# Der Lacklaborant

*The Coatings Technician*

Kompendium der Lacktechnik
Lerntafeln · Übungsblätter · Rechner
Prüfungsvorbereitung zum Lacklaboranten

179 Lernblätter · 179 Übungsblätter · 541 Prüfungsfragen

Rohstoffe · Filmbildung · Rezeptur · Dispergierung · Applikation · Prüf- und Messtechnik · Farbmetrik · Umwelt, Arbeits- und Gefahrstoffrecht · Spezial- und Funktionsbeschichtungen

Erste vollständig durchgesehene und korrigierte Ausgabe

Fassung 4.0 · Stand: 05.10.2026

Hinweis: Zum Ausdruck auf A4. Jedes Lernblatt beginnt auf einer neuen Seite; das zugehörige Übungsblatt mit Musterlösung folgt direkt darunter.

## Zu dieser Ausgabe

Diese Ausgabe ist die erste, die vollständig durchgesehen vorliegt: Alle 179 Lernblätter wurden blattweise und zusätzlich kategorienweise gegengelesen, jede Rechnung wurde unabhängig nachgerechnet, der Rechtsstand ist zum 05.10.2026 geprüft. Die fachliche und rechtliche Freigabe erfolgte durch den Autor.

*Eine durchgesehene Ausgabe ist keine fehlerfreie. Für Hinweise auf verbliebene Fehler ist der Autor dankbar.*

# Vorwort

Farbe und Lack sind mehr, als man ihnen ansieht. Hinter jedem gleichmäßig glänzenden Autoblech, jeder wetterfesten Fassade und jeder bedruckten Verpackung steckt ein abgestimmtes System aus Bindemitteln, Pigmenten, Füllstoffen, Löse- bzw. Verdünnungsmitteln und Additiven — und Menschen, die verstehen, warum ein Beschichtungsstoff genau so zusammengesetzt und verarbeitet wird. Als Lacklaborantin oder Lacklaborant wirst du eine davon.

Dieses Kompendium begleitet dich durch deine Ausbildung. Es ist Lernwerk und Nachschlagewerk zugleich: Es erklärt die fachlichen Grundlagen Schritt für Schritt und lässt dich das Gelernte unmittelbar anwenden. Der Aufbau orientiert sich an den Anforderungen, die dir im Betrieb, in der Berufsschule und in den beiden Teilen der Abschlussprüfung begegnen — von den Grundlagen der Filmbildung über Rezeptur und Applikation bis hin zu Prüf- und Messtechnik, Recht, Umwelt und Sicherheit. Auch die technischen Inhalte der Wahlqualifikationen werden berücksichtigt.

### Drei Bausteine greifen ineinander

#### Lerntafeln

bringen jeweils ein Thema kompakt auf den Punkt: Kernaussage, fachlicher Zusammenhang und die wichtigsten Merksätze.

#### Übungsblätter

stellen dich anschließend mit Verständnis-, Rechen- und Anwendungsaufgaben auf die Probe. So wird aus dem Lesen aktives Lernen.

#### Rechner

unterstützen dich bei Festkörperberechnung, PVK, Verdünnung, NCO-Kennzahl und weiteren Berechnungen. Sie sollen dabei nicht das Verständnis ersetzen, sondern dir helfen, dich auf das fachliche Prinzip und die richtige Vorgehensweise zu konzentrieren.

#### Prüfungszuordnung

Über jeder Lerntafel ist angegeben, welchem Teil der Abschlussprüfung und welcher Berufsbildposition bzw. Pflicht- oder Wahlqualifikation der Ausbildungsordnung (z. B. A 10) der behandelte Stoff zugeordnet ist. Die Zuordnung orientiert sich an der Verordnung über die Berufsausbildung im Laborbereich Chemie, Biologie und Lack (ChemBioLackAusbV), insbesondere §§ 21 und 22 sowie Anlage 3.

Teil 1 der Abschlussprüfung soll vor dem Ende des zweiten Ausbildungsjahres stattfinden. Für Lacklaborantinnen und Lacklaboranten umfasst er die Prüfungsbereiche „Applikations- und Prüftechnik“ sowie „Chemie und Physik von Beschichtungsstoffen“.

Für den technischen Teil dieses Kompendiums sind in Teil 2 der Abschlussprüfung insbesondere die fachlichen Prüfungsbereiche „Herstellung und Qualitätskontrolle“ sowie „Lack- und Beschichtungstechnologie“ relevant. Im Prüfungsbereich „Lack- und Beschichtungstechnologie“ gehören unter anderem Herstellungsverfahren von Beschichtungsstoffen, Aufbau, Eigenschaften und Wirkungsweise von Lackrohstoffen, die Formulierung von Beschichtungsstoffen sowie drei der gewählten Wahlqualifikationen zu den zugrunde liegenden Gebieten und Tätigkeiten. Im praktischen Prüfungsbereich „Herstellung und Qualitätskontrolle“ werden Beschichtungsstoffe unter Berücksichtigung einer der gewählten Wahlqualifikationen hergestellt, appliziert und geprüft; außerdem gehört das Erstellen einer Arbeitsrezeptur nach vorgegebener Zusammensetzung dazu.

Wichtig dabei: Die Prüfungszuordnung ist keine Reihenfolge des Lernens. Fachliche Grundlagen können bereits früh in der Ausbildung benötigt und angewendet werden, auch wenn bestimmte Inhalte erst in Teil 2 der Abschlussprüfung ausdrücklich geprüft werden. Die Ausbildungsordnung führt beispielsweise „Grundlagen zur Formulierung von Beschichtungsstoffen“ als Pflichtqualifikation auf; diese Grundlagen sind daher Bestandteil der Ausbildung und nicht erst ein Thema der Prüfungsvorbereitung.

### Zusammenhänge statt Auswendiglernen

Querverweise verbinden verwandte Themen, damit fachliche Zusammenhänge verstanden und nicht nur einzelne Fakten auswendig gelernt werden. Wo Stoffe, Verfahren oder Anwendungen überholt oder aus Sicherheits-, Umwelt- oder rechtlichen Gründen eingeschränkt sind, wird dies entsprechend kenntlich gemacht.

### Ein ehrliches Wort noch

Dieses Kompendium ist eine Lern- und Arbeitshilfe und kein Ersatz für die Ausbildungsordnung, aktuelle Normen, Sicherheitsdatenblätter, technische Unterlagen, betriebliche Vorgaben oder die fachliche Anleitung durch Ausbilderinnen und Ausbilder.

Normen und Rechtsvorschriften können sich ändern; Rezepturen, Prüfverfahren und Verarbeitungsvorgaben können produktspezifisch oder betriebsspezifisch sein. Im Zweifel sind die jeweils geltenden amtlichen Vorschriften, die Originaltexte der anzuwendenden Normen, die Sicherheitsdatenblätter und technischen Informationen des konkreten Produkts sowie die betrieblichen Vorgaben maßgeblich.

### Rechtlicher Hinweis

Keine Rechtsberatung, keine Gewähr: Die Angaben zu Gesetzen, Verordnungen, technischen Regeln und Normen geben den Kenntnisstand zum auf dem Titel angegebenen Stand wieder und dienen ausschließlich der Ausbildung. Sie stellen keine Rechtsberatung dar. Für Richtigkeit, Vollständigkeit und Aktualität wird keine Gewähr übernommen.

Rechtsvorschriften und Normen können sich ändern. Verbindlich ist jeweils die geltende amtliche Fassung bzw. der Originaltext der einschlägigen Norm. Für das konkrete Produkt sind zusätzlich die jeweils gültigen Sicherheitsdatenblätter, technischen Merkblätter und Verarbeitungsvorschriften zu beachten. Für das Handeln im Betrieb sind insbesondere die Gefährdungsbeurteilung und die betrieblichen Vorgaben sowie die Anweisungen der fachlich verantwortlichen Personen maßgeblich. Eine Haftung für Schäden, die aus der Nutzung dieser Angaben entstehen, ist ausgeschlossen, soweit dies gesetzlich zulässig ist.

Dieses Werk wird laufend geprüft, korrigiert und erweitert. Über Hinweise, Ergänzungen und fachliche Korrekturen freuen wir uns: marionmichaeldreyer@gmail.com

### Ziel dieses Kompendiums

Ziel dieses Kompendiums ist nicht, jede Spezialfrage abschließend zu beantworten. Es soll vielmehr eine fachlich belastbare, verständliche und praxisnahe Grundlage auf Lacklaboranten-Niveau schaffen — vom Einstieg in die Ausbildung bis zur vertieften praktischen Anwendung.

### Transparenz zum Einsatz von KI

Bei der Erarbeitung dieses Kompendiums wurde die KI Claude (Anthropic) als Werkzeug eingesetzt. Die Auswahl der Inhalte, ihre fachliche Prüfung, die redaktionelle Verantwortung und die Verantwortung für die veröffentlichten Inhalte liegen beim Menschen.

### Zu den Quellen

Die fachlichen Grundlagen dieses Kompendiums beruhen auf einschlägigen Lehrbüchern der Lack- und Beschichtungstechnik, DIN-, EN- und ISO-Normen sowie einschlägigen Gesetzen, Verordnungen und technischen Regelwerken. Die verwendeten Quellen sind im Register „Quellen & Normen“ am Ende dieses Werks bzw. auf der zugehörigen Website aufgeführt.

Die auf der Website antippbaren Wikipedia-Worterklärungen sind dagegen keine zitierten Quellen für die fachlichen Inhalte dieses Kompendiums. Sie dienen ausschließlich als zusätzliche, optionale Nachschlagehilfe für allgemeine Begriffe.

### Fachlicher Anspruch

Chemisch präzise · prüfungsorientiert · praxisnah · verständlich · mit klar gekennzeichneten Gültigkeitsbedingungen

# Inhaltsverzeichnis


## Kapitel 1 — Grundlagen 12

L-01 Aufbau eines Beschichtungsstoffs . . . 13
L-02 Filmbildung I — physikalische Trocknung . . . 18
L-03 Filmbildung II — chemische Härtung . . . 22
L-04 Polymere als Filmbildner . . . 27
L-05 Molmasse und Molmassenverteilung . . . 31
L-06 Aggregat- und Sekundärstrukturen von Polymeren . . . 35
L-07 Löslichkeit und Löslichkeitsparameter . . . 39
L-08 Chemische Kennzahlen der Lackrohstoffe . . . 43
L-09 Glasübergangstemperatur . . . 50
L-10 Viskosität von Lacken und Polymerlösungen . . . 56
L-11 Mechanisches Verhalten von Lackfilmen . . . 61
L-12 Benetzung und Haftung . . . 66
L-13 Phasengrenzflächen in Beschichtungen . . . 70

## Kapitel 2 — Bindemittel und Lacktypen 74

L-14 Öle und oxidative Härtung . . . 75
L-15 Natürliche und modifizierte Naturharze . . . 80
L-16 Alkydharze I — Chemie und Öllänge . . . 84
L-17 Alkydharze II — Modifizierung und Anwendung . . . 87
L-18 Epoxidharzester . . . 92
L-19 Gesättigte Polyester — Aufbau und Eigenschaften . . . 96
L-20 Gesättigte Polyester — Vernetzung und Anwendung . . . 99
L-21 Cellulosenitrat und Celluloseester . . . 102
L-22 Celluloseether und physikalisch trocknende Filmbildner . . . 105
L-23 Ungesättigte Polyester (UP) und Reaktivverdünner . . . 110
L-24 Strahlungshärtende Acrylate . . . 113
L-25 2K-Polyurethanlacke — Die Isocyanatreaktion . . . 117
L-26 Isocyanate — Härter für 2K-PUR . . . 119
L-27 2K-PUR — OH-Bindemittel und Stöchiometrie . . . 122
L-28 2K-Epoxidharzlacke — Harze und Kennzahlen . . . 126
L-29 Epoxid-Härter . . . 129
L-30 Einbrennlacke — Grundlagen . . . 133
L-31 Aminoharze — Aufbau und Vernetzung . . . 136
L-32 Melaminharze — Typen und Kombination . . . 139
L-33 Verkappte Polyisocyanate — Prinzip und Anwendung . . . 142

L-34 Verkappungsmittel und Entkappungstemperatur . . . 145
L-35 Phenolharze — Resole und Novolake . . . 148
L-36 Selbstvernetzende Einbrennlacke . . . 151
L-37 Silicon-Einbrennlacke . . . 153

**Kapitel 3 — Pigmente, Füllstoffe und Additive 157**

L-38 Überlackierbarkeit und Ausbluten . . . 158
L-39 Pigmente und Füllstoffe . . . 162
L-40 Füllstoffe — Typen und Eigenschaften . . . 169
L-41 Korrosionsschutz-Pigmente . . . 174
L-42 Organische Farbmittel: Farbstoffe und Pigmente . . . 177
L-43 Tagesleuchtfarben . . . 184
L-44 Teilchengröße und spezifische Oberfläche . . . 187
L-45 BET-Methode und spezifische Oberfläche . . . 191
L-46 Rheologie-Additive . . . 194
L-47 Additive — wichtige Gruppen im Überblick . . . 201
L-48 Weichmacher . . . 204

**Kapitel 4 — Dispergierung und Rezeptur 207**

L-49 Disperse Systeme und Kolloide . . . 208
L-50 Flockulation und elektrostatische Stabilisierung . . . 212
L-51 Sterische Stabilisierung . . . 220
L-52 Netz- und Dispergiermittel . . . 225
L-53 Der Dispergierprozess . . . 229
L-54 Ausschwimmen und kontrollierte Flockulation . . . 236
L-55 Pigmentierungshöhe und kritische PVK . . . 240
L-56 Vom Kalkulations- zum Fertigungsrezept . . . 244
L-57 Eine Rezeptur entwickeln — Beispiel Korrosionsschutz-Grundierung . . . 249
L-58 Rechenbeispiel: Härtermenge im 2K-PUR-Lack . . . 252
L-59 Rechenbeispiel: PVK und kritische PVK . . . 254

**Kapitel 5 — Herstellung und Betrieb 256**

L-60 Herstellung von Flüssiglacken im Betrieb . . . 257
L-61 Vom Labor zur Produktion: Applikation und Fertigungsübertragung . . . 260
L-62 Digitalisierung und vernetzte Systeme im Labor . . . 263
L-63 Prozess- und Umweltarbeitstechniken . . . 266

**Kapitel 6 — Applikation 268**

L-64 Untergründe und ihre Vorbehandlung . . . 269

L-65 Anstrichaufbau . . . 272
L-66 Applikationsverfahren I — Hand- und Fließverfahren . . . 275
L-67 Applikationsverfahren II — Spritzverfahren . . . 278
L-68 Applikation III — Sicherheit, Wirkungsgrad und Qualität . . . 281
L-69 Trocknungsverfahren und -anlagen . . . 283

**Kapitel 7 — Wasserlacke und Elektrotauchlackierung 286**

L-70 Wässrige Systeme . . . 287
L-71 Wasser als Lacklösemittel . . . 290
L-72 Bindemittel im Wasser — die drei Wege . . . 292
L-73 Primärdispersionen und Emulsionspolymerisation . . . 294
L-74 Sekundärdispersionen . . . 296
L-75 Wässrige Bindemittellösungen und Neutralisation . . . 298
L-76 Filmbildung von Dispersionen . . . 300
L-77 Dispersionsfarben — Rezeptur und Rheologie . . . 302
L-78 Silicatfarben (2K) . . . 304
L-79 Siliconharz- und Dispersionssilicatfarben . . . 306
L-80 Glanzgradklassifizierung physikalisch trocknender wässriger Lacke . . . 308
L-81 Anforderungen an Fassadenbeschichtungen . . . 311
L-82 Wasserverdünnbare, oxidativ härtende Alkydharze . . . 314
L-83 Wässrige 2K-Polyurethan-Systeme . . . 316
L-84 Wässrige 2K-Epoxidharzlacke . . . 319
L-85 Wässrige Einbrennlacke auf Aminoharzbasis . . . 322
L-86 Elektrotauchlackierung — Prinzip . . . 324
L-87 Anodische Elektrotauchlacke (ATL) . . . 326
L-88 Kathodische Elektrotauchlacke (KTL) . . . 328
L-89 Elektrotauchlack — Verfahrenstechnik . . . 330

**Kapitel 8 — Pulverlacke 332**

L-90 Pulverlacke — Grundlagen und Eigenschaften . . . 333
L-91 Pulverlack-Applikation . . . 337
L-92 Thermoplastische Pulverlacke . . . 340
L-93 Epoxidharz-Pulverlacke . . . 343
L-94 Epoxid/Polyester-Hybrid-Pulverlacke . . . 346
L-95 Polyester-Pulverlacke: TGIC und Hydroxyalkylamid . . . 348
L-96 Acrylat-Pulverlacke . . . 351
L-97 Pulverlackherstellung (Extrusion) . . . 355
L-98 Pulverlack-Prüfungen und Ringleitungsstabilität . . . 358

**Kapitel 9 — Anwendungen: Objektlackierung** **361**

L-99 Korrosionsschutzsysteme . . . 362
L-100 Washprimer (Reaktionsgrundierung) . . . 365
L-101 Zinkstaubfarbe . . . 367
L-102 Coil-Coating-Lacke . . . 370
L-103 Schiffsfarbe . . . 372
L-104 Flugzeug- und Luftfahrtlackierung . . . 375
L-105 Chlorkautschuk-Beschichtungen . . . 378
L-106 PVC-Einschichtdecklack . . . 380
L-107 Bitumenbeschichtungen . . . 382
L-108 Betonbodenbeschichtung . . . 384
L-109 Tiefgrund . . . 388
L-110 Emballagenlack (Dosenaußenlack) . . . 391
L-111 Automobil-Lackaufbau (OEM-Serienlackierung) . . . 394
L-112 Füller (Füllprimer) . . . 397
L-113 Füller (Primer-Surfacer) in der Automobillackierung . . . 400
L-114 Basislacke: Uni, Effekt und Nass-in-Nass . . . 404
L-115 Automobil-Klarlacke . . . 407
L-116 Autoreparaturlacke (Refinish) . . . 410
L-117 Farbtonangleich und Beilackierung . . . 413
L-118 Polyesterspachtel (UP-Spachtel) . . . 415
L-119 Glasfaserspachtel . . . 417
L-120 Unterbodenschutz und PVC-Plastisole . . . 419
L-122 Säurehärtende Lacke (SH-Lacke) . . . 422
L-123 Cellulosenitrat-Lacke für die Möbellackierung . . . 425
L-124 Wässrige Holzlacke: IK, selbstvernetzend, 2K-PUR und UV . . . 428
L-125 Parkettlack (Fußbodenversiegelung) . . . 431
L-126 Kunststoffbeschichtung — Vorbehandlung und Haftung . . . 433
L-127 Kunststofflack-Systeme . . . 435
L-128 Gelcoat und faserverstärkte Kunststoffe (GFK) . . . 437

**Kapitel 10 — Spezial- und Funktionsbeschichtungen** **440**

L-129 Funktionelle Beschichtungen — Überblick . . . 441
L-130 Glasbeschichtung . . . 443
L-131 Polyvinylbutyral (PVB) und Folienbeschichtung . . . 445
L-132 Hammerschlag- und Effektlacke . . . 447
L-133 Strukturlacke . . . 449
L-134 Straßenmarkierungsfarbe . . . 451

L-135 Abziehlack . . . 453
L-136 Antigraffitilack . . . 455
L-137 Elektroisolierlack (Tränklack) . . . 457
L-138 Brandschutzbeschichtungen (Dämmschichtbildner) . . . 459
L-139 Antistatische und leitfähige Beschichtungen . . . 461

**Kapitel 11 — Druckfarben 463**

L-140 Aufbau einer Druckfarbe . . . 464
L-141 Herstellung: vom Ansatz zur fertigen Druckfarbe . . . 467
L-142 Feinheit, Agglomerate und Rheologie . . . 469
L-143 Trocknung und Härtung von Druckfarben . . . 472
L-144 Druckverfahren im Überblick . . . 475
L-145 Offsetdruckfarben . . . 477
L-146 Flexo- und Tiefdruckfarben . . . 479
L-147 UV- und Elektronenstrahl-Druckfarben . . . 482
L-148 Siebdruck, Inkjet und Toner . . . 485
L-149 Bedruckstoffe, QK, Compliance und Arbeitsschutz . . . 488

**Kapitel 12 — Prüf- und Messtechnik 492**

L-150 pH-Wert, Leitfähigkeit und MEQ . . . 493
L-151 Analytik flüssiger Rohstoffe . . . 495
L-152 Qualitativer Eisennachweis . . . 498
L-153 Verlauf, Ablaufneigung und Trocknung — Prüfung . . . 500
L-154 Schichtdickenmessung . . . 502
L-155 Glanz, Haze und Oberflächen-Erscheinungsbild . . . 504
L-156 Haftfestigkeit und Verformbarkeit — Prüfung . . . 506
L-157 Härte- und Abriebprüfung von Lackfilmen . . . 508
L-158 Licht- und Wetterbeständigkeit — Prüfung . . . 510
L-159 Korrosionsprüfung . . . 512
L-160 Vernetzungsverfolgung und thermische Analyse . . . 514
L-161 Lack- und Lackierschäden . . . 516
L-162 Farbmessung und der CIELAB-Farbraum . . . 518
L-163 Farbabstand ΔE, Toleranzen und Metamerie . . . 521
L-164 Die CIE-Normfarbtafel . . . 523
L-165 Das RAL-Farbregister . . . 525
L-166 Deckvermögen, Kontrastverhältnis und Farbstärke . . . 527
L-167 Qualitätssicherung und Statistik im Lacklabor . . . 530
L-178 Viskosität und Fließverhalten — Messung . . . 533
L-179 Moderne Rheologie — Oszillationsmessungen . . . 536

L-180 Körnigkeit und Teilchengrößenmessung . . . 539

**Kapitel 13 — Recht, Umwelt und Sicherheit 541**

L-168 Emissionsminderung und Umweltschutz . . . 542
L-169 High-Solid-Decklack . . . 545
L-170 Sicherheitstechnische Kenndaten . . . 547
L-171 Gefahrstoffkennzeichnung nach GHS/CLP . . . 550
L-172 Arbeitssicherheit: Grenzwerte, Explosionsschutz und Gefahrguttransport . . . 557
L-173 Molekülgröße, Flüchtigkeit und Gefahr . . . 561
L-174 Wasserrecht und Wassergefährdungsklassen . . . 564
L-175 Abfall- und Kreislaufwirtschaft . . . 567
L-176 Luftreinhaltung und VOC . . . 569
L-177 Ökobilanz und Lebenszyklusbetrachtung . . . 572

**Prüfungssimulation 575**

Chemie und Physik von Beschichtungsstoffen . . . 576
Applikations- und Prüftechnik . . . 579
Lack- und Beschichtungstechnologie . . . 581
Herstellung und Qualitätskontrolle . . . 583
Wahlqualifikationen . . . 585
WQ 1 — wasserverdünnbar — Holz und Holzwerkstoffe . . . 586
WQ 2 — wasserverdünnbar — Kunststoffoberflächen . . . 587
WQ 3 — wasserverdünnbar — metallische Untergründe . . . 588
WQ 4 — Beschichtungsstoffe für mineralische Untergründe . . . 589
WQ 5 — lösemittelhaltige Beschichtungsstoffe — Holz und Holzwerkstoffe . . . 590
WQ 6 — lösemittelhaltige Beschichtungsstoffe — Kunststoffoberflächen . . . 591
WQ 7 — lösemittelhaltige Beschichtungsstoffe — metallische Untergründe . . . 592
WQ 8 — Korrosionsschutzsysteme . . . 594
WQ 9 — Pulverlacksysteme . . . 596
WQ 10 — Elektrotauchlacke . . . 598
WQ 11 — Druckfarben . . . 600

**Erwartungshorizonte 601**

**Quellen & Normen 630**

**Über den Autor 635**

**Schlusswort 636**

Kapitel 1

# Grundlagen

# L-01 · Aufbau eines Beschichtungsstoffs

*Bestandteile, Funktionen und ihre Kennzahlen*

**Prüfungsteil 2** · A 10

Ein Beschichtungsstoff enthält – abhängig vom System – nichtflüchtige und gegebenenfalls flüchtige Bestandteile. Nicht jeder Beschichtungsstoff enthält alle Stoffgruppen.

## Die Begriffe zuerst: Beschichtungsstoff, Beschichtung, Lack, Farbe

Die Begriffe der Branche sind genormt (DIN EN ISO 4618) und werden im Alltag trotzdem häufig durcheinandergebracht. Diese Begriffe sind für die Grundlagen besonders wichtig:

• Beschichtungsstoff — das Produkt im Liefer- und Verarbeitungszustand: flüssig, pastenförmig oder pulverförmig. Auf einen Untergrund aufgebracht, bildet er eine Beschichtung mit schützender, dekorativer oder besonderer technischer Wirkung.

• Beschichtung — die auf einem Untergrund gebildete zusammenhängende Schicht aus einer oder mehreren Lagen.

• Lack — ein Beschichtungsstoff, meist mit organischem Bindemittel, der einen geschlossenen Film bildet, z. B. Industrie-, Auto-, Holz- oder Pulverlack; pigmentiert als Buntlack, unpigmentiert als Klarlack. Lacke sind häufig glatt und glänzend; eine scharfe Begriffsgrenze gibt es aber nicht.

• Lackierung — die aus einem Lack hergestellte Beschichtung; im Alltag auch der Vorgang des Lackierens.

• Farbe — ein pigmentierter Beschichtungsstoff, vor allem im Bautenbereich (z. B. Dispersions- oder Silicatfarbe). Dasselbe Wort bezeichnet auch den Farbeindruck (siehe L-162).

• Anstrichmittel oder Anstrichstoff — ältere Bezeichnungen für Beschichtungsstoff; „Anstrich“ entsprechend für die Beschichtung. In älterer Literatur und in Bauausschreibungen findet man diese Begriffe weiterhin.

## Die beiden Anteile

Nichtflüchtiger Anteil: Filmbildner, Pigmente, Füllstoffe und der nichtflüchtige Anteil der Additive. Flüchtiger Anteil: Lösemittel, Wasser (bei Wasserlacken als Lösemittel oder Dispersionsmedium) und der flüchtige Anteil der Additive. Beim Einbrennen können zusätzlich flüchtige Reaktions- oder Abspaltprodukte entstehen.

Systemabhängigkeit: Auch lösemittelfreie Systeme (100-%-Systeme), Pulver- und UV-Lacke können beim Härten geringe Mengen flüchtiger Stoffe abgeben – z. B. das Abspaltprodukt blockierter Isocyanate bei PUR-Pulverlacken oder nicht umgesetzte Reaktivverdünner bei UV-Lacken (siehe L-24). Ein Klarlack enthält in der Regel keine Pigmente und Füllstoffe (Ausnahme: Mattierungsmittel).

## Die Bestandteile im Einzelnen

• Filmbildner — makromolekularer Stoff oder reaktive Stoffbasis, aus der der zusammenhängende und am Untergrund haftende Film entsteht. Bei physikalisch trocknenden Lacken liegt der Filmbildner bereits als fertiges Polymer vor; er muss nur noch zum Film zusammenrücken. Bei chemisch härtenden Systemen liegen zunächst Harze oder Oligomere mit reaktiven Gruppen vor, die erst bei der Härtung chemisch zu einem vernetzten Film verknüpft werden (siehe L-03). Beispiele: physikalisch trocknend etwa thermoplastische Acrylate und Cellulosenitrat (siehe L-21, L-22); chemisch härtend etwa oxidativ härtende Alkydharze und OH-Bindemittel/Polyisocyanate im 2K-PUR (siehe L-25, L-27).
• Bindemittel — nach DIN EN ISO 4618 der nichtflüchtige Anteil eines Beschichtungsstoffs ohne Pigmente und Füllstoffe, also der Filmbildner einschließlich nichtflüchtiger Zusätze wie Weichmacher oder Sikkative. Der Filmbildner ist sein Hauptbestandteil; das Bindemittel ist wesentlich für Filmbildung, Haftung und viele Filmeigenschaften verantwortlich. Im Alltag werden beide Begriffe oft vereinfachend gleichgesetzt.
• Pigmente — feinteilige, im Anwendungsmedium praktisch unlösliche Feststoffe für Farbgebung, Deckvermögen oder funktionelle Aufgaben. Beispiele: Titandioxid, Ruß, Zinkphosphat.
• Füllstoffe — praktisch unlösliche Feststoffe zur Einstellung von Volumen und technischen Eigenschaften. Ihre Brechzahl liegt nahe der des Bindemittels, deshalb tragen sie kaum zu Farbe und Deckvermögen bei (siehe L-40). Beispiele: Kreide (Calciumcarbonat, $CaCO_3$), Talkum (Magnesiumsilicat, plättchenförmig), Schwerspat (Bariumsulfat, $BaSO_4$).
• Additive — meist in kleinen Mengen eingesetzte Stoffe zur gezielten Beeinflussung einzelner Eigenschaften, z. B. Verlaufmittel, Rheologieadditive (Verdicker/Thixotropiermittel), Mattierungsmittel, Sikkative oder Entschäumer. Additive können flüchtige und nichtflüchtige Anteile enthalten; je nach Stoff und Formulierung sind sie nichtflüchtig, teilweise oder vollständig flüchtig.
• Lösemittel — Flüssigkeiten, die den Filmbildner lösen und so Viskosität und Verarbeitbarkeit einstellen; bei der Trocknung verdunsten sie. Beispiele: Xylol, Butylacetat, Butylglykol. In Wasserlacken übernimmt Wasser die Hauptrolle (oft ergänzt durch wenig Co-Lösemittel): Es löst wasserlösliche Bindemittel – oder es ist bei Dispersionen das Dispersionsmedium, in dem der Filmbildner nur fein verteilt, aber nicht gelöst ist.
• Verschnittmittel — lösen den Filmbildner allein nicht oder nur unzureichend, werden aber zusammen mit geeigneten Lösemitteln eingesetzt, um Verdunstungsverhalten und Verarbeitungseigenschaften des Lösemittelgemischs einzustellen. Bei zu hohem Anteil kann es zu Trübung, Schlieren oder Ausfällen des Bindemittels kommen (siehe L-07).
• Verdünner — Lösemittel oder Lösemittelgemisch (bei Wasserlacken: Wasser, gegebenenfalls mit etwas Co-Lösemittel nach Herstellerangabe), das der Verarbeiter dem fertigen Beschichtungsstoff zusetzt, um die Spritz- oder Streichviskosität einzustellen. Ein Verdünner besteht meist aus echten Lösern und Verschnittmitteln und muss auf den Lack abgestimmt sein: Passt die Zusammensetzung nicht, kann der Filmbildner ausfallen oder der Lack trüb werden (siehe L-07).
• Dispersionsmedium — flüssige Phase, in der nicht gelöste Teilchen, z. B. Polymerpartikel einer Dispersion, fein verteilt vorliegen; das flüssige Medium ist dort Dispersionsmedium und nicht Lösemittel (siehe L-02 und L-70). Meist ist es Wasser, es gibt aber auch nichtwässrige Dispersionen. Dispergieradditive sind davon zu unterscheiden; sie stabilisieren z. B. Pigment- oder Polymerteilchen. Im Labor zeigt sich der Unterschied zur echten Lösung beim Reinigen: Solange der Wasserlack frisch ist, liegen die Polymerteilchen noch im Wasser verteilt vor und lassen sich mit Wasser vom Pinsel abspülen. Angetrocknete Reste sind dagegen schon zu einem Film zusammengeflossen und lösen sich in Wasser meist nicht mehr.

## Einteilung von Beschichtungsstoffen

Beschichtungsstoffe lassen sich nach verschiedenen Gesichtspunkten einteilen:

- nach Verdünnbarkeit — lösemittelverdünnbare, wasserverdünnbare und lösemittelfreie Systeme
- nach Art der Filmbildung — physikalisch trocknend oder chemisch härtend (oxidativ, 2K, Einbrennen, Strahlung; siehe L-02, L-03)
- nach Funktion im Schichtaufbau — z. B. Grundierung, Füller, Decklack und Klarlack
- nach Anwendung — z. B. Industrielack, Bautenanstrich, Autoserien- oder Autoreparaturlack
- nach Hauptaufgabe — z. B. Korrosionsschutz, Brandschutz (dämmschichtbildende Beschichtung), elektrische Isolierung (Drahtlack) oder Dekoration (Effektlack wie Metallic- oder Perlglanzlack)

## Festkörper, VOC und Emission

Der Festkörpergehalt ist der Anteil der unter definierten Prüfbedingungen verbleibenden nichtflüchtigen Bestandteile. Zu unterscheiden sind der Massenfestkörper und der Volumenfestkörper.

Beim Massenfestkörper wird der Massenanteil des nach der Prüfung verbleibenden Rückstands bestimmt; die Bestimmung des Gehaltes an nichtflüchtigen Anteilen erfolgt beispielsweise nach DIN EN ISO 3251. Der Volumenfestkörper beschreibt den Volumenanteil der nichtflüchtigen Bestandteile bezogen auf das Volumen des Beschichtungsstoffs im Ausgangszustand.

Zwei Lacke können den gleichen Massenfestkörper besitzen und trotzdem nach dem Trocknen unterschiedlich viel Volumen beziehungsweise Schichtdicke aus dem gleichen Nasslackvolumen ergeben. Die Ursache liegt in der unterschiedlichen Dichte der Feststoffbestandteile: Ein Lack mit hohem Anteil eines Pigments hoher Dichte wie Titandioxid enthält viel Masse auf vergleichsweise kleinem Volumen. Für die praktische Frage „Wie viel Trockenschichtdicke erhalte ich aus einem bestimmten Volumen Lack?“ und für die theoretische Ergiebigkeit ist deshalb der Volumenfestkörper maßgeblich.

High-Solids-Lacke kommen bei gleicher Trockenschichtdicke mit weniger Lösemittel aus. Das gelingt nicht durch bloßes Weglassen von Lösemittel – die Verarbeitungsviskosität wäre zu hoch. High-Solids-Systeme sind eigens formuliert: mit niedermolekularen Bindemitteln oder Oligomeren, die auch bei hohem Festkörper noch spritzfähig sind und erst beim Härten zum Film vernetzen (siehe L-168, L-169). Abluftreinigung und Lösemittelrückgewinnung mindern die Emissionen dagegen anlagentechnisch, ohne die Rezeptur zu ändern (siehe L-63).

Der VOC-Gehalt beschreibt den Gehalt an flüchtigen organischen Verbindungen und ist daher nicht identisch mit dem gesamten flüchtigen Anteil. Wasser ist kein VOC. Wässrige Beschichtungsstoffe können dennoch VOC enthalten, z. B. Co-Lösemittel, bestimmte Amine oder flüchtige Filmbildehilfsmittel. VOC-Angaben hängen von Definition, Prüf-/Berechnungsmethode und Bezugsgröße ab. Die Begriffe Lösemittel, flüchtiger Anteil, Dispersionsmedium und VOC dürfen deshalb nicht gleichgesetzt werden — besonders bei Wasserlacken ist diese Unterscheidung wichtig.

**Merksatz**

Der Beschichtungsstoff ist das Produkt im Liefer- und Verarbeitungszustand; die Beschichtung ist die daraus auf dem Untergrund gebildete Schicht. Eine Beschichtung aus Lack heißt Lackierung. Lack und Farbe sind gebräuchliche Bezeichnungen für Beschichtungsstoffe; eine scharfe Grenze gibt es nicht.
Was nach Trocknung oder Härtung im Film bleibt, ist der nichtflüchtige Anteil; Lösemittel und andere flüchtige Bestandteile entweichen.
Das Bindemittel — Filmbildner plus nichtflüchtige Zusätze — bildet den Film und hält Pigmente und Füllstoffe zusammen. Pigmente geben Farbe und Deckvermögen oder übernehmen besondere Aufgaben wie den Korrosionsschutz; Füllstoffe geben Volumen und beeinflussen technische Eigenschaften wie Schleifbarkeit, Glanz oder Rissfestigkeit. Additive steuern gezielt einzelne Eigenschaften.
Für Schichtdicke und Ergiebigkeit ist der Volumenfestkörper aussagekräftiger als der Massenfestkörper.
Flüchtiger Anteil und VOC-Gehalt sind nicht dasselbe: Wasser ist flüchtig, aber kein VOC. Nach ChemVOCFarbV ist ein VOC eine organische Verbindung mit einem Anfangssiedepunkt von höchstens 250 °C bei 101,3 kPa (siehe L-176).

**Stichwörter:** Beschichtungsstoff, Beschichtung, Lack, Farbe, Lackierung, Anstrichmittel, Anstrichstoff, Anstrich, DIN EN ISO 4618, Bindemittel, Filmbildner, Pigment, Füllstoff, Additiv, Lösemittel, Verdünner, Verschnittmittel, Dispersionsmedium, Klarlack, Buntlack, Pulverlack, nichtflüchtiger Anteil
*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur; DIN EN ISO 4618; DIN EN ISO 3251*

## Übungsblatt Ü-01 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**
Nennen Sie die Bestandteile eines Beschichtungsstoffs, ordnen Sie sie — soweit möglich — dem flüchtigen oder nichtflüchtigen Anteil zu und erläutern Sie die Aufgabe des Filmbildners.

**Nichtflüchtiger Anteil:** Filmbildner, Pigmente, Füllstoffe und der nichtflüchtige Anteil der Additive.
**Flüchtiger Anteil:** Lösemittel, Wasser und der flüchtige Anteil der Additive; beim Einbrennen können zusätzlich flüchtige Reaktions- oder Abspaltprodukte entstehen.
**Dispersionen:** Bei Dispersionen ist das Wasser kein Lösemittel, sondern das Dispersionsmedium; es gehört zum flüchtigen Anteil.
**Additive:** Additive können flüchtige und nichtflüchtige Anteile enthalten.
**Aufgabe des Filmbildners:** Er bildet den zusammenhängenden Film und bindet die übrigen nichtflüchtigen Bestandteile in den Film ein.
**Ergänzung:** Ein Klarlack enthält in der Regel keine Pigmente und Füllstoffe (Ausnahme: Mattierungsmittel).
*Bewertung: Die Bestandteile werden vollständig genannt — Filmbildner, Pigmente, Füllstoffe, Additive, Lösemittel bzw. Wasser — und richtig dem flüchtigen bzw. nichtflüchtigen Anteil zugeordnet; dass Additive flüchtige und nichtflüchtige Anteile enthalten können, muss erkennbar sein. Die Aufgabe des Filmbildners wird eigenständig erklärt. Die Klarlack-Ergänzung ist keine Pflichtleistung, hebt die Antwort aber ab.*

**Frage 2** **(Berechnung, 10 Punkte)**

2,50 g Lack ergeben nach dem Trocknen 1,65 g Rückstand. a) Berechnen Sie den Festkörpergehalt. b) Warum sagt der Massenfestkörper allein nichts über die erreichbare Trockenschichtdicke?

**Gegeben:** m(nass) = 2,50 g; m(trocken) = 1,65 g

**Ansatz:** FK = m(trocken) / m(nass) · 100 %

**Rechnung:** FK = 1,65 g / 2,50 g · 100 % = 66,0 %

**Antwortsatz:** Der Lack hat einen Massenfestkörper von 66,0 %.

**b) Begründung:** Die Schichtdicke hängt vom Volumen der Feststoffe ab, nicht von ihrer Masse. Feststoffe mit hoher Dichte, z. B. Titandioxid, bringen viel Masse, aber wenig Volumen. Für Schichtdicke und Ergiebigkeit ist deshalb der Volumenfestkörper maßgeblich.

*Bewertung: Teil a: vollständiger Dreischritt aus Ansatz, Rechnung mit Einheiten und Antwortsatz. Teil b: Die Antwort bezieht die Schichtdicke auf das Volumen der Feststoffe und nennt den Volumenfestkörper als maßgebliche Größe.*

**Frage 3** **(Anwendung, 8 Punkte)**

Nennen Sie mehrere Wege zur Emissionsminderung. Erläutern Sie am Beispiel der Festkörpererhöhung das Wirkprinzip und einen Zielkonflikt, der sich daraus für die Rezeptur ergibt.

**Wege zur Emissionsminderung:** Höhere Festkörpergehalte, wässrige Systeme, Pulverlacke, strahlenhärtende Systeme sowie technische Maßnahmen wie Abluftreinigung oder Lösemittelrückgewinnung.

**Wirkprinzip Festkörpererhöhung:** Bei High-Solid-Systemen wird für eine vergleichbare Zielschichtdicke weniger flüchtiges organisches Medium benötigt. Ein pauschales Umrechnungsverhältnis — etwa doppelter Festkörper, halbe Emission — gilt jedoch nicht allgemein, weil Auftragswirkungsgrad, Schichtdicke und Rezeptur mit eingehen.

**Zielkonflikt:** Höherer Festkörper kann die Viskosität erhöhen; Rezeptur, Bindemittelstruktur, Lösemittelwahl und Applikation müssen entsprechend angepasst werden.

*Bewertung: Die Antwort nennt mehrere Wege (rezeptur- und anlagentechnisch), erklärt das Wirkprinzip — weniger Lösemittel je Trockenschichtdicke, aber kein pauschales Umrechnungsverhältnis — und einen Zielkonflikt wie Viskosität und Verarbeitbarkeit.*

# L-02 · Filmbildung I — physikalische Trocknung

*Vom flüssigen Lack zum festen Film ohne chemische Reaktion*

**Prüfungsteil 1** · A 8.3

Physikalische Trocknung heißt: Der Film entsteht allein durch Verdunsten der flüchtigen Bestandteile, ohne chemische Reaktion. Deshalb bleibt er mit geeignetem Lösemittel wieder anlösbar.

## Was dabei geschieht

Die Verfestigung ist der Übergang des aufgetragenen Beschichtungsstoffs vom flüssigen in den festen Zustand. Die dabei entstehende zusammenhängende Schicht heißt in der Lacktechnik Film oder Lackfilm; auf dem Untergrund ist sie die Beschichtung (siehe L-01). Bei einer Bindemittellösung entweicht das Lösemittel; die Polymerketten rücken zusammen, verschlaufen sich und bilden einen zusammenhängenden Film.

Bei einer Dispersion müssen sich die Polymerteilchen beim Trocknen zunächst annähern. Ist die Temperatur ausreichend hoch, sind die Teilchen weich genug, dass sie sich verformen und miteinander verschmelzen können (Koaleszenz). Bei zu niedriger Temperatur bleibt die Koaleszenz unvollständig; der Film kann dann rissig, rau oder weißlich erscheinen. Entscheidend ist die Mindestfilmbildetemperatur des Systems (siehe L-76).

## Typische physikalisch trocknende Bindemittel

- Cellulosenitrat (siehe L-21)
- Chlorkautschuk und Vinylcopolymere (siehe L-22)
- thermoplastische Acrylate (siehe L-22)
- Acrylat- und Styrolacrylat-Dispersionen (siehe L-76)
- thermoplastische Pulverlacke

## Wieder anlösbar

Da keine Vernetzung stattfindet, lässt sich ein physikalisch getrockneter Film mit einem geeigneten Lösemittel wieder anlösen. Das hat zwei Seiten: Beim Überlackieren löst der Lösemittelanteil des neuen Lacks die alte Schicht an, und beide verbinden sich fest miteinander – ein Vorteil bei Reparatur und Mehrschichtaufbau. Wird die alte Schicht dabei aber zu stark angelöst, etwa durch langes Nachstreichen mit dem Pinsel oder eine zu dicke Nassschicht, kann sie aufquellen, runzeln oder sich aufziehen. Chemisch gehärtete Filme (siehe L-03) sind dagegen nicht wieder anlösbar: Bei langer Einwirkzeit kann ein Lösemittel sie allenfalls anquellen, das Netzwerk löst sich aber nicht auf.

## Verdunsten ist kein Sieden

Verdunsten passiert bei jeder Temperatur: An der Oberfläche entweichen ständig die schnellsten Moleküle in die Luft. Wie viele das sind, bestimmt der Dampfdruck, und der steigt mit der Temperatur. Sieden ist nur der Sonderfall, bei dem der Dampfdruck den Luftdruck erreicht und sich Dampfblasen im Inneren bilden. Ein Lack trocknet deshalb auch weit unterhalb des Siedepunkts seiner Lösemittel – nur von der Oberfläche her und umso schneller, je wärmer es ist und je weniger Dampf schon über dem Film steht: bei Wasserlacken also je trockener die Luft, bei Lösemittellacken je besser die Dämpfe abgeführt werden.

Der Siedepunkt sagt wenig darüber, wie schnell ein Lösemittel bei Raumtemperatur verdunstet. Dafür dient die Verdunstungszahl (DIN 53170, Diethylether = 1): Xylol (Siedepunkt 140 °C) verdunstet mit Verdunstungszahl 17 rund fünfmal schneller als Wasser (100 °C, Verdunstungszahl 80), weil Wassermoleküle über Wasserstoffbrücken aneinander hängen. Butylglykol (171 °C, Verdunstungszahl 160) ist ein typischer Langsamverdunster.

## Solvatation und Verdunstung aus dem Film

In einem lösemittelhaltigen Lack liegt das Lösemittel in zwei Zuständen vor: Ein Teil ist freies Lösemittel, das sich ungehindert bewegen kann. Der andere Teil umgibt die gelösten Polymermoleküle als Solvathülle – dieses solvatisierende Lösemittel steht in engem Kontakt mit den Polymerketten und ist deshalb fester gebunden. Beim Trocknen verdunstet zuerst das freie Lösemittel; das solvatisierende wird zurückgehalten und verlässt den Film nur langsam.

Wie schnell ein Lösemittel aus dem Film verdunstet, hängt deshalb nicht nur von seinem Siedepunkt ab. Mit steigender Polymerkonzentration nimmt außerdem die Viskosität zu, sodass die verbleibenden Lösemittelmoleküle immer langsamer aus dem Filminneren an die Oberfläche gelangen. So fällt die Verdunstungsgeschwindigkeit gegen Ende der Trocknung stark ab, obwohl noch Lösemittel im Film ist: Die Oberfläche wirkt bereits trocken, während im Inneren noch Lösemittelreste sitzen.

## Der Ablauf in Stufen

- Das Lösemittel bzw. Wasser verdunstet an der Oberfläche; aus dem Filminneren muss es erst dorthin gelangen.
- Die Polymerkonzentration steigt; die Ketten nähern sich einander.
- Bei Lösungen verschlaufen sich die Ketten und halten sich gegenseitig fest; bei Dispersionen verformen und verbinden sich die Polymerteilchen.
- Der Film wird zunehmend viskos bzw. fest; Restlösemittel kann länger im Film verbleiben.

## Retention

Verbleibende geringe Mengen flüchtiger Bestandteile im Film werden als Retention bezeichnet. Sie können Geruch, Härte, Blockfestigkeit und weitere Filmeigenschaften beeinflussen.

Retention erkennt man in der Praxis häufig daran, dass ein Lackfilm zwar an der Oberfläche trocken wirkt, beim Stapeln lackierter Prüfbleche aber noch klebt oder Abdrücke entstehen. Auch ein Film, der sich mit dem Fingernagel noch deutlich eindrücken lässt oder nach längerer Zeit noch stark nach Lösemittel riecht, kann noch erhebliche Restlösemittel enthalten.

Retention ist in der Regel unerwünscht. Klein halten lässt sie sich vor allem über die Rezeptur und die Trocknungsführung: ein Lösemittelgemisch ohne zu langsame Verdunster und ohne Lösemittel, die das Polymer besonders fest bindet; keine zu dicken Nassschichten – lieber zwei Lagen mit Ablüftzeit dazwischen; vor dem Forcieren oder Einbrennen ausreichend ablüften lassen, damit sich keine Haut bildet, die das Lösemittel einschließt; und Wärme und Luftbewegung bei der Trocknung, die den Abtransport aus dem Filminneren beschleunigen.

## Schichtdicke nach dem Trocknen

Für die vereinfachte Schichtdickenrechnung gilt:
TSD = NSD · Volumenfestkörper / 100 %
Beispiel: 120 µm · 42 / 100 = 50,4 µm

Dabei wird angenommen, dass nur das Volumen der nichtflüchtigen Bestandteile als Trockenschicht zurückbleibt. Der Schichtdickenschwund bezieht sich auf die Nassschichtdicke.

## Luftführung in der Lackierkabine

In der Lackierkabine sorgt die Absaugung für den nötigen Abtransport der Lösemitteldämpfe; sie dient zugleich dem Arbeits- und Explosionsschutz. Die Luftführung darf den Verlauf jedoch nicht durch zu schnelle Oberflächenverdunstung stören und beeinflusst den Sprühnebel (Overspray).

### Sonderfälle: Organosole, Plastisole, thermoplastische Pulverlacke

• Organosole — nichtwässrige Dispersionen von Polymerteilchen in einer organischen Flüssigkeit. In der Lackpraxis sind das meist PVC-Teilchen in Weichmacher und einem zusätzlichen flüchtigen Verdünner; eine echte Lösung liegt nicht vor. Beim Trocknen verdunstet der Verdünner; die Filmbildung gelingt aber erst beim Erwärmen, wenn der Weichmacher in die Teilchen eindringt und sie gelieren und verschmelzen (siehe L-120). Anwendungsbeispiele: Dosendeckel und Verschlüsse (siehe L-106). Auch PVDF-Dispersionen für Coil-Coating-Lacke sind Organosole.
• Plastisole — Polymerteilchen in flüssigem Weichmacher, praktisch ohne flüchtigen Anteil; in der Regel PVC, daneben PVC-freie Acrylat-Plastisole. Beim Erwärmen dringt der Weichmacher in die Teilchen ein; sie gelieren und verschmelzen zu einem zusammenhängenden Material – chemisch vernetzt wird dabei nichts. Klassische Anwendung: PVC-Unterbodenschutz im Automobilbau (siehe L-120).
• Thermoplastische Pulverlacke — aufgeschmolzen bilden sie beim Abkühlen einen festen Film. Eine chemische Vernetzung ist für die Filmbildung nicht erforderlich.

### Warum die Rezeptur zählt

Das Lösemittelgemisch muss so gewählt werden, dass der Filmbildner während der kritischen Trocknungsphase ausreichend solvatisiert bleibt und der Film gleichmäßig verlaufen kann. Verdunstet ein für die Löslichkeit wichtiger Bestandteil zu früh, kann es zu Trübung, Ausfällung, Orangenhaut oder anderen Oberflächenstörungen kommen. Zu langsame Verdunstung kann dagegen Retention und lange Durchtrocknung fördern.

**Merksatz**

Verdunsten ist kein Sieden: Ein Lack trocknet auch weit unterhalb des Siedepunkts seiner Lösemittel.
Wie schnell er trocknet, bestimmen Dampfdruck des Lösemittels, Temperatur, Luftfeuchte, Schichtdicke und Luftbewegung.
Dispersionen bilden nur oberhalb der Mindestfilmbildetemperatur einen geschlossenen Film.
Physikalisch getrocknete Filme sind nicht vernetzt und deshalb mit Lösemittel wieder anlösbar.
Trockenschichtdicke = Nassschichtdicke · Volumenfestkörper / 100 %.

**Stichwörter:** physikalische Trocknung, Solvatation, Verdunstung, Stofftransport, Retention, Koaleszenz, Weichmacher, Organosol, Plastisol, Pulverlack, Lösemittelgemisch, Wiederanlösbarkeit, Mindestfilmbildetemperatur, Verdunstungszahl, Dampfdruck

*Quellen: Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur; Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; DIN 53170*

## Übungsblatt Ü-02 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Warum ist die Verdunstungsreihenfolge eines Lösemittelgemischs für den Verlauf wichtig?

**Anforderung an den Löser:** Der Filmbildner muss während der entscheidenden Verfestigungsphase ausreichend solvatisiert bleiben.
**Folge bei falscher Reihenfolge:** Ein zu früh entweichender guter Löser kann dazu führen, dass überwiegend schlechter lösende Komponenten zurückbleiben.
**Mögliche Störung:** Dann können Löslichkeitsverlust, Trübung oder Ausfällung auftreten.
**Rezepturregel:** Die am langsamsten verdunstende Komponente des Gemischs muss ein echter Löser sein; Verschnittmittel müssen vor dem Löser verdunstet sein.

*Bewertung: Die Antwort begründet den Zusammenhang über Solvatation und Löslichkeit, statt die Verdunstungsreihenfolge nur zu behaupten.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**

Ein Lack mit einem Volumenfestkörper (Festkörpervolumengehalt, FVK) von 42 % wird mit einer Nassschichtdicke (NSD) von 120 µm appliziert. a) Berechnen Sie die Trockenschichtdicke (TSD). b) Berechnen Sie den prozentualen Schichtdickenschwund.

**Gegeben:** NSD = 120 µm; Volumenfestkörper = 42 %

**a) Trockenschichtdicke:** TSD = NSD · Volumenfestkörper / 100 % = 120 µm · 42 / 100 = 50,4 µm

**b) Schichtdickenschwund:** Schwund = (NSD − TSD) / NSD · 100 % = (120 − 50,4) / 120 · 100 % = 58,0 %

**Antwortsatz:** Der Lack trocknet auf eine Schichtdicke von 50,4 µm ein; das entspricht einem Schwund von 58,0 %.

*Bewertung: Die Trockenschichtdicke folgt in dieser vereinfachten Rechnung direkt aus dem Volumenfestkörper — nur das Volumen der Feststoffe wird als verbleibende Schicht betrachtet. Der Schwund bezieht sich auf die Nassschichtdicke als Ausgangsgröße.*

**Frage 3** **(Anwendung, 8 Punkte)**

a) Ein Dispersionslack mit einer Mindestfilmbildetemperatur von 12 °C (laut technischem Merkblatt) wird bei 8 °C verarbeitet; der Film wird rissig und weißlich. Erklären Sie den Vorgang. b) Warum lässt sich ein physikalisch getrockneter Film mit Lösemittel wieder anlösen, ein chemisch gehärteter nicht?

**a) Filmbildung bei Dispersionen:** Beim Trocknen nähern sich die Polymerteilchen an, verformen sich und verschmelzen zu einem geschlossenen Film (Koaleszenz).

**a) Ursache:** 8 °C liegen unter der Mindestfilmbildetemperatur von 12 °C: Die Teilchen bleiben hart, verschmelzen nicht und liegen nur lose nebeneinander – der Film ist rissig und streut das Licht weißlich.

**a) Abhilfe:** Verarbeitung und Trocknung oberhalb der Mindestfilmbildetemperatur des Systems (Herstellerangabe), gegebenenfalls Filmbildehilfsmittel (siehe L-76).

**b) Physikalisch getrocknet:** Die Polymerketten sind nur verschlauft, nicht chemisch verbunden; ein geeignetes Lösemittel schiebt sich wieder zwischen die Ketten und löst den Film an.

**b) Chemisch gehärtet:** Die Ketten sind zu einem Netzwerk vernetzt; Lösemittel kann das Netzwerk höchstens anquellen, aber nicht auflösen (siehe L-03).

*Bewertung: Teil a: Die Antwort nennt die drei Schritte der Koaleszenz und erklärt den Fehler über die Mindestfilmbildetemperatur. Teil b: Der Unterschied wird über Verschlaufung gegen Vernetzung begründet, nicht nur behauptet.*

# L-03 · Filmbildung II — chemische Härtung

*Vernetzung, Reaktionslacke und ihre Steuerung*

**Prüfungsteil 1** · A 8.3 · A 10

Chemische Härtung heißt: Nach dem Auftragen reagieren die Bestandteile miteinander und bauen ein dreidimensionales Netzwerk auf. Der Film entsteht nicht nur durch Verdunsten, sondern durch Reaktion – und ist danach weder anlösbar noch schmelzbar.

## Was dabei geschieht

Enthält ein chemisch härtender Lack Lösemittel oder Wasser, trocknet er zunächst physikalisch: Das Lösemittel bzw. Wasser verdunstet, die Bestandteile rücken zusammen (siehe L-02). Zusätzlich – gleichzeitig oder im Anschluss – reagieren die Bestandteile miteinander: Die Molmasse steigt, und es entsteht ein dreidimensionales Netzwerk. Diese Reaktion läuft weiter, wenn kein Lösemittel mehr entweicht, und sie bestimmt die endgültigen Filmeigenschaften. Bei lösemittelfreien Systemen (100-%-Systeme, Pulverlacke) entfällt der erste Schritt; hier ist die Reaktion der einzige Weg zum Film.

Mit zunehmender Vernetzung werden die Ketten unbeweglicher, und die Reaktionspartner finden sich immer schwerer; die Reaktion wird langsamer, hört aber nicht schlagartig auf. Deshalb kann ein Film nach dem Trocknen oder Einbrennen noch nachhärten: Härte, Lösemittel- und Chemikalienbeständigkeit erreichen ihre Endwerte oft erst nach Tagen (Nachhärtung).

## Was die Reaktion auslöst

- Luftsauerstoff — oxidativ härtende Öle und Alkydharze (1K); Sikkative beschleunigen (siehe L-14, L-16)
- Wärme — Einbrennlacke (1K): z. B. Polyester oder Acrylat mit Aminoharz, blockierte Isocyanate, Pulverlacke (siehe L-31, L-36)
- Zweite Komponente — 2K-Lacke: Epoxid/Amin, Polyol/Polyisocyanat (2K-PUR); nach dem Mischen läuft die Topfzeit (siehe L-25, L-28)
- Luftfeuchtigkeit — feuchtigkeitshärtende 1K-PUR-Lacke (siehe L-25)
- Strahlung — UV- und Elektronenstrahlhärtung (siehe L-24)
- Säure — säurehärtende Lacke (SH-Lacke), z. B. Möbellacke (siehe L-122)

## Härtungsreaktionen

- Polymerisation — ungesättigte Monomere und Harze reagieren über ihre Doppelbindungen zu Ketten oder Netzwerken; ein Starter (meist ein Radikal) bricht die erste Doppelbindung auf, danach wächst die Kette von selbst weiter. Beispiele: Acrylate, ungesättigte Polyester mit Styrol; kein Abspaltprodukt.
- Polykondensation — funktionelle Gruppen reagieren unter Abspaltung kleiner Moleküle, z. B. Esterbildung unter Wasserabspaltung oder Aminoharz-Vernetzung unter Alkoholabspaltung.
- Polyaddition — funktionelle Gruppen reagieren ohne Abspaltung kleiner Moleküle, z. B. Polyisocyanat + Polyol zum Polyurethan (Urethan-Bindung) oder Epoxidharz + Amin (der Epoxidring öffnet sich; es entstehen eine C–N-Bindung und eine OH-Gruppe). Die Produkte heißen Polyaddukte (siehe L-04).

## Beispiele für Reaktionsgleichungen

```
Polymerisation (z. B. Acrylat):
n CH₂=CH–R → [–CH₂–CH(R)–]ₙ  (kein Abspaltprodukt)

Polyaddition PUR:
R–NCO + R′–OH → R–NH–CO–O–R′

Polyaddition Epoxid/Amin:
Epoxidring + R′–NH₂ → R′–NH–CH₂–CH(OH)–  (Ringöffnung, kein Abspaltprodukt)
Eine primäre Aminogruppe (–NH₂) kann nacheinander zwei Epoxidgruppen
umsetzen, eine sekundäre (–NH–) noch eine (siehe L-29).

Polykondensation Esterbildung:
R–COOH + R′–OH ⇌ R–COO–R′ + H₂O
So vernetzen selbstvernetzende Polyester-Einbrennlacke (siehe L-36)
und ein Teil der Polyester-Pulverlacke (siehe L-95); das Reaktionswasser
muss aus dem Film entweichen können.
```

## Zwei Wege zum vernetzten Film

- Ein fertiges Polymer wird nachträglich vernetzt — die Ketten sind lang (linear oder verzweigt) und tragen die Filmeigenschaften schon mit; wenige Verknüpfungen genügen, die Dosierung ist unkritisch, aber der Festkörper ist niedrig. Beispiele: linearer OH-Polyester mit Aminoharz (Coil Coating, siehe L-19, L-20); oxidativ härtendes Alkydharz – im Lackbereich „oxidative Trocknung“ genannt, fachlich eine chemische Reaktion mit Sauerstoff (siehe L-14, L-16).
- Das Netzwerk entsteht erst bei der Härtung — aus niedermolekularen oder oligomeren Bausteinen; hoher Festkörper möglich, aber alle Eigenschaften hängen an der Reaktion: Die Stöchiometrie muss stimmen, die Vernetzungsdichte wird hoch, der Film hart und beständig, eher spröde. Beispiele: 2K-Epoxid/Amin, 2K-PUR mit niedermolekularem Polyol, UP-Harz/Styrol (siehe L-23, L-25, L-28).

Einteilungskriterium ist, wie weit das Bindemittel vor der Härtung schon aufgebaut ist – nicht der Reaktionstyp und nicht der Härter.

## Lagerstabil und trotzdem reaktiv

Ein Beschichtungsstoff soll bei der Lagerung stabil, nach der Applikation aber reaktiv sein. Das gelingt, indem Lagerung und Reaktion zeitlich getrennt werden – auf zwei Arten: Beim 2K-Lack bleiben die Reaktionspartner bis zum Mischen getrennt. Beim 1K-Lack sind alle Partner zusammen, die Reaktion springt aber erst unter der Härtungsbedingung an. Beim Einbrennlack genügt dafür meist die Temperaturabhängigkeit der Reaktion: bei Raumtemperatur praktisch kein Umsatz, bei Einbrenntemperatur – je nach System z. B. 120 bis 180 °C – vollständige Vernetzung innerhalb von Minuten. Nur Partner, die sonst schon bei Raumtemperatur reagieren würden, werden zusätzlich gesichert – durch blockierte Reaktivgruppen (blockierte Isocyanate, siehe L-25) oder einen „latenten“, also ruhenden Katalysator, der erst bei Einbrenntemperatur frei wird (z. B. aminblockierte Säurekatalysatoren, siehe L-31). Beim UV-Lack ist der Photoinitiator der ruhende Starter, der erst durch Licht Radikale bildet (siehe L-24).

Im Labor sieht man das am 2K-Lack: Nach dem Mischen beginnt die Reaktion, die Viskosität steigt, bis der Lack nicht mehr verarbeitbar ist. Die Zeit vom Mischen bis dahin heißt Topfzeit (Verarbeitungszeit); sie steht im technischen Merkblatt und hängt vor allem von Temperatur, Ansatzmenge und Reaktivität ab (siehe L-25). Deshalb setzt man nur so viel an, wie innerhalb der Topfzeit verarbeitet werden kann. Ein Einbrennlack dagegen ist bei Raumtemperatur monatelang lagerfähig; seine Härtungsreaktion wird erst durch die erhöhte Temperatur im Ofen ausgelöst bzw. stark beschleunigt.

## Rechenweg Härterzusatz

Grundlage sind zwei Kennwerte aus dem technischen Merkblatt:
• OH-Äquivalent = 17 · 100 / %OH — Gramm Harz, die ein Mol OH-Gruppen enthalten (17 g/mol: molare Masse der OH-Gruppe). Ist statt des OH-Gehalts die OH-Zahl in mg KOH/g angegeben: %OH = OH-Zahl / 33 (siehe L-08).
• NCO-Äquivalent = 42 · 100 / %NCO — Gramm Härter, die ein Mol NCO-Gruppen enthalten (42 g/mol: molare Masse der NCO-Gruppe).

Für jedes OH-Äquivalent Harz braucht man ein NCO-Äquivalent Härter. Bezogen auf 100 g Harz ergibt das den Isocyanat-Grundwert:
Isocyanat-Grundwert (g Härter je 100 g Harz) = 42 · 100 · %OH / (17 · %NCO)

Soll das NCO/OH-Verhältnis nicht 1,0 sein, wird der Grundwert mit dem gewünschten Verhältnis multipliziert:
Härter je 100 g Harz = Isocyanat-Grundwert · NCO/OH-Verhältnis

Beispiel: Polyol mit 3,0 % OH, Härter mit 20 % NCO.
OH-Äquivalent = 1 700 / 3,0 = 567 g · NCO-Äquivalent = 4 200 / 20 = 210 g
Isocyanat-Grundwert = 42 · 100 · 3,0 / (17 · 20) = 37,1 g Härter je 100 g Harz
Bei NCO/OH = 1,0: für 200 g Polyol 2 · 37,1 = 74 g Härter.
Bei NCO/OH = 1,1: 37,1 · 1,1 = 40,8 g je 100 g, für 200 g Polyol 82 g Härter.

Ein Verhältnis über 1,0 (NCO-Überschuss) wird in der Praxis oft gewählt, weil ein Teil der Isocyanatgruppen mit Luftfeuchte reagiert und so für die Vernetzung verloren geht (siehe L-25, L-27). Weitere Beispiele in L-27 und L-58; selbst rechnen: Frage 4 in Ü-03.

## Kenngrößen des vernetzten Films

• Vernetzungsdichte — die Dichte wirksamer Netzwerkverknüpfungen. Mit zunehmender Vernetzung steigen Härte und Chemikalienbeständigkeit; Flexibilität und Quellbarkeit nehmen ab. Beispiel: Eine hochvernetzte 2K-Epoxid-Bodenbeschichtung ist chemikalienfest, aber spröde; ein weitmaschig vernetztes PUR-Elastomer bleibt flexibel, quillt aber stärker in Lösemitteln.
• Gelanteil — der nach einer Extraktionsprüfung unlösliche Anteil des Films. Ein Gelanteil von 95 % heißt: 95 % der Filmmasse bleiben als unlösliches Netzwerk zurück, 5 % werden extrahiert.
• Lösemittel-Reibtest — ein mit Lösemittel (meist Methylethylketon) getränktes Tuch wird über den Film gerieben. Ein ausreichend vernetzter Film wird kaum angegriffen; ein unzureichend vernetzter wird weich, klebrig oder gibt Material an das Tuch ab. Schnell und praxisnah, die Aussagekraft hängt aber von Lösemittel, Methode und Lacktyp ab.

**Merksatz**

Chemische Härtung: Nach dem Auftragen reagieren die Bestandteile zu einem dreidimensionalen Netzwerk; der Film ist danach weder anlösbar noch schmelzbar.
Was die Reaktion auslöst, kennzeichnet den Lacktyp: Luftsauerstoff, Wärme, zweite Komponente, Luftfeuchtigkeit, Strahlung oder Säure.
Polykondensation spaltet ein kleines Molekül ab, Polyaddition nicht; Polymerisation läuft über Doppelbindungen.
Lagerstabil und trotzdem reaktiv: Reaktionspartner getrennt halten (2K) oder die Reaktion erst durch Wärme auslösen (Einbrennlack). Nach dem Mischen eines 2K-Lacks läuft die Topfzeit.
Ob ein Film durchgehärtet ist, zeigt nicht die trockene Oberfläche, sondern die Prüfung: Lösemittel-Reibtest, Gelanteil oder Härtemessung.

**Stichwörter:** chemische Härtung, Vernetzung, Reaktionslack, Einbrennlack, 2K, Zweikomponentenlack, säurehärtend, Vernetzungsdichte, Vernetzungsgrad, Gelanteil, oxidative Härtung, Topfzeit, Nachhärtung, Lösemittel-Reibtest
*Quellen: Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur; Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie*

## Übungsblatt Ü-03 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Unterscheiden Sie Polymerisation, Polykondensation und Polyaddition nach Reaktionsablauf und Abspaltprodukt und nennen Sie zu jeder Reaktion ein Beispiel aus der Lackhärtung.

**Polymerisation:** Ein Starter – meist ein Radikal aus einem Peroxid oder Photoinitiator – bricht die Doppelbindung eines Monomers auf. Das Kettenende bleibt dadurch selbst reaktiv und greift das nächste Monomer an; so wächst die Kette Monomer für Monomer. Ein kleines Molekül wird nicht abgespalten. Beispiel: UP-Harz, dessen Doppelbindungen radikalisch mit Styrol reagieren (siehe L-23); UV-Lacke (siehe L-24).

**Polykondensation:** Funktionelle Gruppen reagieren miteinander; dabei wird ein kleines Molekül abgespalten. Beispiel: Ein OH-Bindemittel vernetzt beim Einbrennen mit einem Aminoharz; das abgespaltene Reaktionsprodukt, z. B. Alkohol oder Wasser, muss aus dem Film entweichen (siehe L-31).

**Polyaddition:** Funktionelle Gruppen reagieren miteinander, aber ohne Abspaltung eines kleinen Moleküls. Beispiel: Im 2K-PUR-Lack reagiert die Isocyanatgruppe mit der OH-Gruppe zum Urethan (siehe L-25).

**Worauf es ankommt:** Polykondensation und Polyaddition laufen bei den hier betrachteten Lackreaktionen über funktionelle Gruppen und unterscheiden sich hinsichtlich des Abspaltprodukts. Die Polymerisation läuft dagegen über Doppelbindungen: Ein Starter öffnet die erste, danach gibt die Kette die Reaktivität von Monomer zu Monomer weiter.

*Bewertung: Zu jeder Reaktion gehören der Ablauf, die Aussage zum Abspaltprodukt und ein Beispiel aus der Lackhärtung. Der Kern ist die Unterscheidung von Polykondensation und Polyaddition über das Abspaltprodukt.*

**Frage 2** **(Verständnis, 9 Punkte)**

Erläutern Sie die zwei Wege, auf denen ein vernetzter Lackfilm entstehen kann, je mit einem Stoffbeispiel, und nennen Sie je eine Folge für Festkörper und Dosierung.

**Erster Weg — fertiges Polymer wird nachträglich vernetzt:** Lange Ketten (linear oder verzweigt) tragen die Filmeigenschaften schon mit; wenige Verknüpfungen genügen. Beispiel: linearer OH-Polyester mit Aminoharz (Coil Coating, siehe L-19, L-20) oder oxidativ härtendes Alkydharz (siehe L-14, L-16).

**Folgen beim ersten Weg:** Niedriger Festkörper, weil lange Ketten den Lack viskos machen; die Dosierung des Vernetzers ist unkritisch.

**Zweiter Weg — Netzwerk entsteht erst bei der Härtung:** Niedermolekulare oder oligomere Bausteine reagieren erst beim Härten zum Netzwerk. Beispiel: 2K-Epoxid aus Epoxidharz und Aminhärter (siehe L-28, L-29) oder 2K-PUR mit niedermolekularem Polyol (siehe L-25, L-27).

**Folgen beim zweiten Weg:** Hoher Festkörper möglich; die Stöchiometrie muss stimmen, sonst bleibt der Film unvollständig vernetzt oder enthält unreagierte Gruppen.

**Einteilungskriterium:** Wie weit das Bindemittel vor der Härtung schon aufgebaut ist – nicht der Reaktionstyp und nicht der Härter.

*Bewertung: Zu jedem Weg werden Prinzip, ein Stoffbeispiel und die Folge für Festkörper und Dosierung genannt. Die Zuordnung folgt dem Aufbau des Bindemittels vor der Härtung, nicht dem Reaktionstyp.*

**Frage 3** **(Verständnis, 10 Punkte)**

Ein 2K-PUR-Lack ist vor dem Mischen lagerstabil, nach dem Mischen aber nur begrenzt verarbeitbar. Erklären Sie den Unterschied und nennen Sie zwei Faktoren, die die Topfzeit beeinflussen. Bewerten Sie außerdem kurz, warum eine höhere Reaktionstemperatur die Topfzeit verändert.

**Vor dem Mischen:** Die reaktiven Komponenten sind getrennt; die Reaktion zwischen Polyol und Polyisocyanat kann daher nicht ablaufen.

**Nach dem Mischen:** Die Reaktionspartner stehen gemeinsam zur Verfügung, sodass die Vernetzung beginnt und die Viskosität mit der Zeit ansteigen kann.

**Einflussfaktoren auf die Topfzeit:** Temperatur, Katalysierung, Konzentration und Reaktivität der Komponenten, das NCO/OH-Verhältnis – und Feuchtigkeit im Ansatz, etwa aus Lösemitteln, Pigmenten oder Füllstoffen, weil Wasser mit Isocyanatgruppen reagiert.

**Wirkung höherer Temperatur:** Höhere Temperatur beschleunigt die Reaktion typischerweise und verkürzt dadurch die Topfzeit.

*Bewertung: Die Antwort erklärt den Unterschied über die Trennung der Reaktionspartner, nennt zwei Einflussfaktoren auf die Topfzeit und begründet die Temperaturwirkung über die beschleunigte Reaktion.*

**Frage 4** **(Berechnung, 9 Punkte)**

Ein 2K-PUR-System besteht aus 500 g Polyol mit 4,5 % OH und einem Härter mit 22 % NCO. Berechnen Sie die Härtermasse a) für ein NCO/OH-Verhältnis von 1,0 und b) für ein NCO/OH-Verhältnis von 1,1.

**Gegeben:** m(Polyol) = 500 g; 4,5 % OH; 22 % NCO

**Äquivalente:** OH-Äquivalent = 1 700 / 4,5 = 378 g Polyol je mol OH; NCO-Äquivalent = 4 200 / 22 = 191 g Härter je mol NCO

**Isocyanat-Grundwert:** 42 · 100 · 4,5 / (17 · 22) = 50,5 g Härter je 100 g Polyol

**a) NCO/OH = 1,0:** m(Härter) = 5 · 50,5 g = 253 g

**b) NCO/OH = 1,1:** m(Härter) = 253 g · 1,1 = 278 g

**Antwortsatz:** Für das stöchiometrische Verhältnis werden 253 g Härter benötigt, bei 10 % NCO-Überschuss 278 g.

*Bewertung: Der Rechenweg führt über die beiden Äquivalente bzw. den Isocyanat-Grundwert; das NCO/OH-Verhältnis geht als Faktor ein. Teil b zeigt, dass ein Überschuss gezielt gewählt wird – eine pauschale Aussage „mehr NCO sorgt immer für vollständige Härtung“ wäre nicht korrekt.*

# L-04 · Polymere als Filmbildner

*Grundbegriffe, Polyreaktionen und Polymertypen*

**Prüfungsteil 2** · A 10 · B 12

Das Bindemittel eines organischen Lackfilms ist ein Polymer. Es liegt entweder schon fertig im Lack vor und bildet den Film physikalisch (siehe L-02), oder es wird beim Härten zusätzlich vernetzt (siehe L-03). Oder es entsteht erst bei der Filmbildung aus reaktiven, niedermolekularen Ausgangsstoffen (ebenfalls L-03).

## Die drei Grundbegriffe

• Monomer — reaktionsfähiger, vergleichsweise niedermolekularer Ausgangsstoff, aus dem durch eine Polyreaktion ein Polymer aufgebaut werden kann. Beispiele: Methylmethacrylat, Styrol und 1,3-Butadien (Doppelbindungs-Monomere der Kettenpolymerisation) — oder Ethylenglykol, das zusammen mit einer Dicarbonsäure zum Polyester wird (Baustein einer Stufenwachstumsreaktion, siehe L-19). Im Lacklabor begegnen Monomere beispielsweise als reaktive Bausteine bzw. Reaktivverdünner. In ungesättigten Polyesterharzen können bestimmte Monomere, beispielsweise Styrol, gleichzeitig die Viskosität des Harzsystems verringern und bei der Härtung in die entstehende Polymerstruktur eingebaut werden. Anders als ein klassisches Lösemittel verdunsten solche reaktiven Komponenten daher nicht einfach vollständig, sondern werden Bestandteil des ausgehärteten Films (siehe L-23, L-24).
• Polymer — Stoff aus Makromolekülen, deren Struktur aus sich wiederholenden Einheiten aufgebaut ist. Die Zahl der verknüpften Wiederholungseinheiten heißt Polymerisationsgrad P; für ein Homopolymer gilt näherungsweise $M_n \approx P \cdot M_0$. Beispiel: Bei Poly(methylmethacrylat) ist $M_0$ bei der Kettenpolymerisation näherungsweise gleich der Molmasse des Monomers, weil nichts abgespalten wird: $M_0 = 5 \cdot 12{,}01 + 8 \cdot 1{,}008 + 2 \cdot 16{,}00 = 100{,}12$ g/mol ≈ 100 g/mol ($C_5H_8O_2$). Bei P = 500 ist Mn ≈ 50 000 g/mol (Zahlenmittel, siehe L-05). Ein OH-Acrylatharz für 2K-PUR mit Mn ≈ 5 000 g/mol und einer mittleren Bausteinmasse von rund 100 g/mol entspricht grob 50 Wiederholungseinheiten. Beim Homopolymer ist die Näherung gut; bei Copolymeren ist $M_0$ ein Mittelwert und die Rechnung gröber. Technische Polymere können Molmassen von wenigen Tausend bis zu vielen Hunderttausend g/mol oder darüber besitzen; eine feste allgemeine Obergrenze gibt es nicht.
• Oligomer — Stoff aus vergleichsweise kurzen Ketten bzw. wenigen Wiederholungseinheiten. Die Grenze zum Polymer ist nicht scharf und hängt vom Kontext ab; 2000 g/mol ist nur eine grobe Orientierung, keine Definition.

## Polyreaktionen

• Kettenpolymerisation — ein Start erzeugt ein aktives Zentrum, meist ein Radikal am Kettenende. Dort lagert sich ein Monomer an, und das aktive Zentrum sitzt danach am neuen Ende. Ein Start kann dadurch die Anlagerung vieler Monomere ermöglichen. Ein einzelnes Makromolekül kann bereits eine hohe Kettenlänge erreicht haben, während ein großer Teil des Monomers noch unreagiert vorliegt. Ein ungesättigter Polyester, dessen Doppelbindungen radikalisch mit Styrol reagieren, kann auf diesem Weg ein Netzwerk bilden (siehe L-23). Typisches Beispiel ist die radikalische Acrylatpolymerisation; ein kleines Molekül wird dabei nicht abgespalten.
• Stufenwachstumsreaktionen — hier wandert kein aktives Zentrum mit: Moleküle mit passenden funktionellen Gruppen können miteinander reagieren. Jede einzelne Verknüpfung ist eine Stufe. Bei einer Polykondensation kann ein kleines Molekül wie Wasser oder Methanol abgespalten werden, bei einer Polyaddition erfolgt die Verknüpfung ohne solche Abspaltung. Beispiele: Polyester als Polykondensate; Polyurethane als Polyaddukte.
Kurz gefasst: Bei der Kettenpolymerisation wächst die Polymerkette an einem aktiven Reaktionszentrum weiter — vereinfacht wie ein Zug, an den fortlaufend weitere Wagen angekuppelt werden. Beim Stufenwachstum können dagegen zunächst viele kleine Moleküle miteinander reagieren. Dabei entstehen beispielsweise Dimere und Oligomere, die anschließend mit weiteren Molekülen reagieren können, sodass die Molekülgröße schrittweise zunimmt.

## Bezeichnungen der Produkte

Je nach Reaktionstyp heißen die Produkte Polymerisate, Polykondensate oder Polyaddukte. Die ältere, auf Carothers zurückgehende Einteilung in Additionspolymerisation und Kondensationspolymerisation hat sich im deutschen Sprachraum nicht durchgesetzt; die hier verwendete Einteilung folgt Kettenpolymerisation sowie den Stufenwachstumsreaktionen Polykondensation und Polyaddition.

## Molekülgestalt und Polymertyp

• Linear: überwiegend kettenförmige Moleküle ohne nennenswerte Seitenäste — Beispiel: viele lineare gesättigte Polyester (siehe L-19) oder lineares Polyvinylchlorid.
• Verzweigt: Polymerketten mit Seitenketten oder Verzweigungspunkten — Beispiel: ein mit Trimethylolpropan aufgebautes Alkyd- oder Polyesterharz (siehe L-16, L-19). Trimethylolpropan trägt drei OH-Gruppen. Reagieren alle drei, wird das TMP-Molekül zum Verzweigungspunkt; bleibt eine OH-Gruppe frei, kann sie später für Vernetzung zur Verfügung stehen.
• Vernetzt: dreidimensionales Netzwerk, bei dem die Ketten über kovalente Bindungen miteinander verbunden sind — Beispiel: ein ausgehärteter 2K-Epoxidfilm.

## Werkstoffklassen

• Thermoplaste: unvernetzte Polymere, die beim Erwärmen erweichen, schließlich schmelzen und sich neu formen lassen; viele sind in geeigneten Lösemitteln löslich.
• Elastomere: weitmaschig vernetzte, gummielastische Polymere; sie quellen in geeigneten Lösemitteln, lösen sich aber nicht.
• Duroplaste: engmaschig vernetzte Polymere. Sie lösen sich nicht und schmelzen nicht. Beim Erwärmen können sie oberhalb ihrer Glasübergangstemperatur etwas weicher werden, bleiben aber formstabil und fließen nicht; bei zu starker Erwärmung zersetzen sie sich (vgl. L-09).

Im Lacklabor erkennt man Unterschiede zwischen physikalisch getrockneten und chemisch gehärteten Filmen häufig beim Kontakt mit Lösemitteln. Ein rein physikalisch getrockneter Film kann sich — abhängig vom Bindemittel — durch ein geeignetes Lösemittel wieder anlösen. Ein chemisch vernetzter 2K- oder Einbrennlack löst sich dagegen in der Regel nicht einfach wieder auf. Er kann durch geeignete Lösemittel quellen oder angegriffen werden, bleibt aber aufgrund seiner Netzwerkstruktur weitgehend unlöslich.

Elastomere spielen in der Beschichtungstechnik nur eine untergeordnete Rolle — man findet sie dort, wo der Film dauerhaft gummielastisch bleiben muss: etwa Fouling-Release-Antifoulings auf Siliconelastomer-Basis (siehe L-103), rissüberbrückende Fassaden- und Betonbeschichtungen sowie flexible Polyurethan-Beschichtungen.

## Homopolymer und Copolymer

Wird nur eine Monomersorte als struktureller Baustein eingesetzt, spricht man von einem Homopolymer. Werden mehrere verschiedene Monomere eingebaut, entsteht ein Copolymer; bei drei Monomeren auch ein Terpolymer. Bei Copolymeren unterscheidet man u. a. statistische, alternierende, Block- und Pfropfcopolymere. Statistisch: A-B-B-A-B-A-A-B, die Monomere sind statistisch über die Kette verteilt. Alternierend: A-B-A-B-A-B. Block: A-A-A-B-B-B-A-A-A, längere Stücke je eines Monomers hintereinander. Pfropf: eine Hauptkette aus A, an der Seitenketten aus B hängen. Die Anordnung der Wiederholungseinheiten beeinflusst Glasübergang, Härte, Flexibilität, Löslichkeit und Haftung.

### Lacktechnische Bedeutung

Durch Auswahl und Mengenverhältnis der Monomere lassen sich Eigenschaften gezielt einstellen. Ein „hartes“ Monomer kann beispielsweise die Glasübergangstemperatur und Härte erhöhen, während ein „weiches“ Monomer die Flexibilität verbessern kann. In realen Bindemitteln spielen außerdem Molmassenverteilung, Verzweigung, Funktionalität und Polarität eine Rolle. Die Vernetzung selbst entsteht erst beim Härten (siehe L-03); wie dicht sie wird, legen Funktionalität des Bindemittels und Vernetzermenge schon vorher fest. Ein höhermolekularer Filmbildner ergibt bei gleicher Konzentration typischerweise eine zähflüssigere Lösung als ein niedermolekularer gleicher chemischer Art (siehe L-10).

**Merksatz**

Liegt das Polymer bereits als Bindemittel im Lack vor — oder entsteht ein wesentlicher Teil der Polymerstruktur erst während der Härtung? Lässt sich der trockene Film wieder anlösen oder quillt er nur? Welche Bausteine beeinflussen Härte, Flexibilität und Beständigkeit?
Nicht nur die Art der Monomere, sondern auch ihre Verteilung und die entstehende Polymerstruktur beeinflussen die Eigenschaften des Bindemittels.

**Stichwörter:** Monomer, Polymer, Oligomer, Polyreaktion, Polymerisation, Kettenpolymerisation, Stufenwachstumsreaktion, Polykondensation, Polyaddition, Thermoplast, Plastomer, Elastomer, Duromer, Duroplast, Homopolymer, Copolymer, Terpolymer
*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie*

## Übungsblatt Ü-04 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 10 Punkte)**
Zwei thermoplastische Acrylpolymere besitzen eine ähnliche chemische Zusammensetzung, aber unterschiedliche mittlere Molmassen. Erklären Sie, wie eine höhere Molmasse typischerweise die Lösungsviskosität und die Verarbeitung eines Polymerbindemittels beeinflusst. Nennen Sie außerdem einen Grund, warum die Molmasse allein die Filmeigenschaften nicht vollständig bestimmt.

**Molmasse und Lösungsviskosität:** Mit steigender Molmasse nimmt die Viskosität von Polymerlösungen typischerweise deutlich zu.
**Auswirkung auf die Verarbeitung:** Dadurch kann die Verarbeitung, beispielsweise das Einstellen der Spritzviskosität, schwieriger werden.
**Warum Molmasse nicht alles bestimmt:** Die Filmeigenschaften werden zusätzlich durch Faktoren wie Molmassenverteilung, Glasübergangstemperatur, Polarität, Funktionalität, Verzweigung und intermolekulare Wechselwirkungen bestimmt.
*Bewertung: Die Antwort trennt sauber zwischen dem direkten Viskositätseffekt der Molmasse und weiteren Einflussgrößen auf die Filmeigenschaften.*

**Frage 2** **(Berechnung, 9 Punkte)**
Ein Acrylpolymer wird durch radikalische Kettenpolymerisation aufgebaut. Der mittlere Polymerisationsgrad beträgt P = 340, die Molmasse der Monomereinheit $M_0$ = 100 g/mol. a) Berechnen Sie die mittlere Molmasse Mn. b) Erklären Sie, warum ein höherer Polymerisationsgrad typischerweise zu einer höheren Lösungsviskosität führt.

**Gegeben:** P = 340; $M_0$ = 100 g/mol
**a) Mittlere Molmasse:** $Mn = P \cdot M_0 = 340 \cdot 100$ g/mol = 34 000 g/mol
**b) Viskositätsanstieg:** Mit steigendem Polymerisationsgrad werden die Ketten länger. Längere Ketten verschlaufen sich stärker und können dadurch den Strömungswiderstand und die Viskosität erhöhen.
**Einschränkung:** Der genaue Zusammenhang hängt zusätzlich von Konzentration, Lösemittel, Temperatur und Polymerstruktur ab.
*Bewertung: Teil a ist eine direkte Anwendung der Definition des Polymerisationsgrades. Teil b verbindet Molmasse, Kettenlänge, Verschlaufung und Viskosität.*

**Frage 3** **(Anwendung, 8 Punkte)**

Nennen Sie zwei mögliche Copolymerarchitekturen und erläutern Sie jeweils kurz, welchen Einfluss die Anordnung der Monomere auf die Eigenschaften haben kann.

**Blockcopolymer:** Aufbau: A-A-A-B-B-B-A-A-A oder mehrfach abwechselnd (Multiblock) — längere Stücke je eines Monomers hintereinander. Wirkung: Unterschiedliche Segmente können unterschiedliche Eigenschaften in das Polymer einbringen. Harte und weiche Segmente können beispielsweise gemeinsam Steifigkeit und Flexibilität beeinflussen. Beispiele: Hart- und Weichsegmente in Polyurethanen (siehe L-06); Dispergiermittel mit einem Block, der am Pigment haftet, und einem Block, der sich im Lack löst (siehe L-51).

**Statistisches Copolymer:** Aufbau: A-B-B-A-B-A-A-B, die Monomere sind statistisch über die Kette verteilt. Wirkung: Die Eigenschaften werden durch Monomertyp und Mengenverhältnis sowie Molmasse und weitere Strukturmerkmale bestimmt. Beispielsweise kann sich die Glasübergangstemperatur mit der Zusammensetzung verändern (Fox-Gleichung, siehe L-09). Beispiel: Acrylatdispersion aus Methylmethacrylat (hart) und Butylacrylat (weich).

**Einschränkung:** Wie stark der Effekt ist, hängt von den Monomeren, ihrem Mengenverhältnis, der Molmasse und der konkreten Polymerarchitektur ab.

*Bewertung: Zu jeder genannten Architektur wird die Anordnung der Bausteine beschrieben und ein plausibler Eigenschaftseinfluss abgeleitet. Auch alternierende und Pfropfcopolymere sind zulässig.*

# L-05 · Molmasse und Molmassenverteilung

*Mittelwerte, Verteilungsbreite und ihre Bestimmung*

**Prüfungsteil 1** · A 7.1 · B 12

Für ein technisches Polymer lässt sich keine einheitliche molare Masse angeben — jedes einzelne Molekül hat zwar eine definierte Molmasse, die Probe als Ganzes aber eine Molmassenverteilung. Zahlenmittel Mn und Massenmittel Mw beschreiben diese Verteilung aus zwei unterschiedlichen Blickwinkeln; die Breite der Verteilung ist dabei oft wichtiger als ein einzelner Mittelwert.

## Warum es Mn und Mw gibt

Ein kleines Molekül besitzt eine eindeutig definierte molare Masse. Ein technisches Polymer besteht dagegen aus vielen Molekülen unterschiedlicher Kettenlänge. Beispiel: In einer Polymerprobe können Moleküle mit 5 000, 10 000, 20 000 und 50 000 g/mol vorkommen; die chemische Grundstruktur ist gleich, unterschiedlich ist nur die Zahl der verknüpften Monomereinheiten.

Eine einzige Durchschnittszahl beschreibt diese Verteilung nicht ausreichend: Schon ein kleiner Anteil sehr hochmolekularer Ketten kann Eigenschaften wie die Lösungsviskosität deutlich beeinflussen. Deshalb betrachtet man die Probe aus zwei unterschiedlichen Blickwinkeln.

## Zahlenmittel Mn und Massenmittel Mw

Zahlenmittel Mn – jedes Molekül wird gleich gewichtet; ein Molekül mit 10 000 g/mol zählt genauso stark wie eines mit 100 000 g/mol. Mn beschreibt damit die Molmasse eines durchschnittlichen Polymermoleküls.

$$M_n = \Sigma(N_i \cdot M_i) / \Sigma N_i$$

(Ni = Anzahl der Moleküle mit der Molmasse Mi; Σ heißt: über alle vorkommenden Molmassen aufsummieren. Oben steht also die Gesamtmasse der Probe, unten die Gesamtzahl der Moleküle.)

Massenmittel Mw – größere Moleküle werden stärker gewichtet; ein Molekül mit 100 000 g/mol enthält zehnmal so viel Polymermasse wie eines mit 10 000 g/mol. Mw reagiert deshalb besonders empfindlich auf hochmolekulare Ketten.

$$M_w = \Sigma(N_i \cdot M_i^2) / \Sigma(N_i \cdot M_i)$$

(Beim Massenmittel ist der Gewichtungsfaktor jeder Molekülsorte nicht ihre Anzahl Ni, sondern ihre Masse Ni · Mi. Gemittelt wird die Molmasse Mi – also Σ(Ni · Mi · Mi) / Σ(Ni · Mi), daher steht oben Mi². Unten steht die Gesamtmasse der Probe, weil man bei einem gewichteten Mittel immer durch die Summe der Gewichtungsfaktoren teilt.)

## Rechenbeispiel

Eine Probe enthalte je ein Molekül mit 10 000, 20 000 und 30 000 g/mol.

$$M_n = (10\,000 + 20\,000 + 30\,000) / 3 = 20\,000 \text{ g/mol}$$

$$M_w = (10\,000^2 + 20\,000^2 + 30\,000^2) / (10\,000 + 20\,000 + 30\,000) = 23\,333 \text{ g/mol}$$

Mw ist größer, weil die größeren Moleküle bei Mw stärker in die Mittelwertbildung eingehen.

## Dispersität Đ

Die Dispersität beschreibt, wie breit die Molmassenverteilung ist. Warum der Quotient das kann: Mn zählt alle Moleküle gleich, Mw lässt die großen stärker zählen. Sind alle Ketten gleich lang, kommt bei beiden dasselbe heraus. Sind kurze und lange Ketten gemischt, ziehen die kurzen Mn nach unten und die langen Mw nach oben – je ungleicher die Kettenlängen, desto größer wird Mw/Mn:

$$Đ = M_w / M_n$$

Für das obige Beispiel: Đ = 23 333 / 20 000 = 1,17. Je näher Đ bei 1 liegt, desto enger ist die Verteilung; für eine ideal monodisperse (molekulareinheitliche) Probe gilt Mw = Mn und damit Đ = 1.

VERTIEFUNG — ÜBER DEM PRÜFUNGSSTOFF

## Đ-Bereiche verschiedener Herstellverfahren — Vertiefung

Lebende Polymerisation — einfach erklärt: Bei einer normalen Polymerisation wächst eine Kette, bis ein Kettenabbruch sie stoppt; danach kann sie nicht weiterwachsen. Bei einer lebenden Polymerisation wird dieser Abbruch weitgehend vermieden: Die Kette bleibt reaktionsfähig und nimmt weitere Monomere auf, solange welche vorhanden sind. Dadurch wachsen viele Ketten kontrollierter und mit ähnlicherer Länge — die Molmassenverteilung kann sehr eng werden, Đ etwa 1,05 bis 1,2. „Lebend“ heißt hier also nicht biologisch lebendig, sondern: Das Kettenende bleibt reaktionsfähig. Konventionelle radikalische Polymerisationen — etwa viele Acrylatharze — liegen meist bei Đ ≈ 1,5 bis 3. Lineare Polykondensate, zum Beispiel gesättigte Polyester, liegen um Đ ≈ 2; verzweigte Typen (mit Triol) deutlich darüber.

Das sind grobe Richtwerte, keine festen Grenzen.

Warum entsteht überhaupt ein Gemisch aus kurzen und langen Ketten? Bei der normalen radikalischen Polymerisation starten und enden ständig neue Ketten nebeneinander — manche werden lang, manche kurz; enger wird es, wenn Monomer und Initiator langsam und gleichmäßig zudosiert werden und die Temperatur konstant bleibt. Bei der Polykondensation verbinden sich die Moleküle zufällig, mal zwei kleine, mal ein kleines mit einem großen. Ganz eng wird die Verteilung nur mit den lebenden Polymerisationen, die reine Monomere und besondere Initiatoren brauchen — das kostet Aufwand.

Was das für den Lack bedeutet: Eine enge Verteilung ist meist günstiger — die Lösung bleibt dünnflüssiger, weil keine übergroßen Ketten dabei sind; für High-Solid-Lacke ist das wichtig (siehe unten, Lacktechnische Bedeutung). Bei einer breiten Verteilung machen die wenigen sehr langen Ketten die Lösung zäh, und die sehr kurzen Ketten werden beim Härten nur eingebunden, wenn sie reaktive Gruppen tragen — sonst bleiben sie als weiche Reste im Film und schwächen Härte und Beständigkeit; sie helfen allerdings beim Verlauf. Für den Laboralltag genügt die Kernaussage: Ein enges Đ bedeutet gleichmäßigere Ketten und damit besser vorhersagbares Verhalten.

## Bestimmungsmethoden

• Viskosimetrie — man misst, wie zäh eine verdünnte Lösung des Polymers fließt: je länger die Ketten, desto zäher. Daraus erhält man das Viskositätsmittel Mv, das meist zwischen Mn und Mw liegt, näher an Mw (Fachrechner „Viskositätszahlen“), oder den K-Wert nach Fikentscher: eine dimensionslose Kennzahl für das viskositätsbezogene Verhalten eines Polymers in Lösung. Er wird aus dem Viskositätsverhalten bestimmt und ist keine direkte Angabe der Molmasse. Vereinfacht gilt bei vergleichbaren Prüfbedingungen: höherer K-Wert → längere Polymerketten → höhere Lösungsviskosität. Beispiel: Ein PVC mit K 70 hat unter vergleichbaren Bedingungen typischerweise eine höhere Lösungsviskosität als ein PVC mit K 60. Der K-Wert steht bei PVC, Polyvinylchlorid-Mischpolymerisaten (siehe L-22) und Polyvinylacetat als Typkennzahl im Datenblatt (für PVC genormt in DIN EN ISO 1628-2). Die genaue Lösungsviskosität hängt zusätzlich von Polymerkonzentration, Polymerstruktur, Lösemittel, Temperatur und den Prüfbedingungen ab.
• Dampfphasenosmometrie — liefert das Zahlenmittel Mn. Ein Tropfen Polymerlösung und ein Tropfen reines Lösemittel hängen nebeneinander in Lösemitteldampf. Auf dem Lösungstropfen schlägt sich Dampf nieder, dadurch wird er ein wenig wärmer. Warum: An jeder Oberfläche verdunsten ständig Moleküle und schlagen sich zugleich welche aus dem Dampf nieder. Auf beide Tropfen treffen gleich viele Moleküle aus dem Kammerdampf — aber aus dem Lösungstropfen verdunsten weniger, weil ein Teil seiner Oberfläche von Polymermolekülen besetzt ist. Er nimmt deshalb netto Dampf auf, und jedes niedergeschlagene Molekül gibt seine Verdampfungswärme an den Tropfen ab. Wie viel wärmer, hängt nur davon ab, wie viele Moleküle gelöst sind — nicht wie groß sie sind. Die Methode zählt also Moleküle. Sie wird mit einem Stoff bekannter Molmasse geeicht und eignet sich vor allem für kleine Molmassen (Oligomere, niedermolekulare Harze), weil der Effekt bei großen Ketten zu klein wird.
• Gelpermeationschromatographie (GPC) — die Standardmethode. Die gelöste Probe wird durch eine Säule gepumpt, die mit einem porösen Gel gefüllt ist. Kleine Moleküle schlüpfen in die Poren, machen Umwege und kommen spät heraus; große Moleküle passen kaum hinein, laufen außen vorbei und kommen zuerst. Ein Detektor am Ende misst, wie viel Polymer wann herauskommt — das ergibt die ganze Molmassenverteilung und daraus Mn, Mw und Đ. Die Säule trennt nach der Größe der Molekülknäuel, nicht direkt nach der Masse. Geeicht wird mit Polymeren bekannter Molmasse (meist Polystyrol); die Werte gelten dann als Polystyrol-Äquivalente.

## Lacktechnische Bedeutung

Molmasse und Molmassenverteilung beeinflussen insbesondere Lösungsviskosität, Verarbeitbarkeit, Filmbildung und mechanische Filmeigenschaften. Ein Filmbildner, der eine geringe Lösungsviskosität und damit einen lösemittelärmeren Lack ergeben soll, braucht neben einer möglichst niedrigen molaren Masse auch eine enge Molmassenverteilung — schon wenige sehr große Moleküle treiben die Viskosität überproportional nach oben.

**Merksatz**

Zwei Harzchargen besitzen den gleichen Festkörper, zeigen aber unterschiedliche Viskositäten. Könnte die Molmasse oder Molmassenverteilung eine Rolle spielen? Welcher Mittelwert reagiert besonders stark auf einen höheren Anteil großer Moleküle? Wie breit ist die Molmassenverteilung? Mn ist das Zahlenmittel der Molmasse: Jedes Molekül geht dabei mit gleicher Gewichtung in den Mittelwert ein. Mw ist das Massenmittel der Molmasse: Größere Moleküle werden stärker gewichtet als kleinere. Daher gilt für eine reale Polymerverteilung grundsätzlich: Mw ≥ Mn. Je breiter die Molmassenverteilung ist, desto stärker können sich Zahlen- und Massenmittel unterscheiden.
Für die Lackpraxis ist wichtig: Die Viskosität einer Polymerlösung hängt nicht allein vom Festkörper ab. Auch Molmasse, Molmassenverteilung, Polymerstruktur, Lösemittel und Temperatur beeinflussen das Fließverhalten.

**Stichwörter:** Polymerisationsgrad, molare Masse, Zahlenmittel, Massenmittel, Dispersität, Molmassenverteilung, Verteilungsbreite, GPC, Gelpermeationschromatographie, Viskosimetrie, spezifische Viskosität, reduzierte Viskosität, Viskositätszahl, Grenzviskosität, Dampfphasenosmometrie, K-Wert
*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; DIN EN ISO 1628-2*

## Übungsblatt Ü-05 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 7 Punkte)**

Erklären Sie, warum Mw bei einer realen Molmassenverteilung größer als Mn ist.

**Zahlenmittel Mn:** Jedes Molekül wird gleich gewichtet — Mn ist das arithmetische Mittel der molaren Masse.

**Massenmittel Mw:** Größere Moleküle bringen mehr Masse mit und gehen dadurch stärker in den Mittelwert ein als die gleiche Anzahl kleiner Moleküle.

**Folgerung:** Da die großen Moleküle stärker gewichtet werden, fällt Mw größer aus als Mn. Nur bei einer monodispersen (molekulareinheitlichen) Probe, bei der alle Moleküle dieselbe Masse haben, gilt Mw = Mn.

*Bewertung: Der Grenzfall der monodispersen Probe wird ergänzt. Er zeigt, dass der Zusammenhang durchdrungen und nicht nur nachgesprochen wurde.*

**Frage 2** **(Berechnung, 9 Punkte)**

Ein Polymergemisch enthält 0,50 mol einer Fraktion mit M = 5 000 g/mol und 0,50 mol einer Fraktion mit M = 15 000 g/mol. Berechnen Sie Mn.

**Gegeben:** $n_1$ = 0,50 mol bei $M_1$ = 5 000 g/mol; $n_2$ = 0,50 mol bei $M_2$ = 15 000 g/mol

**Ansatz:** $M_n = (n_1 \cdot M_1 + n_2 \cdot M_2) / (n_1 + n_2)$

**Rechnung:** $M_n = (0{,}50 \cdot 5\,000 + 0{,}50 \cdot 15\,000) / (0{,}50 + 0{,}50) = 10\,000$ g/mol

**Antwortsatz:** Das Zahlenmittel beträgt 10 000 g/mol — bei gleichen Stoffmengen entspricht das dem einfachen arithmetischen Mittel der beiden Molmassen.

*Bewertung: Das Zahlenmittel wird korrekt über die Stoffmengenanteile gebildet; bei gleichen Stoffmengen entspricht es dem einfachen arithmetischen Mittel.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**

Zwei Bindemittel haben dasselbe Mn, aber unterschiedliche Molmassenverteilungen. Welches wird bei vergleichbarer Konzentration typischerweise die niedrigere Lösungsviskosität besitzen?

**Antwort:** Typischerweise das Bindemittel mit der engeren Molmassenverteilung.

**Begründung:** Eine kleine Fraktion sehr großer Moleküle kann die Viskosität stark erhöhen; die vielen kleineren Moleküle können das nicht ausgleichen, obwohl der Mittelwert gleich bleibt. Der genaue Zusammenhang hängt zusätzlich von Polymerstruktur, Konzentration, Lösemittel und Temperatur ab.

**Praxisbezug:** Bei High-Solid-Systemen beeinflussen Molmasse und Molmassenverteilung wesentlich die Viskosität und Verarbeitbarkeit; eine gute Spritzbarkeit hängt jedoch von der gesamten Formulierung und den Verarbeitungsbedingungen ab.

*Bewertung: Die Begründung kommt ohne zusätzliche Kenngröße aus und stützt sich auf den überproportionalen Zusammenhang. Der Praxisbezug zeigt, warum die Frage im Berufsalltag zählt.*

# L-06 · Aggregat- und Sekundärstrukturen von Polymeren

*Knäuel, Verschlaufungen und Teilkristallinität*

**Prüfungsteil 2** · A 10 · B 12

Unvernetzte Polymerketten sind beweglich: Um jede Einfachbindung kann sich die Kette drehen. Bei tausenden zufälligen Drehwinkeln ergibt sich fast immer ein Knäuel — keine gestreckte Kette. Für viele Lackfilme sind verschlaufte Ketten günstig: Sie lassen sich nicht so leicht aneinander vorbeiziehen — der Film hält besser zusammen und reißt nicht so leicht. Kristallite sind dagegen bei vielen transparenten Lackfilmen unerwünscht, können bei bestimmten Polymeren aber gezielt technische Eigenschaften verbessern.

## Polymerknäuel

Entlang einer Polymerkette sind Rotationen um Einfachbindungen möglich; zusätzlich sind Bindungswinkel und sterische Effekte zu berücksichtigen. Dadurch entsteht keine dauerhaft gestreckte Idealstruktur, sondern eine statistische Konformation. Die Knäuelbildung gilt sowohl im ungelösten (festen bzw. geschmolzenen) Zustand als auch in Lösung; in Lösung wird die Knäueldimension zusätzlich durch Polymer-Lösemittel-Wechselwirkungen beeinflusst.

## Wie sich Knäuel zusammenlagern

- Zellenstruktur — die Knäuel liegen weitgehend undurchdrungen nebeneinander.
- Netzwerkstruktur — die Knäuel durchdringen sich gegenseitig und bilden eine Art Molekülfilz.

Für viele Lackfilme kann ein guter Grad an Verschlaufung wegen der besseren mechanischen Eigenschaften günstig sein. Wichtige Abgrenzung: Gemeint ist hier ein rein physikalisches Verschlaufungsnetzwerk unvernetzter Ketten — das ist etwas anderes als ein chemisches Netzwerk aus kovalenten Vernetzungen (siehe L-03). Ein anschauliches Bild ist Filz: Viele Fasern liegen ungeordnet vor und sind miteinander verschlungen. Dadurch können sie sich nicht einfach voneinander lösen. Ähnlich können sich lange Polymerketten miteinander verschlaufen und dadurch zum Zusammenhalt des Materials beitragen. Wie stark dieser Effekt ist, hängt unter anderem von der Molmasse und der Kettenstruktur ab. Sind Polymerketten sehr kurz, treten weniger Verschlaufungen auf; dadurch können sich die Ketten leichter gegeneinander bewegen. Die Eigenschaften des Films hängen jedoch zusätzlich von Faktoren wie Tg, Wechselwirkungen und Vernetzungsgrad ab.

- Bei manchen Polymeren können sich regelmäßige Molekülabschnitte zusätzlich dichter anordnen; solche geordneten Bereiche können Härte, Festigkeit und Barriereeigenschaften beeinflussen. Bei Polyurethanen tragen beispielsweise Urethangruppen und ihre intermolekularen Wechselwirkungen zur Festigkeit und Abriebbeständigkeit bei, neben Faktoren wie Vernetzungsgrad, Hart-/Weichsegmentstruktur und Morphologie.
- Teilkristalline Struktur — viele Molekülsegmente lagern sich zu Kristalliten im Nanometerbereich zusammen, die sich ihrerseits zu Überstrukturen ordnen können.

## Zwischenmolekulare Wechselwirkungen

• Dispersionskräfte — wirken zwischen allen Molekülen; sie entstehen durch momentane Unsymmetrien der Ladungsverteilung.
• Polare Kräfte (Dipol-Dipol-Wechselwirkungen) — entstehen zusätzlich bei Molekülen mit permanenten Dipolen.
• Wasserstoffbrücken — gerichtete, relativ starke intermolekulare Wechselwirkungen, z. B. zwischen OH-/NH-Gruppen und geeigneten Elektronenpaaren.
Chemische Hauptvalenzbindungen sind deutlich stärker als einzelne intermolekulare Wechselwirkungen wie Wasserstoffbrücken. Je stärker und zahlreicher die intermolekularen Wechselwirkungen sind, desto stärker kann der Zusammenhalt zwischen Polymerketten sein. Das kann sich unter geeigneten Bedingungen beispielsweise in höherer Festigkeit oder Härte zeigen. Zwischenmolekulare Wechselwirkungen können sich im Lacklabor unter anderem auf die Viskosität auswirken. Beispielsweise können OH-Gruppen Wasserstoffbrücken zwischen Polymerketten ermöglichen und dadurch den Zusammenhalt zwischen den Ketten erhöhen. Ob ein Bindemittel dadurch tatsächlich zähflüssiger wird, hängt jedoch auch von Molmasse, Konzentration, Lösemittel, Polymerstruktur und Anzahl der funktionellen Gruppen ab. Ein geeignetes Lösemittel kann solche Wechselwirkungen teilweise abschwächen und dadurch die Viskosität der Bindemittellösung beeinflussen (siehe L-10).

## Amorph und teilkristallin

Ein amorphes Polymer besitzt keine Fernordnung der Kettensegmente. Teilkristalline Polymere enthalten neben amorphen Bereichen geordnete Kristallite. Regelmäßige, lineare Ketten können Kristallisation begünstigen; Verzweigungen, unregelmäßiger Kettenbau und statistische Copolymerisation erschweren sie.

## Bedeutung für Lackfilme

Teilkristalline Bereiche können die Löslichkeit und den Verlauf beeinflussen und wegen unterschiedlicher Brechzahlen Licht streuen. Für viele transparente Lackfilme ist daher eine überwiegend amorphe Struktur günstig. Teilkristallinität ist jedoch nicht grundsätzlich ein Fehler; bei bestimmten Polymeren kann sie gezielt technische Eigenschaften verbessern.

Im Labor kann man Strukturänderungen beispielsweise daran erkennen, dass eine Harzlösung oder ein Klarlackfilm nach der Lagerung nicht mehr vollständig klar ist. Eine milchige Trübung kann verschiedene Ursachen haben. Möglich sind beispielsweise auskristallisierte Bestandteile, eine Unverträglichkeit zwischen Komponenten oder eingedrungene Feuchtigkeit. Die Trübung allein erlaubt daher noch keine eindeutige Aussage über die Ursache.

Die Knäuel-Betrachtung gilt für gelöste Filmbildner: In lösemittelhaltigen Systemen und in wässrigen Bindemittellösungen (Hydrosol, siehe L-70) liegen die Ketten als solvatisierte, sich durchdringende Knäuel vor. In Kunststoffdispersionen und in Pulverlacken liegen die Polymerketten zunächst kompakt in Teilchen bzw. Pulverpartikeln vor und können beim Zusammenfließen (Koaleszenz) bzw. Aufschmelzen eine zusammenhängende Polymerphase bilden. Bei Pulverlacken sind Glasübergangstemperatur und Lagerstabilität besonders wichtig: Eine zu niedrige Glasübergangstemperatur kann das Verblocken begünstigen. Beim Einbrennen muss das Bindemittel ausreichend aufschmelzen und gut verlaufen. Kristalline Bereiche können die Blockfestigkeit verbessern, sind dafür aber nicht allein verantwortlich — entscheidend ist vor allem die Glasübergangstemperatur. Ein höherer Kristallinitätsgrad kann außerdem den Verlauf und die Transparenz der Beschichtung beeinflussen. Teilkristalline Vernetzer werden in bestimmten Pulverlacksystemen gezielt eingesetzt, weil ihr Schmelzverhalten die Verarbeitung und die Eigenschaften des Pulverlacks beeinflussen kann (siehe L-90).

Teilkristalline Vernetzer besitzen geordnete (kristalline) und ungeordnete (amorphe) Bereiche. Beim Erwärmen schmelzen die kristallinen Bereiche in einem charakteristischen Temperaturbereich. Dadurch lässt sich ihr Schmelzverhalten gut beschreiben und für die Verarbeitung im Pulverlack gezielt nutzen.

**Merksatz**

Ist der Klarlack klar oder milchig? Liegt die Ursache möglicherweise bei Kristallisation, Unverträglichkeit oder Feuchtigkeit? Verblockt ein Polymerpulver bei der Lagerung — und welche Rolle könnten dabei Tg und zwischenmolekulare Wechselwirkungen spielen? Sind die Polymerketten lang genug, um sich ausreichend zu verschlaufen?
Polymere können je nach ihrer Struktur teilweise oder stärker kristallisieren. Der erreichbare Kristallinitätsgrad hängt stark vom jeweiligen Polymer und seinen strukturellen Voraussetzungen ab. Strukturen mit Abmessungen in der Größenordnung der Lichtwellenlänge können bei ausreichendem Brechzahlunterschied Licht streuen und dadurch einen Lackfilm trüben. Kristalline Bereiche → geordnetere Struktur → charakteristischer Schmelzbereich.

**Stichwörter:** Knäuel, amorph, Kristallinität, Zellenstruktur, Netzwerkstruktur, Molekülfilz, Teilkristallinität, Kristallit, Dispersionskräfte, polare Kräfte, Wasserstoffbrücken, Brechzahl, Trübung
*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie*

## Übungsblatt Ü-06 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 7 Punkte)**
Warum liegen unvernetzte Polymerketten in Lösung nicht als vollständig gestreckte Ketten vor?

**Ursache:** Die Ketten besitzen zahlreiche drehbare Bindungen, wobei Bindungswinkel und sterische Wechselwirkungen die möglichen Konformationen bestimmen.
**Statistische Folge:** Die thermische Bewegung führt deshalb zu statistisch geknäuelten Konformationen; eine dauerhaft gestreckte, regelmäßige Zickzack-Kette ist als Gesamtstruktur statistisch sehr unwahrscheinlich.
**Zusatzfaktoren:** Die genaue Knäueldimension hängt zusätzlich von Polymer-Lösemittel-Wechselwirkungen und Molmasse ab.
*Bewertung: Beide molekularen Ursachen (drehbare Bindungen, Bindungswinkel/sterische Effekte) werden genannt und über die statistische Überlegung verbunden.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**
Ein teilkristallines Polymer zeigt im Klarlackfilm Trübung. Der kristalline Bereich hat einen Brechungsindex von $n_1 = 1{,}53$, der amorphe Bereich von $n_2 = 1{,}49$. a) Berechnen Sie die Brechzahldifferenz $\Delta n$. b) Erklären Sie, warum diese Differenz zur Trübung führt, und nennen Sie eine strukturelle Maßnahme zur Verbesserung der Klarheit.

**Gegeben:** n(Kristallit) = 1,53; n(amorph) = 1,49
**a) Brechzahldifferenz:** $\Delta n = n_1 - n_2 = 1{,}53 - 1{,}49 = 0{,}04$. Das ist für Lack- und Polymersysteme bereits merklich: Bei fein verteilten Partikeln oder unterschiedlichen Phasen kann eine solche Differenz deutliche Lichtstreuung verursachen und die Transparenz der Beschichtung verringern — wovon das im Einzelnen abhängt, zeigt Teil b.
**b) Ursache der Trübung:** An Grenzflächen zwischen Bereichen mit unterschiedlichen Brechzahlen kann Licht gestreut werden. Wie stark die Streuung ausfällt, hängt unter anderem vom Brechzahlunterschied $\Delta n$ sowie von Größe und Anzahl der streuenden Strukturen ab. Werden die Strukturen ausreichend groß bzw. bilden sie größere Überstrukturen, kann die Lichtstreuung sichtbar werden.
**Strukturelle Maßnahme:** Wahl eines stärker amorphen Filmbildners, z. B. durch geeignete Copolymerisation oder Verzweigung, die Kristallisation erschwert. Ebenfalls möglich: die Bildung größerer geordneter Strukturen vermeiden bzw. die Strukturgröße klein halten.
*Bewertung: Teil a ist eine einfache Subtraktion; Teil b zeigt, dass die Berechnung mit dem physikalischen Mechanismus der Lichtstreuung verbunden wird und daraus eine strukturelle Maßnahme abgeleitet werden kann.*

**Frage 3** **(Anwendung, 8 Punkte)**

Warum kann eine stärkere Verschlaufung von Polymerketten für Lackfilme günstig sein? Erklären Sie dabei, wodurch Verschlaufungen und intermolekulare Wechselwirkungen die mechanische Festigkeit beeinflussen.

**Wenig verschlaufte Struktur:** Die Polymerknäuel liegen weitgehend nebeneinander und sind nur wenig miteinander verschlungen. Dadurch können sich die Ketten bei einer mechanischen Belastung leichter gegeneinander bewegen.

**Verschlaufte Struktur:** Die Polymerketten durchdringen sich stärker und bilden zahlreiche Verschlaufungen. Dadurch wird ihre gegenseitige Bewegung stärker behindert.

**Wirkung der Verschlaufungen:** Verschlaufungen wirken wie physikalische Verknüpfungspunkte. Sie behindern das Aneinandervorbeigleiten der Polymerketten und können dadurch die mechanische Festigkeit und Zähigkeit des Lackfilms erhöhen.

**Wirkung intermolekularer Wechselwirkungen:** Zusätzliche Wechselwirkungen zwischen den Polymerketten, beispielsweise Dipol-Dipol-Wechselwirkungen oder Wasserstoffbrücken, können den Zusammenhalt der Ketten weiter erhöhen. Je nach Polymerstruktur und Prüfbedingungen kann dies unter anderem zu höherer Festigkeit, Härte oder Abriebbeständigkeit beitragen.

**Schlussfolgerung:** Für viele Lackfilme können ausreichend starke Verschlaufungen vorteilhaft sein, weil sie die Beweglichkeit der Polymerketten einschränken. Der Lackfilm kann dadurch mechanischen Belastungen besser widerstehen.

**Wichtige Abgrenzung:** Verschlaufungen sind physikalische Verknüpfungen und keine chemischen Bindungen. Sie sind daher von einem chemisch vernetzten Polymernetzwerk zu unterscheiden (siehe L-03).

**Einschränkung:** Die Wirkung hängt unter anderem von Molmasse, Polymerstruktur, Temperatur, Glastemperatur und gegebenenfalls vom Grad der chemischen Vernetzung ab.

*Bewertung: Für die volle Punktzahl müssen die beiden Strukturen beschrieben, die Wirkung von Verschlaufungen erklärt, Verschlaufungen von intermolekularen Wechselwirkungen unterschieden und die Abgrenzung zur chemischen Vernetzung genannt werden.*

# L-07 · Löslichkeit und Löslichkeitsparameter

*Vom Quellen zum Lösen — mit dem Löslichkeitsparameter*

**Prüfungsteil 2** · A 10

„Ähnliches löst sich in Ähnlichem“ ist eine nützliche Näherung. Löslichkeit hängt aber auch von Polymerstruktur, Molmasse, Temperatur, Kristallinität und spezifischen Wechselwirkungen ab.

## Quellung und Lösen

Bei einem amorphen, unvernetzten Polymer dringen Lösemittelmoleküle zwischen die Polymerketten ein: Das Polymer quillt, das Volumen nimmt zu, die mechanische Festigkeit sinkt, weil die zusammenhaltenden Kräfte zwischen den Ketten mehr und mehr durch Kräfte zwischen Kette und Lösemittel ersetzt werden. Bei ausreichendem Lösevermögen kann daraus eine molekulare Lösung entstehen; einen scharfen Übergang zwischen gequollen und gelöst gibt es nicht. Ein vernetztes Polymer geht dagegen im Allgemeinen nicht in eine echte Lösung über, sondern quillt nur.

Ein einfaches Bild hilft bei der Unterscheidung: Zucker löst sich in Wasser vollständig auf. Ein Schwamm nimmt dagegen Wasser auf, wird größer und weicher, bleibt aber als zusammenhängendes Material erhalten. Ähnlich kann sich ein unvernetztes Polymer in einem geeigneten Lösemittel lösen, während ein vernetztes Polymernetzwerk häufig nur quillt. Im Lacklabor kann man das beispielsweise beobachten, wenn ein ausgehärteter Lackfilm unter einem lösemittelgetränkten Tupfer weich wird, sich ausdehnt oder runzelt, aber nicht vollständig auflöst.

Merke: Lösen bedeutet, dass sich das Polymer im Lösemittel verteilt und eine Lösung bildet. Beim Quellen nimmt das Polymer Lösemittel auf, bleibt aber als zusammenhängendes Netzwerk erhalten.

## Löslichkeitsparameter

Der Hildebrand-Löslichkeitsparameter beschreibt vereinfacht die Kohäsionsenergie eines Stoffes, meist in (J/cm³)^½ angegeben; je stärker die Anziehungskräfte zwischen den eigenen Molekülen, desto höher der Wert. Für komplexe Systeme ist die Aufteilung in Hansen-Parameter δD, δP und δH aussagekräftiger: Dispersions-, polare und Wasserstoffbrücken-Wechselwirkungen.

## Der praktische Kern

Für die Rezepturarbeit reicht zunächst ein einfacher Grundsatz: Liegen die drei Hansen-Parameter von Bindemittel und Lösemittel nahe beieinander, ist eine gute Verträglichkeit bzw. Löslichkeit wahrscheinlicher. Liegen sie deutlich auseinander, ist eine ausreichende Löslichkeit weniger wahrscheinlich.

Genau diesen Abstand berechnet der Fachrechner „Löslichkeitsparameter“. Er vergleicht zwei Stoffe anhand ihrer Hansen-Parameter und gibt den Hansen-Abstand Ra aus.

Je kleiner Ra ist, desto ähnlicher sind sich die Stoffe hinsichtlich ihrer Hansen-Parameter und desto wahrscheinlicher ist eine gute Verträglichkeit. Ob z. B. ein Lösemittel tatsächlich als Ersatz für ein anderes geeignet ist, muss jedoch zusätzlich praktisch geprüft werden, da auch Verdunstung, Viskosität und die übrigen Bestandteile der Rezeptur eine Rolle spielen.

VERTIEFUNG – ÜBER DEM PRÜFUNGSSTOFF

## Hansen-Abstand Ra und RED — Vertiefung

Der Hansen-Abstand Ra beschreibt den Abstand zwischen den Hansen-Parametern eines Polymers und eines Lösemittels:
$Ra = \sqrt{(4\Delta\delta D^2 + \Delta\delta P^2 + \Delta\delta H^2)}$
Dabei wird die Differenz der Dispersionsanteile δD mit dem Faktor 4 gewichtet. Ein kleinerer Ra-Wert bedeutet, dass sich Polymer und Lösemittel hinsichtlich ihrer Hansen-Parameter ähnlicher sind.

Für die weiterführende Bewertung kann der dimensionslose Wert RED verwendet werden: $RED = Ra/R_0$. Dabei beschreibt $R_0$ den empirisch bestimmten Radius des Löslichkeitsbereichs eines bestimmten Polymers im Hansen-Raum. $R_0$ wird aus experimentellen Löslichkeitsdaten abgeleitet und ist kein allgemeingültiger Stoffwert.

Vereinfacht bedeutet:
• Ra = tatsächlicher Abstand zwischen Polymer und Lösemittel
• $R_0$ = charakteristischer Grenzabstand für den Löslichkeitsbereich des Polymers
• RED < 1 = Lösemittel liegt innerhalb des empirisch bestimmten Löslichkeitsbereichs
• RED > 1 = Lösemittel liegt außerhalb dieses Bereichs

Rechenbeispiel: Polymer (16,8; 8,4; 7,8), Lösemittel (15,8; 8,8; 7,0), Werte in (J/cm³)^½.
$\Delta\delta D = 16{,}8 - 15{,}8 = 1{,}0$; $\Delta\delta P = 8{,}4 - 8{,}8 = -0{,}4$; $\Delta\delta H = 7{,}8 - 7{,}0 = 0{,}8$
$Ra = \sqrt{(4 \cdot 1{,}0^2 + 0{,}4^2 + 0{,}8^2)} = \sqrt{(4 + 0{,}16 + 0{,}64)} = \sqrt{4{,}80} \approx 2{,}19$
Wird für dieses Polymer beispielhaft ein empirisch bestimmter Wert von $R_0 = 8$ angenommen: $RED = 2{,}19 / 8 \approx 0{,}27$.
Da RED < 1 ist, liegt das Lösemittel nach diesem empirischen Modell innerhalb des Löslichkeitsbereichs. Das bedeutet jedoch nicht automatisch, dass das Lösemittel das Polymer unter allen praktischen Bedingungen vollständig löst. Die tatsächliche Eignung sollte gegebenenfalls experimentell überprüft werden.

Warum das über dem Kernniveau liegt: Die Berechnung von Ra eignet sich gut zur praktischen Vorauswahl von Lösemitteln und kann direkt aus den Hansen-Parametern durchgeführt werden. Für die Berechnung von RED wird zusätzlich $R_0$ benötigt. Dieser Wert wird für das jeweilige Polymersystem anhand experimenteller Löslichkeitsdaten bestimmt und ist daher nicht ohne Weiteres aus allgemeinen Stoffdaten abzuleiten.

Merksatz: Ra zeigt, wie ähnlich sich Polymer und Lösemittel hinsichtlich ihrer Hansen-Parameter sind. RED setzt diesen Abstand ins Verhältnis zum empirisch bestimmten Löslichkeitsbereich des Polymers.

## Grenzen

Es gibt keine universelle feste Grenzdifferenz, die für alle Polymere gilt. Zuverlässiger sind empirisch ermittelte Löslichkeitsparameter-Diagramme: Für ein bestimmtes Polymer wird ein Bereich von Werten ermittelt, in dem es sich löst; Lösemittel innerhalb dieses Bereichs sind häufig gute Kandidaten, außerhalb ist eine gute Löslichkeit weniger wahrscheinlich. Molmasse, Temperatur, Kristallinität und spezifische Wechselwirkungen können die Vorhersage zusätzlich deutlich beeinflussen.

## Lösemittelgemische und latente Löser

Bei Lösemittelgemischen können die Hansen-Parameter näherungsweise aus den Volumenanteilen der einzelnen Komponenten abgeschätzt werden. Dadurch kann sich die Lage des Gemischs im Hansen-Raum verändern.

Ein latenter Löser ist ein Lösemittel, das ein bestimmtes Polymer allein nur schlecht oder gar nicht löst, das aber zusammen mit einem geeigneten zweiten Lösemittel eine ausreichende Löslichkeit ermöglichen kann. Entscheidend ist die gemeinsame Wechselwirkung des Lösemittelgemischs mit dem Polymer. Ein klassisches Beispiel ist Polystyrol: Es löst sich weder in n-Heptan noch in Aceton allein ausreichend, kann aber bei geeigneten Mischungsverhältnissen von n-Heptan und Aceton gelöst werden. Das genaue Verhalten hängt unter anderem vom Mischungsverhältnis und den Versuchsbedingungen ab.

Ein typisches Lackbeispiel sind Lösemittelgemische für Cellulosenitratlacke. Ein einzelnes Lösemittel kann für das Bindemittel unzureichend sein. Durch die Kombination verschiedener Lösemittel kann dagegen eine ausreichende Lösungswirkung erreicht werden. Dabei können echte Löser, latente Löser und Verschnittmittel zusammen eingesetzt werden. Ein abgestimmtes Lösemittelgemisch beeinflusst nicht nur die Löslichkeit des Bindemittels, sondern auch Verdunstungsverhalten, Viskosität, Verlauf und Filmbildung (siehe L-22). Ein gutes Lösemittelgemisch muss also nicht aus einem einzigen „starken“ Löser bestehen — entscheidend ist das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten.

Nichtlöser, die einem Lack nur zur Verdünnung oder Kostensenkung zugesetzt werden, heißen Verschnittmittel (Verschnittlöser); wird ihr Anteil zu hoch, verlässt das Gemisch das Löslichkeitsfenster und das Bindemittel fällt aus (Ausfällung).

## Struktureinflüsse

- Molmasse: Mit steigender Molmasse kann das Lösen eines unvernetzten Polymers langsamer und schwieriger werden. Die thermodynamische Löslichkeit kann ebenfalls abnehmen; der genaue Einfluss hängt vom jeweiligen Polymer-Lösemittel-System ab.
- Verzweigung: Eine stärkere Verzweigung kann die Löslichkeit unter bestimmten Bedingungen verbessern, wenn dadurch dichtere Packung oder Kristallisation erschwert wird. Eine allgemeingültige Regel „verzweigt = leichter löslich“ gibt es nicht.
- Vernetzung: Vernetzte Polymere lösen sich im Allgemeinen nicht mehr molekular auf. Sie können jedoch Lösemittel aufnehmen und quellen. Insbesondere die Vernetzungsdichte beeinflusst das Ausmaß der Quellung.
- Teilkristallinität: Kristalline Bereiche können das Eindringen des Lösemittels und die Auflösung der Polymerketten erschweren. Teilkristallinität ist jedoch nicht grundsätzlich unerwünscht; sie kann je nach Polymer auch gezielt Eigenschaften wie Härte, Chemikalienbeständigkeit oder Barrierewirkung beeinflussen.

**Merksatz**

Ein Löslichkeitsparameter ist ein Hilfsmittel zur Auswahl geeigneter Lösemittel — kein alleiniger Beweis für Löslichkeit. Die praktische Prüfung bleibt entscheidend.

**Stichwörter:** Quellung, Lösen, Löslichkeitsparameter, Hansen-Parameter, Hansen-Abstand, RED, Kohäsionsenergiedichte, Dispersionskräfte, polare Kräfte, Wasserstoffbrücken, latenter Löser, Verschnittlöser, Ausfällung, Lösemittelgemisch
*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie*

## Übungsblatt Ü-07 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 7 Punkte)**
Erläutern Sie den Unterschied zwischen Quellung und dem vollständigen Lösen eines unvernetzten Polymers.

**Quellung:** Lösemittel dringt in das Polymer ein und vergrößert dessen Volumen; die mechanische Festigkeit sinkt.
**Übergang zum Lösen:** Bei ausreichender Wechselwirkung und Entkopplung der Ketten kann der Vorgang bis zur molekularen Lösung fortschreiten — einen scharfen Übergang zwischen gequollen und gelöst gibt es nicht.
**Sonderfall:** Ein chemisch vernetztes Polymer kann dagegen quellen, aber nicht in einzelne Polymermoleküle zerfallen und sich lösen.
*Bewertung: Der fließende Übergang wird als der entscheidende Unterschied herausgestellt. Der Sonderfall der vernetzten Polymere rundet die Antwort ab.*

**Frage 2** **(Berechnung, 10 Punkte)**
Ein Polymer besitzt die Hansen-Parameter δD = 18,0, δP = 6,0 und δH = 8,0 (in (J/cm³)^½). Für das System gilt $R_0$ = 5,0 (J/cm³)^½. Lösemittel A hat (17,5 / 5,0 / 7,0), Lösemittel B (16,0 / 9,0 / 12,0). Berechnen Sie für beide Lösemittel den Hansen-Abstand Ra und RED = Ra/$R_0$. Welches Lösemittel liegt nach diesem Modell innerhalb der Löslichkeitssphäre?

**Ansatz:** $Ra = \sqrt{[4\cdot(\Delta\delta D)^2 + (\Delta\delta P)^2 + (\Delta\delta H)^2]}$
**Lösemittel A:** $Ra = \sqrt{[4\cdot 0{,}5^2 + 1{,}0^2 + 1{,}0^2]} = 1{,}73$; RED = 1,73/5,0 = 0,35
**Lösemittel B:** $Ra = \sqrt{[4\cdot 2{,}0^2 + 3{,}0^2 + 4{,}0^2]} = 6{,}40$; RED = 6,40/5,0 = 1,28
**Antwortsatz:** Lösemittel A liegt mit RED < 1 innerhalb der Löslichkeitssphäre, Lösemittel B mit RED > 1 außerhalb — nach dem verwendeten empirischen Modell und kein alleiniger experimenteller Beweis für tatsächliche Löslichkeit.
*Bewertung: Die Berechnung verwendet unmittelbar die in L-07 eingeführte Hansen-Gleichung für zwei Lösemittel im direkten Vergleich.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**
Warum kann ein Lösemittelgemisch bessere Löseeigenschaften besitzen als jede Einzelkomponente?

**Prinzip:** Beim Mischen mehrerer Lösemittel verändert sich die Zusammensetzung der Wechselwirkungsparameter. Die Hansen-Parameter des Gemischs können näherungsweise aus den Volumenanteilen abgeschätzt werden. Dadurch kann das Gemisch hinsichtlich Dispersionskräften, polarer Wechselwirkungen und Wasserstoffbrücken besser zu den Wechselwirkungseigenschaften eines Polymers passen als die einzelnen Lösemittel allein.
**Fachbegriff:** Man spricht von einem latenten Löser: ein Lösemittel, das ein Polymer allein nur schlecht oder gar nicht löst, zusammen mit einem geeigneten zweiten Lösemittel aber eine ausreichende Löslichkeit ermöglicht — klassisches Beispiel ist Polystyrol in geeigneten n-Heptan/Aceton-Gemischen.
**Einschränkung:** Ob tatsächlich eine ausreichende Lösung entsteht, muss gegebenenfalls experimentell überprüft werden.
*Bewertung: Für die volle Punktzahl müssen erkennbar sein: 1. das Prinzip (Hansen-Parameter des Gemischs näherungsweise aus den Volumenanteilen) und seine Wirkung auf die Polymerverträglichkeit, 2. die korrekte Verwendung des Begriffs „latenter Löser“, 3. die experimentelle Einschränkung.*

# L-08 · Chemische Kennzahlen der Lackrohstoffe

*Säurezahl, Verseifungszahl, Esterzahl, Iodzahl, NCO-Gehalt, OH-Zahl, Epoxidwert, Äquivalentgewichte*

**Prüfungsteil 1** · A 7.2

Chemische Kennzahlen machen reaktive Gruppen eines Lackrohstoffs messbar — als Zahl mit Einheit und Bezugsbasis. Damit lassen sich Rohstoffe vergleichen, in der Qualitätskontrolle prüfen und Härter- oder Neutralisationsmittelmengen berechnen.

## Wozu Lacklaboranten Kennzahlen brauchen

- Rohstoffvergleich und Wareneingangskontrolle: Liegt die Lieferung in der Spezifikation?
- Beurteilung von Bindemitteln und Härtern: Wie viele reaktive Gruppen stecken in einer bestimmten Masse?
- Berechnung von Neutralisationsmitteln (Säurezahl)
- Berechnung von 2K-PUR-Mischungsverhältnissen (NCO-Gehalt und OH-Zahl)
- Berechnung von 2K-EP-Härtermengen (Epoxidwert und AHEW)

## Grundregel: drei Fragen an jede Kennzahl

Zahl + Einheit + Bezugsbasis gehören immer zusammen. Deshalb bei jeder Kennzahl fragen:

- Was wird gemessen? (welche Gruppe, welche Reaktion)
- In welcher Einheit? (mg KOH/g · g $I_2$/100 g · Masse-% · mol/100 g · g/Äq.)
- Bezogen auf welche Masse? (Festharz oder Lieferform — siehe Bezugsbasis unten)

Und dann die Rezepturfrage: Was bedeutet ein hoher, was ein niedriger Wert — und was ändert sich dadurch im Ansatz?

Alle Zahlen in diesem Blatt sind Beispielwerte zum Rechnen, keine typischen Stoffdaten.

## Säurezahl SZ

Was wird gemessen? Die Masse an Kaliumhydroxid (KOH) in mg, die erforderlich ist, um die in 1 g der untersuchten Probe enthaltenen freien Säuren zu neutralisieren. Bei Lackbindemitteln sind das vor allem freie Carboxylgruppen –COOH. Einheit: mg KOH/g.

Vereinfachte Reaktion: R–COOH + KOH → R–COOK + $H_2O$

Einfach gesagt: Die Säurezahl zeigt, wie viel freie Säure in einem Rohstoff steckt.

## Säurezahl bestimmen

Die Probe wird gelöst und mit KOH-Maßlösung bis zum Umschlag titriert. Aus Verbrauch, Konzentration und Einwaage folgt:

SZ = V · c · 56,1 / m

V = Nettoverbrauch KOH in mL (Probe minus Blindwert), c = Konzentration der Maßlösung in mol/L, m = Einwaage in g, 56,1 = molare Masse von KOH in g/mol.

Beispiel: 2,0 g Einwaage, 12,5 mL KOH-Maßlösung 0,1 mol/L

SZ = 12,5 · 0,1 · 56,1 / 2,0 = 35,1 mg KOH/g

(Den Weg über Stoffmenge und Masse übt Ü-08, Aufgabe 2; Fachrechner „Säurezahl aus Titration“.)

## Was die Säurezahl bedeutet

• Niedrige Säurezahl → wenig freie Säuregruppen je Gramm: geringer Neutralisationsbedarf, geringer Einfluss auf Polarität und Verträglichkeit; für Reaktionen über Carboxylgruppen stehen weniger Gruppen zur Verfügung.
• Hohe Säurezahl → viele freie Säuregruppen je Gramm: höherer Neutralisationsbedarf, höhere Polarität und dadurch veränderte Verträglichkeit mit unpolaren Rohstoffen; mehr Carboxylgruppen für Reaktionen, die sie brauchen.
Eine hohe Säurezahl ist nicht grundsätzlich gut oder schlecht. Viele wasserverdünnbare Bindemittel werden erst durch freie Säuregruppen wasserlöslich, die mit Amin neutralisiert werden — hier ist die Säurezahl gewollt. Bei lösemittelhaltigen Alkyden dagegen ist eine niedrige Säurezahl das Ziel der Kondensation (siehe L-15).
Rechnen mit der Säurezahl: 100 g Festharz mit SZ = 20 mg KOH/g würden zur Neutralisation 20 mg/g · 100 g = 2 000 mg = 2,00 g KOH verbrauchen. Das entspricht 2,00 g / 56,1 g/mol = 0,0357 mol Säuregruppen. KOH ist dabei nur die Rechengröße — neutralisiert wird in der Praxis zum Beispiel mit einem Amin: m(Amin) = 0,0357 mol · M(Amin) (Ü-08, Aufgabe 2 c).

## Verseifungszahl VZ

Was wird gemessen? Die Masse an KOH in mg, die unter festgelegten Analysenbedingungen von 1 g Probe verbraucht wird, um die freien Säuren zu neutralisieren und die Estergruppen zu verseifen. Einheit: mg KOH/g.

Bei der alkalischen Verseifung wird die Esterbindung gespalten. KOH wird dabei verbraucht — der KOH-Verbrauch erfasst also die freien Säuren und die verseifbaren Ester zusammen:
R–COOR′ + KOH → R–COOK + R′–OH

Bei Fetten und Ölen ist R–COOK die Seife — daher der Name. Dieselbe Reaktion ist der Grund, warum Ester-Bindemittel (Alkyde) auf alkalischen Oberflächen wie verzinktem Stahl oder frischem Beton verseifen und die Haftung verlieren können (siehe L-18).

Was bedeutet der Wert? Eine hohe Verseifungszahl zeigt viele freie Säuren und/oder viele verseifbare Estergruppen je Gramm, eine niedrige wenige. Aus der Verseifungszahl allein lässt sich der Estergehalt aber nicht ablesen, weil die freien Säuren mitgezählt werden — dafür braucht man zusätzlich die Säurezahl.

## Verseifungszahl bestimmen

Die Probe wird mit überschüssiger KOH-Lösung unter Rückfluss gekocht; der nicht verbrauchte Rest wird mit Salzsäure zurücktitriert. Anders als bei der Säurezahl zählt hier Blindwert minus Probe:
VZ = ($V_0$ − V) · c · 56,1 / m
$V_0$ = Verbrauch Blindwert, V = Verbrauch Probe, jeweils in mL (Fachrechner „Verseifungszahl“).

## Esterzahl EZ

```
EZ = VZ − SZ
Die Esterzahl ist der rechnerische Anteil des KOH-Verbrauchs, der auf die Estergruppen
   entfällt.

Beispiel: VZ = 180 mg KOH/g, SZ = 23,6 mg KOH/g
EZ = 180 − 23,6 = 156,4 mg KOH/g

Merksatz: SZ → freie Säuren. VZ → freie Säuren + Ester. EZ = VZ − SZ → nur die Ester.
```

## Iodzahl IZ

Was wird gemessen? Die Iodzahl ist ein Maß für die Ungesättigtheit eines Öls oder ölhaltigen Bindemittels: die Masse an Halogen, berechnet als Iod, in g, die unter festgelegten Analysenbedingungen von 100 g Probe gebunden wird. Einheit: g $I_2$/100 g.

Warum Halogen gebunden wird: An eine C=C-Doppelbindung lagert sich ein Halogenmolekül an — die Doppelbindung öffnet sich und nimmt zwei Halogenatome auf (Addition), vereinfacht:
–CH=CH– + $I_2$ → –CHI–CHI–

Je mehr Doppelbindungen ein Öl trägt, desto mehr Halogen wird gebunden. In der Praxis arbeitet man mit einer Iodmonochlorid-Lösung im Überschuss (Verfahren nach Wijs), setzt den Rest mit Kaliumiodid zu Iod um und titriert mit Natriumthiosulfat zurück — das Ergebnis wird als Iod berechnet.

## Was die Iodzahl bedeutet

- Niedrige Iodzahl → wenig Doppelbindungen: wenig reaktive Stellen für den Luftsauerstoff, meist geringe Eignung zur oxidativen Trocknung.
- Hohe Iodzahl → viele Doppelbindungen: mehr reaktive Stellen für die oxidative Vernetzung, meist gute Eignung als trocknendes Öl.

Faustregel für Öle: unter 100 meist nichttrocknend · etwa 100 bis 150 meist halbtrocknend · über 150 meist trocknend. Die Grenzen sind fließend und weichen je nach Quelle etwas ab; Tabelle und Grenzfälle in L-14.

Aber: Die Iodzahl allein bestimmt nicht die Trocknungsgeschwindigkeit. Lage und Art der Doppelbindungen (isoliert oder konjugiert), Ölstruktur, Sikkativierung, Temperatur, Sauerstoffzufuhr und Schichtdicke wirken mit (siehe L-14). Zwei Öle mit gleicher Iodzahl können deshalb verschieden schnell trocknen. Hohe Iodzahl ≠ automatisch schnelle Trocknung.

VERTIEFUNG — ÜBER DEM PRÜFUNGSSTOFF

### Theoretische Iodzahl — Vertiefung

Für eine reine Verbindung mit n Doppelbindungen und molarer Masse M gilt als Näherung IZ = 253,8 · 100 · n / M, weil 1 mol Doppelbindungen 1 mol Iod = 253,8 g bindet (Fachrechner „Iodzahl und Trocknungscharakter“). Die praktische Iodzahl bleibt eine analytisch definierte Messgröße.

## NCO-Gehalt und OH-Zahl: die Kennzahlen des 2K-PUR-Lacks

Isocyanat-Härter und Polyol reagieren zur Urethanbindung:
R–NCO + R′–OH → R–NH–CO–O–R′

Damit die Reaktion aufgeht, müssen NCO-Gruppen und OH-Gruppen im richtigen Verhältnis zusammenkommen. Die beiden Kennzahlen sagen, wie viele davon je Masse Härter bzw. Polyol vorhanden sind.

## NCO-Gehalt und NCO-Äquivalentgewicht

Was wird gemessen? Der Massenanteil an Isocyanatgruppen –NCO im Härter. Einheit: Masse-% NCO — meist auf die Lieferform bezogen.
Beispiel: 16 Masse-% NCO → 100 g Härter enthalten rechnerisch 16 g NCO-Gruppen.

NCO-Äquivalentgewicht (genauer: Äquivalentmasse): Wie viel Gramm Härter enthalten 1 Äquivalent, also 1 mol NCO-Gruppen? Eine NCO-Gruppe hat die molare Masse 42 g/mol. 100 g Härter enthalten %NCO Gramm NCO, also %NCO / 42 mol. Daraus folgt:
NCO-EW = 4 200 / %NCO
Beispiel: 4 200 / 16 = 262,5 g/Äq. → 262,5 g Härter enthalten 1 NCO-Äquivalent.

## OH-Zahl und OH-Äquivalentgewicht

Was wird gemessen? Der Gehalt an Hydroxylgruppen eines Polyols, ausgedrückt als KOH-Äquivalent: die Masse an KOH in mg, die der OH-Menge in 1 g Probe entspricht. Einheit: mg KOH/g.
Wichtig: Die OH-Zahl bedeutet nicht, dass KOH im Polyol vorhanden ist. Sie ist eine analytische Äquivalentangabe: Die OH-Gruppen werden acetyliert, der Überschuss an Reagenz zurücktitriert; freie Säuregruppen stören und werden über die Säurezahl korrigiert (Fachrechner „OH-Zahl“).

OH-Äquivalentgewicht: Wie viel Gramm Polyol enthalten 1 Äquivalent OH-Gruppen? 1 g Polyol entspricht OH-Zahl mg KOH, also OH-Zahl / 56 100 mol OH (M(KOH) = 56,1 g/mol = 56 100 mg/mol). Daraus folgt:
OH-EW = 56 100 / OH-Zahl
Beispiel: OH-Zahl 150 mg KOH/g → OH-EW = 56 100 / 150 = 374 g/Äq. → 374 g Polyol enthalten 1 OH-Äquivalent.

## Die eine Regel für alle Äquivalentgewichte

Ein Äquivalentgewicht (EW) sagt: So viel Gramm Stoff enthalten 1 Äquivalent reaktive Gruppen.
• Kennzahl hoch (hoher NCO-Gehalt, hohe OH-Zahl, hoher Epoxidwert) → viele reaktive Gruppen je Gramm → Äquivalentgewicht klein → weniger Masse für dieselbe Menge Gruppen.
• Kennzahl niedrig → wenige reaktive Gruppen je Gramm → Äquivalentgewicht groß → mehr Masse für dieselbe Menge Gruppen.
Ein hoher NCO-Gehalt macht den Härter nicht automatisch „besser“. Funktionalität, Struktur, Viskosität, Festkörper und Reaktivität entscheiden mit — die Kennzahl liefert nur die Masse je Äquivalent.

## NCO:OH-Mischungsverhältnis

Für die theoretische Stöchiometrie 1 : 1 gilt: NCO-Äquivalente = OH-Äquivalente. Dann mischt man Polyol und Härter im Verhältnis ihrer Äquivalentgewichte:
Härter je 100 g Polyol = NCO-EW / OH-EW · 100

Beispiel: Polyol mit OH-Zahl 150 mg KOH/g, bezogen auf die Lieferform → OH-EW 374 g/Äq.; Härter mit 16 Masse-% NCO → NCO-EW 262,5 g/Äq. Härter je 100 g Polyol = 262,5 / 374 · 100 = 70,2 g. Als Verhältnis: Polyol : Härter = 374 : 262,5 ≈ 1,42 : 1 (Massenteile) für NCO : OH ≈ 1 : 1.

In der Praxis wird oft mit einem leichten NCO-Überschuss gearbeitet, weil ein Teil des NCO mit Feuchtigkeit reagiert. Der Überschuss wird als NCO:OH-Verhältnis angegeben — in der PUR-Technik auch „Kennzahl“ oder „Index“ genannt: 1,0 ist stöchiometrisch, 1,1 bedeutet 10 % NCO-Überschuss, die Härtermenge wird dann mit 1,1 multipliziert (Fachrechner „NCO-Gehalt und PUR-Härtermenge“). Bezugsbasis beachten: Ist die OH-Zahl auf das Festharz bezogen, muss zuerst auf die Lieferform umgerechnet werden (siehe Bezugsbasis unten).

## Falsche Stöchiometrie beim PUR-Lack

• Zu wenig NCO → OH-Gruppen bleiben unverbraucht: geringere Vernetzungsdichte, weicherer Film, oft schlechtere Chemikalienbeständigkeit.
• Zu viel NCO → NCO-Überschuss reagiert mit Feuchtigkeit zu Harnstoffgruppen und $CO_2$: der Film kann je nach System härter und/oder spröder werden, in dicken Schichten ist Blasenbildung möglich.
Deshalb muss das NCO:OH-Verhältnis zum jeweiligen System passen.

## Epoxidwert und AHEW: die Kennzahlen des 2K-Epoxidlacks

Epoxidgruppen reagieren mit den aktiven Wasserstoffatomen des Aminhärters (N–H). Der Epoxidring öffnet sich, und Harz und Härter sind chemisch verbunden, vereinfacht:
$R–NH_2$ + Epoxidgruppe → $R–NH–CH_2–CH(OH)–R'$

Ein primäres Amin ($–NH_2$) trägt zwei aktive H-Atome und kann daher mit zwei Epoxidgruppen reagieren; ein sekundäres (–NH–) eines; ein tertiäres Amin hat keins.

## Epoxidwert E und Epoxidäquivalentgewicht EEW

Der Begriff Epoxidwert wird nicht einheitlich verwendet. Deshalb immer angeben, welche Definition und Einheit gemeint ist. In diesem Lernblatt gilt:
E = mol Epoxidgruppen je 100 g Harz (Einheit mol/100 g)
Beispiel: E = 0,50 mol/100 g → 100 g Harz enthalten rechnerisch 0,50 mol Epoxidgruppen.
Manche Datenblätter geben den Wert in mol/kg an; dann ist E(mol/kg) = 10 · E(mol/100 g), und es gilt EEW = 1 000 / E.

Epoxidäquivalentgewicht: Wie viel Gramm Harz enthalten 1 Äquivalent Epoxidgruppen?
EEW = 100 / E (E in mol/100 g)
Beispiel: E = 0,50 mol/100 g → EEW = 100 / 0,50 = 200 g/Äq. → 200 g Harz enthalten 1 Epoxidäquivalent. Für die Härterberechnung ist das EEW die entscheidende Größe; die Regel für alle Äquivalentgewichte gilt auch hier.

## H-Aktiv-Äquivalentgewicht AHEW

AHEW = Active Hydrogen Equivalent Weight, H-Aktiv-Äquivalentgewicht: Wie viel Gramm Härter liefern 1 Äquivalent reaktionsfähigen Wasserstoff (N–H)?

Für ein reines Amin: AHEW = molare Masse / Anzahl der aktiven H-Atome. Beispiel Isophorondiamin: M = 170,3 g/mol, zwei primäre Aminogruppen = 4 aktive H → AHEW = 170,3 / 4 ≈ 42,6 g/Äq. Bei technischen Härtern (Gemische, Addukte) steht das AHEW im Datenblatt. Achtung: Die dort ebenfalls angegebene Aminzahl in mg KOH/g ist nicht das AHEW.

## Härtermenge: Epoxidharz + Aminhärter

Theoretische Stöchiometrie 1 : 1: Epoxidäquivalente = H-Aktiv-Äquivalente.
Härter je 100 g Harz = AHEW / EEW · 100

Beispiel: EEW = 200 g/Äq., AHEW = 50 g/Äq. → Härter je 100 g Harz = 50 / 200 · 100 = 25 g; Harz : Härter = 4 : 1 → auf 400 g Harz kommen 100 g Härter (Fachrechner „Epoxidwert und Härtermenge“).

Falsche Stöchiometrie wirkt hier wie beim PUR-Lack: Zu wenig Härter → Unterhärtung, weicher Film; Aminüberschuss → freies Amin an der Oberfläche, das mit Feuchtigkeit und $CO_2$ aus der Luft reagiert und Oberflächenstörungen verursachen kann (Blushing).

## Bezugsbasis: Festharz oder Lieferform?

Eine Kennzahl kann auf das reine Festharz oder auf die Lieferform (Harz in Lösemittel) bezogen sein. Säurezahl, Verseifungszahl, Iodzahl, OH-Zahl und Epoxidwert werden häufig auf das Festharz bezogen, weil der Wert dann unabhängig von der Verdünnung vergleichbar ist. Der NCO-Gehalt eines Härters wird dagegen meist auf die Lieferform bezogen. Welche Bezugsbasis gilt, steht verlässlich nur im technischen Datenblatt; bei lösemittelfreien Rohstoffen (Öle, flüssige Epoxidharze) sind beide Werte gleich.

Ist eine Kennzahl auf Festharzbasis angegeben und man arbeitet mit einer Lösung, muss der Festkörpergehalt einbezogen werden — sonst wird das Lösemittel fälschlich als reaktive Masse gerechnet. Beispiel: Polyol mit OH-Zahl 150 mg KOH/g (Festharz), 60 % Festkörper. OH-Zahl der Lieferform = 150 · 0,60 = 90 mg KOH/g → OH-EW der Lieferform = 56 100 / 90 = 623 g/Äq. Auf 100 g Lieferform kommen mit dem Härter aus dem NCO:OH-Beispiel also nur 262,5 / 623 · 100 = 42,1 g Härter statt 70,2 g.

Achtung: Manche Lösemittel und Verdünner tragen selbst reaktive Gruppen — Alkohole verbrauchen NCO, Reaktivverdünner bringen Epoxidgruppen mit. Sie gehören dann in die Rechnung.

### Übersicht: Was bedeutet hoch, was niedrig?

• Säurezahl SZ (mg KOH/g): niedrig = wenig freie Säuregruppen · hoch = viele freie Säuregruppen
• Verseifungszahl VZ (mg KOH/g): niedrig = wenig Säure + Ester · hoch = viel Säure + Ester
• Esterzahl EZ = VZ − SZ (mg KOH/g): niedrig = geringerer rechnerischer Anteil an verseifbaren Estergruppen · hoch = höherer rechnerischer Anteil an verseifbaren Estergruppen
• Iodzahl IZ (g $I_2$/100 g): niedrig = wenig Doppelbindungen · hoch = viele Doppelbindungen
• NCO-Gehalt (Masse-%): niedrig = wenig NCO je Gramm, NCO-EW groß · hoch = viel NCO je Gramm, NCO-EW klein
• OH-Zahl (mg KOH/g): niedrig = wenig OH je Gramm, OH-EW groß · hoch = viel OH je Gramm, OH-EW klein
• Epoxidwert E (mol/100 g): niedrig = wenig Epoxidgruppen je Gramm, EEW groß · hoch = viele Epoxidgruppen je Gramm, EEW klein
• Äquivalentgewicht NCO-EW, OH-EW, EEW, AHEW (g/Äq.): niedrig = viele reaktive Gruppen je Gramm, wenig Masse nötig · hoch = wenige reaktive Gruppen je Gramm, viel Masse nötig

**Merksatz**

Zahl + Einheit + Bezugsbasis gehören zusammen. Ohne Bezugsbasis kann eine Kennzahl falsch interpretiert werden.
SZ hoch → mehr freie Säuregruppen → mehr Neutralisationsmittel. VZ zählt Säure und Ester; EZ = VZ − SZ zählt nur die Ester.
IZ hoch → mehr Doppelbindungen → mehr reaktive Stellen für die oxidative Trocknung — aber nicht automatisch schneller.
Kennzahl hoch → Äquivalentgewicht klein → weniger Masse für dieselbe Menge reaktiver Gruppen. Das gilt für NCO-Gehalt, OH-Zahl und Epoxidwert gleichermaßen.
Nicht nur die Zahl lernen — immer fragen: Was bedeutet ein hoher Wert, was ein niedriger, und was ändert sich dadurch in der Rezeptur?

**Stichwörter:** Säurezahl, Verseifungszahl, Esterzahl, Iodzahl, NCO-Gehalt, Isocyanatzahl, OH-Zahl, Hydroxylzahl, Epoxidwert, Epoxidäquivalentgewicht, EEW, AHEW, Äquivalentgewicht, Kennzahl, Bezugsbasis, Titration, Verseifung, Trocknungscharakter, Stöchiometrie
*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie*

## Übungsblatt Ü-08 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 6 Punkte)**
Definieren Sie die Säurezahl und nennen Sie ihre Bedeutung für die Formulierung.

**Definition:** Die Säurezahl ist die Masse an Kaliumhydroxid (KOH) in mg, die erforderlich ist, um die in 1 g der untersuchten Probe enthaltenen freien Säuren zu neutralisieren. Einheit: mg KOH/g. Zur Angabe gehört die Bezugsbasis: Gesamtprobe (Lieferform) oder Bindemittelfeststoff (Festharz).
**Bedeutung:** Freie Carboxylgruppen sind stark polar. Ein Harz mit hoher Säurezahl ist daher polarer und mit unpolaren Lackrohstoffen oft schlechter verträglich; außerdem bestimmt die Säurezahl den Neutralisationsbedarf und die Stöchiometrie. Eine hohe Säurezahl ist nicht grundsätzlich schlecht — bei wasserverdünnbaren Bindemitteln ist sie gewollt, weil erst die neutralisierten Säuregruppen das Harz wasserlöslich machen.
**Beispiel:** Kolophonium hat mit etwa 150 bis 180 mg KOH/g eine sehr hohe Säurezahl, die wesentlich zur begrenzten Verträglichkeit mit vielen anderen Lackrohstoffen beiträgt (siehe L-15).
*Bewertung: Definition mit Einheit und Bezugsbasis, Wirkprinzip und Zahlenbeispiel. Zahl + Einheit + Bezugsbasis gehören bei jeder Kennzahl zusammen — eine Definition ohne Bezugsbasis ist unvollständig.*

**Frage 2** **(Berechnung, 12 Punkte)**

2,00 g eines Alkydharzes (Festharz) werden mit 0,100 mol/L KOH titriert; der Verbrauch beträgt 8,4 mL. Die Verseifungszahl des Harzes liegt bei 180 mg KOH/g. a) Berechnen Sie die Säurezahl. b) Berechnen Sie daraus die Esterzahl. c) 100 g des Harzes sollen über die freien Säuregruppen mit einem Amin der Äquivalentmasse 89 g/Äq. neutralisiert werden — wie viel Amin ist theoretisch erforderlich?

**Gegeben:** m = 2,00 g; V = 8,4 mL; c(KOH) = 0,100 mol/L; M(KOH) = 56,1 g/mol; VZ = 180 mg KOH/g

**a) Schritt 1 — Stoffmenge KOH:** $n(KOH) = c \cdot V = 0{,}100\ mol/L \cdot 0{,}0084\ L = 8{,}4 \cdot 10^{-4}\ mol$

**a) Schritt 2 — Masse KOH:** $m(KOH) = n \cdot M = 8{,}4 \cdot 10^{-4}\ mol \cdot 56{,}1\ g/mol = 0{,}0471\ g = 47{,}1\ mg$

**a) Schritt 3 — Bezug auf 1 g:** SZ = 47,1 mg / 2,00 g = 23,6 mg KOH/g

**b) Esterzahl:** EZ = VZ − SZ = 180 − 23,6 = 156,4 mg KOH/g

**c) Freie Säuregruppen in 100 g:** 100 g · 23,6 mg/g = 2 360 mg = 2,360 g KOH-Äquivalent. n = 2,360 g / 56,1 g/mol = 0,0421 mol KOH — das entspricht 0,0421 Äq. Säuregruppen.

**c) Aminmenge:** Bei einem Amin-Äquivalent je Säureäquivalent: m(Amin) = 0,0421 Äq. · 89 g/Äq. = 3,74 g

**Antwortsatz:** SZ = 23,6 mg KOH/g, EZ = 156,4 mg KOH/g; theoretisch werden rund 3,74 g Amin benötigt. In der Praxis sind Reinheit, Lieferform und die tatsächliche Stöchiometrie zu berücksichtigen — läge die Säurezahl auf Festharzbasis vor und würde mit einer Lösung gearbeitet, müsste zuerst der Festkörpergehalt einbezogen werden.

*Bewertung: Der Weg über Stoffmenge und Masse ist sicher gegen Einheitenfehler; die Umrechnung von Milliliter in Liter wird ausdrücklich vollzogen — ein häufiger Fehlerpunkt. Teil b und c bauen auf dem in a berechneten Wert auf, ein Fehler in a wird deshalb nur einmal gewertet.*

**Frage 3** **(Anwendung, 8 Punkte)**

Ein Öl besitzt eine Iodzahl von 168 g $I_2$/100 g. Ordnen Sie den Trocknungscharakter nach der Faustregel des Lernblatts ein und erläutern Sie die Aussage der Iodzahl.

**Einordnung:** Nach der vereinfachten Einteilung „über 150 = meist trocknend“ liegt das Öl mit 168 deutlich im Bereich der trocknenden Öle.

**Aussage der Iodzahl:** Die Iodzahl ist ein Maß für die Ungesättigtheit und damit für die Anzahl der C=C-Doppelbindungen — an und neben diesen Doppelbindungen greift der Luftsauerstoff bei der oxidativen Härtung an.

**Einschränkung:** Sie ist aber kein vollständiger Prädiktor der Trocknungsgeschwindigkeit; Lage und Art der Doppelbindungen (isolierte oder konjugierte Doppelbindungen, siehe L-14), Ölstruktur, Sikkativierung, Temperatur, Sauerstoffzufuhr und Schichtdicke spielen ebenfalls eine Rolle. Hohe Iodzahl ≠ automatisch schnelle Trocknung.

*Bewertung: Die Einschränkung am Schluss ist der Punkt, der diese Antwort auszeichnet: Sie benennt die Grenze der Kennzahl. Solche Differenzierungen werden in der Abschlussprüfung Teil 2 erwartet.*

# L-09 · Glasübergangstemperatur

*Zustandsbereiche, Messung und Konsequenzen für den Lackfilm*

**Prüfungsteil 1** · A 8.3 · A 8.4 · A 10

Die Lage von Tg zur Gebrauchstemperatur entscheidet, ob ein Film weich und flexibel oder hart und sperrend ist.

## Die Zustandsbereiche

Erwärmt man einen amorphen Thermoplasten von sehr tiefer Temperatur ausgehend, durchläuft er nacheinander verschiedene Zustandsbereiche. Entscheidend ist dabei, wie beweglich die Polymerketten und ihre Kettensegmente sind.

Glaszustand: Bei sehr niedrigen Temperaturen ist die Beweglichkeit der Polymerketten stark eingeschränkt. Es treten hauptsächlich Schwingungen und lokale Rotationen einzelner Atome oder kleiner Atomgruppen auf; eine größere Bewegung von Kettensegmenten ist kaum möglich. Das Polymer ist hart, steif und häufig spröde: Unter Belastung kann es nur wenig durch Verformung nachgeben und bricht bei ausreichender Belastung. Mit steigender Temperatur nimmt die Beweglichkeit der Kettensegmente allmählich zu.

Glasübergangsbereich: Im Bereich der Glasübergangstemperatur Tg werden größere Abschnitte der Polymerketten beweglich — nicht schlagartig wie an einem Schmelzpunkt, sondern über einen Temperaturbereich (siehe unten). Das Material verliert zunehmend seine hohe Steifigkeit und wird weicher, zäher und verformbarer. Ein anschauliches Beispiel aus der Bautechnik ist Bitumen: Bei niedrigen Temperaturen ist es hart und kann spröde wirken beziehungsweise reißen. Bei höheren Temperaturen wird es zunehmend weich und verformbar. Der Übergang erfolgt nicht wie beim Schmelzen eines reinen Stoffes bei einer einzigen festen Temperatur, sondern über einen Temperaturbereich. Auch bei einem amorphen Polymer verändert sich die Beweglichkeit der Polymerketten im Bereich der Glasübergangstemperatur Tg deutlich. Dadurch können sich Eigenschaften wie Härte, Flexibilität, Zähigkeit und Dämpfung mit der Temperatur verändern. Für einen Lackfilm ist deshalb nicht nur der Zahlenwert der Tg wichtig. Entscheidend ist auch die Lage der vorgesehenen Gebrauchstemperatur im Verhältnis zum Glasübergangsbereich.

Gummielastischer bzw. viskoelastischer Bereich: Oberhalb des Glasübergangs können sich die Kettensegmente deutlich gegeneinander bewegen. Das Polymer verhält sich viskoelastisch: Unter Belastung verformt es sich und kehrt nach Entlastung teilweise in seine ursprüngliche Form zurück (Entropieelastizität, siehe L-11). Bei einem unvernetzten Thermoplasten beginnen die Ketten mit steigender Temperatur zunehmend aneinander abzugleiten.

Fließbereich: Bei noch höheren Temperaturen wird ein amorpher Thermoplast zähflüssig und schließlich schmelzfähig; die Polymerketten bewegen sich großräumig gegeneinander. Diesen Bereich nutzt die Kunststoffverarbeitung (Spritzgießen, Extrudieren) — und der Pulverlack: Im Einbrennofen muss das Pulver aufschmelzen und verlaufen, bevor die Vernetzung einsetzt (siehe L-90). Noch weiter erhitzt, zersetzt sich das Polymer — sieden kann ein Polymer nicht.

## Besonderheit der Duroplaste

Bei Duroplasten ist die Situation grundsätzlich anders: Während der Aushärtung werden die Polymerketten durch chemische Bindungen zu einem dreidimensionalen Netzwerk vernetzt (siehe L-03). Nach vollständiger Vernetzung können die Ketten nicht mehr wie bei einem Thermoplasten gegeneinander fließen — Duroplaste besitzen deshalb keinen Schmelzbereich. Beim Erwärmen durchlaufen sie zwar ebenfalls den Glasübergang und werden oberhalb Tg weicher und viskoelastischer; das Netzwerk verhindert jedoch ein Aufschmelzen und Fließen. Bei weiterer starker Erwärmung zersetzt sich der Duroplast, bevor er schmilzt (vgl. L-04).

## Was Tg ist und was nicht

Der Übergangsbereich vom hart-spröden in den weichen Zustand heißt Erweichungs- oder Einfrierbereich, allgemein Glasübergangsbereich. Ihm wird die Glasübergangstemperatur Tg zugeordnet. Sie ist physikalisch-chemisch nicht eindeutig definierbar und damit nicht scharf fixierbar sowie von Messmethode und Auswertedefinition abhängig; der Glasübergang ist keine Phasenumwandlung erster Ordnung, sondern ein gleitender Prozess. Erkennbar wird er unter anderem an der Zunahme des spezifischen Volumens — oberhalb Tg wächst es stärker als darunter, weil die erwachenden Segmentschwingungen freies Volumen schaffen. Gemessen wird Tg üblicherweise kalorimetrisch mit der DSC oder über die thermische Ausdehnung (TMA bzw. Dilatometrie); siehe L-160.

## Messmethoden

- Thermomechanische Analyse (TMA) über die Dimensionsänderung bzw. thermisch induzierte Verformung unter definierter Belastung
- Dynamisch-mechanische Analyse über Elastizitäts- beziehungsweise Schubmodul
- Differential Scanning Calorimetry (DSC) über die spezifische Wärmekapazität

## Was die Fox-Gleichung leistet

Mischt man beim Polymerisieren ein „hartes“ Monomer (hohe eigene Tg, z. B. Methylmethacrylat oder Styrol) mit einem „weichen“ (niedrige Tg, z. B. Butylacrylat), liegt die Tg des Copolymers dazwischen (vgl. die statistischen Copolymere in L-04). Die Fox-Gleichung schätzt diese Misch-Tg aus den Massenanteilen und den Tg-Werten der reinen Homopolymere ab. So legt man über das Monomerverhältnis gezielt fest, ob der Film eher hart wird (gute Blockfestigkeit, Schleifbarkeit) oder eher weich und flexibel.

Zwei Dinge sind wichtig: Erstens müssen alle Tg-Werte in Kelvin eingesetzt werden (°C + 273,15) — mit Celsius liefert die Gleichung falsche Werte. Zweitens ist die Gleichung eine Näherung für Copolymere und für kompatible, einphasige Mischungen verschiedener Filmbildner; sie unterstellt ideales Mischen. Bei inkompatiblen, mehrphasigen Mischungen können dagegen zwei getrennte Glasübergänge auftreten statt eines gemeinsamen — dann versagt die einfache Fox-Abschätzung, und der gemessene Wert kann auch bei kompatiblen Systemen etwas abweichen.

## Fox-Gleichung

```
1 / Tg = wA / TgA + wB / TgB + …

Tg = Glasübergangstemperatur (alle Temperaturen in Kelvin), w = Massenanteile der
   Komponenten.
Gilt als Näherung für Copolymerisate und für kompatible, einphasige Mischungen
   verschiedener Filmbildner. Bei inkompatiblen (mehrphasigen) Mischungen können mehrere
   Glasübergänge auftreten.
```

## Tg im Verhältnis zur Gebrauchstemperatur

Die Lage der Glasübergangstemperatur Tg zur vorgesehenen Gebrauchstemperatur beeinflusst wesentlich die mechanischen Eigenschaften eines Lackfilms. Je näher die Gebrauchstemperatur am Glasübergangsbereich liegt, desto stärker können sich Härte, Elastizität, Flexibilität und Dämpfung mit der Temperatur verändern.

Tg deutlich oberhalb der Gebrauchstemperatur: Der Lackfilm befindet sich überwiegend im glasartigen Bereich. Er ist meist hart und steif und kann eine gute Barrierewirkung gegenüber Wasser und anderen Stoffen aufweisen. Nachteilig können eine höhere Sprödigkeit und geringere Flexibilität sein. Bei großen Temperaturänderungen können innere Spannungen entstehen. Je nach Bindemittel und Vernetzungszustand können Restlösemittel langsamer freigesetzt werden. Liegt der gesamte Gebrauchstemperaturbereich ausreichend weit unterhalb der Tg, verändern normale Temperaturschwankungen die mechanischen Eigenschaften meist vergleichsweise wenig.
Praxisbeispiel: Ein hart vernetzter 2K-PUR-Klarlack oder ein harter Einbrennlack auf einem Metallbauteil hat meist eine Tg deutlich über der Raumtemperatur. Der Film ist dann hart, steif, gut blockfest und kratzbeständig — genau das gewünschte Profil. Bei sehr niedrigen Temperaturen kann jedoch die Sprödigkeit zunehmen und die Flexibilität abnehmen.

Tg nahe der Gebrauchstemperatur: Hier verändert sich die Segmentbeweglichkeit der Polymerketten besonders stark. Schon relativ kleine Temperaturänderungen können Modul, Härte, Flexibilität und Dämpfung deutlich verändern. Bei niedrigen Temperaturen kann der Film härter und spröder, bei höheren Temperaturen dagegen weicher und verformbarer werden. Eine mögliche Folge ist eine verringerte Blockfestigkeit: Beim Stapeln beschichteter Teile oder beim Kontakt beschichteter Flächen kann die Oberfläche bei erhöhter Temperatur stärker zum Kleben neigen. Auch die Schmutzaufnahme und andere mechanische Eigenschaften können sich verändern. Gleichzeitig ist die Dämpfung im Bereich des Glasübergangs besonders hoch. Dies kann bei bestimmten Anwendungen erwünscht sein, beispielsweise bei Antidröhn- oder Steinschlagschutzbeschichtungen.
Praxisbeispiel: Ein Lackfilm mit Tg = 40 °C wird bei 20 bis 60 °C eingesetzt. Bei 20 °C liegt er unterhalb der Tg und ist relativ hart. Werden beschichtete Kunststoffteile gestapelt und in einem warmen Lager oder Fahrzeug auf 50 bis 60 °C erwärmt, nimmt die Segmentbeweglichkeit deutlich zu: Der Film wird weicher, kann sich verformen und neigt zum Kleben — die Blockfestigkeit sinkt.

Tg deutlich unterhalb der Gebrauchstemperatur: Der Lackfilm befindet sich überwiegend im gummielastischen bzw. segmentbeweglicheren Bereich. Typisch sind eine höhere Flexibilität und geringere Steifigkeit. Je nach Bindemittel und Vernetzungsgrad können Härte, Blockfestigkeit und Schleifbarkeit geringer sein. Auch die Barriereeigenschaften können sich verändern, weil eine höhere Segmentbeweglichkeit den Transport bestimmter Stoffe durch den Film erleichtern kann. Die Wasseraufnahme hängt zusätzlich vom Bindemittel und seiner Polarität ab und lässt sich daher nicht allein aus der Lage der Tg ableiten.
Praxisbeispiel: Ein frischer Langölalkydlack hat eine relativ niedrige Tg; bei 20 °C liegt der Film deutlich oberhalb davon. Dadurch bleibt er flexibel und macht Bewegungen des Untergrunds mit — erwünscht auf Holz und anderen Untergründen, die sich mit Temperatur und Feuchte bewegen; ein zu harter, spröder Film würde reißen oder abplatzen. Dafür können Härte, Blockfestigkeit und Schleifbarkeit geringer sein als bei einem stärker vernetzten System mit höherer Tg.

## Was bedeutet das für die Lackformulierung?

Die Auswirkungen sind nicht automatisch „riesig“. Entscheidend ist, wie weit die Gebrauchstemperatur vom Glasübergangsbereich entfernt liegt und welche weiteren Eigenschaften die Beschichtung besitzt. Bei der Formulierungsentwicklung wird die Tg deshalb meist so eingestellt, dass der vorgesehene Gebrauchstemperaturbereich ausreichend weit vom Glasübergangsbereich entfernt liegt — außer die Eigenschaften des Übergangsbereichs werden gezielt genutzt.

## Beispiele aus der Lackpraxis

• Langölalkydlack — flexibel, relativ weich; eher niedrige Tg, bei Raumtemperatur meist deutlich oberhalb der Tg
• 2K-PUR-Beschichtung — hart, chemikalienbeständig, mechanisch belastbar; häufig höhere Tg, abhängig von Bindemittel und Vernetzung
• 2K-Epoxidharzlack — hart, fest, gute Haftung und Beständigkeit; Tg stark von Harz, Härter und Vernetzungsgrad abhängig
• Einbrennlack — meist hart und gut vernetzt; Tg und Vernetzungsdichte beeinflussen Härte und Temperaturbeständigkeit
• Flexible Beschichtung — elastisch, dehnfähig; niedrigere Tg kann gewünscht sein
• Antidröhn-/Steinschlagschutz — hohe Dämpfung, flexible Schicht; Eigenschaften nahe bzw. oberhalb des Glasübergangs werden gezielt genutzt

Die Übersicht zeigt Tendenzen, keine festen Tg-Werte — die Einflussgrößen stehen unter „Womit sich die Glasübergangstemperatur Tg beeinflussen lässt“.

## Gibt es temperaturrobuste Formulierungen?

Eine Beschichtung ist nie vollständig temperaturunabhängig. Vergleichsweise unempfindlich gegenüber normalen Temperaturschwankungen ist sie, wenn der vorgesehene Gebrauchstemperaturbereich ausreichend weit von der Tg entfernt liegt. Bei stark vernetzten Beschichtungen, beispielsweise vielen Duroplasten, wird das mechanische Verhalten allerdings nicht allein durch die Tg bestimmt. Auch Vernetzungsdichte, Netzwerkstruktur, Bindemittelaufbau, Pigmentierung und weitere Formulierungsbestandteile wirken mit. Auch solche Filme bleiben daher temperaturabhängig.

## Ein einfaches Zahlenbeispiel

Zwei miteinander mischbare Polymerkomponenten haben Tg = +80 °C (Komponente 1) und Tg = −20 °C (Komponente 2); die Mischung enthält 70 Massen-% Komponente 1 und 30 Massen-% Komponente 2. Fox-Gleichung, Temperaturen in Kelvin:
Tg1 = 353,15 K; Tg2 = 253,15 K
1/Tg = 0,70/353,15 + 0,30/253,15 → Tg ≈ 315,7 K ≈ +42,6 °C

Bei 20 °C liegt die Mischung unterhalb ihrer Tg und verhält sich überwiegend glasartig. Bei 60 °C liegt sie oberhalb ihrer Tg; die Segmentbeweglichkeit ist dann deutlich höher und der Film typischerweise weicher und flexibler. Das Beispiel zeigt: Nicht „unterhalb“ oder „oberhalb“ allein ist entscheidend, sondern wie weit die Gebrauchstemperatur vom Glasübergangsbereich entfernt ist. Die Fox-Gleichung liefert dabei nur eine Näherung – reale Lackfilme können insbesondere durch Vernetzung, Mischungswechselwirkungen, Weichmacher, Pigmente und weitere Formulierungsbestandteile davon abweichen.

**Merksatz**

Gebrauchstemperatur weit unter Tg → eher hart und steif. Nahe Tg → Eigenschaften ändern sich stark mit der Temperatur. Weit über Tg → eher weich und flexibel.
Aber: Tg ist kein alleiniger Schalter für „hart“ oder „weich“ — Vernetzungsgrad, Polymerstruktur und die gesamte Formulierung bestimmen die tatsächlichen Eigenschaften mit.
Thermoplast: Erwärmen → Glaszustand → Glasübergang → weich/viskoelastisch → Fließen bzw. Schmelzen.
Duroplast: Erwärmen → Glaszustand → Glasübergang → gummielastisch/viskoelastisch → bei starker Erwärmung Zersetzung statt Schmelzen. Die Vernetzung verhindert das freie Fließen der gesamten Polymerstruktur.

## Womit sich die Glasübergangstemperatur Tg beeinflussen lässt

Die Tg eines Polymers wird vor allem durch die Beweglichkeit der Polymerketten und die zwischenmolekularen Wechselwirkungen bestimmt.

Tg steigt durch:

- höhere Polarität und stärkere zwischenmolekulare Wechselwirkungen, z. B. durch Wasserstoffbrückenbindungen
- eine steifere und regelmäßigere Polymerstruktur
- kurze, starre Strukturelemente in oder nahe der Hauptkette
- unflexible Co-Monomere
- höhere Vernetzungsdichte, da die Beweglichkeit der Ketten eingeschränkt wird
- eine Erhöhung der molaren Masse, vor allem bei niedrigen molaren Massen

Tg sinkt durch:

- flexible Co-Monomere bzw. flexible Strukturelemente („innere Weichmachung“)
- lange, flexible Seitenketten, die die Beweglichkeit erhöhen
- bestimmte Verzweigungen, sofern sie die freie Kettenbeweglichkeit erhöhen
- zugesetzte (äußere) Weichmacher, sofern sie mit dem Bindemittel verträglich sind (siehe L-48)

Kurz: Je stärker die Beweglichkeit der Polymerketten eingeschränkt wird, desto höher liegt meist die Tg; je beweglicher die Ketten, desto niedriger.

## Welche Tg wird angestrebt? Beispiel 2K-PUR-Decklack

Ein Beispielwert: Ein reines Polymethylmethacrylat hat eine Tg von etwa 105 °C, ein Poly(n-butylacrylat) dagegen etwa −54 °C; je nach Quelle und Messmethode werden Werte zwischen −54 und −45 °C tabelliert. Die riesige Spanne zwischen beiden Monomeren zeigt, wie stark die Monomerwahl die Tg bestimmt (siehe Fox-Gleichung oben). Für Rechnungen nach Fox ist durchgängig die Tg-Tabelle einer einzigen Quelle zu verwenden, weil die Herstellerangaben um einige Kelvin voneinander abweichen.

Für einen hochwertigen 2K-PUR-Decklack (siehe L-25) strebt man üblicherweise eine Tg an, die spürbar oberhalb der üblichen Gebrauchstemperatur liegt, aber nicht extrem hoch: Ein Zielkorridor von grob 40 bis 70 °C ist in der Praxis verbreitet. Das liegt bei Zimmer- und gemäßigten Außentemperaturen im glasartigen Bereich — das ergibt die gewünschte Härte, Kratz- und Chemikalienbeständigkeit eines Decklacks. Gleichzeitig soll die Tg nicht zu weit darüber liegen, damit der Film bei tiefen Temperaturen (Winter, Steinschlag) nicht übermäßig spröde und schlagempfindlich wird. Die konkrete Ziel-Tg hängt vom OH-Bindemittel, dem Härtertyp und der gewünschten Eigenschaftsbalance ab (siehe L-27) — es gibt keine feste Idealzahl für alle 2K-PUR-Systeme.

**Stichwörter:** Glasübergangstemperatur, Tg, Glasübergangsbereich, Einfrierbereich, Fließtemperatur, freies Volumen, spezifisches Volumen, DSC, TMA, DMA, Fox, innere Weichmachung, Weichmacher, Blockfestigkeit, temperaturrobust, Zustandsbereiche, Glaszustand, Fließbereich, Duroplast, Thermoplast

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie*

## Übungsblatt Ü-09 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Erläutern Sie, welche Eigenschaften ein Lackfilm typischerweise aufweist, wenn seine Glasübergangstemperatur deutlich unterhalb, nahe beziehungsweise deutlich oberhalb der Gebrauchstemperatur liegt.

**Tg deutlich unterhalb der Gebrauchstemperatur:** Der Film ist stärker segmentbeweglich und typischerweise weicher und flexibler; Härte und Blockfestigkeit fallen geringer aus.

**Tg nahe der Gebrauchstemperatur:** Der ungünstigste Fall: Schon kleine Temperaturänderungen verschieben Modul, Härte und Dämpfung deutlich.

**Tg deutlich oberhalb der Gebrauchstemperatur:** Der Film ist eher glasartig, hart und formstabil, tendenziell aber spröder.

**Einschränkung:** Die konkreten Eigenschaften hängen zusätzlich von Polymerstruktur, Vernetzung, Pigmentierung und weiteren Formulierungsfaktoren ab.

*Bewertung: Alle drei Lagen werden unterschieden statt nur der einfachen Zweiteilung unterhalb/oberhalb, und die Einschränkung am Schluss verhindert eine zu pauschale Aussage.*

**Frage 2** **(Berechnung, 12 Punkte)**

Eine homogene, kompatible Polymermischung besteht aus 60 Massen-% Komponente A (Tg = +90 °C) und 40 Massen-% Komponente B (Tg = −30 °C). a) Berechnen Sie die Tg der Mischung mit der Fox-Gleichung. b) Beurteilen Sie das Verhalten bei 20 °C und bei 60 °C. c) Erklären Sie, warum die Unterschiede der Filmeigenschaften unterhalb und oberhalb der Tg nicht immer gleich groß sind.

**Ansatz:** 1/Tg = wA/TgA + wB/TgB, alle Temperaturen in Kelvin

**a) Umrechnung:** TgA = 90 + 273,15 = 363,15 K; TgB = −30 + 273,15 = 243,15 K

**a) Rechnung:** 1/Tg = 0,60/363,15 + 0,40/243,15 = 0,003297 $K^{-1}$ → Tg = 303,3 K = 30,1 °C

**b) Bei 20 °C:** Die Gebrauchstemperatur liegt rund 10 K unter Tg: Der Film ist bereits eher glasartig, befindet sich aber noch im Bereich nahe Tg, in dem sich Modul und Härte mit der Temperatur stark ändern (vgl. Frage 1).

**b) Bei 60 °C:** Die Gebrauchstemperatur liegt oberhalb Tg; die Segmentbeweglichkeit ist deutlich höher und der Film typischerweise weicher/flexibler.

**c) Erklärung:** Tg ist ein Übergangsbereich und kein harter Schaltpunkt. Besonders nahe Tg ändern sich mechanische Eigenschaften stark. Je weiter die Gebrauchstemperatur von diesem Übergangsbereich entfernt ist, desto geringer kann die Änderung bestimmter Eigenschaften bei einer zusätzlichen kleinen Temperaturänderung ausfallen.

*Bewertung: Didaktischer Check: Die Aufgabe verbindet Formelrechnung mit einer unmittelbaren lacktechnologischen Interpretation. Sie ist damit anspruchsvoller als eine reine Fox-Rechnung, bleibt aber vollständig im zuvor vermittelten Stoff.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**

Nennen Sie drei Möglichkeiten, die Tg eines Filmbildners gezielt abzusenken, und nennen Sie jeweils die strukturelle Ursache.

**Erste Möglichkeit:** Anteil eines flexiblen Co-Monomers erhöhen → höhere Segmentbeweglichkeit (innere Weichmachung).

**Zweite Möglichkeit:** Flexible beziehungsweise längere Seitenketten einbauen → geringere Packungsdichte und höhere Beweglichkeit.

**Dritte Möglichkeit:** Vernetzungsgrad reduzieren → geringere Einschränkung der Kettenbewegung; ebenso wirkt eine Verringerung der molaren Masse.

**Ergänzung:** Auch ein kompatibler Weichmacher kann die Tg eines Polymermaterials absenken, sofern er mit dem System verträglich und dauerhaft wirksam ist — im Unterschied zur inneren Weichmachung wird er jedoch nicht chemisch eingebaut.

*Bewertung: Drei Möglichkeiten mit jeweils der molekularen Begründung. Die Ergänzung um den externen Weichmacher grenzt diesen sauber von der inneren Weichmachung ab.*

# L-10 · Viskosität von Lacken und Polymerlösungen

*Dynamische, kinematische und relative Viskosität, Einflussgrößen und praktische Messung*

**Prüfungsteil 1** · A 7.1

Die Viskosität einer Polymerlösung wird nicht nur vom Bindemittel bestimmt. Sie hängt unter anderem von Polymerkonzentration, Molmasse, Lösemittel und Temperatur ab. Im Mittelpunkt stehen die dynamische Viskosität η, die kinematische Viskosität ν und die relative Viskosität ηrel.

## Dynamische Viskosität η

Die dynamische Viskosität η beschreibt den Widerstand eines Fluids gegen eine Scherbewegung. Vereinfacht gesagt ist sie ein Maß dafür, wie zähflüssig ein Material ist.

Einheit: SI-Einheit Pa·s; in der Lackpraxis häufig mPa·s. Es gilt 1 Pa·s = 1 000 mPa·s. Ältere Angaben verwenden teilweise cP (Centipoise): 1 cP = 1 mPa·s. Zum Vergleich: Wasser besitzt bei 20 °C etwa 1 mPa·s.

Für eine newtonsche Flüssigkeit gilt: $\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}$ ($\tau$ = Schubspannung, $\eta$ = dynamische Viskosität, $\dot{\gamma}$ = Schergeschwindigkeit). Bei konstanter Temperatur ist η bei einer newtonschen Flüssigkeit unabhängig von der Schergeschwindigkeit.

Merke: Je höher η ist, desto größer ist der Widerstand gegen die Scherung und desto zähflüssiger ist das Material.

## Kinematische Viskosität ν

Die kinematische Viskosität ν ist die dynamische Viskosität geteilt durch die Dichte: $\nu = \eta / \rho$. Einheit: $m^2/s$, in der Praxis $mm^2/s$ (ältere Angaben in cSt, Centistokes: 1 cSt = 1 $mm^2/s$). Sie beschreibt, wie eine Flüssigkeit unter ihrem eigenen Gewicht fließt — deshalb ist sie die Größe hinter allen Verfahren, bei denen die Flüssigkeit durch die Schwerkraft ausläuft: Auslaufbecher und Kapillarviskosimeter liefern zunächst ν; die dynamische Viskosität folgt daraus mit $\eta = \nu \cdot \rho$.

Beispiel: Ein Lack mit η = 450 mPa·s und ρ = 1,2 $g/cm^3$ hat ν = 450 / 1,2 = 375 $mm^2/s$. Wasser: η ≈ 1 mPa·s, ρ ≈ 1 $g/cm^3$ → ν ≈ 1 $mm^2/s$.

Merke: Zwei Flüssigkeiten mit gleicher dynamischer Viskosität, aber verschiedener Dichte laufen verschieden schnell aus dem Becher — die schwerere schneller.

## Viskosität von Polymerlösungen

Die Viskosität einer Polymerlösung wird insbesondere beeinflusst durch:

- Polymerkonzentration
- Molmasse und Molekülgestalt
- Polymer-Lösemittel-Wechselwirkung bzw. Lösemittelwahl
- Temperatur
- bei nichtnewtonschen Systemen zusätzlich Schergeschwindigkeit

Polymerkonzentration: Mit zunehmender Polymerkonzentration steigt die Viskosität in der Regel an. Bei höherer Konzentration befinden sich mehr Polymerketten im gleichen Volumen; ihre gegenseitige Behinderung nimmt zu.

Molmasse: Bei vergleichbarer Polymerkonzentration führt eine höhere Molmasse häufig zu einer höheren Lösungsviskosität. Längere Polymerketten können sich stärker verschlaufen und gegenseitig behindern. Der Einfluss hängt aber auch von Polymerstruktur, Konzentration und Polymer-Lösemittel-Wechselwirkung ab.

## Relative Viskosität ηrel

Die relative Viskosität vergleicht die Viskosität einer Polymerlösung mit der Viskosität des reinen Lösemittels:
$\eta_{rel} = \eta / \eta_0$
η = Viskosität der Polymerlösung; $\eta_0$ = Viskosität des reinen Lösemittels. Beide Werte müssen bei gleicher Temperatur und unter vergleichbaren Messbedingungen bestimmt werden. ηrel ist dimensionslos.

Bedeutung: ηrel = 1: gleiche Viskosität; ηrel > 1: das Polymer erhöht die Viskosität. Je größer ηrel, desto stärker ist die Viskosität der Lösung gegenüber dem reinen Lösemittel erhöht.

Beispiel: η = 2,4 mPa·s und $\eta_0$ = 0,60 mPa·s → ηrel = 4,0. Die Polymerlösung besitzt die vierfache Viskosität des reinen Lösemittels.

## Relative Viskosität im Kapillarviskosimeter

Bei einer Kapillarmessung misst die Durchlaufzeit die kinematische Viskosität; für ηrel braucht man deshalb die Dichten. Unter gleichen und geeigneten Messbedingungen gilt näherungsweise:
$\eta_{rel} = (t \cdot \rho) / (t_0 \cdot \rho_0)$
t = Durchlaufzeit der Lösung; $t_0$ = Durchlaufzeit des Lösemittels; ρ = Dichte der Lösung; $\rho_0$ = Dichte des Lösemittels. Sind die Dichten nahezu gleich, kann näherungsweise $\eta_{rel} \approx t / t_0$ verwendet werden.

## Praktische Viskositätsmessung

Auslaufbecher: Gemessen wird die Auslaufzeit einer definierten Flüssigkeitsmenge durch eine genormte Düse. Je länger die Auslaufzeit, desto zähflüssiger ist das Material. Die Auslaufzeit in Sekunden ist jedoch nicht selbst die dynamische Viskosität. Für geeignete, annähernd newtonsche Flüssigkeiten kann daraus unter den Normbedingungen die kinematische Viskosität ν bestimmt werden (siehe oben). DIN EN ISO 2431 beschreibt Auslaufbecher mit Düsen von 3, 4, 5 und 6 mm; gemessen wird bei (23 ± 0,5) °C. Der geeignete Becher wird so gewählt, dass die Auslaufzeit im vorgesehenen Bereich liegt; in der Praxis werden häufig etwa 30 bis 100 s angestrebt (Fachrechner „Auslaufbecher Soll/Ist“). Bei stark nichtnewtonschen Materialien ist die Aussagekraft eingeschränkt. Bei strukturviskosen beziehungsweise thixotropen Lacken kann der Zustand des Materials die Messung deutlich beeinflussen: Ein frisch aufgerührter Lack kann beispielsweise eine kürzere Auslaufzeit zeigen als derselbe Lack nach einer definierten Standzeit. Deshalb müssen bei vergleichenden Messungen die Vorbehandlung, Rührbedingungen und Wartezeit möglichst gleich gehalten werden. Auch die Temperatur muss kontrolliert werden, weil die Viskosität stark temperaturabhängig sein kann. Ein Auslaufbecher liefert dabei unter festgelegten Bedingungen eine Auslaufzeit, die für die praktische Beurteilung und den Vergleich von Lacken genutzt werden kann.

Rotationsviskosimeter: Bestimmt wird das Drehmoment, das erforderlich ist, um einen Messkörper mit definierter Geschwindigkeit in der Probe zu bewegen. Damit können Viskositätswerte bei unterschiedlichen Schergeschwindigkeiten bestimmt und nichtnewtonsche Fließeigenschaften untersucht werden. Im Oszillationsverfahren wird der Messkörper nicht gedreht, sondern mit kleiner Amplitude hin- und herbewegt; so lässt sich die innere Struktur eines Lacks — etwa der Wiederaufbau nach dem Rühren bei thixotropen Systemen — verfolgen, ohne sie durch die Messung zu zerstören.

Kapillarviskosimeter: Gemessen wird die Durchlaufzeit einer Flüssigkeit durch eine Kapillare. Aus der Durchlaufzeit wird unter den festgelegten Mess- und Kalibrierbedingungen die Viskosität bzw. bei Polymerlösungen die entsprechende Viskositätskennzahl bestimmt. Das Verfahren eignet sich besonders für niedrigviskose, annähernd newtonsche Flüssigkeiten und verdünnte Polymerlösungen.

## Niedrige und hohe Viskosität in der Lackpraxis

Niedrige Viskosität: Das Material fließt leicht. Das kann den Verlauf und die Verteilung erleichtern, erhöht aber die Gefahr des Ablaufens an senkrechten Flächen.

Hohe Viskosität: Das Material fließt schwerer. Mögliche Folgen sind schlechterer Verlauf, höherer Strömungswiderstand und beim Spritzen erschwerte Zerstäubung.

Wichtig: Es gibt keine allgemein richtige Viskosität. Die erforderliche Viskosität hängt von Lacksystem, Auftragverfahren, Festkörpergehalt, Schichtdicke und Verarbeitungsbedingungen ab.

## Fließverhalten und Fließkurven

Beim Lagern, Pumpen, Rühren, Auftragen und Spritzen wirken unterschiedliche Scherbedingungen. Eine Fließkurve beschreibt den Zusammenhang zwischen Schubspannung τ und Schergeschwindigkeit γ̇.

- Newtonsch: η bleibt bei konstanter Temperatur unabhängig von der Schergeschwindigkeit.
- Strukturviskos bzw. scherverdünnend: Die Viskosität nimmt mit steigender Schergeschwindigkeit ab. Das kann bei Lacken erwünscht sein: bei hoher Scherung niedrigere Viskosität, nach dem Auftrag bei niedriger Scherung höhere Viskosität.
- Dilatant bzw. scherverdickend: Die Viskosität nimmt mit steigender Schergeschwindigkeit zu. Dieses Verhalten kann beispielsweise bei hochgefüllten Systemen auftreten.
- Thixotrop: Die Viskosität nimmt unter Scherung ab und baut sich nach Verringerung oder Beendigung der Scherung zeitabhängig wieder auf.

Prüfungsfalle: Scherverdünnung ist nicht automatisch Thixotropie. Thixotropie enthält zusätzlich die Zeitabhängigkeit des Strukturabbaus und -wiederaufbaus. Ein scherverdünnendes System kann also ohne thixotropen Zeitaufbau vorliegen.

## Thixotropie gezielt einstellen — Vorteile und Nachteile

Ziel: Ein Lack soll sich unter Scherung gut verarbeiten lassen und nach dem Auftrag ausreichend standfest sein.

Vorteile: besseres Standvermögen, höhere mögliche Nassfilmdicke, geringere Sedimentationsneigung bei geeigneter Struktur.

Nachteile einer zu starken Struktur: schlechterer Verlauf, höherer Aufrührаufwand, mögliche Lufteinschlüsse und erschwerte Verarbeitung. Eingestellt wird die Struktur mit rheologischen Additiven wie pyrogener Kieselsäure (siehe L-46).

## Einfluss des Lösemittels

Das Lösemittel beeinflusst die Lösungsviskosität auf mehreren Wegen. Seine eigene Viskosität trägt zum Gesamtverhalten bei. Außerdem beeinflussen Polarität, Lösungsvermögen und Wechselwirkungen zwischen Lösemittel und Polymer die Ausbildung von Polymerketten-Assoziaten (siehe L-07).

Bei Bindemitteln mit OH- oder COOH-Gruppen können Wasserstoffbrücken zwischen Polymergruppen zur Viskosität beitragen. Ein geeignetes Lösemittel kann solche Wechselwirkungen abschwächen bzw. Polymerketten besser solvatisieren und dadurch die Viskosität senken. Ein ungeeignetes Lösemittel kann dagegen zu schlechter Solvatation, Assoziation oder im Extremfall zu Löslichkeitsproblemen führen.

Merke: Ein Lösemittel mit niedriger Eigenviskosität führt nicht automatisch zur niedrigsten Lackviskosität; entscheidend ist das Zusammenspiel von Lösemittel und Bindemittel.

## Einfluss der Temperatur

Die Viskosität ist stark temperaturabhängig: Temperatur steigt → Viskosität sinkt in der Regel; Temperatur sinkt → Viskosität steigt in der Regel. Deshalb muss ein Viskositätswert immer zusammen mit der Messtemperatur angegeben werden.

Der Zusammenhang ist nicht linear. Als grobe Praxisregel kann bei vielen Lacklösemitteln und -bindemitteln eine deutliche Viskositätsabnahme mit steigender Temperatur beobachtet werden; die oft verwendete Faustregel „etwa halbierte Viskosität je 10 bis 15 °C“ ist nur eine grobe Näherung und kein Naturgesetz. Die tatsächliche Temperaturabhängigkeit muss für das jeweilige System bestimmt werden.

Beim Heißspritzen wird diese Temperaturabhängigkeit gezielt genutzt: Durch Erwärmen kann die Verarbeitungsviskosität sinken, ohne den Lack durch zusätzliche Lösemittelzugabe zu verdünnen. Dabei müssen jedoch auch Lösemittelverdunstung, Topfzeit, Trocknung und Arbeitssicherheit berücksichtigt werden.

**Merksatz**

Bei welcher Temperatur wurde gemessen? Welches Messverfahren beziehungsweise welcher Becher wurde verwendet? Wurde der Lack vor der Messung immer gleich behandelt? Ist der Lack annähernd newtonsch oder zeigt er strukturviskoses beziehungsweise thixotropes Verhalten? Passt das gemessene Fließverhalten zum vorgesehenen Auftragsverfahren und zur gewünschten Schichtdicke?
Dynamische Viskosität η: Maß für den Widerstand eines Fluids gegen Scherung, in der Lackpraxis häufig in mPa·s. Relative Viskosität $\eta_{rel} = \eta / \eta_0$: Verhältnis der Viskosität einer Lösung zur Viskosität des reinen Lösemittels unter vergleichbaren Messbedingungen. Kinematische Viskosität $\nu = \eta / \rho$: dynamische Viskosität geteilt durch die Dichte.
Vereinfachte Lacklabor-Regeln: Höhere Polymerkonzentration → meist höhere Viskosität. Höhere Molmasse → häufig höhere Lösungsviskosität. Höhere Temperatur → bei vielen Lacken niedrigere Viskosität. Stärkere Scherung → kann bei strukturviskosen oder thixotropen Lacken zu einer scheinbaren Viskositätsabnahme führen.
Wichtig: Ein Viskositätswert ist nur sinnvoll vergleichbar, wenn Temperatur und Messverfahren bekannt sind. Bei nichtnewtonschen Lacken müssen zusätzlich die Schergeschwindigkeit beziehungsweise die übrigen Messbedingungen berücksichtigt werden.

**Stichwörter:** Viskosität, dynamische Viskosität, kinematische Viskosität, relative Viskosität, Dichte, Oszillation, Fließkurve, newtonsch, strukturviskos, dilatant, thixotrop, Scherung, Schergeschwindigkeit, Heißspritzen, Auslaufbecher, Auslaufzeit, Rotationsviskosimeter, Kapillarviskosimeter, DIN EN ISO 2431
*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; DIN EN ISO 2431*

## Übungsblatt Ü-10 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 7 Punkte)**

Definieren Sie die dynamische Viskosität und die relative Viskosität, nennen Sie vier Einflussgrößen auf die Viskosität einer Polymerlösung und erläutern Sie, was bei der Angabe eines Viskositätswertes zu beachten ist.

**Dynamische Viskosität:** η beschreibt den Widerstand eines Fluids gegen Scherung. Einheit Pa·s, in der Lackpraxis häufig mPa·s. Bei einer newtonschen Flüssigkeit ist η bei konstanter Temperatur unabhängig von der Schergeschwindigkeit.

**Relative Viskosität:** ηrel = η / η₀, also das Verhältnis der Viskosität der Lösung zur Viskosität des reinen Lösemittels, beide bei gleicher Temperatur gemessen. Sie ist dimensionslos.

**Einflussgrößen:** Beispielsweise Polymerkonzentration, Molmasse/Molekülgestalt, Polymer-Lösemittel-Wechselwirkung bzw. Lösemittelwahl und Temperatur. Bei nichtnewtonschen Systemen ist zusätzlich die Schergeschwindigkeit relevant.

**Angabe eines Viskositätswertes:** Es müssen mindestens Messtemperatur und Messverfahren bekannt sein. Bei nichtnewtonschen Systemen sind zusätzlich Schergeschwindigkeit bzw. Messbedingungen erforderlich.

*Bewertung: Beide Definitionen mit Einheit bzw. Dimension, vier Einflussgrößen und die Angaberegel Temperatur/Verfahren. Wer die Schergeschwindigkeit als Einflussgröße nennt, zeigt, dass er den Unterschied newtonsch/nichtnewtonsch verstanden hat.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**

Eine Polymerlösung hat bei 23 °C eine Viskosität von 3,8 mPa·s, das reine Lösemittel bei 23 °C 0,65 mPa·s. a) Berechnen Sie die relative Viskosität und deuten Sie das Ergebnis. b) Ein Vorversuch mit einem Auslaufbecher, 3-mm-Düse, ergibt 25 s. Beurteilen Sie das. c) Die Lösung wird auf 40 °C erwärmt. Wie ändert sich die Viskosität qualitativ und was folgt daraus für die Angabe von Messwerten?

**Gegeben:** η = 3,8 mPa·s; η₀ = 0,65 mPa·s; beide bei 23 °C; Auslaufbecher 3 mm: 25 s

**a) Relative Viskosität:** ηrel = 3,8 / 0,65 ≈ 5,8. Die Polymerlösung besitzt etwa die 5,8-fache Viskosität des reinen Lösemittels.

**b) Auslaufbecher:** 25 s liegt unter dem vorgesehenen Bereich des Auslaufbechers. Die Messung ist deshalb für die genormte Auslaufzeitbestimmung nicht geeignet. Eine kleinere Normdüse als 3 mm steht nicht zur Verfügung. Für eine niedrigviskose, annähernd newtonsche Polymerlösung ist ein geeignetes Kapillarviskosimeter die passendere Methode.

**c) Temperatur:** Mit steigender Temperatur sinkt die Viskosität in der Regel. Bei 40 °C ist die Lösung daher dünnflüssiger als bei 23 °C. Die Messtemperatur muss deshalb immer angegeben werden; Werte bei verschiedenen Temperaturen sind nicht direkt vergleichbar.

*Bewertung: Teil a ist die Rechnung mit Deutung; b und c prüfen, ob die Regeln der Messpraxis verstanden sind. In c wird keine Zahl verlangt.*

**Frage 3** **(Anwendung, 7 Punkte)**

Ein Lack besitzt eine Viskosität von 480 mPa·s bei 20 °C und soll für einen Spritzauftrag verarbeitet werden. Nennen Sie zwei grundsätzliche Möglichkeiten, die Verarbeitungsviskosität zu verändern, und erklären Sie jeweils die mögliche Folge.

**Verdünnen:** Mit einem geeigneten Lösemittel kann die Viskosität gesenkt werden; dadurch kann sich die Zerstäubung verbessern. Der Festkörpergehalt sinkt jedoch und die Lösemittelemission steigt; für dieselbe Trockenschichtdicke ist mehr Material nötig. Das Lösemittel muss zum Bindemittel und zum gesamten Lacksystem passen; eine ungeeignete Wahl kann beispielsweise Verlauf, Trocknung oder Haftung beeinflussen.

**Erwärmen:** Durch Erwärmen sinkt die Viskosität in der Regel; dadurch kann die Verarbeitung erleichtert werden, ohne den Festkörpergehalt zu senken. Gleichzeitig können sich Verdunstung, Trocknung, Topfzeit und Arbeitssicherheit verändern; die Temperatur muss daher kontrolliert eingestellt werden.

**Merke:** Die Verarbeitungsviskosität wird passend zu Lacksystem und Auftragverfahren eingestellt und nicht nach einem allgemein gültigen Zahlenwert.

*Bewertung: Beide Wege mit ihrer Folge — beim Verdünnen gehören Festkörper und Emission dazu, beim Erwärmen die Verarbeitungsrisiken. Der Merke-Satz rundet die Antwort ab.*

# L-11 · Mechanisches Verhalten von Lackfilmen

*Viskoelastizität, Zugversuch, Kriechen, Relaxation und dynamisch-mechanische Analyse*

**Prüfungsteil 1** · A 8.4

Lackfilme zeigen häufig viskoelastisches Verhalten. Ihr mechanisches Verhalten hängt daher nicht nur von der Temperatur, sondern auch von der Belastungsdauer und Verformungsgeschwindigkeit ab.

## Viskoelastisches Verhalten

Lackfilme verbinden elastische und zeitabhängige, viskose Eigenschaften. Wie stark die einzelnen Anteile ausgeprägt sind, hängt unter anderem von Temperatur, Belastungsdauer bzw. Belastungsgeschwindigkeit, Polymerstruktur und Vernetzungsgrad ab.

Elastischer Anteil: Der Lackfilm verformt sich unter Belastung und kann nach der Entlastung ganz oder teilweise in seine ursprüngliche Form zurückkehren.

Viskoser Anteil: Die Verformung ist zeitabhängig. Ein Teil der Verformung kann nach der Entlastung bestehen bleiben, weil sich Polymerketten bzw. Netzwerkelemente während der Belastung umlagern.

Vergleich aus der Lackpraxis — elastischer, harter Lackfilm: Ein gut vernetzter 2K-PUR-Klarlack ist hart und steif. Bei einer kurzen mechanischen Belastung kann er sich geringfügig elastisch verformen; nach der Entlastung geht diese Verformung weitgehend zurück. Weicher bzw. stärker viskoelastischer Lackfilm: Ein weicher, thermoplastisch geprägter Beschichtungsfilm kann sich unter längerer Belastung stärker verformen; ein Teil dieser Verformung kann nach der Entlastung bestehen bleiben. Je nach Rezeptur kann derselbe Lackfilm bei unterschiedlicher Temperatur oder Belastungsgeschwindigkeit deutlich unterschiedlich reagieren.

## Drei idealisierte Beiträge zum mechanischen Verhalten

Energieelastischer Beitrag: Die Rückstellkraft entsteht durch die Dehnung und Verzerrung von Bindungen und Polymersegmenten. Nach der Entlastung wird gespeicherte elastische Energie wieder frei. Beispiel: Ein harter, gut vernetzter Einbrennlack auf einem Metallblech wird kurzzeitig leicht gebogen. Der Lackfilm kann sich geringfügig mitverformen und anschließend wieder weitgehend zurückgehen — wie eine harte Feder: wenig Dehnung, aber deutliche Rückstellkraft.

Entropieelastischer Beitrag: Bei gummiartigen, vernetzten Polymerstrukturen entsteht ein wesentlicher Teil der Rückstellkraft durch die Änderung der statistischen Anordnung der Polymerketten. Dieser Beitrag ist besonders für Elastomere wichtig. Beispiel: Eine weiche, elastische Beschichtung kann stark gedehnt werden und anschließend wieder in Richtung ihrer ursprünglichen Form zurückkehren. Anschaulich: Die Polymerketten werden aus ihrem ungeordneten Zustand heraus gestreckt; nach der Entlastung kehren sie bevorzugt wieder in einen ungeordneteren Zustand zurück.

Viskoser Beitrag: Polymerketten können sich zeitabhängig gegeneinander umlagern. Dadurch können Kriechen und Spannungsrelaxation auftreten. Ein Teil der Verformung kann dauerhaft bestehen bleiben. Beispiel: Ein thermoplastischer Beschichtungsfilm wird über längere Zeit belastet. Die Polymerketten können sich langsam gegeneinander verschieben; nach der Entlastung bleibt deshalb möglicherweise eine bleibende Verformung zurück — wie bei einem sehr zähen Honig: Unter kurzer Belastung passiert wenig, unter längerer Belastung kann sich das Material langsam verändern.

Wichtig: Diese drei Beiträge sind idealisierte Betrachtungen. Reale Lackfilme zeigen meist eine Kombination mehrerer Beiträge.

## Duromere, Elastomere und Thermoplaste

• Duromer — stark vernetzt, formstabil, geringe Kettenbeweglichkeit; Lackpraxis: harter, gut vernetzter 2K-PUR- oder EP-Lackfilm
• Elastomer — stark und weitgehend reversibel verformbar; Lackpraxis: elastifizierte bzw. gummiartige Beschichtung
• Thermoplast — Ketten nicht dauerhaft vernetzt, zeitabhängige Verformung möglich; Lackpraxis: thermoplastisch geprägter Beschichtungsfilm
Kurz gesagt: Ein Duromer gibt wenig nach und bleibt formstabil. Ein Elastomer lässt sich stark dehnen und geht wieder zurück. Bei einem Thermoplasten können sich die Ketten bei Wärme und längerer Belastung gegeneinander bewegen (siehe L-04).

## Zugversuch

Beim Zugversuch wird eine Probe mit definierter Geschwindigkeit auseinandergezogen. Dabei werden Kraft und Längenänderung gemessen (Fachrechner „Zugversuch“).

Zugspannung: $\sigma = F / A$
$\sigma$ = Zugspannung · F = Zugkraft · A = belastete Querschnittsfläche

Dehnung: $\varepsilon = \Delta l / l_0$
$\varepsilon$ = Dehnung · $\Delta l$ = Längenänderung · $l_0$ = ursprüngliche Messlänge

Für einen annähernd linear-elastischen Bereich gilt das Hookesche Gesetz: $\sigma = E \cdot \varepsilon$

Der E-Modul beschreibt die Steifigkeit eines Materials.
• hoher E-Modul → hohe Steifigkeit, geringe Dehnung bei gleicher Spannung
• niedriger E-Modul → geringere Steifigkeit, größere Dehnung bei gleicher Spannung
Bei Polymeren hängt der E-Modul unter anderem stark von Temperatur, Belastungsgeschwindigkeit und Polymerstruktur ab. Beispiel: Vergleicht man einen harten Einbrennlack mit einer weichen elastifizierten Beschichtung, benötigt man beim harten Lack für die gleiche Dehnung meist eine höhere Spannung — hoher E-Modul heißt: Der Lackfilm lässt sich schwerer dehnen.

## Duktiles und sprödes Verhalten

Duktil: Der Lackfilm kann sich vor dem Bruch deutlich und dauerhaft verformen. Er ist unter den jeweiligen Prüfbedingungen meist verformbarer.

Spröde: Der Lackfilm zeigt nur geringe Verformung vor dem Bruch und kann bei mechanischer Belastung schneller reißen oder abplatzen.

Vergleich aus dem Lackbereich: Ein harter, stark vernetzter Klarlack kann bei einer schnellen Verformung Risse bilden (spröde). Ein elastifizierter Beschichtungsfilm kann sich stärker mit einem verformten Untergrund mitbewegen, ohne sofort zu reißen (duktiler). Ein Lack kann also hart und trotzdem nicht ausreichend flexibel sein. Wichtig: Temperatur und Belastungsgeschwindigkeit können die Duktilität deutlich beeinflussen.

## Zugfestigkeit und Reißdehnung

Zugfestigkeit ist die höchste im Zugversuch erreichte Zugspannung vor dem Bruch bzw. der entsprechend der Prüfnorm bestimmte Kennwert.

Reißdehnung ist die Dehnung der Probe beim Reißen. Eine hohe Reißdehnung weist auf eine hohe Verformbarkeit hin: Ein Lackfilm mit hoher Reißdehnung kann sich bei einer mechanischen Beanspruchung stärker dehnen, bevor er reißt; ein Lackfilm mit geringer Reißdehnung kann bereits bei einer vergleichsweise kleinen Dehnung versagen.

Reißenergie beschreibt die bis zum Bruch aufgenommene mechanische Arbeit pro Volumen. Im Spannungs-Dehnungs-Diagramm entspricht sie näherungsweise der Fläche unter der Kurve bis zum Bruch.

## Kriechen

Beim Kriechen nimmt die Dehnung eines Materials mit der Zeit zu, obwohl die Spannung konstant gehalten wird.

Beispiel: Ein lackiertes Kunststoffteil wird über längere Zeit an einer Stelle mechanisch belastet. Zunächst ist die Verformung gering; mit zunehmender Belastungsdauer kann sich der Lackfilm jedoch immer stärker verformen. Bei höherer Temperatur laufen molekulare Bewegungen meist leichter ab — deshalb kann ein Lackfilm dann stärker zum Kriechen neigen.

## Spannungsrelaxation

Bei der Spannungsrelaxation wird eine bestimmte Dehnung vorgegeben und möglichst konstant gehalten. Die dafür erforderliche Spannung nimmt mit der Zeit ab.

Beispiel: Ein Lackfilm wird auf einem flexiblen Untergrund gedehnt und in dieser gedehnten Stellung gehalten. Zu Beginn ist eine relativ hohe Kraft erforderlich; bleibt die Dehnung konstant, kann die erforderliche Kraft mit der Zeit abnehmen.

## Dynamisch-mechanische Analyse (DMA)

Mit der DMA wird das mechanische Verhalten eines Polymermaterials unter einer periodischen Belastung untersucht.

E′ — Speichermodul: Beschreibt den überwiegend elastisch gespeicherten Anteil der mechanischen Energie.

E″ — Verlustmodul: Beschreibt den Anteil der mechanischen Energie, der bei der periodischen Verformung dissipiert, also insbesondere in Wärme umgewandelt wird.

Verlustfaktor: tan δ = E″ / E′ (Fachrechner „DMA — Verlustfaktor“). Ein höherer tan δ bedeutet eine stärkere Dämpfung bzw. einen größeren Energieverlustanteil relativ zur elastischen Energiespeicherung. Beispiel: Zwei Lackfilme können bei ähnlicher Steifigkeit unterschiedlich stark mechanische Energie abbauen; der Lackfilm mit höherem tan δ weist unter gleichen Prüfbedingungen eine stärkere Dämpfung auf.

DMA-Messungen können unter anderem verwendet werden, um Veränderungen im Bereich der Glasübergangstemperatur Tg zu untersuchen (siehe L-09).

## Einfluss der Verformungsgeschwindigkeit

Je schneller ein Polymer belastet wird, desto weniger Zeit haben die Polymerketten für zeitabhängige Umlagerungen. Dadurch nimmt die Verformbarkeit häufig ab und die Bruchneigung kann zunehmen.

Langsame Verformung: Ein Lackfilm wird langsam gebogen. Die Polymerketten haben mehr Zeit für Umlagerungen; der Film kann sich unter diesen Bedingungen häufig stärker verformen. Schnelle Verformung: Der gleiche Lackfilm wird schlagartig belastet. Die Polymerketten können nicht schnell genug reagieren; der Film kann deshalb bei geringerer Dehnung reißen.

Praxisbeispiel: Eine Lackierung kann bei einer langsamen Umformprüfung eine gute Verformbarkeit zeigen, bei einer Schlagbeanspruchung aber trotzdem versagen.

## Erichsen-Tiefung und Schlagtiefung

Erichsen-Tiefung: Prüft die Verformbarkeit eines Beschichtungsfilms bei einer definierten, langsamen Eindrückbelastung — „Wie weit kann sich der Lack unter langsamer Verformung mitbewegen?“

Schlagtiefung: Prüft das Verhalten eines Beschichtungsfilms bei einer schnellen, stoßartigen Belastung — „Wie gut hält der Lack eine plötzliche Belastung aus?“

Die beiden Prüfungen sind nicht direkt gleichwertig, weil sich Belastungsart und Belastungsgeschwindigkeit unterscheiden (siehe L-156).

## Gesamtvergleich für den Lacklaboranten

- Sehr steif → hoher E-Modul
- Stark dehnbar → hohe Verformbarkeit, hohe Reißdehnung
- Bricht schnell bei Biegung → sprödes Verhalten
- Kann sich stark dehnen und geht zurück → elastisches bzw. elastomeres Verhalten
- Verformung nimmt bei längerer Belastung zu → Kriechen
- Erforderliche Spannung sinkt bei gleicher Dehnung → Spannungsrelaxation
- Versagt bei Schlag, aber nicht bei langsamer Verformung → starke Abhängigkeit von der Verformungsgeschwindigkeit
- Hoher tan δ → stärkere Dämpfung

**Merksatz**

Ein Lackfilm ist nicht einfach nur „hart“ oder „weich“. Für sein mechanisches Verhalten sind mindestens diese Fragen wichtig: Wie stark lässt er sich verformen? Wie schnell wird er belastet? Wie lange wirkt die Belastung? Welche Temperatur herrscht? Wie stark ist das Polymer vernetzt? Erst aus diesen Bedingungen ergibt sich, ob ein Lackfilm eher steif, elastisch, duktil, spröde oder zeitabhängig verformbar reagiert.
Hoher E-Modul = hohe Steifigkeit, der Film lässt sich schwerer dehnen. Niedriger E-Modul = geringere Steifigkeit.
Kriechen = gleiche Belastung, immer mehr Verformung. Relaxation = gleiche Dehnung, immer weniger Spannung erforderlich.
E′ beschreibt die elastische Energiespeicherung, E″ den Energieverlust. Hoher tan δ bedeutet stärkere Dämpfung.
Schnelle Belastung lässt Polymerketten weniger Zeit zur Umlagerung und kann deshalb die Verformbarkeit verringern und die Bruchneigung erhöhen.

**Stichwörter:** Viskoelastizität, energieelastisch, entropieelastisch, Duromer, Elastomer, Thermoplast, Zugversuch, Zugspannung, Dehnung, Hooke, Elastizitätsmodul, duktil, spröde, Reißdehnung, Zugfestigkeit, Reißenergie, Kriechen, Spannungsrelaxation, DMA, Speichermodul, Verlustmodul, Verlustfaktor, Erichsen-Tiefung, Schlagtiefung
*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie*

## Übungsblatt Ü-11 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Unterscheiden Sie energieelastisches, entropieelastisches und rein viskoses Verhalten und ordnen Sie sie dem elastischen bzw. plastischen Anteil zu.

**Energieelastisch:** Die Atome werden minimal aus ihrer Ruhelage gezogen (Bindungslängen und -winkel ändern sich), wie bei einer sehr steifen Feder: nur winzige Dehnung, sofort und vollständig zurück. Gehört zum elastischen Anteil; überwiegt bei harten, glasartigen Filmen und Duromeren.

**Entropieelastisch:** Verknäuelte Ketten werden gestreckt und ziehen sich nach dem Entlasten von selbst wieder zusammen, weil der ungeordnete Knäuel-Zustand der wahrscheinlichere ist. Große, umkehrbare Dehnung — die gummiartige Elastizität; ebenfalls elastischer Anteil, überwiegt bei Elastomeren.

**Rein viskos (plastisch):** Ganze Moleküle gleiten aneinander ab und bleiben in der neuen Lage — das ist der plastische Anteil: Die Verformung bleibt, die Energie geht als Wärme verloren. Umso leichter, je höher die Temperatur und je schwächer die zwischenmolekularen Kräfte.

**Abgrenzung:** Vernetzte Polymere — Duromere und Elastomere — können praktisch nicht fließen: Das Netzwerk verhindert ein bleibendes Abgleiten der Ketten.

*Bewertung: Wichtig ist die Zuordnung: energie- und entropieelastisch bilden zusammen den reversiblen elastischen Anteil, rein viskos den bleibenden plastischen.*

**Frage 2** **(Berechnung, 9 Punkte)**

Ein freier Lackfilm mit einem Querschnitt von 4,5 mm² wird mit 180 N belastet. Die Ausgangslänge von 60 mm nimmt dabei um 1,8 mm zu. Berechnen Sie Zugspannung, Dehnung und Elastizitätsmodul.

**Gegeben:** $A = 4{,}5\ \text{mm}^2$; $F = 180\ \text{N}$; $l_0 = 60\ \text{mm}$; $\Delta l = 1{,}8\ \text{mm}$

**Zugspannung:** $\sigma = F / A = 180\ \text{N} / 4{,}5\ \text{mm}^2 = 40{,}0\ \text{N/mm}^2 = 40{,}0\ \text{MPa}$

**Dehnung:** $\varepsilon = \Delta l / l_0 = 1{,}8\ \text{mm} / 60\ \text{mm} = 0{,}030 = 3{,}0\ \%$

**Elastizitätsmodul:** Nach dem Hookeschen Gesetz gilt $\sigma = E \cdot \varepsilon$, also $E = \sigma / \varepsilon = 40{,}0\ \text{MPa} / 0{,}030 = 1333\ \text{MPa}$

**Antwortsatz:** Die Zugspannung beträgt 40,0 MPa, die Dehnung 3,0 % und der Elastizitätsmodul rund 1330 MPa.

*Bewertung: Die Dehnung wird sowohl als Verhältnis als auch in Prozent angegeben — beim Einsetzen in das Hookesche Gesetz muss der dimensionslose Wert verwendet werden. Das ist die häufigste Fehlerquelle dieser Aufgabe.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**

An derselben Lackierung werden eine Erichsen-Tiefung und eine Schlagtiefung geprüft. Erklären Sie, warum die Erichsen-Werte in der Regel deutlich höher ausfallen.

**Unterschied der Prüfungen:** Bei der Erichsen-Tiefung wird das lackierte Prüfblech langsam ausgebeult, bei der Schlagtiefung schnell.

**Molekulare Erklärung:** Das mechanische Verhalten eines Polymers hängt außer von der Temperatur stark von der Deformationsgeschwindigkeit ab. Bei langsamer Dehnung hat der Lackfilm Zeit, auftretende Spannungen durch molekulare Platzwechselvorgänge beziehungsweise Fließen partiell abzubauen.

**Bei schneller Belastung:** Im zweiten Fall ist das kaum möglich. Die Spannung baut sich vollständig auf und der Film reißt bei geringerer Verformung.

**Ergebnis:** Erichsen-Tiefungswerte fallen deshalb in der Regel deutlich höher aus als Schlagtiefungen. Beide Prüfungen sind daher nicht gegeneinander austauschbar.

*Bewertung: Die Erklärung führt auf die Zeitabhängigkeit der Molekülbewegung zurück. Der Schlusssatz zieht die praktische Konsequenz für die Prüfplanung.*

# L-12 · Benetzung und Haftung

*Oberflächenspannung, Randwinkel und die Regel für die Benetzung*

**Prüfungsteil 1** · A 8.1

Gute Benetzung wird begünstigt, wenn die Oberflächenspannung des Lacks niedrig und die Oberflächenenergie des Untergrunds hoch ist — entscheidend ist aber der Randwinkel, der zusätzlich von der Grenzflächenspannung zwischen Lack und Untergrund abhängt (Young-Gleichung).

## Haftung als erste Voraussetzung

Die Haftfestigkeit ist ein Maß für den Widerstand einer Beschichtung gegen ihre mechanische Abtrennung vom Untergrund; sie wird als Kraft je Fläche in N/mm² angegeben. Dauerhafte Haftung — auch bei Feuchtigkeitseinwirkung — ist die erste Voraussetzung für jede Schutzwirkung, etwa den Korrosionsschutz. Eine bewusste Ausnahme sind Abziehlacke als temporärer Transportschutz.

## Woher die Oberflächenspannung kommt

Im Inneren einer Flüssigkeit ist jedes Molekül gleichmäßig von Nachbarn umgeben; die Anziehungskräfte heben sich auf. An der Oberfläche fehlen die Nachbarn nach außen, es bleibt eine ins Flüssigkeitsinnere gerichtete Kraft. Sie bewirkt, dass die Oberfläche möglichst klein wird — im schwerelosen Raum ist ein Tropfen deshalb kugelförmig.

Die Grenzflächenspannung γ ist die Kraft, die an einem Meter einer gedachten Linie in der Grenzfläche wirkt, angegeben meist in mN/m. Grenzt eine Phase an Luft, spricht man von Oberflächenspannung. Da eine Energie je Fläche dasselbe ist wie eine Kraft je Länge, beschreibt γ zugleich die Oberflächenenergie.

## Anhaltswerte in mN/m

- Quecksilber 500 · Wasser 73
- Epoxidharze 45–60 · Melaminharze 42–58 · Alkydharze 33–60 · Acrylharze 32–40
- Xylol 29–30 · Butylglykol 27–28 · Testbenzin 26–27 · Butylacetat 25 · Butanol 24
- Testbenzin aromatenfrei 23–25 · Hexan 18
- Siliconöl (PDMS) 20–21 — der niedrigste Wert unter den Bindemitteln und Additiven dieser Reihe; als Verlaufs-, Netz- und Entschäumer-Additiv gewollt so niedrig, als Verunreinigung Ursache der Siliconkrater

## Hoch- und niederenergetische Substrate

Dieselbe Regel erklärt, warum manche Untergründe leicht, andere kaum benetzbar sind. Hochenergetische, polare Oberflächen — Glas, Metalle und andere oxidische Substrate — werden von den meisten Lacken von allein gut benetzt. Niederenergetische, unpolare Oberflächen — PE, PP, PTFE, Silicon — liegen so tief, dass Lacke abperlen und erst aktiviert werden müssen. Merkregel: polar/hochenergetisch = gut benetzbar, unpolar/niederenergetisch = schlecht benetzbar. Gute Benetzung heißt aber noch nicht dauerhafte Haftung — Glas etwa wird gut benetzt, braucht wegen der glatten, wasserempfindlichen Grenzfläche aber Haftvermittler (siehe L-130).

## Folgen mangelnder Benetzung

Benetzt der Lack den Untergrund nicht vollständig, zeigt sich das als Krater, Stippen, „Apfelsinenhaut“ oder ein Zusammenlaufen zu Tropfen. Solche Fehler entstehen typischerweise an fett- oder siliconverunreinigten Stellen oder auf unbehandelten unpolaren Kunststoffen — und, oft übersehen, durch nicht optimal eingesetzte siliconmodifizierte Additive des Lacks selbst, allen voran Entschäumer: Sie wirken über eine gewollte, feine Unverträglichkeit; bei Überdosierung, unverträglichem Silicontyp oder schlechter Einarbeitung schlägt diese in genau die Krater um, die man vermeiden wollte.

**Merksatz**

Als praktische Faustregel gilt: Eine gute Benetzung wird begünstigt, wenn die Oberflächenspannung des flüssigen Lackes niedrig und die Oberflächenenergie des festen Substrats hoch ist. Der entscheidende, experimentell beobachtbare Maßstab ist jedoch der Randwinkel θ (siehe unten): Er wird nicht allein durch Oberflächenspannung und Oberflächenenergie bestimmt, sondern zugleich durch die Grenzflächenspannung zwischen Flüssigkeit und Festkörper (Young-Gleichung). Das erklärt, warum Wasserlacke auf unbehandelten, unpolaren Kunststoffen schlecht benetzen und warum Fett-, Öl-, Silicon- oder Trennmittelreste auf Metall zu Benetzungsstörungen führen.

## Substrat-Vorbehandlung: entfetten und aktivieren

Aus der Benetzungsregel folgt die Vorbehandlung — sie sorgt dafür, dass der Untergrund eine höhere Oberflächenenergie hat als der Lack.

Entfetten und Reinigen: Fett, Öl und Trennmittelreste bilden eine niederenergetische Schicht und müssen restlos entfernt werden (Lösemittelreinigung, wässrige Reiniger, Beizen). Wichtig für die Praxis: Ein Reinigungsbad reichert sich mit der Zeit mit Fett an. Ist seine Aufnahmefähigkeit erschöpft, zieht das gelöste Fett beim Abtrocknen wieder auf das Werkstück und verursacht genau die Benetzungsstörungen, die man vermeiden wollte. Deshalb Bäder überwachen, rechtzeitig wechseln und mit rückstandsfrei verdunstendem Reiniger nachspülen.

Aktivieren unpolarer Kunststoffe: PP, PE und ähnliche haben eine zu niedrige Oberflächenenergie, um lackiert zu werden. Corona-Behandlung (eine elektrische Entladung dicht über der Oberfläche), Beflammen oder Plasma oxidieren die obersten Molekülschichten und schaffen polare Gruppen — die Oberflächenenergie steigt, der Lack benetzt. Der Effekt lässt mit der Zeit nach (die Oberfläche heilt aus), deshalb bald nach der Behandlung lackieren; kontrollieren lässt er sich mit Prüftinten.

## Benetzungsadditive und ihr Wirkmechanismus

Erfüllt ein Lack die Benetzungsregel nicht von allein, senkt man seine Oberflächenspannung mit Benetzungsadditiven. Sie wandern an die Grenzfläche: Der niederenergetische Molekülteil zeigt nach außen, der Rest bleibt im Lack verankert — die Oberflächenspannung des Lacks sinkt unter die des Untergrunds, Krater und Entnetzung verschwinden.

- Siliconadditive (polyether-modifizierte Polysiloxane) — starke Senkung der Oberflächenspannung, besserer Verlauf und Kratervermeidung; zu viel oder das falsche Silicon stört Überlackierbarkeit und Zwischenhaftung.
- Fluortenside — stärkste Wirkung, schon in kleinsten Mengen; wegen PFAS-Regulierung heute zurückhaltend eingesetzt.
- organische Netzmittel (Tenside, z. B. auf Polyether-Basis) — moderatere Wirkung, silicon- und fluorfrei, gut überlackierbar.

Darum wirken schon geringe Zugaben.

## Der Randwinkel als Maß

Je kleiner der Randwinkel θ zwischen Festkörper und aufgetragenem Tropfen, desto besser die Benetzung: $\theta < 90°$ heißt gute Benetzung, $\theta > 90°$ schlechte (der Tropfen perlt ab), bei $\theta = 0$ läuft er vollständig auseinander — das ist die Spreitung.

Gemessen wird θ optisch mit einem Randwinkelmessgerät (Goniometer, Sessile-Drop-Verfahren): Ein definierter Tropfen wird auf die Oberfläche gesetzt, im Profil per Kamera aufgenommen und der Winkel am Dreiphasenpunkt (fest/flüssig/gasförmig) über die Tropfenkontur bestimmt. Aus den Randwinkeln mehrerer Testflüssigkeiten lässt sich die Oberflächenenergie des Substrats berechnen. Schnell und werkstattnah sind Prüftinten (Dyne-Stifte): Man streicht Testtinten abgestufter Oberflächenspannung auf; die höchste, die noch als geschlossener Film stehen bleibt, liefert einen Anhaltswert für die Benetzbarkeit bzw. das Oberflächenenergieniveau des Untergrunds.

### Young-Gleichung und Benetzungskriterium

```
Kräftegleichgewicht am Dreiphasenpunkt (Young):
γSV = γSL + γLV · cos θ   →   cos θ = (γSV − γSL) / γLV

Maßgeblich ist der Randwinkel θ, nicht der bloße Vergleich zweier
Oberflächenspannungen: θ = 0 vollständige Spreitung, θ < 90° gute,
θ > 90° schlechte Benetzung.
γSV Oberflächenenergie des Festkörpers (fest/gasförmig) ·
γLV Oberflächenspannung des Lacks (flüssig/gasförmig) ·
γSL Grenzflächenspannung fest/flüssig.

Beispiel: γSV = 40 mN/m (behandelter Kunststoff), γLV = 30 mN/m (Lack),
γSL = 8 mN/m (Grenzfläche Lack/Kunststoff).
cos θ = (40 − 8) / 30 = 1,07
Da cos θ rechnerisch über 1 liegt, gibt es keinen stabilen Randwinkel –
der Lack spreitet vollständig (θ ≈ 0°), die Benetzung ist optimal.
Zweites Beispiel mit schlechterer Grenzfläche: γSL = 25 mN/m (sonst gleich):
cos θ = (40 − 25) / 30 = 0,50 → θ ≈ 60°, noch gute, aber deutlich schlechtere Benetzung.
Der Vergleich zeigt: Bei gleichem γSV und γLV entscheidet allein die
Grenzflächenspannung γSL, ob spontane Spreitung oder nur mäßige Benetzung eintritt.
```

**Stichwörter:** Haftung, Adhäsion, Benetzung, Oberflächenspannung, Randwinkel, Goniometer, Prüftinte, Vorbehandlung, Entfetten, Corona-Behandlung, Beflammen, Plasma, Benetzungsadditiv, Fluortensid, Siliconadditiv, Spreitung, hochenergetisch, Glas

*Quellen: Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur*

## Übungsblatt Ü-12 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 7 Punkte)**

Erklären Sie mit eigenen Worten, wann ein Lack einen Untergrund benetzt und wann nicht.

**Grundregel:** Gute Benetzung wird begünstigt, wenn die Oberflächenspannung des flüssigen Lacks niedrig und die Oberflächenenergie des festen Untergrunds hoch ist; maßgeblich ist aber der resultierende Randwinkel.

**Lack mit höherer Oberflächenspannung:** Ist die Oberflächenspannung des Lacks dagegen höher als die Oberflächenenergie des Untergrunds, zieht sich der Lack zusammen — es entstehen Krater, oder er perlt ganz ab.

**Der Randwinkel als Maß:** Je kleiner der Randwinkel eines Tropfens auf dem Untergrund, desto besser die Benetzung; bei 0° spreitet die Flüssigkeit vollständig.

**Praxisfolge:** Deshalb senkt man mit Netzmitteln die Oberflächenspannung des Lacks oder erhöht die Oberflächenenergie des Untergrunds durch Vorbehandlung.

*Bewertung: Die Grundregel wird korrekt und in eigenen Worten wiedergegeben; der Randwinkel wird richtig als anschauliches Maß eingeordnet.*

**Frage 2** **(Berechnung, 7 Punkte)**

Ein Wasserlack hat eine Oberflächenspannung von 38 mN/m. Er soll auf entfettetem Stahl mit 45 mN/m und auf unbehandeltem Polypropylen mit 30 mN/m appliziert werden. Beurteilen Sie beide Fälle.

**Kriterium:** Als Faustregel benetzt der Lack besser, je niedriger seine Oberflächenspannung und je höher die Oberflächenenergie des Untergrunds; entscheidend ist der Randwinkel — die Zahlen zeigen hier nur die Tendenz.

**Fall Stahl:** Die niedrigere Oberflächenspannung des Lacks (38 mN/m) trifft auf die hohe Oberflächenenergie des Stahls (45 mN/m) — das spricht für gute Benetzung und einen kleinen Randwinkel.

**Fall Polypropylen:** Die niedrige Oberflächenenergie des PP (30 mN/m) liegt unter der Oberflächenspannung des Lacks (38 mN/m) — schlechte Benetzung, großer Randwinkel, Entnetzung und Krater.

**Maßnahme:** Polypropylen muss vorbehandelt werden, um seine Oberflächenenergie anzuheben — etwa durch Beflammen oder Coronabehandlung. Alternativ wäre ein Lack mit niedrigerer Oberflächenspannung zu formulieren.

*Bewertung: Beide Fälle werden durch den einfachen Zahlenvergleich richtig beurteilt; die abschließende Maßnahme beantwortet die eigentliche Praxisfrage.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**

Nach dem Reinigen eines Prüfblechs mit einem fetthaltigen Reinigungsmittel treten Benetzungsstörungen auf. Erklären Sie die Ursache.

**Ursache:** Fett- oder Trennmittelreste bilden einen dünnen Film auf der Metalloberfläche. Dieser Film hat eine deutlich niedrigere Oberflächenenergie als das Metall selbst.

**Wirkung:** Der Lack sieht nicht mehr die hohe Oberflächenenergie des Stahls, sondern die niedrige des Fettfilms — die Bedingung für gute Benetzung ist an diesen Stellen nicht mehr erfüllt.

**Erscheinungsbild:** Es entstehen Krater oder entnetzte Stellen, häufig punktuell dort, wo die Verunreinigung sitzt.

**Konsequenz:** Die Vorbehandlung muss ein rückstandsfrei verdunstendes Reinigungsmittel verwenden.

*Bewertung: Die Kette aus Ursache, Wirkung und sichtbarem Fehlerbild wird lückenlos dargestellt — genau das Vorgehen bei einer praktischen Fehleranalyse.*

# L-13 · Phasengrenzflächen in Beschichtungen

*Vier Grenzflächen und was sie bewirken*

**Prüfungsteil 1** · A 8.1 · A 8.4

Eine pigmentierte Beschichtung ist ein sehr dünner Verbundwerkstoff — neben der Zusammensetzung prägen die inneren Grenzflächen ihre Eigenschaften maßgeblich mit.

## Auch Klarlacke sind nicht zwangsläufig homogen

Schon ein Klarlack ohne Pigmente und Füllstoffe bildet zwar einen weitgehend homogenen Film, muss aber nicht perfekt homogen sein. Unter bestimmten Bedingungen entstehen mikroskopische Inhomogenitäten — durch unterschiedliche Vernetzungsgrade (oft ein Vernetzungsgradient über die Schichtdicke, wenn die Oberfläche anders härtet als der Untergrund), durch teilweise Entmischung von Bindemittel- oder Additivbestandteilen oder durch Wechselwirkungen mit der Substratoberfläche.

An der Grenzfläche zum Substrat orientieren sich polare funktionelle Gruppen des Bindemittels — etwa Carboxylgruppen — bevorzugt zur Oberfläche, zum Beispiel zu Metalloxiden. Dadurch unterscheidet sich die Zusammensetzung und Struktur des Bindemittels in Grenzflächennähe vom Filmvolumen; es bildet sich eine grenzflächennahe Interphase, die hinter der spezifischen (Säure-Base-)Haftung steht. Mit Pigmenten und Füllstoffen entstehen ohnehin zahlreiche innere Grenzflächen — man spricht von grenzflächenreichen Systemen mit sehr großer innerer Grenzfläche. Ihre Größe lässt sich abschätzen: $A = m \cdot a(spez)$, also Feststoffmasse mal spezifischer Oberfläche. Richtwerte für a(spez): Kreide und Talkum 2 bis 10 m²/g, Titandioxid-Weißpigment etwa 10 bis 20 m²/g (BET, oberflächennachbehandelte Handelsqualität; schwach behandelte Typen liegen bei 7 bis 10 m²/g, hoch witterungsbeständige silicareiche Typen darüber), pyrogene Kieselsäure 100 bis 400 m²/g (hochoberflächige Typen am oberen Ende, vgl. L-44 und L-55). Zum Vergleich die reine Geometrie: Für ein idealisiertes, glattes Kugelteilchen von 250 bis 300 nm liefert $S_m = 6/(\rho \cdot d)$ mit ρ rund 4,1 g/cm³ nur etwa 5 bis 6 m²/g. Das ist ein Rechenwert des Modells und kein gemessener BET-Wert eines Handelspigments — die reale Oberfläche liegt wegen Porosität, Rauheit und vor allem der anorganischen Nachbehandlung deutlich höher (vgl. L-44). Die aus Masse und BET-Oberfläche berechnete Grenzfläche A ist ein rechnerischer Höchstwert — wirksam ist nur der tatsächlich benetzte Anteil.

## Die vier Grenzflächen

- Bindemittel/Substrat — bestimmt durch die tatsächliche Substratoberfläche, die bei rauem Substrat je nach Rauheit wenig bis deutlich größer als die planimetrisch gemessene Fläche sein kann. Bedeutung: Hier entscheidet sich die Haftung, bei metallischen Substraten zusätzlich der Korrosionsschutz.
- Bindemittel/Pigment bzw. Füllstoff — die Feststoffteilchen bilden eine sehr große innere Grenzfläche; ihre Größe hängt stark von Material, Teilchengröße und Teilchenform ab (feinteilige Füllstoffe und pyrogene Kieselsäuren erreichen besonders hohe spezifische Oberflächen). Bedeutung: Ort wichtiger Wechselwirkungen, die Benetzung, Dispergierung, Rheologie, mechanische Eigenschaften (z. B. Steinschlagbeständigkeit) und Beständigkeit mitbestimmen. Der innere Zusammenhalt des Films hängt daneben von Bindemittelmatrix, Vernetzung, Pigmentvolumenkonzentration und Partikelwechselwirkungen ab — die Grenzfläche ist ein wichtiger, aber nicht der alleinige Faktor.
- Bindemittel/Atmosphäre — die äußere Oberfläche, bei ebener Beschichtung annähernd die planimetrische Fläche. Bedeutung: Angriffspunkt für Sauerstoff, Feuchte, UV-Belastung, Verschmutzung und Bewitterung; Veränderungen können in tiefer liegende Bereiche fortschreiten.
- Bindemittel/Bindemittel — entsteht, wenn der Film aus unterschiedlichen, nicht vollständig verträglichen Bindemittelphasen besteht. Bedeutung: Solche Phasengrenzen können Mechanik, Transparenz, Haftung, Beständigkeit und Alterung beeinflussen.

**Merksatz**

Bei Beschichtungen bestimmen nicht nur die Bestandteile des Lackfilms, sondern auch die Grenzflächen zwischen ihnen maßgeblich die Eigenschaften.

## Konsequenzen für die Praxis

Die Grenzfläche zwischen Bindemittel und Pigment bzw. Füllstoff ist für pigmentierte Lacke besonders wichtig: Eine gute Benetzung der Feststoffoberfläche sowie eine wirksame Dispergierung und Stabilisierung verhindern die Bildung und Rückbildung von Agglomeraten und verbessern dadurch Rheologie, Glanz, Farbton, mechanische Eigenschaften und Lagerstabilität (siehe L-52). Auch die äußere Oberfläche des Films ist für die Beständigkeit entscheidend: Ihre Zusammensetzung und Struktur beeinflussen die Wechselwirkung mit UV-Strahlung, Sauerstoff, Wasser und Schmutz. Die Eigenschaften eines Lackfilms lassen sich daher nicht allein aus seiner mittleren Zusammensetzung ableiten.

## Was bei schlechter Grenzflächenkontrolle passiert

- schlechte Pigmentbenetzung → Agglomerate und Körnigkeit
- unzureichende Dispergierung → Farbton- und Glanzprobleme, instabile Rheologie
- schlechte Substratgrenzfläche → Haftungsverlust
- inkompatible Bindemittelphasen → Trübung, Phasentrennung oder lokale Schwächung

## Praxisbeispiel: die Substratgrenzfläche

Ein Stahlblech wird vor dem Lackieren nur oberflächlich abgewischt; ein dünner Öl- oder Fettfilm aus der Umformung bleibt zurück. Der Lack läuft trotzdem glatt auf und sieht einwandfrei aus — die polaren Gruppen des Bindemittels finden aber nicht das Metalloxid, sondern eine Fettschicht. Die Interphase, die die Haftung trägt, entsteht gar nicht erst. Sichtbar wird der Fehler erst später: Der Gitterschnitt reißt in großen Schollen ab, und im Salzsprühnebeltest unterwandert Rost die Schicht von jedem Kratzer aus.

Zweites Beispiel, dieselbe Grenzfläche: Siliconöl aus Pflege- oder Trennmitteln senkt örtlich die Oberflächenspannung. Dort zieht sich der nasse Film zurück — es entstehen Krater. Beide Fehler sitzen im Untergrund, nicht im Lack; im Lackansatz sind sie deshalb nicht zu finden. Vor dem Lackieren prüft man den Untergrund mit dem Wasserbenetzungstest (auf sauberem Stahl bleibt der Wasserfilm zusammenhängend und reißt nicht) oder mit Prüftinten (siehe L-12).

## Praxisbeispiel und Prüfungsdenken

Ein pigmentierter Lack zeigt nach Lagerung eine deutliche Viskositätszunahme. Eine mögliche Ursache ist die Bildung bzw. Rückbildung von Pigmentagglomeraten. Die Ursache liegt dann nicht zwingend in einer Änderung des Bindemittels, sondern kann an der Grenzfläche und an der Stabilisierung der dispergierten Phase liegen.

Bei einem Fehlerbild lohnt sich immer diese Reihenfolge: Welche Grenzfläche ist betroffen? Was passiert dort molekular oder physikalisch? Welche sichtbare Folge entsteht daraus?

**Stichwörter:** Phasengrenzfläche, Grenzfläche, Verbundwerkstoff, spezifische Oberfläche, Steinschlagbeständigkeit, Bewitterung, Heterogenität, grenzflächenreich, Interphase, Agglomerat, Gitterschnitt, Siliconkrater, Wasserbenetzungstest

*Quellen: Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur*

## Übungsblatt Ü-13 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 10 Punkte)**

Nennen Sie die vier Phasengrenzflächen einer pigmentierten Beschichtung und geben Sie zu jeder die Funktion an. Begründen Sie anschließend, warum sich eine pigmentierte Beschichtung als Verbundwerkstoff bezeichnen lässt.

**Bindemittel/Substrat:** Bei rauen Substraten ist die tatsächliche Oberfläche größer als die planimetrische Fläche; das Ausmaß hängt von der Rauheit ab. Funktion: Haftung, bei metallischen Substraten zusätzlich Korrosionsschutz.

**Bindemittel/Pigment und Füllstoff:** Kann wegen der hohen spezifischen Oberfläche der Feststoffe sehr groß werden (feinteilige Materialien wie pyrogene Kieselsäure erreichen besonders hohe Werte). Funktion: beeinflusst den Verbund zwischen Matrix und Feststoffphase und damit u. a. mechanische Eigenschaften wie die Steinschlagbeständigkeit sowie Benetzung, Dispergierung, Rheologie und Beständigkeit.

**Bindemittel/Atmosphäre:** Entspricht etwa der planimetrischen Oberfläche der Beschichtung. Hier läuft die Bewitterung ab.

**Bindemittel/Bindemittel:** Tritt auf, wenn der Film aus unterschiedlichen, nicht vollständig verträglichen Bindemittelphasen besteht. Funktion: Solche Phasengrenzen können Mechanik, Transparenz, Haftung, Beständigkeit und Alterung beeinflussen.

**Verbundwerkstoff — Aufbau:** Eine zusammenhängende Matrix (das Bindemittel) mit darin eingebetteten festen Teilchen aus Pigment und Füllstoff — genau der Aufbau eines Verbundwerkstoffs.

**Verbundwerkstoff — Kraftübertragung:** Über die Grenzfläche Bindemittel/Pigment werden Kräfte zwischen Matrix und Füllphase übertragen. Diese Grenzfläche beeinflusst den Verbund wesentlich mit — sie ist ein wichtiger, aber nicht der alleinige Faktor.

**Verbundwerkstoff — Eigenschaftsbeitrag:** Mechanische Eigenschaften wie die Steinschlagbeständigkeit ergeben sich aus dem Zusammenwirken beider Phasen, nicht aus einer allein. Der wesentliche Unterschied zu klassischen Verbundwerkstoffen liegt in der Dimension: meist nur einige zehn Mikrometer Dicke.

*Bewertung: Alle vier Grenzflächen werden benannt — Bindemittel/Substrat, Bindemittel/Pigment bzw. Füllstoff, Bindemittel/Atmosphäre und Bindemittel/Bindemittel. Zu den ersten drei gehören Größenordnung und Funktion, zur vierten mindestens die Entstehungsbedingung (nicht vollständig verträgliche Bindemittelphasen). Für die volle Punktzahl wird die Verbundwerkstoff-Eigenschaft nicht behauptet, sondern an den Definitionsmerkmalen (Matrix, eingebettete Phase, Kraftübertragung über die Grenzfläche) einzeln geprüft.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**

Eine pigmentierte Beschichtung enthält je Kilogramm Trockenfilm 250 g Füllstoff mit einer spezifischen Oberfläche von 8 m²/g sowie 30 g pyrogene Kieselsäure mit 200 m²/g. Berechnen Sie die gesamte innere Grenzfläche zwischen Bindemittel und Feststoffen je Kilogramm Film und ordnen Sie das Ergebnis ein.

**Ansatz:** Die Grenzfläche einer Feststoffart ist Masse · spezifische Oberfläche. Beide Anteile getrennt berechnen und addieren.

**Füllstoff:** A(Füllstoff) = 250 g · 8 m²/g = 2000 m².

**Pyrogene Kieselsäure:** A(Kieselsäure) = 30 g · 200 m²/g = 6000 m².

**Summe:** A(gesamt) = 2000 + 6000 = 8000 m² je Kilogramm Film.

**Einordnung:** Aus wenig Feststoff entsteht eine innere Grenzfläche von mehreren tausend Quadratmetern je Kilogramm — ein Vielfaches der äußeren Filmoberfläche. Genau das meint der Begriff grenzflächenreiches System: An dieser riesigen inneren Grenzfläche entscheiden sich Benetzung, Dispergierung, Rheologie, mechanische Eigenschaften und Beständigkeit. Die feinteilige Kieselsäure dominiert die Grenzfläche, obwohl ihre Masse gering ist. Zu beachten: Die 8000 m² sind eine rechnerische, massebezogene Feststoffoberfläche, nicht die äußere Fläche, die mit 1 kg Lack beschichtet werden kann. Die tatsächlich wirksame Bindemittel-Feststoff-Grenzfläche kann kleiner sein, wenn die gemessene spezifische Oberfläche nicht vollständig zugänglich bzw. benetzt ist.

*Bewertung: Die Grenzflächen der Einzelkomponenten werden getrennt als Masse mal spezifische Oberfläche berechnet (2000 bzw. 6000 m²) und summiert (8000 m²). Entscheidend ist die Einordnung: Die innere Grenzfläche übertrifft die äußere um Größenordnungen — der Kern der Aussage, dass pigmentierte Filme grenzflächenreiche Systeme sind. Dass die feinteilige Kieselsäure trotz geringer Masse die Grenzfläche dominiert, zeigt tieferes Verständnis.*

**Frage 3** **(Anwendung, 8 Punkte)**

Ein pigmentierter Lack zeigt nach einigen Wochen Lagerung eine deutliche Viskositätszunahme und gleichzeitig schlechteren Glanz. Erklären Sie einen plausiblen Zusammenhang über Grenzflächen und Pigmentdispergierung.

**Ursache:** Eine unzureichende Stabilisierung kann dazu führen, dass Pigmentteilchen wieder stärker miteinander wechselwirken und Agglomerate bilden.

**Folge für die Viskosität:** Dadurch ändern sich die effektive Teilchengröße und die Wechselwirkungen im dispergierten System; die Viskosität kann steigen.

**Folge für den Glanz:** Die Oberfläche wird optisch unruhiger, wodurch der Glanz sinkt.

*Bewertung: Prüfungsdenken: Bei einem Fehlerbild immer die Reihenfolge Grenzfläche → molekularer/physikalischer Vorgang → sichtbare Folge durchgehen, statt Ursache und Symptom nur nebeneinanderzustellen.*

Kapitel 2

# Bindemittel und Lacktypen

# L-14 · Öle und oxidative Härtung

*Fettsäuren, Sikkative und der Weg zum Firnis*

**Prüfungsteil 1** · A 8.3 · A 10

Trocknende Öle härten nicht durch Verdunsten, sondern durch Reaktion mit Luftsauerstoff.

## Was ein fettes Öl ist

Lackchemisch relevante Öle sind Triglyceride: Glycerin besitzt drei Hydroxygruppen, die jeweils mit einem Fettsäuremolekül verestert sind. Die molare Masse liegt je nach Fettsäurezusammensetzung typischerweise bei etwa 880 g/mol. Das lässt sich nachrechnen: Glycerin (92,1 g/mol) plus drei Linolsäuremoleküle (je 280,4 g/mol) minus drei Wassermoleküle aus der Veresterung (je 18,0 g/mol) ergibt 879,3 g/mol. Für ein linolensäurereiches Leinöl kommt man auf rund 873 g/mol, für ein ölsäurereiches Öl auf rund 885 g/mol — die Größenordnung 880 g/mol trägt also für alle Triglyceride langkettiger C18-Fettsäuren, wie sie in den trocknenden und halbtrocknenden Ölen vorliegen. Öle aus kurzkettigen Fettsäuren liegen deutlich darunter — ein laurinsäurereiches Cocosöl bei rund 650 bis 700 g/mol. Gewonnen werden sie überwiegend aus ölhaltigen Pflanzensamen durch Pressen und Extrahieren mit anschließender Raffination.

## Formelbeispiel: Aufbau eines trocknenden Öls

Glycerin, dreifach verestert mit Fettsäuren ($R_1$, $R_2$, $R_3$ = Fettsäurereste, bei einem trocknenden Öl mehrfach ungesättigt, z. B. Linol- oder Linolensäurerest):

$CH_2–O–CO–R_1$
|
$CH –O–CO–R_2$
|
$CH_2–O–CO–R_3$

Isoliert (Linolsäurerest, Isolentyp) – zwischen den Doppelbindungen steht eine $CH_2$-Gruppe:
$–(CH_2)_7–CH=CH–CH_2–CH=CH–(CH_2)_4–CH_3$

Konjugiert (Eläostearinsäurerest aus Holzöl, Konjuentyp) – die Doppelbindungen folgen sich über je eine Einfachbindung:
$–(CH_2)_7–CH=CH–CH=CH–CH=CH–(CH_2)_3–CH_3$

Die drei Esterbindungen entstehen bei der Fettbildung in der Pflanze; für die Lacktechnik zählt allein die Doppelbindungsanordnung der Fettsäurereste – sie entscheidet über Isolen- oder Konjuentyp und damit über den Trocknungsweg.

## Fettsäuretypen

Die gebundenen Fettsäuren sind langkettige, unverzweigte Monocarbonsäuren, gesättigt oder verschieden hoch ungesättigt. Wichtigstes Merkmal ist die Anzahl der Doppelbindungen. Daneben zählt ihre Anordnung: Sind zwei Doppelbindungen durch eine dazwischenliegende –$CH_2$–Gruppe getrennt, spricht man von Isolensäuren; folgen sie sich dagegen direkt über nur eine C–C-Einfachbindung, von Konjuensäuren. Gesättigt sind etwa Laurin- und Stearinsäure, einfach ungesättigt die Ölsäure, mehrfach ungesättigt Linol- und Linolensäure.

## Der Härtungsmechanismus

Kurz gesagt: Die ungesättigten Fettsäureketten reagieren mit Luftsauerstoff und vernetzen dabei zu einem festen Film — der Rest dieses Abschnitts erklärt, wie das im Einzelnen abläuft.

Übliches Lösemittel für Ölanstriche ist Testbenzin (White Spirit), historisch auch Terpentinöl; ein sehr dickes, hochkonzentriertes Öl (Firnis, siehe unten) lässt sich auch weitgehend lösemittelfrei verarbeiten. Wenn dem Öl Lösemittel zugesetzt ist, verläuft die Filmbildung in zwei zeitlich unterschiedenen Schritten: Zuerst verdunstet das Lösemittel rein physikalisch (siehe L-02) — dabei findet noch keine chemische Reaktion statt. Erst danach beziehungsweise überlappend damit beginnt die eigentliche Trocknung im chemischen Sinn: die oxidative Härtung durch Reaktion mit Luftsauerstoff.

Das sogenannte Trocknen mehrfach ungesättigter Öle ist in Wirklichkeit eine oxidative Polymerisation unter Vernetzung. Sie gehört zu den Autoxidationen: Luftsauerstoff greift organische Stoffe schon bei Raumtemperatur an, von sich aus aber nur träge — die Reaktion muss erst anspringen. Getragen wird sie dann von Radikalen, Peroxylradikalen und Hydroperoxiden.

## Isolenöl gegen Konjuenöl

- Isolenöle: Die Fettsäurereste enthalten zunächst isolierte Doppelbindungen. Bei der Autoxidation entstehen zunächst Hydroperoxide; dabei können sich die Doppelbindungen teilweise umlagern und konjugierte Systeme bilden.
- Konjuenöle: Durch das bereits vorhandene konjugierte Doppelbindungssystem können sie relativ schnell über direkte Reaktionen der Doppelbindungen vernetzen — Hydroperoxide spielen aber auch bei ihnen eine Rolle; die genaue Sauerstoffaufnahme und der Vernetzungsmechanismus hängen aber stark vom einzelnen Öl und Reaktionsweg ab und lassen sich nicht pauschal als „weniger“ beziffern.
- Als Folge neigen Konjuenöle weniger zur Versprödung und bilden weniger flüchtige, geruchsintensive Spaltprodukte. Der Grund liegt in der Zahl der Hydroperoxide: Beim Isolenöl muss praktisch jede Vernetzungsstelle über ein Hydroperoxid gehen. Dessen Zerfall liefert zwar das vernetzende Radikal, spaltet die Fettsäurekette aber auch — dabei entstehen kurzkettige Aldehyde und Säuren, die den typischen Geruch alternder Ölanstriche ausmachen, und die Kette wird kürzer. Weil das über Jahre weiterläuft, versprödet der Film. Konjuenöle knüpfen einen größeren Teil der Vernetzung direkt über C–C-Bindungen zwischen den Doppelbindungen — pro geknüpfter Stelle entstehen weniger Hydroperoxide, also weniger Spaltungen.

## Warum Öle vergilben

- Die Vergilbung lässt sich nicht auf einen einzelnen Faktor reduzieren: Oxidationsgrad, Konjugationsmuster und die dabei entstehenden Chromophore wirken zusammen. Ein hoher Anteil an isoliertem Trien (Linolensäure) begünstigt sie zusätzlich — das Konjuenöl Holzöl vergilbt trotzdem deutlich. Linolensäurearme Öle wie Saflor oder Sonnenblume neigen deshalb tendenziell weniger zur Vergilbung, die genaue Zusammensetzung schwankt aber je nach Sorte.
- Die gelbe Farbe selbst stammt von konjugierten Oxidationsprodukten (Chromophoren), die blaues Licht absorbieren — Gelb ist dessen Komplementärfarbe; bei starker Alterung verschiebt sie sich nach Braun.

## Sikkative

Weil die Trocknung von Natur aus sehr langsam abläuft — der Luftsauerstoff ist von sich aus reaktionsträge, natürliche Antioxidantien im Öl (Tocopherole) bremsen den Start zusätzlich, und die radikalische Kettenreaktion muss sich erst über den langsamen Hydroperoxidzerfall selbst beschleunigen —, setzt man geringe Mengen Sikkative zu — organische Metallsalze von Cobalt, Mangan, Eisen, Calcium, Zirkonium, Cer und anderen. Vereinfacht dargestellt beschleunigen sie den Peroxidzerfall über einen Redox-Kreislauf des Metalls (real sind Alkoxy- und weitere Peroxyradikal-Zwischenstufen beteiligt, der Reaktionsweg ist komplexer als hier gezeigt): Im ersten Schritt spaltet das reduzierte Metallkation ein Hydroperoxid und wird dabei selbst oxidiert — es entsteht ein Oxy-Radikal. Im zweiten Schritt reagiert das oxidierte Metall mit einem weiteren Hydroperoxid zu einem Peroxy-Radikal und wird dabei wieder reduziert, also in den Ausgangszustand zurückversetzt. So zerlegt ein einziges Metallatom immer wieder neue Hydroperoxide — deshalb genügen kleinste Mengen —, und die entstehenden Radikale knüpfen die Ketten zum festen Netzwerk.

## Was das bringt — und was ein Firnis ist

So lässt sich die Trockenzeit drastisch verkürzen: Für einen dünnen Leinölfilm unter Laborbedingungen wird die Klebfreiheit mit rund 120 Stunden ohne und etwa 3 Stunden mit Sikkativ angegeben. Die Zahlen gelten für diesen Fall — Schichtdicke, Temperatur, Luftfeuchte, Sikkativtyp und die Frage, welcher Trockengrad gemeint ist (staubtrocken, klebfrei oder durchgetrocknet), verschieben sie erheblich. Ein sikkativiertes, oxidativ vorverdicktes Öl wird oft als Firnis bezeichnet — historisch steht der Begriff allgemeiner für speziell behandelte trocknende Öle bzw. Öllösungen, das Sikkativieren ist dabei nur eine mögliche Behandlung.

## Sikkative im Gefahrstoffrecht

Bleisikkative — früher als „Durchtrockner“ wichtig — sind wegen der Giftigkeit des Bleis heute in Bau- und Dekorlacken verboten. Cobaltsikkative, die klassischen Oberflächentrockner, stehen unter erheblichem Regulierungsdruck. Das lässt sich am wichtigsten Vertreter konkret machen: Cobalt(II)-2-ethylhexanoat (Cobalt-bis(2-ethylhexanoat), CAS 136-52-7) ist nach CLP Anhang VI harmonisiert als reproduktionstoxisch Kategorie 1B eingestuft, H360D — über den Gruppeneintrag „2-Ethylhexansäure und ihre Salze“ (Index 607-230-00-6). Ein 2026 eingereichter Vorschlag auf zusätzliche Einstufung als krebserzeugend Kategorie 1B (H350) und Repr. 1B (H360FD) ist zum Stand September 2026 noch nicht entschieden — geltende Einstufung und laufendes Verfahren sind also auseinanderzuhalten. Für andere Cobaltverbindungen ist der Status jeweils einzeln zu prüfen: harmonisierte Einstufung in CLP Anhang VI, dazu Kandidatenliste und Beschränkungen nach REACH sowie das Sicherheitsdatenblatt des Lieferanten. Deshalb werden zunehmend cobaltfreie Trockenstoffe (z. B. auf Eisen-, Mangan- oder Vanadiumbasis) eingesetzt. Calcium- und Zirkoniumverbindungen werden als vergleichsweise toxikologisch günstige Hilfstrockner eingesetzt.

## Öle im Überblick: Isolen, Konjuen und Sonderfälle

- Isolenöle (isolierte, nicht konjugierte Doppelbindungen) — die meisten klassischen trocknenden und halbtrocknenden Öle: Leinöl (hoher Linolensäureanteil, klassisches trocknendes Öl), Sojaöl, Sonnenblumenöl und Safloröl (alle halbtrocknend, Linol-/Linolensäure-geprägt).
- Konjuenöle (bereits von Natur aus konjugierte Doppelbindungen) — Holzöl (Tungöl) ist das klassische Beispiel: Es enthält überwiegend Eläostearinsäure mit einem konjugierten Triensystem und trocknet dadurch besonders schnell, neigt aber bei zu dicker Schicht zur Runzelbildung.
- Gemischte Fälle — dehydratisiertes Ricinusöl (DCO, Ricinenöl): Bei der technischen Dehydratisierung von Ricinusöl entstehen aus den ursprünglich isolierten Doppelbindungen teilweise konjugierte Systeme, teilweise bleiben isolierte erhalten — das Öl enthält deshalb ein Gemisch aus Isolen- und Konjuenanteilen (siehe Grenzfall unten).
- Nichttrocknend — Cocosöl (fast gesättigt, sehr niedrige Iodzahl) und unbehandeltes Ricinusöl (Ricinolsäure hat nur eine Doppelbindung, dafür eine OH-Gruppe — trocknet oxidativ praktisch nicht, dient aber als Ausgangsstoff für DCO und für Alkydmodifizierungen).

### Iodzahl und Trocknungscharakter

```
Die Iodzahl (IZ) gibt an, wie viel Gramm Iod von 100 g Öl gebunden werden; 1 mol
   Doppelbindungen bindet dabei 1 mol Iod = 253,8 g.

IZ < 100          nichttrocknend   (Cocosöl 9, Ricinusöl 84)
IZ 100 bis 150    halbtrocknend    (Sojaöl 127, Sonnenblumenöl 130, Safloröl 145)
IZ > 150          trocknend        (Holzöl 163, Leinöl 178)
(Die Iodzahl ist ein grober Orientierungswert für den Ungesättigungsgrad – keine sichere
   Klassifizierung des tatsächlichen Trocknungsverhaltens; die Grenzen sind fließend.)
```

### Grenzfall: dehydratisiertes Ricinusöl

Dehydratisiertes Ricinusöl (DCO, Ricinenöl) liegt mit einer Iodzahl von etwa 135 bis 140 genau im Übergangsbereich zwischen „halbtrocknend“ und „trocknend“ — nach der reinen Zahlengrenze wäre es noch halbtrocknend. In der Lackpraxis wird es dennoch als synthetisch erzeugtes, gut trocknendes Öl eingesetzt: Die bei der Dehydratisierung entstehenden konjugierten Doppelbindungssysteme trocknen deutlich schneller, als es die Iodzahl allein vermuten lässt. Genau das zeigt: Die Iodzahl allein reicht für eine verlässliche Einordnung nicht aus — Doppelbindungsanordnung und -typ zählen mit.

### Reaktionsgleichung: oxidative Trocknung (Autoxidation)

```
Am aktivierten (allylständigen) C der Fettsäure:
–CH=CH–CH₂– + O₂ → –CH=CH–CH(OOH)–  (Hydroperoxid)

Der Zerfall zu Radikalen führt zur Vernetzung über C–C-, Ether-
und Peroxid-Brücken. Sikkative (Co, Mn) beschleunigen die Zerlegung der Hydroperoxide
und damit die Vernetzung und Trocknung.
```

**Merksatz**

Trocknende Öle härten nicht durch Verdunsten, sondern durch Autoxidation mit Luftsauerstoff. Die Iodzahl zählt die Doppelbindungen, sagt aber nichts über ihre Lage — Konjuenöle reagieren rascher als Isolenöle gleicher Iodzahl. Sikkative sind Katalysatoren: sie beschleunigen die Reaktion, ersetzen aber weder Sauerstoff noch Zeit. Firnis ist ein speziell behandeltes trocknendes Öl — meist oxidativ vorverdickt, meist sikkativiert; eine Aufbereitung, kein eigener Bindemitteltyp.

**Stichwörter:** Triglycerid, fettes Öl, Fettsäure, Isolensäure, Konjuensäure, oxidative Trocknung, Autoxidation, Hydroperoxid, Sikkativ, Trockenstoff, Firnis, Leinöl, Holzöl, Tungöl, Iodzahl, Ricinusöl, dehydratisiertes Ricinusöl
*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; CLP-Verordnung (EG) Nr. 1272/2008*

## Übungsblatt Ü-14 — Musterlösungen

**Frage 1** (Verständnis, 8 Punkte)
Erläutern Sie den Mechanismus der oxidativen Härtung eines Isolenöls und die Wirkungsweise von Sikkativen.

**Einordnung:** Die oxidative Härtung gehört zu den Autoxidationen: Organische Stoffe werden bei Raumtemperatur langsam durch Luftsauerstoff oxidiert.
**Ursache:** Luftsauerstoff ist gegenüber organischen Molekülen von sich aus reaktionsträge; die Reaktion muss erst anspringen und läuft dann über Radikalbildung und Hydroperoxide.
**Ablauf bei Isolenölen:** Zunächst entstehen vorrangig Hydroperoxide. Erst deren Zerfall zu Oxy-Radikalen löst die vernetzende Polymerisation und damit die eigentliche Verfilmung aus.
**Wirkung der Sikkative:** Sikkative sind organische Metallsalze, etwa von Cobalt, Mangan, Zirkonium oder Cer. Das Metallkation reagiert mit dem Hydroperoxid und beschleunigt dessen Zerfall zum Oxy-Radikal. Durch Folgereaktionen wird das Metall wieder reduziert und damit reaktiviert.
**Wirkung in Zahlen:** Für einen dünnen Leinölfilm unter Laborbedingungen wird die Klebfreiheit mit rund 120 Stunden ohne und etwa 3 Stunden mit Sikkativ angegeben — Schichtdicke, Temperatur und der gemeinte Trockengrad verschieben die Werte erheblich. Ein sikkativiertes, oxidativ vorverdicktes Öl wird oft als Firnis bezeichnet.
*Bewertung: Der Mechanismus wird vollständig vom trägen Sauerstoff über den Radikalstart bis zur Vernetzung durchlaufen, und der katalytische Charakter der Sikkative wird ausdrücklich benannt.*

**Frage 2** **(Berechnung, 9 Punkte)**

Ein Triglycerid hat eine molare Masse von 878 g/mol und enthält im Mittel 5,5 Doppelbindungen je Molekül. Berechnen Sie die theoretische Iodzahl und ordnen Sie den Trocknungscharakter zu.

**Grundlage:** Ein Mol isolierte Doppelbindungen addiert ein Mol Iod, also 253,8 g.

**Ansatz:** In 100 g stecken 100 g / M = 100/878 mol ≈ 0,114 mol Moleküle (M = molare Masse = 878 g/mol). Jedes Molekül trägt im Mittel n = 5,5 Doppelbindungen, und 1 mol Doppelbindungen bindet 253,8 g Iod. Also: IZ = (100 / M) · n · 253,8 = 25 380 · n / M (n = Doppelbindungen je Molekül, 25 380 = 100 · 253,8)

**Rechnung:** IZ = 25 380 · 5,5 / 878 = 139 590 / 878 = 159,0 g/100 g

**Einordnung:** Bei einer Iodzahl über 150 handelt es sich um ein trocknendes Öl.

**Antwortsatz:** Die theoretische Iodzahl beträgt 159 g Iod je 100 g Substanz; das Öl ist trocknend.

*Bewertung: Die Formel wird aus der Grundaussage hergeleitet statt nur zitiert. Wer den Zusammenhang mit 253,8 g je Mol kennt, kann die Formel auch dann aufstellen, wenn sie nicht auf dem Formelblatt steht.*

**Frage 3** **(Anwendung, 7 Punkte)**

Ein Anstrich auf Basis eines Isolenöls trocknet langsam und versprödet mit den Jahren. Begründen Sie über den Reaktionsmechanismus, worin sich ein Konjuenöl unterscheidet — und nehmen Sie Stellung, ob damit auch die Vergilbung sicher geringer ausfällt.

**Unterschied im Mechanismus:** Bei Isolenölen läuft die Vernetzung über den Zerfall zuvor gebildeter Hydroperoxide. Konjuenöle können daneben zu einem erheblichen Teil auch direkt über C–C-Verknüpfungen reagieren — die übrige Oxidationschemie mit Hydroperoxiden bleibt aber auch bei ihnen von Bedeutung.

**Folge für Spaltprodukte und Versprödung:** Beim Isolenöl geht praktisch jede Vernetzungsstelle über ein Hydroperoxid. Dessen Zerfall spaltet auch die Fettsäurekette — es entstehen kurzkettige Aldehyde und Säuren (Geruch) und der Film versprödet über die Jahre. Konjuenöle knüpfen mehr Vernetzungsstellen direkt über C–C-Bindungen und brauchen dafür weniger Hydroperoxide.

**Folge für die Vergilbung:** Konjugierte Systeme führen zu einem anderen Reaktionsweg und anderen Alterungsprodukten — daraus folgt aber nicht automatisch eine generell geringere Vergilbung; die Farbtonentwicklung hängt zusätzlich von Öltyp, Fettsäurezusammensetzung, Pigmenten, Sikkativierung, Schichtdicke und Alterung ab.

**Folge für die Trocknung:** Über die direkten C–C-Verknüpfungen verfilmen Konjuenöle zudem schneller — der Anstrich trocknet spürbar rascher.

**Einschränkung:** Konjuenöle wie Holzöl neigen ihrerseits zur Runzelbildung bei zu dickem Auftrag; die Applikationsvorschrift muss darauf abgestimmt werden.

*Bewertung: Die Begründung verläuft über den Reaktionsmechanismus, nicht über bloße Erfahrungswerte. Die genannte Einschränkung zeigt ein abgewogenes Urteil.*

# L-15 · Natürliche und modifizierte Naturharze

*Kolophonium, Schellack und die Wege ihrer Verbesserung*

**Prüfungsteil 2** · A 10

Kolophonium ist unmodifiziert kaum brauchbar; die Modifizierungen verbessern es, indem sie Säurezahl, Molekülgröße und Doppelbindungsgehalt gezielt verändern — nicht jeder Weg alle drei zugleich.

## Kolophonium

Das für die Lackchemie wichtigste Naturharz wird aus Kiefern gewonnen. Der nach Ritzen des Stammes austretende Balsam wird destillativ in Terpentinöl und hellfarbenes Balsamharz aufgetrennt. Das dunklere Wurzelharz gewinnt man aus den Wurzelstöcken durch Extraktion, das Tallharz aus dem bei der Cellulosegewinnung nach dem Sulfatverfahren anfallenden Tallöl. Kolophonium ist eine rubinrote bis hellgelbe, spröde Masse, die bei etwa 80 °C schmilzt.

## Struktur der Abietinsäure

Abietinsäure ($C_{19}H_{29}$–COOH, Summenformel $C_{20}H_{30}O_2$) ist eine tricyclische Diterpen-Carbonsäure: drei anellierte (miteinander verschmolzene) Sechsringe, keine Aromaten. Die Struktur ist also cycloaliphatisch (alicyclisch) — kein Benzolring wie bei aromatischen Verbindungen, aber auch keine offenkettige, rein aliphatische Struktur wie bei einer Fettsäure. In der Abietinsäure erstreckt sich das konjugierte Doppelbindungssystem (Dien) über zwei der drei Ringe (heteroannular). In dieser Anordnung ist es für eine Diels-Alder-Reaktion nicht geeignet; erst die Isomerisierung zur Lävopimarsäure, deren Dien vollständig in einem Ring liegt (homoannular), macht die Maleinisierung möglich.

## Warum es unmodifiziert kaum taugt

Chemisch besteht Kolophonium überwiegend aus Abietinsäure und verwandten Harzsäuren und hat daher eine hohe Säurezahl von etwa 150 bis 180 mg KOH/g. Diese trägt wesentlich zur begrenzten Verträglichkeit mit vielen anderen Lackrohstoffen bei. Hinzu kommen schlechte Oxidations- und Vergilbungsbeständigkeit, mangelhafte Wasserfestigkeit, Neigung zur Kristallisation und Klebrigkeit.

**Merksatz**

Drei Ziele stehen hinter der Modifizierung: Säurezahl senken, molare Masse vergrößern, reaktive Doppelbindungen verringern. Nicht jeder Weg erreicht alle drei — jeder zielt vor allem auf eine Schraube: Salzbildung (Resinate) und Veresterung senken die Säurezahl und vergrößern dabei das Molekül; die thermisch-katalytische Behandlung vergrößert vor allem das Molekül; Hydrierung und Disproportionierung entschärfen die reaktiven Doppelbindungen und bringen Lichtstabilität. Die thermisch-katalytischen und die Maleinisierungs-Wege verbrauchen die Doppelbindungen nur nebenbei über Diels-Alder; die Maleinisierung erhöht die Säurezahl zunächst sogar und wird darum meist mit einer anschließenden Veresterung kombiniert.

## Wo Kolophonium heute eingesetzt wird

Als Bindemittel im klassischen Lack ist Kolophonium weitgehend von Kunstharzen abgelöst worden. Als nachwachsender Rohstoff für Derivate ist es dagegen unverändert ein Massenprodukt — in Klebstoffen und Klebrigmacher-Harzen, in Druckfarben, in Papierleimungsmitteln und in speziellen Harzsystemen. Der heutige Wert liegt darin, aus dem Naturstoff durch gezielte Modifizierung Produkte mit definierten Eigenschaften zu machen.

Welcher Weg zählt in der Praxis am meisten? Mengenmäßig die Veresterung: Kolophonium-Ester mit Glycerin oder Pentaerythrit sind das Standardprodukt für Hart- und Klebrigmacher-Harze. In Druckfarben führen die Resinate. Wo Helligkeit und Alterungsbeständigkeit zählen, nimmt man das hydrierte oder disproportionierte Harz. Die Maleinisierung steht dagegen selten allein — sie ist meist die Vorstufe zu einem maleinatmodifizierten Ester mit höherem Erweichungspunkt.

## Die wichtigsten Wege

• Thermisch-katalytische Behandlung — es laufen Decarboxylierungen, Isomerisierungen und Dehydrierungen ab, begleitet von Dimerisierung. Ergebnis ist das polymerisierte Kolophonium.
• Salzbildung mit Oxiden oder Hydroxiden von Zink, Magnesium oder Calcium ergibt Zink-, Magnesium- beziehungsweise Kalk-Harze (Resinate) mit deutlich verringerter Säurezahl und besserer Löslichkeit in unpolaren Lösemitteln. Anwendung vorwiegend bei Druckfarben.
• Veresterung mit mehrfunktionellen Alkoholen wie Glycerin oder Pentaerythrit senkt die Säurezahl drastisch und vergrößert das Molekül erheblich. Die entstehenden Kolophonium-Ester dienen als Hartharze zur Verbesserung von Glanz, Härte und physikalischer Trocknung oder als Klebrigmacher-Harze.
• Maleinisierung — Maleinsäureanhydrid reagiert bei etwa 190 °C nach Diels-Alder mit Lävopimarsäure (einem konjugierten Dien), die durch Isomerisierung aus den übrigen Harzsäuren laufend nachgeliefert wird. Dien und Dienophil (Maleinsäureanhydrid) verbinden sich zu einem ringförmigen Diels-Alder-Addukt; die Anhydridgruppe bleibt erhalten und erhöht die Funktionalität des Harzes — etwa für eine anschließende Veresterung.
• Hydrierung oder Disproportionierung — bei der Hydrierung wird Wasserstoff an die konjugierten Doppelbindungen der Harzsäuren angelagert (hydriertes Kolophonium); bei der Disproportionierung lagern sich die Harzsäuren unter Wasserstoff-Umverteilung in dehydrierte (aromatische) und hydrierte Formen um. Beides beseitigt die reaktive Doppelbindung und macht das Harz licht- und oxidationsstabil sowie vergilbungsarm; Säurezahl und Molekülgröße bleiben weitgehend gleich. Anwendung in hellen, alterungsstabilen Systemen und in Klebrigmacher-Harzen.

VERTIEFUNG — ÜBER DEM PRÜFUNGSSTOFF

### Warum ausgerechnet Maleinsäureanhydrid? — Vertiefung

Maleinsäureanhydrid ist ein Fünfring: Zwei Carbonylgruppen sind über ein Sauerstoffatom verbrückt, zwischen ihnen sitzt eine C=C-Doppelbindung — kurz –CH=CH– mit –CO–O–CO– als Ringschluss ($C_4H_2O_3$, 98,1 g/mol).

Genau dieser Bau macht es zum idealen Partner. Die beiden Carbonylgruppen ziehen Elektronendichte von der Doppelbindung ab; sie wird dadurch elektronenarm. Eine Diels-Alder-Reaktion läuft aber gerade dann bereitwillig ab, wenn ein elektronenreiches Dien — hier das konjugierte System der Lävopimarsäure — auf ein elektronenarmes Dienophil trifft. Sie braucht weder Katalysator noch Lösemittel und spaltet nichts ab: reine Addition, keine Nebenprodukte, kein Wasser.

Der eigentliche Gewinn kommt danach. Die Anhydridgruppe bleibt im Addukt erhalten und ist weiter reaktiv: Mit Alkoholen öffnet sie sich zu Ester und freier Säure. Deshalb steigt die Säurezahl bei der Maleinisierung zunächst — und deshalb folgt fast immer eine Veresterung. Dazu kommt das Praktische: Maleinsäureanhydrid ist billig, in großen Mengen verfügbar und bei den rund 190 °C Reaktionstemperatur flüssig.

## Reaktionswege der Modifizierung

Kolophonium besteht überwiegend aus Harzsäuren (Kurzschreibweise R–COOH, R = Harzsäure-Rest der Abietinsäure). Zwei Bereiche sind für die Modifizierung entscheidend: die Carboxylgruppe –COOH bestimmt die Säurezahl und lässt sich verestern oder in ein Salz überführen; die konjugierten C=C-Doppelbindungen bestimmen Reaktivität sowie Licht- und Oxidationsbeständigkeit.

## Die Reaktionsgleichungen

```
Säurezahl ↓ – Salzbildung (Resinate):
  2 R–COOH + ZnO      → (R–COO)₂Zn + H₂O
  2 R–COOH + Ca(OH)₂  → (R–COO)₂Ca + 2 H₂O

Säurezahl ↓, Molekül ↑ – Veresterung:
  3 R–COOH + C₃H₅(OH)₃    → C₃H₅(O–CO–R)₃ + 3 H₂O   (Glycerin)
  4 R–COOH + C(CH₂OH)₄    → C(CH₂–O–CO–R)₄ + 4 H₂O   (Pentaerythrit)

Molekül ↑ – thermisch-katalytisch: Dimerisierung der
Harzsäuren über die konjugierten Doppelbindungen (v. a.
Diels-Alder) zu höhermolekularen Harzsäurederivaten;
eine allgemeine stöchiometrische Gleichung wird nicht
angegeben.

Funktionalität, Säurezahl ↑ – Maleinisierung (Diels-Alder):
  Harzsäure-Dien + Maleinsäureanhydrid → Diels-Alder-Addukt

Doppelbindungen ↓ – Hydrierung:
  C=C + H₂ → C–C   (Absättigung der Doppelbindungen)

Doppelbindungen ↓ – Disproportionierung (H-Umverteilung):
  2 Abietinsäure → Dehydro- + Dihydroabietinsäure

R–COOH Harzsäure (Abietinsäure C₂₀H₃₀O₂) · ↓ senkt · ↑ erhöht
```

## Schellack

Schellack ist das von Lackschildläusen gebildete Umwandlungsprodukt des Saftes bestimmter Bäume und damit ein Harz tierischen Ursprungs. Er ist je nach Veredlungsgrad rubinrot bis gelblich, erweicht bei 65 bis 80 °C und ist in Alkohol gut löslich. Chemisch besteht er aus freien und veresterten aliphatischen und alicyclischen (terpenoiden) Hydroxysäuren sowie etwas Wachs; die Säurezahl liegt bei 70 mg KOH/g. Verwendung findet er in Holzlacken, Tinten, Polituren und Flexodruckfarben; mit Alkalien, Borax, Aminen oder Ammoniak lässt er sich wasserlöslich machen.

Gebraucht wird Schellack weiterhin, wenn auch in Nischen — und dort ist er schwer zu ersetzen: als Isolier- und Absperrgrundierung, die wasserlösliche Holzinhaltsstoffe sowie Nikotin- und Wasserflecken zuverlässig abriegelt; in der Möbelrestaurierung als Schellackpolitur; als Überzugsmittel für Lebensmittel (E 904, etwa auf Süßwaren und Zitrusfrüchten) und als Filmüberzug für Tabletten. Der Grund ist immer derselbe: Er löst sich in Alkohol, trocknet rein physikalisch sehr schnell und zeigt auf vielen unterschiedlichen Untergründen eine gute Haftung. Weitere Naturharze wie Kopal und Dammar haben in der Lacktechnik heute nur noch Nischenbedeutung, etwa in der Restaurierung und für Künstlerfirnisse.

**Stichwörter:** Kolophonium, Balsamharz, Wurzelharz, Tallharz, Abietinsäure, Schellack, Kopal, Dammar, Resinat, Kolophonium-Ester, Hartharz, Maleinisierung, Diels-Alder, Diels-Alder-Addukt, Dienophil, Maleinsäureanhydrid, Lävopimarsäure, Absperrgrundierung, E 904, Säurezahl
*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie*

## Übungsblatt Ü-15 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 7 Punkte)**
Nennen Sie die drei Ziele, die hinter den Modifizierungen des Kolophoniums stehen, und ordnen Sie der Veresterung ihre Wirkung zu.

**Die drei Ziele:** Erniedrigung der Säurezahl, Reduzierung des Gehalts an reaktiven Doppelbindungen und Vergrößerung der molaren Masse.
**Veresterung:** Die Harzsäuren werden mit mehrfunktionellen Alkoholen — Polyolen wie Glycerin oder Pentaerythrit — verestert.
**Wirkung:** Da die freien Carboxygruppen abreagieren, ergibt sich eine drastische Erniedrigung der Säurezahl. Weil ein Polyol mehrere Harzsäuremoleküle verknüpft, resultiert zugleich eine erhebliche Molekülvergrößerung.
**Verwendung:** Die entstehenden Kolophonium-Ester werden je nach Eigenschaftsprofil als Hartharze zur Verbesserung von Glanz, Härte und physikalischer Trocknung oder als Klebrigmacher-Harze eingesetzt.
*Bewertung: Die Antwort ordnet der Veresterung zwei der drei Ziele konkret zu und begründet beide chemisch. Die Verwendungsangabe schließt den Bogen zur Anwendung.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**
Ein Kolophonium hat eine Säurezahl von 168 mg KOH/g. Nach der Veresterung beträgt sie 12 mg KOH/g. Berechnen Sie, wie viel Prozent der ursprünglich freien Säuregruppen umgesetzt wurden.

**Überlegung:** Die Säurezahl ist der freien Säure direkt proportional. Der Umsatz lässt sich daher unmittelbar aus dem Verhältnis der Säurezahlen bestimmen.
**Ansatz:** Umsatz = (SZ(vorher) − SZ(nachher)) / SZ(vorher) · 100 %
**Rechnung:** Umsatz = (168 − 12) / 168 · 100 % = 156 / 168 · 100 % = 92,9 %
**Antwortsatz:** Rund 93 % der ursprünglich freien Säuregruppen wurden umgesetzt; etwa 7 % liegen noch frei vor.
*Bewertung: Der Ansatz wird durch die Proportionalitätsüberlegung begründet. Die Angabe des Restanteils im Antwortsatz zeigt, dass die Bedeutung des Ergebnisses erfasst wurde.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**
Beurteilen Sie, ob unmodifiziertes Kolophonium für einen witterungsbeständigen Außenanstrich geeignet ist.

**Urteil:** Unmodifiziertes Kolophonium ist dafür nicht geeignet.
**Begründung im Einzelnen:** Es besitzt eine schlechte Oxidations- und Vergilbungsbeständigkeit, wodurch der Anstrich unter Bewitterung rasch nachdunkelt und versprödet. Die hohe Säurezahl von 150 bis 180 mg KOH/g bewirkt eine mangelhafte Wasserfestigkeit — für einen Außenanstrich ein Ausschlusskriterium. Hinzu kommen schlechte Verträglichkeit und Löslichkeit sowie Neigung zur Kristallisation und Klebrigkeit.
**Alternative:** Einzusetzen wäre eine modifizierte Form — für Licht- und Oxidationsstabilität vor allem hydriertes oder disproportioniertes Kolophonium (reaktive Doppelbindungen entschärft), kombiniert mit gesenkter Säurezahl etwa als Kolophonium-Ester.
*Bewertung: Das Urteil steht am Anfang, die Begründung folgt strukturiert und die Alternative wird konkret benannt. Fragen mit „beurteilen Sie“ verlangen genau diesen Dreischritt.*

# L-16 · Alkydharze I — Chemie und Öllänge

*Aufbau, Herstellung und die Öllänge als Ordnungsgröße*

**Prüfungsteil 1** · A 9 · A 10 · B 12

Ein Alkydharz ist ein mit Fettsäuren aufgebauter Polyester — die Öllänge sagt, wie viel Öl darin steckt, und beeinflusst zahlreiche Eigenschaften wie Trocknung, Härte, Flexibilität und Löslichkeit.

## Was ein Alkydharz ist

Der Name „Alkyd“ setzt sich aus alcohol und acid zusammen: Ein Alkydharz ist ein Polyester aus einem mehrwertigen Alkohol (Glycerin, Pentaerythrit oder Trimethylolpropan), einer mehrbasigen Säure bzw. deren Anhydrid (meist Phthalsäureanhydrid, für härtere Typen Isophthalsäure) und Fettsäuren aus pflanzlichen Ölen. Die Fettsäure-Seitenketten tragen die Doppelbindungen, über die das Harz an der Luft oxidativ trocknet (siehe L-14).

## Herstellung im Prinzip

Alkohol, Säure und Fettsäure werden unter Wasserabspaltung verestert (Polykondensation, siehe L-04). Über das Verhältnis der Bausteine lassen sich Molmasse, Säurezahl und OH-Zahl einstellen. Als Fettsäurequelle dienen trocknende und halbtrocknende Öle wie Leinöl, Sojaöl, Sonnenblumenöl oder Tallöl (siehe L-14).

## Die Öllänge als Ordnungsgröße

Die Öllänge ist der Massenanteil des eingesetzten Öls am Harzfestkörper. Bei über Fettsäuren formulierten Alkyden ist die Fettsäuremenge davon zu unterscheiden — beide Bezugsgrößen dürfen nicht vermischt werden. Sie ordnet die Alkyde in Klassen (Richtwerte):

- Kurzölalkyd — unter 40 % Öl
- Mittelölalkyd — 40 bis 60 % Öl
- Langölalkyd — über 60 % Öl
- sehr langöliger Alkyd — etwa 70 bis 85 % Öl

## Was die Öllänge bestimmt

Je höher die Öllänge, desto mehr Öl (Fettsäure) steckt im Harz — bei einem trocknenden Öl also auch mehr trocknende Fettsäure. Ein solcher langöliger Alkyd trocknet oxidativ bei Raumtemperatur, ist weicher und flexibler, verläuft und benetzt gut und löst sich schon in schwach aromatischen Lösemitteln (Testbenzin). Wichtig: Die Öllänge allein sagt noch nichts über die Trocknung — dafür zählt der Fettsäuretyp (siehe unten). Kurzölige Alkyde sind härter und schneller im physikalischen Antrocknen, brauchen aber stärker aromatische Lösemittel oder eine Einbrennhärtung und trocknen kaum von selbst.

## Fettsäuretyp und Trocknung

Neben der Menge zählt die Art der Fettsäure. Nur mehrfach ungesättigte, trocknende Fettsäuren (Leinöl-Typ) lassen das Harz oxidativ härten; die Iodzahl ist ihr Maß (siehe L-14). Alkyde aus nichttrocknenden Fettsäuren (Cocosöl, unbehandeltes Ricinusöl) härten nicht von selbst — sie dienen als weichmachende, nicht vergilbende Komponente, etwa in Einbrennlacken mit Aminoharzen.

### Grenzen der Alkyde

Die Esterbindungen des Alkyds sind gegen Laugen empfindlich: Im Alkalischen verseifen sie (Hydrolyse zu Seifen). Konventionelle Alkyde sind deshalb für die direkte Beschichtung von frischem, alkalischem Beton und von Zink — vor allem im Duplexsystem direkt auf verzinktem Stahl — problematisch: Neben der Verseifung spielen ungünstige Oberflächenchemie, Zinksalze bzw. Korrosionsprodukte auf der Zinkoberfläche sowie mangelhafte Haftung eine Rolle (Ablösen, Blasen). Deshalb sind geeignete Grundierungen bzw. spezielle Systeme erforderlich, nicht der direkte Alkyd-Auftrag. Weitere Grenzen: Sie vergilben (besonders langölig und im Dunkeln), härten oxidativ nur langsam durch und verspröden mit der Zeit durch fortschreitende Oxidation; Wetter-, Chemikalien- und Kratzbeständigkeit erreichen nicht das Niveau moderner Bindemittel. Im Automobilbau werden sie deshalb nicht eingesetzt — dort verlangen die Einbrennsysteme die Beständigkeit gesättigter Polyester und Acrylate mit Aminoharz- oder Isocyanat-Vernetzung (siehe L-20).

### Reaktionsgleichung: Veresterung (Polykondensation)

```
Grundreaktion – Ester unter Wasserabspaltung:
–COOH + HO–R– → –COO–R– + H₂O

Alkyd = mehrwertiger Alkohol (z. B. Glycerin) + mehrbasige Säure bzw. Säureanhydrid
(z. B. Phthalsäureanhydrid) + Fettsäure, unter Wasserabspaltung verestert.

Beim Säureanhydrid – hier der fünfgliedrige zyklische Anhydridring des
Phthalsäureanhydrids – öffnet ein Alkohol diesen Ring direkt:
Anhydridring + HO–R → –COO–R (neue Esterbindung) + –COOH (freie Säuregruppe)
Dabei wird kein Wasser abgespalten: Der Estersauerstoff stammt aus dem
Alkohol; der Ringsauerstoff wird zusammen mit dem Wasserstoff des Alkohols
zur OH-Gruppe der neu entstehenden freien Carboxylgruppe. Die entstandene freie
   Carboxylgruppe reagiert danach wie
jede gewöhnliche Säure weiter – bei diesem und allen folgenden Schritten
unter Wasserabspaltung (Grundreaktion oben).
```

**Merksatz**

Zwei Größen genügen für die erste Einordnung eines Alkyds: die Öllänge (wie viel Öl) und der Fettsäuretyp (trocknend oder nicht). Sie entscheiden über Trocknung, Härte, Lösemittel und Anwendung.

**Stichwörter:** Alkydharz, Alkyd, Öllänge, Kurzölalkyd, Mittelölalkyd, Langölalkyd, Phthalsäureanhydrid, Isophthalsäure, Glycerin, Pentaerythrit, Trimethylolpropan, Fettsäure, Leinöl, trocknendes Öl, oxidative Härtung
*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur*

## Übungsblatt Ü-16 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Erklären Sie, was ein Alkydharz chemisch ist, und welche Rolle die Fettsäure für die Trocknung spielt.

**Chemischer Aufbau:** Ein Alkydharz ist ein Polyester aus einem mehrwertigen Alkohol (z. B. Glycerin, Pentaerythrit), einer mehrbasigen Säure (meist Phthalsäureanhydrid) und Fettsäuren. Der Name steht für alcohol + acid.

**Rolle der Fettsäure:** Die Fettsäure-Seitenketten tragen die Doppelbindungen. Nur trocknende, mehrfach ungesättigte Fettsäuren lassen das Harz mit Luftsauerstoff oxidativ vernetzen (siehe L-14).

**Folge für die Trocknung:** Ohne trocknende Fettsäure härtet das Harz nicht von selbst; es kann dann nur physikalisch antrocknen oder muss eingebrannt werden.

**Einordnung:** Menge und Art der Fettsäure sind damit die zwei wichtigsten Stellgrößen des Alkyds.

*Bewertung: Der Aufbau aus Alkohol, Säure und Fettsäure wird korrekt benannt, und die Trocknung wird ausdrücklich an die Doppelbindungen der Fettsäure geknüpft — nicht an das Verdunsten von Lösemittel.*

**Frage 2** **(Berechnung, 9 Punkte)**

Ein Alkydharz wird aus 65 kg trocknendem Öl und 35 kg harzbildenden Komponenten (Polyol und Säure, als Festkörper gerechnet) aufgebaut. Berechnen Sie die Öllänge und ordnen Sie das Harz einer Klasse zu.

**Gegeben:** Öl = 65 kg; übrige Festkörper = 35 kg; Harzfestkörper = 100 kg
**Ansatz:** Öllänge = Öl / Harzfestkörper · 100 %
**Rechnung:** Öllänge = 65 kg / 100 kg · 100 % = 65 %
**Einordnung:** 65 % liegt über 60 % → Langölalkyd.
**Antwortsatz:** Die Öllänge beträgt 65 %; es handelt sich um einen Langölalkyd.
*Bewertung: Die Öllänge wird auf den gesamten Harzfestkörper bezogen, nicht nur auf die harzbildenden Komponenten. Die Klassengrenze bei 60 % wird richtig angewendet.*

**Frage 3** **(Anwendung, 7 Punkte)**

Ein Maler soll im Freien ein Holzbauteil lufttrocknend und mit dem Pinsel streichen; gute Penetration und geringer Lösemittelgeruch sind gefragt. Welche Öllänge wählen Sie und warum?

**Wahl:** Ein Langölalkyd (über 60 % Öl).
**Trocknung:** Der hohe Anteil trocknender Fettsäure lässt das Harz bei Raumtemperatur oxidativ härten — ohne Einbrennen.
**Lösemittel und Verarbeitung:** Langölige Alkyde lösen sich in schwach aromatischem Testbenzin (geruchsärmer), verlaufen gut, benetzen und dringen ins Holz ein und bleiben flexibel.
**Nachteil benennen:** Nachteilig sind die langsamere Trocknung und die stärkere Vergilbungsneigung — im Außenbereich meist vertretbar.
*Bewertung: Die Wahl wird an den Anforderungen festgemacht (lufttrocknend, streichbar, geruchsarm) und der Nachteil ehrlich genannt. Das zeigt, dass die Öllänge als Kompromiss verstanden ist.*

# L-17 · Alkydharze II — Modifizierung und Anwendung

*Wie man Alkyde gezielt verbessert und wo sie eingesetzt werden*

**Prüfungsteil 2** · A 10 · B 12

Die Grundlage bleibt der oxidativ trocknende Polyester — Modifizierung und Öllänge steuern gezielt Härte, Trocknung, Beständigkeit und Anwendung.

## Warum modifiziert wird

Unmodifizierte Alkyde sind vielseitig, aber in Härte, Trocknungsgeschwindigkeit und Beständigkeit begrenzt. Durch den Einbau anderer Komponenten in den Polyester lassen sich einzelne Eigenschaften gezielt anheben, ohne den Grundcharakter des oxidativ trocknenden Harzes aufzugeben.

## Wichtige Modifizierungen

- Styrolisiert — schnelleres physikalisches Antrocknen, dafür begrenzte Verträglichkeit.
- Urethanalkyd (Urethanöl) — härter, schneller, besser abrieb- und chemikalienbeständig; ein Teil der Esterbindungen wird durch Urethanbindungen ersetzt, indem OH-funktionelle Alkyd- bzw. Fettsäure-/Ölkomponenten mit Diisocyanaten reagieren (siehe L-25).
- Epoxidmodifiziert — bessere Haftung und Chemikalienbeständigkeit, für Grundierungen.
- Silicon- und acrylmodifiziert — bessere Wetter- und Vergilbungsbeständigkeit.
- Thixotropiert (polyamidmodifiziert) — nicht tropfend, für Bauten- und DIY-Lacke.

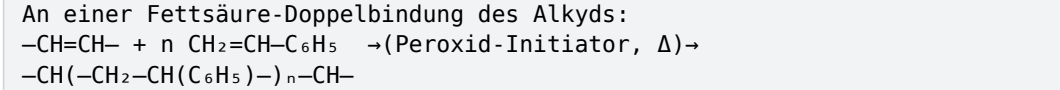
## Wie styrolisiert und acrylmodifiziert chemisch ablaufen

Styrolisierung und Acrylmodifizierung sind kein Veresterungsschritt, sondern eine radikalische Pfropfung: Styrol- bzw. Acrylatmonomere werden mit einem Peroxid-Initiator bei erhöhter Temperatur an die C=C-Doppelbindungen der ungesättigten Fettsäurereste angelagert. Es entsteht ein Pfropfcopolymer — eine Alkyd-Hauptkette mit seitenständigen Polystyrol- bzw. Polyacrylat-Segmenten. Dabei entsteht eine neue C–C-Bindung.

Weil die Pfropfung einen Teil der Doppelbindungen verbraucht, die sonst für die oxidative Durchtrocknung zur Verfügung stünden, kann sich mit steigendem Styrol- bzw. Acrylatanteil die oxidative Nachhärtung verlangsamen — ein Grund, warum Verträglichkeit und Vergilbung mit betrachtet werden müssen: Polystyrol-Segmente sind mit der polaren Alkydmatrix nur begrenzt verträglich und können bei zu hohem Anteil zu Trübung oder Phasentrennung führen.

## Reaktionsgleichung: Styrolisierung (radikalische Pfropfung)

An einer Fettsäure-Doppelbindung des Alkyds:



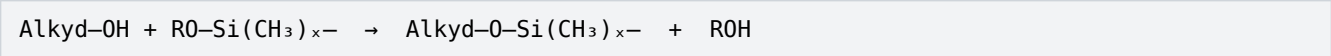
Das Peroxid startet die Radikalkette; Styrol lagert sich wiederholt an, bis die Kette abbricht. Acrylatmonomere (z. B. Methylmethacrylat) reagieren nach demselben Prinzip.

## Wie Siliconmodifizierung abläuft — und warum man überhaupt modifiziert

Siliconmodifizierte Alkyde entstehen dagegen durch Kondensation: OH-Gruppen des Alkyds reagieren mit reaktiven Si–OH- bzw. Si–OR-Gruppen eines Siliconharz-Zwischenprodukts unter Abspaltung von Wasser bzw. Alkohol. Es entstehen Si–O–C-Bindungen, die die organische Alkydkette mit dem anorganischen Siloxangerüst verknüpfen – ein dritter, wieder eigenständiger Reaktionstyp neben Veresterung und radikalischer Pfropfung.

Warum modifiziert man überhaupt, statt gleich das reine Silicon- oder Acrylatharz einzusetzen? Kostenersparnis ist ein wichtiger, aber nicht der einzige Grund: Ein modifiziertes Alkyd verbindet die guten, vergleichsweise preiswerten Grundeigenschaften des Alkyds – Verlauf, Benetzung, oxidative Lufttrocknung ohne Einbrennen – mit den Vorteilen des Modifizierungsharzes, ohne dessen vollen Preis und oft ohne dessen Verarbeitungsanforderungen übernehmen zu müssen (reine Siliconharze verlangen häufig hohe Einbrenntemperaturen, reine Acrylharze sind deutlich teurer als Alkyde). Die konkrete Wirkung hängt stark vom gewählten Reaktionsweg und vom Modifizierungsanteil ab; typisch sind bei Siliconalkyden etwa 30 bis 50 % Siliconanteil für eine spürbare Verbesserung von Wetter- und Hitzebeständigkeit.

## Reaktionsgleichung: Siliconmodifizierung (Kondensation)




## Wasserverdünnbare Alkyde

Für emissionsarme Systeme werden Alkyde mit hoher Säurezahl gebaut und mit Amin oder Ammoniak neutralisiert. Die Neutralisation macht die Carboxylgruppen wasserfreundlich (–COO⁻ statt –COOH) — je höher der Neutralisationsgrad, desto stabiler die Verteilung in Wasser (Hydrosole/Hydrogele, siehe L-70, L-72).

Das ist der Regelfall und macht das Harz selbstemulgierend: Die eigenen, neutralisierten Carboxylgruppen übernehmen die ionische Stabilisierung — kein zusätzlicher Emulgator nötig. Über den Neutralisationsgrad stellt man dabei zugleich den Teilchenzustand ein: Ein hoher Neutralisationsgrad führt zu feinerer Verteilung bis hin zur echten Lösung (Hydrosol), ein niedriger zu gröberen Assoziaten, also zur kolloidalen Sekundärdispersion (Hydrogel). Daneben gibt es auch fremdemulgierte Typen: Ein konventionell aufgebautes, niedrigsäurezahliges Alkyd wird mit einem externen Emulgator (Tensid) in Wasser dispergiert (Emulsion, siehe L-72) — nötig etwa, wenn die Säurezahl aus anderen Gründen (Verträglichkeit, Trocknung) nicht beliebig hochgebaut werden soll oder kann.

## Und der dritte Weg: nichtionisch selbstemulgierend

Selbstemulgierend heißt nicht zwangsläufig ionisch. Baut man in das Alkyd hydrophile Polyetherketten ein — meist Polyethylenglycol-Segmente über einen Baustein mit OH- oder Säurefunktion —, dann verteilt sich das Harz von selbst in Wasser, ohne dass eine einzige Carboxylgruppe neutralisiert werden muss. Die Stabilisierung ist dann sterisch statt elektrostatisch (siehe L-51).

Drei Vorteile fallen im Labor sofort auf: Es wird kein Amin gebraucht, die Dispersion ist weitgehend pH-unabhängig, und sie verträgt Elektrolyte deutlich besser als eine ionisch stabilisierte — Pigmentpasten mit Salzfracht destabilisieren sie nicht.

Der Preis dafür ist grundsätzlich: Das Amin verdunstet später, die Polyetherkette nicht. Sie bleibt dauerhaft im Film und macht ihn wasserempfindlicher — Quellung, langsamerer Härteaufbau, im Korrosionsschutz eine schlechtere Sperrwirkung. Deshalb setzt man nichtionische Typen dort ein, wo Verarbeitungssicherheit und Aminfreiheit wichtiger sind als die letzte Wasserfestigkeit, und hält den Polyetheranteil so klein wie möglich. Häufig kombiniert man auch beides: wenig Polyether plus teilneutralisierte Säuregruppen — elektrosterisch stabilisiert.

## Filmbildung des wässrigen Alkyds

Die Filmbildung läuft wie bei jeder wässrigen Dispersion ab (siehe L-02): Beim Verdunsten des Wassers steigt die Teilchenkonzentration, die Tröpfchen nähern sich einander an, deformieren sich gegenseitig und koaleszieren schließlich — sie fließen an den Berührungsflächen ineinander und verlieren dabei ihre Grenzen, bis ein zusammenhängender Film entsteht. Bei oxidativ trocknenden Alkyden folgt danach die chemische Nachhärtung durch Luftsauerstoff wie bei jedem trocknenden Öl (siehe L-14).

## Welches Amin? Die Regel dahinter

Bei der ionischen Variante ist die Wahl des Neutralisationsmittels kein Detail, sondern eine Abwägung zwischen Filmqualität und Arbeitsschutz — und beide ziehen in dieselbe Richtung.

Das Amin muss den Film beim Trocknen wieder verlassen. Bleibt es drin, bleibt die Carboxylgruppe als Salz zurück und der Film dauerhaft wasserempfindlich. Gebraucht wird also ein flüchtiges Amin. Genau diese Flüchtigkeit ist aber der Grund, warum es zum Gefahrstoffthema wird: Was den Film verlässt, gelangt in die Atemluft. Viele für Wasserlacke eingesetzte Amine können reizend oder gesundheitlich relevant sein und riechen unangenehm; die konkrete Einstufung richtet sich nach dem jeweiligen Stoff und seiner Konzentration. In vielen Regelwerken zählen organische Amine als VOC.

## Die Kandidaten, nach Siedepunkt geordnet

- Ammoniak (Sdp. −33 °C) — entweicht beim Trocknen weitgehend aus dem Film und kann dadurch eine gute Wasserfestigkeit begünstigen; die tatsächliche Wasserfestigkeit hängt jedoch von Bindemittel, Neutralisationsgrad und Formulierung ab. Dafür stechend, stark reizend und gasförmig zu handhaben.
- Triethylamin (89 °C) — sehr flüchtig, aber mit intensivem fischig-ammoniakalischem Geruch und einem sehr niedrigen Arbeitsplatzgrenzwert (AGW 1 ml/m³ ≈ 4,2 mg/m³ nach TRGS 900, Spitzenbegrenzung 2(I)); wird deshalb zunehmend vermieden.
- Dimethylethanolamin (134 °C) — der verbreitete Kompromiss in Wasserlacken: flüchtig genug für die Filmhärtung, weniger aufdringlich als Triethylamin.
- AMP, 2-Amino-2-methyl-1-propanol (165 °C) — deutlich geruchsärmer, verbreitet in emissionsarmen Bautenprodukten; entweicht dafür langsamer.
- Triethanolamin (335 °C) und andere schwerflüchtige Amine — bleiben praktisch vollständig im Film. Als Neutralisationsmittel für einen wasserfesten Film ungeeignet.

## Was im wässrigen Alkydlack tatsächlich eingesetzt wird

Beim Alkyd kommt zu Wasserfestigkeit und Arbeitsschutz eine dritte Bedingung dazu, die es bei einem Acrylat so nicht gibt: Ein wasserverdünnbarer Alkyd ist ein Polyester in wässrig-alkalischem Medium. Seine Esterbindungen verseifen mit der Zeit — das begrenzt die Lagerstabilität und ist der Grund, warum an hydrolysestabileren Alkyd-Typen überhaupt geforscht wird. Der pH-Wert wird deshalb nicht höher gefahren als nötig; üblich sind etwa 7,5 bis 9.

In der Praxis werden deshalb vor allem drei Amine eingesetzt:

- Ammoniak — verbreitet und billig (Wasserfestigkeit siehe oben). Der Preis ist der Geruch — und dass der pH-Wert im Gebinde über die Lagerzeit absinkt, weil Ammoniak durch die Verpackung entweicht.
- AMP — der Standard, wenn es geruchsarm sein soll; in wässrigen Alkyd- und Bautensystemen üblicherweise auf pH 7,5 bis 8 eingestellt. Bleibt im Gebinde stabiler als Ammoniak.
- Dimethylethanolamin — vor allem bei industriellen und einbrennenden wasserverdünnbaren Alkyden.

Triethylamin und verwandte kurzkettige Amine waren früher verbreitet und sind wegen Geruch und Arbeitsschutz rückläufig.

**Merksatz**

Bemerkenswert ist, dass alle drei Anforderungen auf dieselbe Maßnahme hinauslaufen: Wenig Amin ist gut für die Wasserfestigkeit des Films, gut für die Luft am Arbeitsplatz und gut für die Lagerstabilität des Harzes. Ein Zielkonflikt besteht nur nach unten — zu wenig Amin, und die Verteilung in Wasser wird instabil.

Deshalb ist der Neutralisationsgrad keine Rechengröße, die man einmal festlegt, sondern eine Versuchsgröße: so weit herunter, wie die Dispersion es aushält.

## Was daraus für die Praxis folgt

Es gibt kein „bestes“ Amin, sondern nur das mit dem besseren Verhältnis für das jeweilige Produkt: gerade flüchtig genug für die Wasserfestigkeit, so geruchsarm und mit so hohem Grenzwert wie möglich. Entschieden wird das mit dem Sicherheitsdatenblatt und dem Arbeitsplatzgrenzwert in der Hand, nicht aus Gewohnheit.

Drei Maßnahmen sind unabhängig vom gewählten Amin richtig: beim Ansetzen und Neutralisieren absaugen und geschlossen dosieren; den Neutralisationsgrad nur so hoch wählen wie für die Stabilität nötig — weniger Amin heißt weniger Emission und weniger Restsalz im Film; und sekundäre Amine wie Diethanolamin oder Morpholin meiden, weil sie mit Nitrit zu Nitrosaminen reagieren können.

Und noch etwas hängt an der Aminwahl: Ob der fertige Lack ein Gefahrenpiktogramm tragen muss und welchen VOC-Wert er deklariert. Wie das zusammenhängt, steht in L-171.

## Anwendung nach Öllänge

Langölige Alkyde gehen in Bauten-, Maler- und DIY-Lacke: lufttrocknend, gut zu streichen, in Testbenzin löslich. Mittelölige dienen Industrie-, Maschinen- und Nutzfahrzeuglacken. Kurzölige werden mit Aminoharzen zu Einbrennlacken kombiniert (siehe L-30, L-32) — hart, glänzend und chemikalienbeständig.

## Rohstoffauswahl steuert mit

Auch die Bausteine verschieben die Eigenschaften: Isophthalsäure statt Phthalsäureanhydrid ergibt härtere, wetter- und chemikalienbeständigere Harze; kurzkettige Diole und Trimethylolpropan machen härter, längerkettige Diole weicher. Einwertige Säuren wie Benzoesäure begrenzen als Kettenabbrecher die Molmasse.

## Reaktionsgleichung: Neutralisation (wasserverdünnbar)

```
Carboxylgruppen des Harzes in die Salzform bringen:
–COOH + NR₃ ⇌ –COO⁻ + HNR₃⁺

Die geladene –COO⁻-Gruppe macht das Bindemittel wasserverdünnbar
bzw. wasserdispergierbar. Beim Einbrennen/Trocknen entweicht ein Teil
des Amins, das Harz wird wieder wasserfest.
```

**Merksatz**

Ein Alkyd wird nicht „gut“ oder „schlecht“ gebaut, sondern passend: Öllänge, Fettsäuretyp, Säurebaustein und Modifizierung werden gemeinsam auf Trocknung, Härte, Beständigkeit und Applikation abgestimmt.

**Stichwörter:** Alkydmodifizierung, Urethanalkyd, Urethanöl, styrolisiert, Pfropfcopolymer, epoxidmodifiziert, siliconmodifiziert, Siloxan, thixotropiert, wasserverdünnbarer Alkyd, selbstemulgierend, nichtionisch selbstemulgierend, Polyethylenglycol, fremdemulgiert, Hydrosol, Koaleszenz, Säurezahl, Neutralisation, Neutralisationsamin, Dimethylethanolamin, AMP, Triethylamin, Arbeitsplatzgrenzwert, Isophthalsäure, Einbrennlack, Benzoesäure

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur*

## Übungsblatt Ü-17 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Nennen Sie drei Modifizierungen von Alkydharzen und geben Sie zu jeder den Zweck an.

**Urethanalkyd:** OH-Gruppen des Alkyd- bzw. Ölanteils reagieren mit einem Diisocyanat zu Urethanbindungen, die einen Teil der sonst üblichen Esterbindungen ergänzen bzw. ersetzen. Zweck: härter, schneller trocknend, besser abrieb- und chemikalienbeständig.

**Styrolisiert:** Styrol ist einpolymerisiert. Zweck: deutlich schnelleres physikalisches Antrocknen (dafür begrenzte Verträglichkeit).

**Epoxidmodifiziert:** Epoxidharz ist eingebaut. Zweck: bessere Haftung und Chemikalienbeständigkeit, vor allem für Grundierungen.

**Einordnung:** Jede Modifizierung hebt gezielt eine Eigenschaft an, ohne den oxidativ trocknenden Grundcharakter aufzugeben.

*Bewertung: Zu jeder Modifizierung wird ein konkreter Zweck genannt. Der Hinweis, dass der Grundcharakter erhalten bleibt, zeigt Verständnis für das Prinzip der Modifizierung.*

**Frage 2** **(Berechnung, 10 Punkte)**

Ein wasserverdünnbares Alkydharz hat eine Säurezahl von 50 mg KOH/g. 200 g Harzfestkörper sollen zu 80 % mit Ammoniak (M = 17 g/mol) neutralisiert werden. Wie viel Ammoniak wird benötigt? (M(KOH) = 56,1 g/mol)

**Gegeben:** SZ = 50 mg KOH/g; m = 200 g; Neutralisationsgrad = 80 %

**Schritt 1 — KOH-Äquivalent:** 50 mg/g · 200 g = 10 000 mg KOH = 10,0 g KOH

**Schritt 2 — Säuregruppen:** n = 10,0 g / 56,1 g/mol = 0,178 mol

**Schritt 3 — davon 80 %:** 0,178 mol · 0,80 = 0,143 mol zu neutralisieren

**Schritt 4 — Ammoniak:** m($NH_3$) = 0,143 mol · 17 g/mol = 2,4 g

**Antwortsatz:** Es werden rund 2,4 g Ammoniak benötigt.

**Warum nicht einfach 100 %:** Der Neutralisationsgrad wird nur so hoch gewählt, wie es die Stabilität der Verteilung verlangt. Jedes zusätzliche Amin muss beim Trocknen wieder heraus — es erhöht die Emission am Arbeitsplatz und, soweit es im Film bleibt, dessen Wasserempfindlichkeit.

*Bewertung: Die Säurezahl wird zuerst in eine Stoffmenge an Säuregruppen umgerechnet, dann der Neutralisationsgrad angesetzt. Einheiten werden durchgängig mitgeführt (siehe L-08). Der letzte Punkt zeigt, dass der Neutralisationsgrad eine Abwägung ist und keine Rechengröße.*

**Frage 3** **(Anwendung, 7 Punkte)**

Ein Industrielack soll im Einbrennverfahren mit hohem Glanz und guter Chemikalienbeständigkeit gehärtet werden. Welche Öllänge und welchen Vernetzungspartner wählen Sie, und warum?

**Öllänge:** Ein kurzöliger, hydroxyfunktioneller Alkyd.

**Vernetzungspartner:** Ein Aminoharz (Melaminharz), gemeinsam eingebrannt.

**Begründung:** Kurzölige Alkyde trocknen kaum oxidativ und sind auf eine Härtung angewiesen; mit Aminoharz eingebrannt entstehen harte, glänzende und chemikalienbeständige Filme (siehe L-30, L-32).

**Passung:** So werden die Anforderungen Glanz, Härte und Chemikalienbeständigkeit gemeinsam erfüllt.

*Bewertung: Öllänge und Vernetzungspartner werden aufeinander abgestimmt begründet: Kurzöl braucht die Einbrennhärtung, das Aminoharz liefert Härte und Beständigkeit. Das ist die geforderte Verknüpfung.*

# L-18 · Epoxidharzester

*Epoxid-Gerüst mit Fettsäuren — oxidativ trocknend, aber beständiger*

**Wahlqualifikation** · B 12 · B 8

Ein Epoxidharzester trocknet oxidativ wie ein Alkyd, bringt aber über das Epoxidgerüst bessere Haftung und Chemikalienbeständigkeit mit.

## Was ein Epoxidharzester ist

Ein Epoxidharzester entsteht, wenn ein Epoxidharz vom Bisphenol-A-Typ mit ungesättigten Fettsäuren verestert wird. Die Fettsäuren setzen sich an die reaktiven Gruppen des Epoxidharzes; das Ergebnis ist ein Epoxid-Gerüst mit trocknenden Fettsäure-Seitenketten. Als Fettsäuren dienen trocknende Öle wie Leinöl- oder Sojaölfettsäure; ihr Anteil steuert — ähnlich der Öllänge beim Alkyd — Trocknung und Härte. Zur stoffrechtlichen Einordnung von Bisphenol A siehe L-28. Verarbeitet wird meist in Testbenzin, oft im Gemisch mit etwas Xylol — das polarere Epoxidgerüst braucht dafür in der Regel einen höheren aromatischen Anteil als ein vergleichbares Alkyd (siehe L-16).

## Wie er härtet

Wie beim Alkyd härtet der Epoxidharzester oxidativ über die Doppelbindungen seiner Fettsäuren (siehe L-14, L-16). Die Trocknung wird mit Sikkativen beschleunigt, überwiegend mit Cobaltsikkativen. Cobalt wirkt vor allem an der Oberfläche und sorgt für rasches Antrocknen. Cobaltsikkative stehen allerdings unter erheblichem Regulierungsdruck: Cobalt(II)-2-ethylhexanoat ist harmonisiert als reproduktionstoxisch Kategorie 1B eingestuft (H360D, über den Gruppeneintrag der 2-Ethylhexansäure-Salze); ein Vorschlag auf zusätzliche Einstufung als krebserzeugend ist noch nicht entschieden (siehe L-14). Deshalb werden zunehmend cobaltfreie Trockenstoffe (z. B. auf Eisen- oder Manganbasis) eingesetzt.

## Was das Epoxid-Gerüst bringt

Gegenüber dem Alkyd bringt das Epoxidgerüst deutlich bessere Haftung — vor allem auf Metall — und höhere Chemikalienbeständigkeit. Der Grund: Das Epoxidgerüst trägt viele sekundäre OH-Gruppen und polare Bisphenol-A-Segmente, die feste Bindungen (Wasserstoffbrücken) zur Metalloberfläche bilden. Die höhere Beständigkeit gegenüber vielen Alkyden beruht auf diesem Epoxid-Grundgerüst; der Epoxidharzester ist aber nicht pauschal „unverseifbar“ — er enthält weiterhin Esterbindungen, die unter alkalisch-feuchter Belastung angegriffen werden können. Nachteilig sind die stärkere Vergilbung und Kreidung; für hochwertige, glänzende Außendecklacke ist der Epoxidharzester daher nicht geeignet.

## Anwendung

Epoxidharzester dienen vor allem in Korrosionsschutzgrundierungen und Industrielacken. Besonders wichtig sind sie als Bindemittel für einkomponentige Zinkstaub-Grundierungen (siehe L-101), wo gute Haftung und Chemikalienbeständigkeit gefragt sind; dort werden Epoxidharzester und epoxidmodifizierte Alkydharze nebeneinander eingesetzt. Auch als schnell trocknende Industrie- und Bautengrundierung sind sie verbreitet.

## Anwendungsbeispiel: Stahlgeländer im Außenbereich

Ein Metallbaubetrieb lackiert ein neues Stahlgeländer, das draußen steht und regelmäßig mit Regenwasser und gelegentlich mit Streusalzspritzwasser in Kontakt kommt. Gefragt sind rasche Durchtrocknung (das Geländer soll am selben Tag transportfähig sein) und guter Korrosionsschutz auf blankem, gestrahltem Stahl.

Gewählt wird ein zweischichtiger Aufbau: Als Grundierung ein Epoxidharzester-Korrosionsschutzlack, oft zusätzlich mit Zinkstaub oder Zinkphosphat pigmentiert. Er haftet über die polaren Bisphenol-A-Segmente sehr gut auf dem blanken Stahl, trocknet — wie ein Alkyd — oxidativ an der Luft ohne Einbrennofen, und ist in wenigen Stunden ausreichend durchgetrocknet für die nächste Schicht. Als Decklack folgt darauf ein UV- und witterungsstabileres Bindemittel — bei diesem lufttrocknenden Aufbau sinnvollerweise ein 1K-Alkyd- oder 1K-Acryllack. Der Epoxidharzester selbst würde als alleinige Außendecklackschicht zu stark vergilben und kreiden.

Die Rollenverteilung ist typisch für Epoxidharzester: Sie übernehmen die Haftung und den Korrosionsschutz im Untergrund, ein anderes Bindemittel die dauerhafte, UV-stabile Optik an der Oberfläche.

## Warum nicht einfach 2K-PUR darüber?

Naheliegend wäre, gleich einen 2K-PUR-Decklack aufzubringen — er ist beständiger als jeder 1K-Lack. Auf einer oxidativ trocknenden 1K-Grundierung ist das aber der falsche Aufbau, aus zwei Gründen.

Erstens ist die Grundierung nach ein paar Stunden griffest, aber lange nicht durchgehärtet: Die oxidative Vernetzung läuft über Tage und Wochen weiter und der Film schwindet dabei. Ein harter, spröder 2K-Film darüber macht diese Bewegung nicht mit — es drohen Spannungen, Haftungsverlust und Risse. Zweitens greifen die kräftigen Lösemittel des 2K-Lacks den noch nicht durchgetrockneten Untergrund an: Er quillt an, und die frische Schicht runzelt.

Die Regel dazu ist einfach: Die härtere, beständigere Schicht gehört nicht auf die weichere, noch reagierende. Wer 2K-Beständigkeit will, grundiert auch 2K — mit einer 2K-EP- oder 2K-PUR-Grundierung. Bleibt es bei der 1K-Grundierung, bleibt auch der Decklack 1K. Kommt ein 2K-Decklack doch auf eine 1K-Grundierung, dann nur nach vollständiger Durchtrocknung, innerhalb des vom Hersteller angegebenen Überlackierfensters — und mit vorherigem Musteraufbau samt Gitterschnitt.

Auf dem gleichen Grund steht übrigens die Faustregel, dass der Verarbeiter Systeme verschiedener Hersteller nicht mischen, sondern im System eines Herstellers bleiben soll: Das Überlackierfenster ist eine Produkteigenschaft, keine allgemeine Stoffkonstante.

## Einordnung gegen das Alkyd

Beide trocknen oxidativ über Fettsäuren, unterscheiden sich aber im Gerüst: Der Alkyd hat ein Polyester-Gerüst (siehe L-16), der Epoxidharzester ein Epoxid-Gerüst. Die Fettsäure liefert bei beiden die Lufttrocknung, das Gerüst den Charakter.

### Chemie kompakt

```
Epoxidgruppe am Kettenende (Oxiranring – Dreiring aus zwei C-Atomen und einem O):
  ~~~CH₂–CH(–O–)CH₂   (Ring zwischen den beiden C und dem O)

Ringöffnung durch die Fettsäure:
  ~~~CH₂–CH(–O–)CH₂ + HOOC–R  →  ~~~CH₂–CH(OH)–CH₂–O–CO–R

Die Carbonsäure greift am weniger gehinderten, endständigen C-Atom des
gespannten Dreirings an. Dort entsteht die neue Esterbindung (–O–CO–R);
am Nachbar-C-Atom bleibt der frei werdende Ringsauerstoff als sekundäre
OH-Gruppe zurück – daher „β-Hydroxyester“: die OH-Gruppe sitzt eine
Position (β) neben der neuen Esterbindung.

Oxidative Trocknung (über die Fettsäurereste, wie beim Alkyd):
  C=C + O₂ → Hydroperoxide → Radikale → Vernetzung
```

**Merksatz**

Epoxidharzester verbindet die oxidative Trocknung des Alkyds mit Haftung und Beständigkeit des Epoxidgerüsts — der Grundierungswerkstoff, wo es auf Haftung und Korrosionsschutz ankommt, weniger auf glänzende Decklacke.

**Stichwörter:** Epoxidharzester, Epoxidharz, Bisphenol A, Epoxidringöffnung, β-Hydroxyester, Fettsäure, oxidative Trocknung, Cobaltsikkativ, Haftung, Chemikalienbeständigkeit, Vergilbung, Kreidung, Korrosionsschutzgrundierung, Zinkstaub-Grundierung, Überlackierfenster, 1K/2K-Aufbau, Alkyd

*Quellen: Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur; Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; CLP-Verordnung (EG) Nr. 1272/2008*

## Übungsblatt Ü-18 — Musterlösungen

**Frage 1** (Verständnis, 8 Punkte)

Wie ist ein Epoxidharzester aufgebaut, und wie härtet er?

**Aufbau:** Ein Epoxidharz vom Bisphenol-A-Typ wird mit ungesättigten Fettsäuren verestert. Es entsteht ein Epoxid-Gerüst mit trocknenden Fettsäure-Seitenketten.

**Härtung:** Er härtet oxidativ über die Doppelbindungen der Fettsäuren, ähnlich wie ein Alkyd (siehe L-14, L-16).

**Sikkativierung:** Die Trocknung wird mit Sikkativen beschleunigt, überwiegend mit Cobaltsikkativen.

**Kernpunkt:** Das Fettsäuregerüst liefert die Trocknung, das Epoxidgerüst die Beständigkeit.

*Bewertung: Aufbau (Epoxid plus Fettsäure) und Härtung (oxidativ) werden getrennt und richtig zugeordnet; der Bezug zum Alkyd zeigt das Verständnis für das gemeinsame Trocknungsprinzip.*

**Frage 2** (Berechnung, 9 Punkte)

Eine einkomponentige Zinkstaub-Grundierung auf Epoxidharzester-Basis hat ein Massenverhältnis Zinkstaub : Bindemittel-Festkörper von 9 : 1. Wie viel Zinkstaub und wie viel Bindemittel-Festkörper stecken in 5,0 kg dieser beiden Bestandteile?

**Gegeben:** Zinkstaub : Bindemittel = 9 : 1; Summe = 5,0 kg

**Teile gesamt:** 9 + 1 = 10 Teile

**Zinkstaub:** 5,0 kg · 9 / 10 = 4,5 kg

**Bindemittel-Festkörper:** 5,0 kg · 1 / 10 = 0,5 kg

**Antwortsatz:** Es sind 4,5 kg Zinkstaub und 0,5 kg Bindemittel-Festkörper enthalten.

*Bewertung: Das Verhältnis wird über die Gesamtteilzahl aufgeteilt. Der hohe Zinkanteil passt zum kathodischen Schutzprinzip der Zinkstaub-Grundierung (siehe L-99).*

**Frage 3** **(Anwendung, 7 Punkte)**

Warum wählt man für eine Korrosionsschutzgrundierung eher einen Epoxidharzester als ein einfaches Alkyd?

**Haftung:** Das Epoxidgerüst haftet deutlich besser auf Metall als der reine Polyester des Alkyds — entscheidend für den Korrosionsschutz.

**Chemikalienbeständigkeit:** Der Epoxidharzester ist chemikalienbeständiger, was die Grundierung widerstandsfähiger macht.

**Trocknung bleibt einfach:** Er trocknet weiterhin oxidativ über die Fettsäuren, lässt sich also lufttrocknend verarbeiten.

**Grenze:** Für glänzende Außendecklacke ist er wegen Vergilbung und Kreidung ungeeignet — als Grundierung stört das nicht.

**Ergänzung (nicht gefragt):** Auf die oxidativ trocknende 1K-Grundierung gehört ein 1K-Decklack. Ein 2K-PUR-Decklack darauf ist der falsche Aufbau: Die Grundierung härtet über Wochen nach und schwindet dabei, der harte 2K-Film macht das nicht mit; zusätzlich quellen dessen Lösemittel den noch nicht durchgetrockneten Untergrund an. Wer 2K-Beständigkeit will, grundiert auch 2K.

*Bewertung: Die Wahl wird an Haftung und Chemikalienbeständigkeit festgemacht und die Vergilbung als für eine Grundierung unkritisch eingeordnet — genau die geforderte Abwägung.*

# L-19 · Gesättigte Polyester — Aufbau und Eigenschaften

*Ölfreie Polyester: Bausteine, Härte und Funktionalität*

**Prüfungsteil 1** · A 9 · A 10 · B 12

Ein gesättigter Polyester trägt keine trocknenden, oxidativ reaktiven Fettsäuren — er trocknet nicht von selbst, wird aber über seine Bausteine gezielt hart oder weich gebaut. In der Lackpraxis sind diese Typen meist ganz ölfrei.

## Was ihn vom Alkyd unterscheidet

Ein gesättigter, in der Lackpraxis meist ölfreier Polyester ist wie das Alkyd ein Polyester aus mehrwertigem Alkohol und mehrbasiger Säure — aber ohne Fettsäuren. Ihm fehlen also die trocknenden Doppelbindungen, die das Alkyd oxidativ härten lassen (siehe L-16). Er trocknet nicht von selbst und muss chemisch vernetzt werden (siehe L-20).

Fachlich wichtig: „Gesättigt“ bedeutet hier nicht, dass das gesamte Molekül keinerlei Doppelbindungen besitzt. Aromatische Bausteine wie Phthalsäure tragen weiterhin die π-Bindungen ihres Benzolrings. Gemeint ist ausschließlich die fehlende oxidativ reaktive Ungesättigtheit, wie sie Fettsäurereste hätten — Aromaten reagieren unter normalen Lackbedingungen nicht mit Luftsauerstoff.

## Die Bausteine

- Diole — Ethylenglykol, 1,2-Propylenglykol, Neopentylglykol, 1,6-Hexandiol.
- Höherwertige Alkohole für Verzweigung — Trimethylolpropan (dreiwertig) und Pentaerythrit (vierwertig).
- Säuren — Phthalsäureanhydrid, Isophthalsäure, Adipinsäure, Hexahydrophthalsäureanhydrid.

Ein Anhydrid reagiert mit einer Hydroxylgruppe zunächst unter Ringöffnung zum Halbester — das ist chemisch nicht dasselbe wie die direkte Veresterung einer Dicarbonsäure unter Wasserabspaltung (siehe L-16), auch wenn beide Wege am Ende zum Polyestergerüst führen.

## Hart oder weich

Die Bausteinwahl stellt das Eigenschaftsprofil ein: Aromatische Säuren (Phthalsäure, Isophthalsäure) und cycloaliphatische Säuren (Hexahydrophthalsäureanhydrid) sowie kurzkettige Diole (Ethylenglykol, Neopentylglykol) und verzweigende höherwertige Alkohole (Trimethylolpropan, Pentaerythrit) machen hart und beständig. Längerkettige aliphatische Säuren wie Adipinsäure und längerkettige Diole machen weich und flexibel. Über die Mischung dieser Bausteine lässt sich das Harz stufenlos zwischen hart und flexibel einstellen.

## Linear oder verzweigt, Molmasse

Aus Diolen und Disäuren entstehen fadenförmige, lineare Typen; höherwertige Alkohole (Triole und höher) bringen Verzweigung. Niedermolekulare Typen (etwa 1 000 bis 7 000 g/mol) brauchen viel Vernetzer; höhermolekulare Typen — bei linearen Coil-Coating-Polyestern bis etwa 30 000 g/mol — haben einen größeren physikalisch trocknenden Anteil und brauchen entsprechend weniger. Wird eine der beiden Reaktivgruppen — OH oder COOH — im Überschuss eingesetzt, begrenzt das die erreichbare Molmasse, weil die Kettenenden abgesättigt werden.

## Hydroxy- oder carboxyfunktionell

Je nachdem, welche Gruppe im Überschuss ist, endet der Polyester hydroxyfunktionell (OH-terminiert) oder carboxyfunktionell (sauer, COOH-terminiert). Diese Endgruppen sind die Reaktionsstellen der späteren Vernetzung und entscheiden über den passenden Vernetzungspartner und damit auch über das typische Lösemittel (siehe L-20).

## OH-Zahl und OH-Äquivalentmasse

Die OH-Zahl gibt an, wie viele Milligramm Kaliumhydroxid (KOH) rechnerisch der Menge an OH-Gruppen in 1 g Harz entsprechen — eine Kennzahl für den Gehalt an reaktiven Hydroxylgruppen. Die OH-Äquivalentmasse ist die dazu passende Harzmasse, die genau 1 Äquivalent (1 mol) OH-Gruppen enthält:

OH-Äquivalentmasse = 56 100 / OH-Zahl

Die 56 100 ergibt sich aus der molaren Masse von KOH (56,1 g/mol), umgerechnet von g auf mg und bezogen auf 1 g Harz.

Beispiel: OH-Zahl = 150 mg KOH/g → OH-Äquivalentmasse = 56 100 / 150 = 374 g/Äq. Das heißt: 374 g dieses Harzes enthalten rechnerisch 1 mol reaktive OH-Gruppen. Je höher die OH-Zahl, desto kleiner die Äquivalentmasse — bei 300 mg KOH/g wären es nur noch 187 g/Äq. Die OH-Äquivalentmasse wird gebraucht, um die Menge eines OH-reaktiven Vernetzers stöchiometrisch zu berechnen (siehe L-27) — sie verbindet die Kennzahl direkt mit der Rezeptur.

## Reaktionsgleichung: Aufbau (Polykondensation)

```
Diol + Dicarbonsäure → Polyester + Wasser:
  n HO–R–OH + n HOOC–R′–COOH →
  [–O–R–O–CO–R′–CO–]ₙ + 2n H₂O

Die Endgruppen steuern die spätere Vernetzung:
  OH-Überschuss → hydroxyfunktioneller Polyester
  COOH-Überschuss → carboxyfunktioneller Polyester
```

## Wo er eingesetzt wird

Weil er nicht von selbst trocknet, wird der gesättigte Polyester häufig als reaktiver Filmbildner eingesetzt, der über geeignete Vernetzer chemisch gehärtet wird — und weil er ohne Fettsäuren auskommt, vergilbt und verseift er weit weniger als das Alkyd:

- Coil Coating — mit Melaminharz eingebrannt. Der Film muss das Nachverformen des beschichteten Bands aushalten, und genau diese Kombination aus Härte und Dehnbarkeit lässt sich über die Bausteine einstellen (siehe L-102, L-32).
- Pulverlacke — gesättigte Polyester gehören zu den wichtigsten Bindemittelklassen für Pulverlacke: carboxyfunktionell mit Hydroxyalkylamid (Primid) für außen — das früher übliche TGIC ist als erbgutverändernd eingestuft und in Europa weitgehend ersetzt worden (siehe L-95); zusammen mit Epoxidharz als Hybrid für innen (siehe L-94).
- Industrie- und Geräteeinbrennlacke — Haushaltsgeräte, Möbelbeschläge, Metallmöbel.
- 2K-PUR — der hydroxyfunktionelle Typ mit Polyisocyanat: chemikalienbeständig und gut wetterbeständig, üblich bei Nutzfahrzeug- und Industrielackierung; für höchste Bewitterungsansprüche werden reine Acrylatharze bevorzugt (siehe L-27).
- Verpackungs- und Emballagenlacke — geschmacks- und geruchsneutral, weil keine Fettsäuren vorhanden sind, die ranzig werden können (siehe L-110).

**Merksatz**

Der gesättigte Polyester wird maßgeschneidert: Säure- und Alkoholtyp bestimmen hart oder weich, die Molmasse den physikalischen Anteil, die Endgruppe den Vernetzer. Von selbst trocknet er nicht.

**Stichwörter:** gesättigter Polyester, ölfreier Polyester, Diol, Neopentylglykol, Trimethylolpropan, Pentaerythrit, Phthalsäureanhydrid, Isophthalsäure, Adipinsäure, hydroxyfunktionell, carboxyfunktionell, OH-Zahl, OH-Äquivalentmasse, linear, verzweigt, Molmasse

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur*

## Übungsblatt Ü-19 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Worin unterscheidet sich ein gesättigter (ölfreier) Polyester von einem Alkydharz, und was folgt daraus für die Trocknung?

**Gemeinsamkeit:** Beide sind Polyester aus mehrwertigem Alkohol und mehrbasiger Säure.

**Unterschied:** Dem gesättigten Polyester fehlen die Fettsäuren — und damit die trocknenden Doppelbindungen, die das Alkyd oxidativ härten lassen (siehe L-16).

**Folge für die Trocknung:** Der gesättigte Polyester trocknet nicht von selbst; er muss chemisch vernetzt werden (siehe L-20). Das Alkydharz kann dagegen über seine trocknenden Fettsäuren oxidativ härten.

**Einordnung:** „Gesättigt“ heißt nicht, dass das Molekül gar keine Doppelbindungen mehr enthält — aromatische Bausteine wie Phthalsäure tragen weiterhin π-Bindungen. Gemeint ist nur das Fehlen der oxidativ reaktiven Doppelbindungen, wie sie Fettsäurereste hätten.

*Bewertung: Der Unterschied wird an der fehlenden Fettsäure festgemacht und die Trocknung folgerichtig daraus abgeleitet — nicht nur behauptet, dass der eine trocknet und der andere nicht.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**

Ein hydroxyfunktioneller Polyester hat eine OH-Zahl von 150 mg KOH/g. Berechnen Sie die OH-Äquivalentmasse und erläutern Sie, was ein niedrigerer Wert der OH-Zahl bedeuten würde.

**Gegeben:** OH-Zahl = 150 mg KOH/g

**Ansatz:** OH-Äquivalentmasse = 56 100 / OH-Zahl

**Rechnung:** 56 100 / 150 = 374 g/Äq.

**Antwortsatz:** Auf jedes Mol reaktiver OH-Gruppen kommen rund 374 g Harz.

**Deutung:** Eine niedrigere OH-Zahl bedeutet weniger OH-Gruppen je Gramm, also eine größere Äquivalentmasse — und damit weniger Vernetzer je kg Harz.

*Bewertung: Die Äquivalentmasse wird korrekt aus der Kennzahl berechnet, und die Deutung verknüpft sie mit dem Vernetzerbedarf — genau dafür braucht man den Wert in der Praxis.*

**Frage 3** **(Anwendung, 7 Punkte)**

Für ein biegbares Bandblech (Coil Coating) wird ein flexibler Polyester gebraucht. Welche Bausteine wählen Sie für weich, welche würden das Harz zu hart machen?

**Für weich:** Längerkettige aliphatische Säuren wie Adipinsäure und längerkettige Diole; wenig oder keine Verzweigung.

**Zu hart:** Aromatische oder cycloaliphatische Säuren wie Phthal- oder Isophthalsäure sowie kurzkettige, verzweigende Alkohole wie Trimethylolpropan oder Pentaerythrit.

**Begründung:** Beim Coil Coating wird das beschichtete Blech nach dem Härten umgeformt; der Film muss die Biegung mitmachen, ohne zu reißen.

**Ergänzung:** Die Härte lässt sich zusätzlich über die Molmasse und den Vernetzungsgrad feinjustieren.

*Bewertung: Weiche und harte Bausteine werden richtig zugeordnet und an die Umformbarkeit beim Coil Coating gebunden. Der Hinweis auf Molmasse und Vernetzungsgrad zeigt, dass die Härte über mehrere Stellgrößen läuft.*

# L-20 · Gesättigte Polyester — Vernetzung und Anwendung

*Die Endgruppe wählt den Vernetzer*

**Prüfungsteil 2** · A 10 · B 12

Hydroxyfunktionelle Polyester vernetzen mit Aminoharz oder Isocyanat, carboxyfunktionelle mit Epoxid — Endgruppe und Molmasse bestimmen die Anwendung.

## Warum vernetzt werden muss

Weil der gesättigte Polyester keine trocknenden Doppelbindungen trägt, entsteht der feste Film nicht von selbst, sondern erst durch Reaktion seiner Endgruppen mit einem Vernetzer (chemische Härtung, siehe L-03). Ob hydroxy- oder carboxyfunktionell, entscheidet, welcher Vernetzer passt. Der Vernetzer ist dabei mehrfunktionell und verknüpft viele Polyesterketten zu einem Netzwerk — daraus kommen Härte, Haftung und Chemikalienbeständigkeit des Films.

## Hydroxyfunktionelle Polyester

Sie vernetzen mit Aminoharzen (Melamin- oder Benzoguanaminharz) oder mit Polyisocyanaten. Beim Einbrennen reagieren die OH-Gruppen des Polyesters mit den reaktiven Gruppen des Aminoharzes, meist säurekatalysiert. Bei der Transetherifizierung werden dabei vor allem niedermolekulare Alkohole abgespalten; gehärtet wird durch Einbrennen (siehe L-30) oder mit Säurekatalyse bei Raumtemperatur forciert (siehe L-122). Mit Isocyanaten reagieren die OH-Gruppen zu Urethanbindungen — mit geblockten Isocyanaten einkomponentig und erst in der Hitze härtend, mit freien Isocyanaten als Zweikomponentenlack (siehe L-03).

## Carboxyfunktionelle (saure) Polyester

Sie vernetzen mit Epoxidharzen oder mit Triglycidylisocyanurat (TGIC); die Carboxylgruppen öffnen dabei die Epoxidringe des Vernetzers. Diese Kombination ist vor allem für Pulverlacke wichtig, wo fester saurer Polyester und fester Epoxid-Vernetzer in der Schmelze gemischt und dann eingebrannt werden. TGIC ist als mutagen (erbgutverändernd) eingestuft; beim Arbeiten mit TGIC-haltigen Materialien sind Staubexposition und Haut-/Augenkontakt zu vermeiden — Sicherheitsdatenblatt, aktuelle betriebliche Gefahrstoffvorgaben und persönliche Schutzausrüstung sind maßgeblich. Zunehmend werden deshalb TGIC-freie Härter eingesetzt: β-Hydroxyalkylamide (Primid-Typen).

## β-Hydroxyalkylamide (Primid-Typen)

Ein tetrafunktionelles β-Hydroxyalkylamid wie N,N,N′,N′-Tetrakis(2-hydroxyethyl)adipamid trägt vier reaktive Hydroxylgruppen und kann dadurch mehrere Polyesterketten gleichzeitig verknüpfen:

$(HO–CH_2–CH_2)_2N–CO–(CH_2)_4–CO–N(CH_2–CH_2–OH)_2$

Mit dem carboxyfunktionellen Polyester reagiert es unter Esterbildung:

Polyester–COOH + HO–R–N(…) → Polyester–COO–R–N(…) + $H_2O$

Anders als bei der Epoxid/TGIC-Vernetzung entsteht hier Wasser als Kondensationsprodukt.

## Was beim β-Hydroxyalkylamid mit dem Wasser passiert

Das bei der Kondensationsreaktion freigesetzte Wasser muss während der Einbrennhärtung als Wasserdampf aus dem noch nicht vollständig erstarrten Film entweichen. Reaktionsgeschwindigkeit, Einbrenntemperatur, Schichtdicke und Formulierung müssen dafür zusammenpassen. Kann das Wasser nicht ausreichend entweichen, drohen Blasen, Poren oder andere Filmstörungen — besonders bei höheren Schichtdicken oder ungünstiger Härtungsführung ist die Entgasung deshalb ein wichtiger praktischer Punkt bei diesem Vernetzertyp.

## Wasserverdünnbare Typen

Carboxyfunktionelle Polyester lassen sich — wie die sauren Alkyde (siehe L-17) — mit Amin oder Ammoniak neutralisieren und werden dadurch wasserverdünnbar. So entstehen emissionsarme Wasserlacke (siehe L-70, L-168).

### Chemie kompakt

```
Herstellung:
  Diol + Dicarbonsäure → Polyester + H₂O

OH-Polyester + Aminoharz:
  Polyester–OH + Aminoharz–OR → Polyester–O–Aminoharz + ROH

OH-Polyester + Isocyanat:
  R–OH + R′–NCO → R–O–CO–NH–R′   (Urethanbindung)

COOH-Polyester + Epoxid:
  R–COOH + Epoxid → R–COO–CH₂–CH(OH)–R′   (β-Hydroxyester, Ringöffnung wie in L-18)
```

### Anwendung nach Typ

• Lineare hochmolekulare Typen mit Aminoharz — Coil- und Can-Coating, Verpackungen, Druckfarben. Typische Lösemittel: Xylol, Butanol, Butylglykol.
• Niedermolekulare Typen mit Aminoharz oder Isocyanat — Automobil- und Industrielacke. Typische Lösemittel: Xylol, Butylacetat, teils Methoxypropylacetat.
• Verzweigte saure Typen mit Epoxid/TGIC — Pulverlacke. Hier kein Lösemittel: Pulverlacke sind ein 100%-System, Harz und Vernetzer werden in der Schmelze gemischt (siehe L-94). (Zuordnung als Richtwert.)

**Merksatz**

Die Endgruppe wählt den Vernetzer: Hydroxy zu Aminoharz oder Isocyanat, Carboxy zu Epoxid oder TGIC. Molmasse und Typ entscheiden dann über die Anwendung.

**Stichwörter:** Vernetzung, Aminoharz, Melaminharz, Benzoguanaminharz, Polyisocyanat, geblocktes Isocyanat, Polyurethan, Epoxidharz, TGIC, Triglycidylisocyanurat, β-Hydroxyalkylamid, Primid, Entgasung, Pulverlack, Coil Coating, wasserverdünnbar, Einbrennlack
*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur*

## Übungsblatt Ü-20 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**
Welcher Vernetzer passt zu einem hydroxyfunktionellen, welcher zu einem carboxyfunktionellen Polyester? Begründen Sie jeweils kurz.

**Hydroxyfunktionell:** Aminoharze (Melamin-, Benzoguanaminharz) oder Polyisocyanate. Die OH-Gruppen reagieren mit dem Aminoharz beim Einbrennen oder mit dem Isocyanat zu Polyurethan.
**Carboxyfunktionell:** Epoxidharze oder Triglycidylisocyanurat (TGIC). Die Carboxylgruppen reagieren mit den Epoxidgruppen.
**Prinzip:** Die reaktive Endgruppe bestimmt den Partner: Sie muss eine Gruppe finden, mit der sie reagieren kann.
**Beispielanwendung:** Carboxy + Epoxid/TGIC ist der typische Aufbau für Pulverlacke.
*Bewertung: Beide Endgruppen werden dem richtigen Vernetzer zugeordnet und die Zuordnung über die reagierenden Gruppen begründet — nicht auswendig, sondern aus dem Reaktionsprinzip.*

**Frage 2** **(Berechnung, 9 Punkte)**

Ein hydroxyfunktioneller Polyester wird mit Melaminharz im Festkörperverhältnis 70 : 30 eingebrannt. Für 5,0 kg Klarlack mit 60 % Festkörper: Wie viel Polyester- und wie viel Melamin-Festkörper sind enthalten?

**Gegeben:** Lack = 5,0 kg; Festkörper = 60 %; Verhältnis Polyester : Melamin = 70 : 30

**Schritt 1 — Festkörper gesamt:** 5,0 kg · 0,60 = 3,0 kg

**Schritt 2 — Polyester:** 3,0 kg · 0,70 = 2,1 kg

**Schritt 3 — Melamin:** 3,0 kg · 0,30 = 0,9 kg

**Antwortsatz:** Der Lack enthält 2,1 kg Polyester- und 0,9 kg Melamin-Festkörper; die restlichen 2,0 kg sind Lösemittel.

*Bewertung: Zuerst wird der Gesamtfestkörper aus dem Festkörpergehalt bestimmt, dann im Verhältnis aufgeteilt. Dass die restlichen 2,0 kg Lösemittel sind, wird richtig erkannt.*

**Frage 3** **(Anwendung, 7 Punkte)**

Für ein lösemittelfreies Pulverlacksystem soll ein Polyester gewählt werden. Welchen Polyester-Typ und welchen Vernetzer setzen Sie ein und warum?

**Polyester-Typ:** Ein verzweigter, carboxyfunktioneller (saurer) Polyester in fester Form.

**Vernetzer:** Ein Epoxidharz oder Triglycidylisocyanurat (TGIC), ebenfalls fest — als TGIC-freie Alternative ein β-Hydroxyalkylamid (Primid-Typ).

**Begründung:** Beim Pulverlack werden feste Komponenten in der Schmelze gemischt und eingebrannt; Carboxy- und Epoxidgruppen reagieren dabei ohne Lösemittel.

**Besonderheit β-Hydroxyalkylamid:** Hier entsteht bei der Vernetzung Wasser als Kondensationsprodukt, das während der Härtung aus dem Film entweichen muss — eine ausreichende Entgasung ist deshalb wichtig, sonst drohen Blasen oder Poren.

**Passung:** So wird die Vorgabe „lösemittelfrei“ erfüllt und zugleich ein gut vernetzter, beständiger Film erzielt.

*Bewertung: Typ und Vernetzer passen zusammen und zur Vorgabe lösemittelfrei; die Begründung nennt die Schmelze-Vernetzung als den entscheidenden Punkt des Pulverlacks und benennt beim TGIC-freien Weg zusätzlich die Entgasungs-Besonderheit.*

# L-21 · Cellulosenitrat und Celluloseester

*Vom unlöslichen Naturstoff zum physikalisch trocknenden Filmbildner*

**Prüfungsteil 2** · A 10 · B 12

Die Umsetzung der OH-Gruppen durch Verestern oder Verethern kann Cellulose-Derivate mit deutlich veränderter Löslichkeit und Verarbeitbarkeit ergeben. Beim Cellulosenitrat beeinflusst insbesondere der Stickstoffgehalt die Löslichkeit; Celluloseester organischer Säuren sind in vielen Anwendungen weniger entzündlich und beständiger.

## Warum Cellulose derivatisiert wird

Cellulose ist ein Poly-β-1,4-Glucose mit drei OH-Gruppen je Einheit, sehr hoher Molmasse und starker Teilkristallinität. Genau deshalb ist sie in Lösemitteln praktisch unlöslich und nicht direkt als Filmbildner brauchbar. Erst die Umsetzung der OH-Gruppen — durch Verestern oder Verethern — macht sie löslich (siehe L-07).

## Cellulosenitrat

Cellulosenitrat entsteht durch Verestern der OH-Gruppen mit Salpetersäure (Nitriersäure aus Salpeter- und Schwefelsäure). Chemisch ist es ein Ester, keine Nitroverbindung — die verbreitete Bezeichnung „Nitrocellulose“ ist daher irreführend. Kennzahl ist der Stickstoffgehalt.

## Stickstoffgehalt und Löslichkeit

Der theoretische Stickstoffgehalt hängt von der Zahl der Nitratgruppen je Glucose-Einheit ab: eine Gruppe 6,76 %, zwei 11,11 %, drei 14,14 %. Lacktypen liegen dazwischen (Richtwert etwa 11 bis 12 %): niedriger nitrierte sind alkohollöslich (A-Typen), höher nitrierte esterlöslich (E-Typen). Der Stickstoffgehalt ist dabei mehr als nur eine Rechengröße — er beeinflusst wesentlich Löslichkeit, Verträglichkeit mit anderen Bindemitteln und Lösemitteln, Trocknungsverhalten und Filmhärte. Hochnitrierte Cellulose (über etwa 12,5 % N, technisch bis rund 13,5 %; theoretisches Maximum des Trinitrats 14,14 %) ist als „Schießbaumwolle“ ein Explosivstoff und kein Lackrohstoff.

## Eigenschaften und Formulierung

Cellulosenitrat trocknet sehr schnell physikalisch (siehe L-02) zu harten, spröden Filmen; allein eingesetzt wären sie zu hart und wenig verformbar. Weichmacher senken die Glasübergangstemperatur und erhöhen die Flexibilität (siehe L-09, L-48) — Cellulosenitrat wird deshalb in vielen Lackformulierungen mit Weichmachern eingesetzt, um Härte und Flexibilität gezielt einzustellen. Je nach Anwendung und Formulierung können weitere Bindemittel wie Alkydharze kombiniert werden, die zugleich die begrenzte Verträglichkeit und Löslichkeit verbessern.

## Lösemittel in der Praxis

Die Löslichkeit hängt insbesondere vom Stickstoffgehalt und vom Polymerisationsgrad ab; deshalb werden in der Lackpraxis meist abgestimmte Lösemittelgemische statt einzelner Lösemittel eingesetzt — typisch ist eine Kombination aus Estern (Butylacetat, Ethylacetat) als eigentlichem Löser, Ketonen (Aceton, MEK) und aromatischen Verdünnern (Toluol) zur Kostensenkung und Viskositätsanpassung.

## Sicherheit

Cellulosenitrat ist grundsätzlich ein leicht entzündlicher, energiereicher Stoff — mit steigendem Nitrierungsgrad steigt die Gefährlichkeit, weshalb hoch nitrierte Qualitäten grundsätzlich nicht in die Lackpraxis gehören — auch die Lack-Qualität („Lackwolle“) wird zur Sicherheit angefeuchtet gelagert. Bei Lagerung und Verarbeitung gelten die gesetzlichen Vorschriften für leichtentzündliche, lösemittelhaltige Systeme (siehe L-68): Zündquellen fernhalten, Behälter und Anlagen erden, für Belüftung sorgen.

### Bildung und Filmbildung

```
Nitrierung (Veresterung mit Salpetersäure, technisch als Nitriersäure):
  Cell–OH + HNO₃ → Cell–O–NO₂ + H₂O
  (–O–NO₂ = Nitratester; „Nitrocellulose“ ist chemisch unpräzise)

Physikalische Trocknung (ohne chemische Vernetzung):
  Lacklösung → Lösemittel verdunstet → fester Polymerfilm
```

### Celluloseester organischer Säuren

Statt mit Salpetersäure lässt sich Cellulose auch mit organischen Säuren verestern: Celluloseacetat (CA) und vor allem die Mischester Celluloseacetobutyrat (CAB) und -propionat (CAP). Sie sind weniger entzündlich als das Nitrat und licht- sowie wetterbeständiger — sie vergilben deutlich weniger; CAB kann in vielen Lacksystemen Filmbildung, Trocknung, Härte, Verlauf und Blockfestigkeit günstig beeinflussen.

### Wo sie eingesetzt werden

Der technische Vorteil ist bei beiden derselbe: staubtrocken in Minuten, ohne Ofen und ohne Reaktion.

- Cellulosenitrat, Möbel- und Holzlacke — der klassische Einsatz: schleifbar nach kurzer Zeit, mehrere Schichten am selben Tag, jede Schicht löst die vorige wieder an (siehe L-123).
- Cellulosenitrat, Reparatur- und Sonderlacke — früher der Standard in der Fahrzeugreparatur, heute aus Emissionsgründen weitgehend abgelöst; geblieben sind Nagellacke, Lederlacke und Effektlacke.
- Cellulosenitrat, Druckfarben — Flexo- und Tiefdruck auf Papier und Folie, dort wegen der sehr schnellen Trocknung (siehe L-143).
- CAB und CAP, Automobil-Metalliclacke — als Zusatz zum Bindemittel, wo sie die Aluminiumpigmente beim Trocknen ausrichten und in Lage halten; das entscheidet über den Flop.
- CAB und CAP, Holz- und Kunststofflacke — als Zusatz für Verlauf, Blockfestigkeit und schnelles Antrocknen, lichtbeständiger als das Nitrat.

**Merksatz**

Cellulose wird erst durch Umsetzen ihrer OH-Gruppen zum Filmbildner. Beim Nitrat bestimmt der Stickstoffgehalt nicht nur die Löslichkeit, sondern auch Verträglichkeit, Filmeigenschaften und Verarbeitung; die Ester organischer Säuren sind die sicherere, beständigere Alternative.

**Stichwörter:** Cellulose, Cellulosenitrat, Nitrocellulose, Stickstoffgehalt, A-Typ, E-Typ, Schießbaumwolle, Lackwolle, Celluloseacetat, Celluloseacetobutyrat, CAB, Celluloseacetopropionat, physikalische Trocknung, Salpetersäure, Weichmacher

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur*

---

## Übungsblatt Ü-21 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Warum muss Cellulose derivatisiert werden, bevor sie als Filmbildner dient, und warum heißt Cellulosenitrat fälschlich „Nitrocellulose“?

**Warum derivatisieren:** Native Cellulose hat drei OH-Gruppen je Einheit, sehr hohe Molmasse und starke Teilkristallinität; dadurch ist sie in Lösemitteln praktisch unlöslich und nicht direkt verarbeitbar.

**Wie:** Erst das Umsetzen der OH-Gruppen — Verestern oder Verethern — macht sie löslich.

**Falscher Name:** Cellulosenitrat ist ein Ester der Salpetersäure, also eine Nitratverbindung. „Nitrocellulose“ würde eine Nitroverbindung (C–NO₂) bedeuten, die es hier nicht ist.

**Merkpunkt:** Die OH-Gruppen sind der Schlüssel: erst ihre Umsetzung, dann die Löslichkeit.

*Bewertung: Die Unlöslichkeit wird auf Molmasse, OH-Gruppen und Teilkristallinität zurückgeführt, und die Namensverwechslung Ester/Nitroverbindung sauber erklärt.*

**Frage 2** **(Berechnung, 9 Punkte)**

Berechnen Sie den theoretischen Stickstoffgehalt eines Cellulosenitrats mit durchschnittlich zwei Nitratgruppen je Glucose-Einheit. Die Glucose-Einheit hat M = 162 g/mol; jede Nitrierung ersetzt −H durch $-NO_2$ (also +45 g/mol), und je Gruppe kommen 14 g/mol Stickstoff hinzu. Ordnen Sie das Ergebnis ein.

**Gegeben:** M(Einheit) = 162 g/mol; 2 Nitratgruppen; je Gruppe +45 g/mol Masse und 14 g/mol N

**Molmasse der Einheit:** $M = 162 + 2 \cdot 45 = 252$ g/mol

**Stickstoff je Einheit:** $m(N) = 2 \cdot 14 = 28$ g/mol

**Stickstoffgehalt:** $N = 28 / 252 \cdot 100\ \% = 11{,}11\ \%$

**Einordnung:** 11,11 % liegt am unteren Rand des Lackbereichs (Richtwert etwa 11 bis 12 % N) und damit bei den alkohollöslichen A-Typen; die esterlöslichen E-Typen sind höher nitriert. Von der vollständig nitrierten Cellulose (theoretisch 14,14 %) ist der Wert weit entfernt.

*Bewertung: Masse- und Stickstoffbilanz je Einheit werden sauber getrennt und erst am Ende ins Verhältnis gesetzt. Das Ergebnis wird gegen die Löslichkeitsklassen und gegen die vollständig nitrierte Cellulose eingeordnet.*

**Frage 3** **(Anwendung, 7 Punkte)**

Ein schnell trocknender Cellulosenitrat-Decklack soll formuliert und gelagert werden. Nennen Sie zwei Sicherheitspunkte und begründen Sie, warum stattdessen ein Celluloseacetobutyrat (CAB) infrage kommt.

**Sicherheit 1:** Cellulosenitrat ist leicht entzündlich und wird angefeuchtet gelagert (Lackwolle); die gesetzlichen Sicherheitsvorschriften sind zu beachten (siehe L-68).

**Sicherheit 2:** Zündquellen, Erdung und Belüftung sind wie bei lösemittelhaltigen Systemen zu berücksichtigen.

**Warum CAB:** Celluloseacetobutyrat ist weniger entzündlich und licht- sowie wetterbeständiger als das Nitrat und kann in vielen Systemen Filmbildung, Trocknung, Härte, Verlauf und Blockfestigkeit günstig beeinflussen.

**Abwägung:** CAB ist damit die sicherere Alternative, wenn Entzündlichkeit oder Vergilbung des Nitrats stören.

*Bewertung: Die Sicherheitspunkte sind konkret (Anfeuchten, Zündquellen) und CAB wird als Alternative fachlich begründet — nicht nur benannt, sondern gegen die Schwächen des Nitrats gestellt.*

# L-22 · Celluloseether und physikalisch trocknende Filmbildner

*Verethern statt Verestern — und die Familie der verdunstungstrocknenden Binder*

**Prüfungsteil 2** · A 10 · B 12

Ethylcellulose ist der organisch lösliche Filmbildner, die wasserlöslichen Celluloseether dienen als Verdicker — physikalisch trocknende Binder eint das reine Verdunsten.

## Der zweite Weg: Verethern

Neben dem Verestern (siehe L-21) lässt sich Cellulose auch löslich machen, indem ihre OH-Gruppen verethert werden — etwa durch Umsetzung mit Alkylchloriden in Natronlauge. Je nach eingeführter Gruppe entstehen sehr unterschiedliche Celluloseether, von organisch löslich bis wasserlöslich.

## Ethylcellulose (EC)

Ethylcellulose ist der wichtigste klassisch organisch lösliche Celluloseether in der Lacktechnik. Die meisten anderen gebräuchlichen Celluloseether wie Methyl-, Hydroxyethyl- und Carboxymethylcellulose sind dagegen wasserlöslich (siehe unten). Ethylcellulose ist ein flexibler Thermoplast mit guter Beständigkeit gegen Wärme, Wasser und Chemikalien, auch gegen Alkali. Gelöst wird sie ähnlich wie Cellulosenitrat in Estern (Ethyl- oder Butylacetat) und Alkoholen, oft mit aromatischen Verdünnern (Toluol) im Gemisch. Eingesetzt wird sie für physikalisch trocknende Beschichtungen auf flexiblen Untergründen — Papier, Leder, Folien, Textilien — und für Druckfarben. Anders als Cellulosenitrat ist sie nicht leicht entzündlich, was Lagerung und Verarbeitung erleichtert.

## Wasserlösliche Celluloseether

Methyl-, Hydroxyethyl- und Carboxymethylcellulose (letztere als Natriumsalz) sind wasserlöslich. Sie dienen nicht als eigentlicher Filmbildner, sondern als Verdicker und Schutzkolloide in Dispersionsfarben (siehe L-46) sowie als Bindemittel für Leimfarben, Leime und Kleister.

## Veretherung — Reaktionsschema

```
Allgemein:
  Cell–OH + R–X → Cell–OR + HX

Ethylcellulose (vereinfacht):
  Cell–OH + C₂H₅Cl + NaOH → Cell–O–C₂H₅ + NaCl + H₂O

Vereinfachtes Reaktionsschema: Technisch läuft die Veretherung mehrstufig und unter
   kontrollierten Bedingungen ab, und es werden nicht alle OH-Gruppen umgesetzt. Der
   Substitutionsgrad (DS, degree of substitution) gibt an, wie viele der drei OH-Gruppen
   einer Glucose-Einheit im Mittel durch Ethergruppen ersetzt sind – er steuert wesentlich
   Löslichkeit und Eigenschaften des Celluloseethers.
```

## PvB — wichtiger Primerbinder

Polyvinylbutyral (PvB) ist ein physikalisch trocknender Polymerbinder mit besonderer Bedeutung für Haft- und Primeranwendungen. Es entsteht durch Acetalisierung von Polyvinylalkohol mit Butyraldehyd; im Polymer verbleiben neben Butyralgruppen auch Vinylalkohol- und Vinylacetat-Einheiten, die Haftung, Polarität und Löslichkeit beeinflussen. Bekannt ist PvB aus Haft- und Wash-Primer-Systemen: gute Haftung auf Metall, Flexibilität und schnelle physikalische Trocknung machen es zu einem klassischen Primerbindemittel.

## Die chlorhaltigen Filmbildner

• Chlorkautschuk — durch Chlorierung von Natur- oder Polyisoprenkautschuk auf einen hohen Chlorgehalt gebracht. Die Chloratome machen ihn polar, deshalb löst er sich in Aromaten, Estern und Ketonen. Stark: Wasser-, Säure-, Laugen- und Chlorwasserbeständigkeit, gute Haftung auf Beton, schnelle Trocknung ohne Wärme. Schwach: spröde (Weichmacher nötig), nicht hitzebeständig, lösemittelreich. Anwendung: Schwimmbecken, Betonböden, Stahlbau-Korrosionsschutz (siehe L-105, L-108) — aus Emissionsgründen rückläufig.
• Cyclokautschuk — entsteht nicht durch Chlorierung, sondern durch säurekatalysierte Cyclisierung des Kautschuks. Er trägt also keine Chloratome und kann folglich auch kein HCl abspalten. Hart, wasserfest, gut haftend; begrenzt lichtbeständig. Anwendung: Haftvermittler und Korrosionsschutzgrundierungen.
• Polyvinylchlorid-Mischpolymerisate — reines PVC ist in Lacklösemitteln praktisch unlöslich; erst ein Comonomer wie Vinylacetat macht es löslich, eine eingebaute Säurekomponente zusätzlich haftfähig. Gelöst wird meist in Ketonen (MEK, Cyclohexanon) oder Ketongemischen mit Estern. Stark: Chemikalien- und Korrosionsbeständigkeit. Schwach: HCl-Abspaltung, Weichmacher nötig. Anwendung: Einschichtdecklacke, Behälterbeschichtung (siehe L-106).

## Die übrigen physikalisch trocknenden Filmbildner

• Polystyrol und Kohlenwasserstoffharze — rein aus Kohlenwasserstoff aufgebaut, also unpolar und sehr wasserfest, dazu billig. Schwach: niedrige Erweichungstemperatur, empfindlich gegen Weichmacher und Lösemittel, vergilben und verspröden im Freien. Anwendung: Verschnittharze, Straßenmarkierung, einfacher Bautenschutz.
• Hochmolekulare Epoxidharze — als reine Thermoplaste ohne Härter verarbeitet. Die vielen sekundären OH-Gruppen und die Bisphenol-A-Segmente geben sehr gute Haftung auf Metall und Chemikalienbeständigkeit; im Freien kreiden sie (siehe L-18). Anwendung: Grundierungen und Innenbeschichtungen.
• Lösliche Copolyamide — zäh, abriebfest, haften auch auf schwierigen Kunststoffen; empfindlich gegen Alkohol und Feuchte. Anwendung: Flexodruckfarben, Kaschier- und Überdrucklacke.
• Polycarbonat — sehr zäh und klar, aber teuer und nur in wenigen Lösemitteln löslich. Anwendung: Spezialbeschichtungen, vor allem auf Polycarbonat-Substraten.
• Thermoplastische Acrylatharze — hochmolekulare Copolymere aus Acryl- und Methacrylestern ohne reaktive Endgruppen; rein physikalische Filmbildung, schnell trocknend, licht- und wetterbeständig. Anwendung: schnelltrocknende Reparaturlacke, oft mit Cellulosenitrat kombiniert. Nicht zu verwechseln mit den reaktiven, selbstvernetzenden oder strahlungshärtenden Acrylattypen (siehe L-24, L-27, L-36, L-96).

## Chlorabspaltung — was dabei chemisch passiert

Wärme oder UV-Licht löst ein Chloratom aus der Kette. Zusammen mit dem Wasserstoff am Nachbarkohlenstoff wird daraus Chlorwasserstoff, und in der Kette bleibt eine Doppelbindung zurück:

–$CH_2$–CHCl– → –CH=CH– + HCl

Das Tückische daran ist die Rückkopplung: Der freigesetzte Chlorwasserstoff beschleunigt die nächste Abspaltung. Die Reaktion katalysiert sich selbst und läuft wie ein Reißverschluss die Kette entlang. Zurück bleiben aneinandergereihte Doppelbindungen; weil solche konjugierten Systeme sichtbares Licht absorbieren, vergilbt und bräunt der Film (siehe L-14 zur gleichen Ursache der Vergilbung).

Hinzu kommt die zweite Schadwirkung: HCl ist ätzend. Es greift den Untergrund an — bei Stahl also ausgerechnet dort, wo die Beschichtung schützen soll — und bei Brand oder Überhitzung entstehen ätzende Dämpfe. PVC kann bereits bei relativ niedrigen Temperaturen mit der Dehydrochlorierung beginnen, Chlorkautschuk ist thermisch begrenzt stabil; Beginn und Ausmaß hängen bei beiden stark von Polymer, Stabilisierung, Temperatur, Verweilzeit und UV-Belastung ab. Als grobe Orientierung gilt: Chlorkautschuk-Beschichtungen werden dauerhaft bis etwa 80 °C, PVC-Copolymere bis etwa 60 bis 70 °C eingesetzt. Diese Werte sind Gebrauchsgrenzen, nicht der Beginn der Zersetzung — eine technisch relevante HCl-Abspaltung setzt erst deutlich darüber ein (siehe L-105, L-106). Feste, universell gültige Grenzen sind das nicht.

## Chlorwasserstoff — nicht Chlorgas

Eine Verwechslung, die sich hartnäckig hält: Abgespalten wird Chlorwasserstoff HCl, nicht Chlor $Cl_2$.

Der Grund steckt im Bau der Kette. Im PVC trägt nur jeder zweite Kohlenstoff ein Chloratom — –$CH_2$–CHCl–$CH_2$–CHCl– —, zwei Chloratome stehen also gar nicht nebeneinander, aus denen $Cl_2$ werden könnte. Abgespalten wird immer ein Paar aus benachbartem Wasserstoff und Chlor.

Und selbst dort, wo das Chlor unregelmäßig sitzt wie im Chlorkautschuk, bleibt es dabei: Die H–Cl-Bindung ist mit rund 430 kJ/mol weit fester als die Cl–Cl-Bindung mit rund 240 kJ/mol. Der HCl-Weg ist der energetisch günstige.

Praktisch zählt vor allem eines: Der Stabilisator muss eine Säure binden, kein Halogen. Auch die Brandgase chlorhaltiger Kunststoffe sind HCl-haltig; Chlorgas entsteht dabei nicht.

## Stabilisieren — was Zinkoxid kann und was nicht

Man fängt den Chlorwasserstoff ab, bevor er die Kettenreaktion antreibt. In der Lacktechnik übernehmen das niedermolekulare Epoxidverbindungen und epoxidierte Öle in wenigen Prozent: Der gespannte Oxiranring öffnet sich mit HCl zum Chlorhydrin und bindet ihn damit fest — derselbe Mechanismus wie beim epoxidierten Weichmacher in L-48.

Zinkoxid als Säurefänger ist nicht falsch gedacht — es bindet HCl tatsächlich, und in der Kautschukverarbeitung ist es dafür üblich. Im chlorhaltigen Lack ist es trotzdem der falsche Fänger, und der Grund ist das Reaktionsprodukt: Aus ZnO und HCl entsteht Zinkchlorid, und Zinkchlorid ist eine Lewis-Säure, die die Abspaltung ihrerseits katalysiert. Der Stabilisator wird zum Beschleuniger.

Die PVC-Verarbeitung kennt das als Zinkschaden und setzt Zink nie allein ein, sondern mit Calcium: Die Calciumseife bildet die Zinkseife zurück und hält das Zinkchlorid klein. Im Lack verschlechtert das basische Pigment zusätzlich die Lagerstabilität — deshalb steht in L-105, dass Zinkoxid in Chlorkautschuk zu meiden ist. Im Korrosionsschutz bleibt es richtig (siehe L-41, L-57), nur eben nicht in chlorhaltigen Bindemitteln.

### Was sie verbindet

Bei physikalisch trocknenden Lösemittellacken liegt der Filmbildner im Lack als gelöster oder dispergierter thermoplastischer bzw. harzartiger Stoff vor. Nach Verdunsten des Lösemittels (siehe L-02) entsteht der feste Film ohne chemische Vernetzung — das macht diese Systeme lagerstabil und einfach zu verarbeiten. Viele klassische physikalisch trocknende Lösemittellacke benötigen relativ hohe Lösemittelanteile, weil hochmolekulare Filmbildner erst zur Verarbeitung auf eine geeignete Viskosität eingestellt werden müssen — physikalisch trocknend heißt aber nicht automatisch niedriger Festkörper, es gibt auch physikalisch trocknende High-Solid-Systeme. Die Molmasse bestimmt die Filmeigenschaften unmittelbar.

### Physikalisch trocknend gegen chemisch härtend

- Physikalisch trocknend — Lösemittel bzw. Wasser verdunstet; das Polymer bleibt chemisch weitgehend unverändert; der Film lässt sich mit einem passenden Lösemittel wieder anlösen. Beispiele: Cellulosenitrat, Ethylcellulose, thermoplastische Acrylate.
- Chemisch härtend — eine chemische Reaktion findet statt; es entstehen neue chemische Bindungen; der ausgehärtete Film ist meist nicht mehr vollständig löslich. Beispiele: 2K-PUR, Epoxidharzsysteme, Melaminharz-Einbrennsysteme.

**Merksatz**

Verethern statt Verestern: Ethylcellulose ist der klassische organisch lösliche Filmbildner, die wasserlöslichen Ether sind Verdicker und Schutzkolloide. Bei physikalisch trocknenden Systemen verfestigt sich der Film überwiegend durch die Abgabe flüchtiger Bestandteile und durch physikalische Filmbildung, z. B. Annäherung, Deformation und Koaleszenz von Polymerteilchen; eine gezielte chemische Vernetzung ist für die Filmbildung nicht erforderlich — das unterscheidet sie grundlegend von chemisch härtenden Systemen. Bei den chlorhaltigen Filmbildnern kommt hinzu: Sie können unter Wärme und Licht Chlorwasserstoff abspalten und brauchen deshalb einen Stabilisator — Zinkoxid ist dafür ungeeignet, weil das entstehende Zinkchlorid die Abspaltung sogar beschleunigt.

**Stichwörter:** Celluloseether, Verethern, Ethylcellulose, EC, Substitutionsgrad, Methylcellulose, Hydroxyethylcellulose, Carboxymethylcellulose, Schutzkolloid, Verdicker, Chlorkautschuk, Cyclokautschuk, physikalisch trocknend, chemisch härtend, Polyvinylchlorid, Kohlenwasserstoffharz, Chlorabspaltung, Dehydrochlorierung, HCl-Fänger, Zinkchlorid, Polycarbonat, Copolyamid, PvB

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur*

## Übungsblatt Ü-22 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Wie macht man Cellulose über Ether löslich, und worin unterscheiden sich Ethylcellulose und die wasserlöslichen Celluloseether in ihrer Anwendung?

**Verethern:** Die OH-Gruppen der Cellulose werden verethert, etwa durch Umsetzung mit Alkylchloriden in Natronlauge. Je nach eingeführter Gruppe wird der Ether organisch löslich oder wasserlöslich.

**Ethylcellulose:** Organisch löslich; dient als Filmbildner für physikalisch trocknende Beschichtungen auf flexiblen Untergründen (Papier, Leder, Folien, Textilien) und für Druckfarben.

**Wasserlösliche Ether:** Methyl-, Hydroxyethyl-, Carboxymethylcellulose dienen nicht als Filmbildner, sondern als Verdicker und Schutzkolloide in Dispersionsfarben und als Bindemittel für Leimfarben und Kleister.

**Kernunterschied:** Löslichkeit entscheidet die Rolle: Ethylcellulose bildet Filme, die wasserlöslichen Ether verdicken und stabilisieren.

*Bewertung: Das Verethern wird als Weg zur Löslichkeit erklärt, und die beiden Ether-Familien werden klar nach Löslichkeit und Funktion (Filmbildner vs. Verdicker) getrennt.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**

Ein physikalisch trocknender Ethylcellulose-Lack hat einen Festkörpergehalt von 20 %. Wie viel Lösemittel entfällt auf 1 kg Bindemittel-Festkörper, und was ist der praktische Nachteil?

**Gegeben:** Festkörper = 20 %; Bindemittel-Festkörper = 1 kg

**Ansatz:** Lackmenge = Festkörper / Festkörpergehalt

**Rechnung:** Lack = 1 kg / 0,20 = 5,0 kg

**Lösemittel:** 5,0 kg − 1 kg = 4,0 kg Lösemittel je kg Bindemittel

**Nachteil:** Physikalisch trocknende Lacke brauchen viel Lösemittel — hohe Emission und Kosten (siehe L-168).

*Bewertung: Aus dem Festkörpergehalt wird die Lackmenge und daraus der Lösemittelanteil bestimmt. Der Nachteil des hohen Lösemittelbedarfs wird richtig als Kennzeichen physikalisch trocknender Systeme benannt.*

**Frage 3** **(Anwendung, 10 Punkte)**

(a) Welchen Celluloseether wählen Sie als Verdicker in einer wässrigen Dispersionsfarbe, (b) welchen als Filmbildner für eine physikalisch trocknende Lederbeschichtung? (c) Ein Chlorkautschuklack soll gegen die Abspaltung stabilisiert werden. Ein Kollege schlägt Zinkoxid vor — nehmen Sie Stellung und benennen Sie das Abspaltungsprodukt. Begründen Sie jeweils.

**(a) Verdicker:** Ein wasserlöslicher Ether wie Methyl-, Hydroxyethyl- oder Carboxymethylcellulose — er wirkt im wässrigen System als Verdicker und Schutzkolloid.

**(b) Lederbeschichtung:** Ethylcellulose — sie ist organisch löslich, bildet einen flexiblen Film und eignet sich für flexible Untergründe wie Leder.

**Begründung:** Das Lösemittel des Systems entscheidet: wässrig → wasserlöslicher Ether; organisch und flexibel → Ethylcellulose.

**Ergänzung:** Ethylcellulose ist zudem beständig gegen Wärme, Wasser und Chemikalien.

**(c) Abspaltungsprodukt:** Chlorwasserstoff HCl, nicht Chlor $Cl_2$: Abgespalten wird ein benachbartes Paar aus Wasserstoff und Chlor, zurück bleibt eine Doppelbindung.

**(c) Zinkoxid:** Abzulehnen. ZnO bindet HCl zwar, doch dabei entsteht Zinkchlorid — eine Lewis-Säure, die die weitere Abspaltung katalysiert. Der Stabilisator wirkt dann als Beschleuniger; zusätzlich leidet die Lagerstabilität in der Dose.

**(c) Richtige Wahl:** Niedermolekulare Epoxidverbindungen oder epoxidierte Öle in wenigen Prozent: Der Oxiranring öffnet sich mit HCl zum Chlorhydrin und bindet ihn fest.

*Bewertung: Die Fälle (a) und (b) werden richtig zugeordnet und an der Löslichkeit des Systems festgemacht — nicht am Namen, sondern an der Funktion im jeweiligen Medium. In (c) müssen das Abspaltungsprodukt HCl (nicht $Cl_2$) benannt, Zinkoxid wegen des entstehenden, die Abspaltung katalysierenden Zinkchlorids abgelehnt und Epoxidverbindungen als richtige HCl-Fänger genannt werden.*

# L-23 · Ungesättigte Polyester (UP) und Reaktivverdünner

*Styrol verdünnt und wird zugleich einpolymerisiert*

**Prüfungsteil 1** · A 8.3 · A 10 · B 12

Ein UP-Harz härtet, indem seine Doppelbindungen mit dem Styrol radikalisch copolymerisieren — das Styrol wird dabei überwiegend Teil des Films, statt wie ein Lösemittel zu verdunsten.

## Was ein UP-Harz ist

Ein ungesättigter Polyester entsteht, wenn man Diole nicht nur mit gesättigten Säuren, sondern auch mit Maleinsäureanhydrid verestert. Dessen Doppelbindungen bleiben im Harz erhalten — die cis-konfigurierte Maleinsäure isomerisiert dabei überwiegend zur trans-Form, der Fumarsäure — und sind später die Vernetzungsstellen: Genau diese C=C-Doppelbindungen reagieren bei der Härtung radikalisch mit dem Styrol. Ohne sie gäbe es nichts zu vernetzen. Über das Verhältnis von ungesättigter zu gesättigter Säure lässt sich die Zahl der Doppelbindungen und damit tendenziell Vernetzungsdichte und Härte beeinflussen — die tatsächlichen Filmeigenschaften hängen daneben von Funktionalität, Harzstruktur, Styrolgehalt, Additiven und den Härtungsbedingungen ab.

## Styrol als Reaktivverdünner

Das UP-Harz ist in Styrol gelöst. Styrol senkt die Viskosität wie ein Lösemittel, verdunstet aber nicht: Bei der Härtung wird es überwiegend in das Netzwerk einpolymerisiert. Deshalb heißt es Reaktivverdünner — es verdünnt und wird zugleich Baustein des Films. Vollständig emissionsfrei ist das nicht: Ein Teil kann als Restmonomer im Film verbleiben oder während Verarbeitung und Härtung verdunsten.

## Härtung: radikalische Copolymerisation

Styrol und die UP-Doppelbindungen copolymerisieren radikalisch; bei ausreichender Funktionalität und vollständiger Härtung entsteht ein dreidimensional vernetztes Duromer (siehe L-03). Die Startradikale liefert entweder ein organisches Peroxid als radikalischer Initiator — mit einem Beschleuniger (Cobaltoctoat) bei Raumtemperatur (Kalthärtung) — oder Wärme (Heißhärtung) oder UV-Licht mit einem Photoinitiator.

## Zwei Systeme in der Praxis

- Konventionell — ein organisches Peroxid als radikalischer Initiator (z. B. Methylethylketonperoxid, MEKP, mit Cobalt-Beschleuniger — oder Benzoylperoxid mit einem tertiären aromatischen Amin; Peroxid und Beschleuniger müssen zueinander passen, siehe unten); als getrennte A- und B-Komponente, weil unkontrolliertes direktes Vermischen eine sehr schnelle, stark exotherme Zersetzungsreaktion auslösen kann.
- Photochemisch — Photoinitiator im Harz, gestartet durch UV-Licht.

## Reaktionsgleichung: UP-Härtung mit Styrol

```
Start (Peroxid + Beschleuniger oder Wärme liefert ein Radikal R•):
R• + CH₂=CH–C₆H₅ (Styrol) → R–CH₂–CH•–C₆H₅

Kettenwachstum (alternierende Copolymerisation mit den UP-Doppelbindungen):
R–CH₂–CH•–C₆H₅ + –CH=CH– (im UP) → R–CH₂–CH(C₆H₅)–CH–CH•– → vernetztes Copolymer
```

**Merksatz**

An der Oberfläche hemmt Luftsauerstoff die radikalische Härtung, sie bleibt klebrig. Ein Paraffinzusatz migriert während der Härtung an die Oberfläche und bildet dort eine sauerstoffhemmende Schicht, sodass die Oberfläche durchhärtet. Zur Sicherheit: Styrol ist nicht nur geruchsintensiv, sondern haut- und augenreizend, als reproduktionstoxisch Kategorie 2 (H361d) eingestuft und schädigt bei längerer oder wiederholter Exposition das Gehör (H372) — Arbeitsplatzgrenzwert (AGW 20 ml/m³) und Absaugung beachten. Auch die Härterseite ist kritisch: die Peroxide (etwa Methylethylketonperoxid) sind brandfördernd und ätzend. Bei den Cobaltverbindungen ist die Lage in Bewegung: Mehrere Cobaltsalze sind als krebserzeugend und fortpflanzungsgefährdend eingestuft, und die als Beschleuniger verwendeten Cobaltcarboxylate stehen unter Neubewertung (siehe L-14 und den Abschnitt weiter unten). Maßgeblich für das konkret eingesetzte Produkt ist immer das aktuelle Sicherheitsdatenblatt. Peroxid und Beschleuniger nie direkt zusammengeben.

## Ist Cobalt noch im Einsatz?

Ja — weiterhin verbreitet, und der Druck dagegen ist regulatorisch, nicht technisch.

Cobalt funktioniert nämlich außergewöhnlich gut. Das Metall wechselt zwischen zwei Oxidationsstufen und zerlegt dabei immer wieder ein Peroxidmolekül zu Startradikalen — derselbe Redox-Kreislauf wie beim Sikkativ in L-14. Ein einziges Metallatom liefert deshalb viele Startradikale, Zehntelprozente genügen, und die Härtung läuft bei Raumtemperatur. Ein gleichwertig wirksamer Ersatz ist technisch nur schwer zu finden.

Daneben stehen die Cobaltcarboxylate unter Neubewertung durch die europäische Chemikalienagentur und können als besonders besorgniserregender Stoff eingestuft werden. Genau das treibt die Umstellung.

## Die cobaltfreien Wege — und was sie kosten

Kommerziell verfügbar sind Beschleuniger auf Eisen-, Kupfer- und Manganbasis sowie Metallkomplexe, die vom Hersteller nicht offengelegt werden. Ein zweiter, älterer Weg führt über Amine: Ein tertiäres aromatisches Amin wie Dimethyl-p-toluidin bildet mit Benzoylperoxid ebenfalls ein Redoxpaar.

Daraus folgt eine Regel, die man im Labor nicht übergehen darf: Beschleuniger und Peroxid müssen zueinander passen. Cobalt arbeitet mit Ketonperoxiden wie MEKP, das Amin mit Benzoylperoxid. Wer nur den Beschleuniger tauscht und das Peroxid stehen lässt, bekommt keine oder eine unkontrollierte Härtung.

Und eine 1:1-Umstellung gibt es nicht: Anspringverhalten, Gelzeit, Durchhärtung und Eigenfarbe fallen anders aus. Bei jedem Wechsel werden Gelzeit und Durchhärtung neu ermittelt — und was für das konkrete Produkt gilt, steht im Sicherheitsdatenblatt, nicht in einer Faustregel.

## Pyrogene Kieselsäure als Rheologieadditiv

Für UP-Spachtelmassen, thixotrope Beschichtungen und hochgefüllte Systeme ist pyrogene Kieselsäure ein wichtiges Rheologieadditiv. Die sehr feinen Silica-Partikel bilden über Partikel-Partikel-Wechselwirkungen ein reversibles, dreidimensionales Struktur-Netzwerk: bei niedriger Scherung ist die Struktur aufgebaut (hohe Standfestigkeit, geringes Ablaufen), bei hoher Scherung teilweise abgebaut (leichteres Mischen und Auftragen), nach der Applikation baut sie sich wieder auf. Die Wirkung hängt stark von Oberfläche, Dosierung, Dispergierzustand und den Wechselwirkungen mit Harz, Füllstoffen und Additiven ab — pyrogene Kieselsäure ist daher kein bloßer Viskositätserhöher, sondern ein gezieltes Strukturierungsadditiv.

### Anwendung und Merksatz

UP-Systeme haben einen hohen Festkörper und sind lösemittelarm; typisch sind Füller, Spachtel sowie Holz- und Möbellacke. Ein zusätzliches Lösemittel ist bei UP-Systemen meist nicht bzw. nur in geringer Menge nötig — anders als bei den praktisch lösemittelfrei formulierbaren strahlungshärtenden Acrylaten (siehe L-24) fällt hier trotzdem meist noch ein Rest an flüchtigem organischem Lösemittel an. In einem Arbeitsgang lassen sich dicke, harte Schichten aufbauen; das gehärtete Duromer ist nicht wieder aufschmelzbar. Merksatz: Beim UP-Harz ist das Styrol Verdünner und Baustein in einem — es bleibt im Film.

**Stichwörter:** ungesättigter Polyester, UP-Harz, Reaktivverdünner, Styrol, Maleinsäureanhydrid, Fumarsäure, radikalische Copolymerisation, Duromer, Peroxid, Cobaltoctoat, Kalthärtung, Heißhärtung, Paraffin, Luftinhibierung, Spachtel

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur*

---

## Übungsblatt Ü-23 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Warum ist Styrol beim UP-Harz ein Reaktivverdünner und kein gewöhnliches Lösemittel?

**Verdünnerwirkung:** Styrol senkt die Viskosität des UP-Harzes wie ein Lösemittel — der Lack lässt sich damit verarbeiten.

**Der Unterschied:** Ein Lösemittel verdunstet und verlässt den Film. Styrol dagegen wird bei der Härtung radikalisch mit den UP-Doppelbindungen copolymerisiert und bleibt im Film.

**Folge:** Dadurch bleibt der überwiegende Teil im Film, der Festkörper ist hoch — vollständig emissionsfrei ist das System aber nicht: Ein Teil des Styrols kann als Restmonomer im Film verbleiben oder während Verarbeitung und Härtung emittieren.

**Begriff:** Genau deshalb heißt es Reaktivverdünner: es verdünnt und reagiert mit.

*Bewertung: Der Unterschied wird am Verbleib im Film festgemacht (verdunsten gegen einpolymerisieren), nicht nur behauptet. Der Bezug zu Festkörper und Emission zeigt das Verständnis für den Vorteil.*

**Frage 2** **(Berechnung, 9 Punkte)**

Ein UP-Spachtel wird mit Härterpaste im Massenverhältnis Harz : Härter = 100 : 2 angesetzt. Wie viel Härter braucht man für 3,0 kg Harz, und was ist bei der Verarbeitung zu beachten?

**Gegeben:** Harz = 3,0 kg = 3000 g; Verhältnis Harz : Härter = 100 : 2

**Ansatz:** Härter = Harz · 2 / 100

**Rechnung:** 3000 g · 2 / 100 = 60 g

**Antwortsatz:** Es werden 60 g Härterpaste benötigt.

**Hinweis:** Nach dem Mischen läuft die Reaktion an — die Topfzeit ist begrenzt, es darf nur so viel angesetzt werden, wie sich verarbeiten lässt.

*Bewertung: Das Verhältnis wird korrekt auf die Harzmenge angewandt, und der Hinweis auf die begrenzte Topfzeit zeigt das Verständnis für ein reaktives Zweikomponentensystem.*

**Frage 3** **(Anwendung, 7 Punkte)**

Warum wird UP-Lacken für die Oberfläche oft Paraffin zugesetzt, und was ist beim Arbeiten mit Styrol zu beachten?

**Problem:** An der Oberfläche hemmt Luftsauerstoff die radikalische Härtung; sie bleibt klebrig.

**Paraffin:** Das zugesetzte Paraffin migriert während der Härtung an die Oberfläche und bildet dort eine Sperrschicht, die den Luftsauerstoff fernhält, sodass die Oberfläche durchhärtet.

**Styrol/Arbeitsschutz:** Styrol riecht stark und hat einen Arbeitsplatzgrenzwert (AGW); für Absaugung und Belüftung ist zu sorgen (siehe L-68).

**Einordnung:** Paraffin löst also ein Härtungsproblem, der Arbeitsschutz ein Gesundheitsproblem — beides gehört zur UP-Verarbeitung.

*Bewertung: Die Luftinhibierung wird als Ursache erkannt und das Paraffin als Gegenmaßnahme erklärt. Der Arbeitsschutzhinweis zum Styrol ist konkret (AGW, Absaugung), nicht allgemein.*

# L-24 · Strahlungshärtende Acrylate

*UV und Elektronenstrahl: Härtung in Sekunden, lösemittelfrei*

**Prüfungsteil 1** · A 8.3 · A 10

Strahlungshärtende Acrylatsysteme polymerisieren reaktive Doppelbindungen durch UV- oder Elektronenstrahlung. Die Härtung kann sehr schnell erfolgen; viele Formulierungen sind lösemittelarm oder lösemittelfrei.

## Das Prinzip

Strahlungshärtende Lacke enthalten Acrylatharze mit reaktiven Doppelbindungen. Durch Strahlung — ultraviolettes Licht (UV) oder einen Elektronenstrahl (ESH) — können Radikale erzeugt werden, die die reaktiven Doppelbindungen schnell zu einem vernetzten Film polymerisieren. Die erforderliche Härtungszeit hängt unter anderem von Strahlungsdosis, Schichtdicke, Pigmentierung und Formulierung ab. Das geschieht lösemittelfrei — dadurch entfallen die klassischen Lösemittelemissionen (siehe L-168). Praktische Folge: Bei 100 % Volumenfestkörper wird jeder Liter komplett zu Film; die Ergiebigkeit A = 10 · VFK[%] / TSD[µm] (in m²/l) erreicht ihr Maximum. Lösemittelfrei bedeutet aber nicht automatisch emissionsfrei: Restmonomere, flüchtige Bestandteile oder Reaktionsprodukte können weiterhin freigesetzt werden.

## Der Aufbau der Harze

Ein Gerüst aus Polyester, Polyether, Epoxidharz oder Polyurethan trägt Acrylat-Endgruppen. Nach diesem Gerüst heißen die Harze Polyester-, Polyether-, Epoxid- oder Urethanacrylat. Das Oligomergerüst beeinflusst wesentlich Härte, Flexibilität, Haftung und Beständigkeit des Films — typischerweise ergibt ein Epoxidacrylat eher harte, chemikalienbeständige Filme, ein Urethanacrylat eher zähe, flexible und abriebfeste; die konkreten Eigenschaften hängen aber zusätzlich von Molmasse, Funktionalität und Formulierung ab, nicht allein vom Gerüsttyp. Beispiel Epoxidacrylat: Acrylsäure öffnet den Oxiranring des Epoxidharzes (siehe L-28); dabei entstehen eine endständige Acrylatgruppe und eine neue OH-Gruppe: Epoxidharz–CH(–O–)$CH_2$ + $CH_2$=CH–COOH → Epoxidharz–CH(OH)–$CH_2$–O–CO–CH=$CH_2$.

## Reaktivverdünner

Mono- und mehrfunktionelle Acrylate (z. B. Hexandioldiacrylat HDDA mit zwei, Trimethylolpropantriacrylat TMPTA mit drei Acrylatgruppen) stellen die Viskosität ein und werden bei der Härtung mit einpolymerisiert — wie beim Styrol des UP-Harzes (siehe L-23). Monofunktionelle Acrylate senken vor allem die Viskosität und tragen tendenziell weniger zur Vernetzungsdichte bei; di- und mehrfunktionelle schaffen mehrere Reaktionsstellen je Molekül und erhöhen dadurch tendenziell Vernetzungsdichte und Härte des ausgehärteten Films — die Funktionalität des Reaktivverdünners ist damit ein direkter Stellhebel für die Filmeigenschaften. Monofunktionelle Typen wie Isobornylacrylat (IBOA) oder 2-Phenoxyethylacrylat werden tatsächlich als echte Einzel-Acrylate eingesetzt: Sie polymerisieren nur mit ihrem einen Ende in das Netzwerk ein und wirken danach wie ein fest eingebundener Kettenabschluss, nicht wie ein Vernetzer. Niedermolekulare Typen sind nicht nur hautreizend, sondern häufig auch sensibilisierend — wiederholter Hautkontakt zählt zu den häufigsten Ursachen berufsbedingter Kontaktallergien in der UV-Lackindustrie (vergleichbar mit der Epoxid-Amin-Allergie, siehe L-29). Konsequenter Hautschutz und Absaugung sind deshalb Pflicht.

## UV mit Photoinitiator

Die UV-Härtung braucht einen Photoinitiator: Er zerfällt unter UV-Licht in Radikale und startet die Polymerisation. UV-Härtung ist technologisch und wirtschaftlich weit verbreitet, etwa für Holz, Papier und Druck. Das UV-Licht muss die Fläche aber erreichen; verschattete Stellen an dreidimensionalen Teilen härten schlecht. Pigmente verschärfen dieses Problem zusätzlich: Sie absorbieren und streuen das UV-Licht und konkurrieren damit um dieselbe Strahlung wie der Photoinitiator — die Härtungstiefe sinkt. Besonders kritisch sind stark deckende Pigmente wie Titandioxid (Weiß) oder Ruß (Schwarz); pigmentierte Systeme verlangen deshalb oft langwelligere Photoinitiatoren (siehe Acylphosphinoxide unten) oder dünnere Schichten.

## Typischer Photoinitiator

```
Zwei Grundtypen erzeugen die Startradikale:

Typ I (α-Spaltung, Norrish I): Das Molekül zerfällt unter UV-Licht direkt in zwei Radikale.
   Typische Klassen: Benzildimethylketale und α-Hydroxyketone; Acylphosphinoxide
   absorbieren auch längerwelliges UV/Violett und eignen sich besonders für dickere,
   pigmentierte Schichten.

Typ II (Wasserstoffabstraktion): Ein angeregtes Molekül wie Benzophenon reißt einem
   Amin-Synergisten ein H-Atom ab; das dabei am Amin entstehende Radikal startet die
   Polymerisation. Typische Aminsynergisten sind tertiäre Amine wie
   Ethyl-4-(dimethylamino)benzoat (EDB) oder Methyldiethanolamin (MDEA): Ihr α-ständiges
   Wasserstoffatom wird abstrahiert, das entstehende α-Amino-Radikal startet die Kette.
   Nebeneffekt: Das Amin verbraucht dabei Sauerstoff und mildert so die
   Sauerstoffinhibierung an der Filmoberfläche.
```

## Elektronenstrahl (ESH)

Beim Elektronenstrahl erzeugen die Elektronen die Radikale direkt — ein Photoinitiator ist grundsätzlich nicht nötig. Elektronenstrahlung kann unter geeigneten Bedingungen deutlich tiefer in Beschichtungen eindringen als UV-Licht; wie tief, hängt unter anderem von Elektronenenergie, Schichtdicke, Pigmentierung und den Anlagenparametern ab. Dadurch kann ESH bei pigmentierten und dickeren Schichten gegenüber UV Vorteile bieten, weil die Härtung nicht von der optischen Durchlässigkeit der Beschichtung für UV-Licht abhängt — ESH ist aber anlagentechnisch aufwendiger und teurer. Beide Verfahren erlauben sehr hohe Bandgeschwindigkeiten und sind auf durchlaufende, ebene Ware zugeschnitten.

## Reaktionsgleichung: radikalische Polymerisation

```
Start (Photoinitiator liefert ein Radikal R•):
R• + CH₂=CH–COOR′ → R–CH₂–CH•–COOR′

Kettenwachstum:
n CH₂=CH–COOR′ → [–CH₂–CH(COOR′)–]ₙ

Mehrfunktionelle Acrylate vernetzen dreidimensional; kein Abspaltprodukt.

Methacrylate (CH₂=C(CH₃)–COOR′, mit zusätzlicher Methylgruppe an der
Doppelbindung) polymerisieren radikalisch häufig langsamer als ent-
sprechende Acrylate; die konkrete Reaktivität hängt jedoch von Struktur,
Funktionalität, Initiator und Formulierung ab. Sie werden deshalb in
vielen UV-Systemen weniger häufig eingesetzt.
```

## Typische wichtige Einsatzgebiete

Wo strahlungshärtende Acrylate stehen, folgt aus ihren Stärken: Sekundenhärtung, kein Lösemittel, kaum Wärmeeintrag — und aus ihrer Schwäche: Es härtet nur, wo Strahlung hinkommt. Deshalb sind es fast durchweg flache, schnell durchlaufende Teile.

• Möbel und Holzwerkstoffe — ein bedeutendes bzw. traditionell starkes Einsatzgebiet der Strahlungshärtung. Flachteile laufen im Walzen- oder Gießauftrag durch die Anlage und werden unmittelbar danach gehärtet; gestapelt wird sofort. Grundierungen, Füller und Decklacke auf Spanplatte, MDF und Furnier.

• Fußböden — Parkett und Designbeläge werden werkseitig UV-versiegelt; für die Verlegestelle gibt es UV-Handgeräte.

• Druckfarben und Überdrucklacke — Etiketten, Faltschachteln, Verpackungsdruck. Der Glanzlack ist beim Auslauf der Maschine bereits trocken.

• Kunststoff und Folien — kratzfeste Hartlacke auf Polycarbonat und PMMA, Displayfolien, Fahrzeuginnenteile. Der geringe Wärmeeintrag ist hier das entscheidende Argument.

• Elektronik und Optik — Lötstopplacke auf Leiterplatten, Beschichtung von Lichtwellenleitern; dazu Metallverpackung wie Dosen und Tuben.

Für komplizierte dreidimensionale Bauteile und tief pigmentierte dicke Schichten bleiben als Ausweg Elektronenstrahl oder Dual-Cure.

## UP-Harz oder Acrylat? Wer mit wem reagiert

Beide härten radikalisch, beide enthalten einen Reaktivverdünner, der im Film bleibt. Der Unterschied steckt darin, wer mit wem reagiert.

Beim UP-Harz sind es zwei verschiedene Partner. Die Doppelbindungen im Polyester reagieren untereinander kaum; sie brauchen das Styrol als Brücke. Ein Styrolmolekül setzt sich an die eine Kette, das nächste an die übernächste — so entsteht die Vernetzung überhaupt erst. Ohne Styrol bliebe das Harz flüssig.

Beim Acrylat reagiert alles mit allem. Harz und Reaktivverdünner tragen dieselben Acrylat-Doppelbindungen, es ist chemisch dasselbe Baumaterial. Der Verdünner wird nicht als Reaktionspartner gebraucht; er stellt die Viskosität ein und bestimmt über seine Funktionalität, wie dicht vernetzt wird.

Kurz: Beim UP ist der Reaktivverdünner unverzichtbarer Reaktionspartner, beim Acrylat ein Stellrad.

## Was daraus folgt

- Start — UP wird meist chemisch gestartet: Peroxid mit Beschleuniger, oder Wärme. Das Acrylat wird physikalisch gestartet: Strahlung, mit Photoinitiator (UV) oder ohne (Elektronenstrahl).
- Topfzeit — beim peroxidisch gestarteten UP wird der oben genannte chemische Start bereits beim Anmischen eingemischt, deshalb läuft ab diesem Moment die Uhr. Der strahlungshärtende Lack ist einkomponentig und bleibt stabil, bis Strahlung darauf fällt — dann härtet er in Sekunden statt in Minuten bis Stunden. Das gilt genauso für photochemisch gestartetes UP (siehe L-23, Zwei Systeme in der Praxis): Auch dieses bleibt bis zur Bestrahlung stabil und kennt keine klassische Topfzeit.
- Schichtdicke und Form — die Radikale aus dem Peroxid entstehen überall im Material, deshalb baut UP in einem Gang Millimeter auf, unabhängig von der Bauteilform. Licht wirkt nur, wo es hinkommt: Sichtlinie nötig, verschattete Stellen bleiben weich.
- Sauerstoff — hemmt beide an der Filmoberfläche. UP löst es mit aufschwimmendem Paraffin; bei UV helfen Aminsynergisten oder eine Stickstoffabdeckung, beim Elektronenstrahl ist die Stickstoff-Inertisierung zwingend (siehe L-147).
- Gesundheit — beim UP steht das Styrol im Vordergrund, beim Acrylat die stark sensibilisierenden niedermolekularen Reaktivverdünner.

**Merksatz**

Strahlung startet die Polymerisation der Acrylat-Doppelbindungen: UV braucht einen Photoinitiator, der Elektronenstrahl nicht. Beide härten sehr schnell und ohne Lösemittel. Unterschied zum UP-Harz: Dort ist das Styrol unverzichtbarer Reaktionspartner, hier ist der Reaktivverdünner artgleich mit dem Harz und dient der Einstellung.

**Stichwörter:** strahlungshärtend, Acrylat, UV-Härtung, Elektronenstrahlhärtung, ESH, Photoinitiator, Polyesteracrylat, Epoxidacrylat, Urethanacrylat, Reaktivverdünner, Hexandioldiacrylat, Trimethylolpropantriacrylat, Isobornylacrylat, Aminsynergist, Methacrylat, lösemittelfrei, Doppelbindung, Möbellack, Parkettversiegelung, Überdrucklack, Hartbeschichtung, Lötstopplack, Dual-Cure
*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur*

## Übungsblatt Ü-24 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 10 Punkte)**

(a) Worin unterscheiden sich UV-Härtung und Elektronenstrahlhärtung (ESH) einer Acrylatbeschichtung? (b) Beim UP-Harz ist der Reaktivverdünner Styrol unverzichtbar, beim strahlungshärtenden Acrylat nicht. Erklären Sie den Unterschied.

**Gemeinsames Prinzip:** Beide erzeugen Radikale, die die Acrylat-Doppelbindungen zu einem Film polymerisieren — sehr schnell und ohne Lösemittel.

**UV:** Braucht einen Photoinitiator, der unter UV-Licht in Radikale zerfällt und die Reaktion startet.

**ESH:** Die Elektronen erzeugen die Radikale direkt; ein Photoinitiator ist nicht nötig.

**Praxisfolge:** ESH kann auch pigmentierte und dickere Schichten härten, weil Elektronenstrahlung unter geeigneten Bedingungen deutlich tiefer eindringen kann als UV-Licht — ist aber anlagentechnisch aufwendiger und teurer.

**(b) UP-Harz:** Copolymerisation zweier verschiedener Bausteine: Die Doppelbindungen im Polyester reagieren untereinander kaum und brauchen das Styrol als Brücke. Ohne Styrol keine Vernetzung — es ist Verdünner und Baustein zugleich.

**(b) Acrylat:** Harz und Reaktivverdünner tragen dieselben Acrylat-Doppelbindungen und polymerisieren unter sich. Der Verdünner ist kein nötiger Reaktionspartner, sondern stellt Viskosität und über seine Funktionalität die Vernetzungsdichte ein.

*Bewertung: Teil (a): Der Kernunterschied — Photoinitiator nötig oder nicht — wird klar benannt und mit der praktischen Folge (pigmentierte/dicke Schichten bei ESH) verbunden. Teil (b): Entscheidend ist die Erkenntnis, dass beim UP zwei verschiedene Bausteine miteinander reagieren, beim Acrylat aber artgleiche.*

**Frage 2** **(Berechnung, 9 Punkte)**

Ein lösemittelfreier UV-Lack hat 100 % Volumenfestkörper und wird mit 10 µm Trockenschichtdicke auf 600 m² appliziert. Berechnen Sie die Ergiebigkeit und den Materialbedarf.

**Gegeben:** VFK = 100 %; TSD = 10 µm; Fläche = 600 m²

**Schritt 1 — Ergiebigkeit:** $A = 10 \cdot VFK / TSD = 10 \cdot 100 / 10 = 100$ m²/l

**Schritt 2 — Materialbedarf:** $V = 600$ m² / 100 m²/l = 6,0 l

**Antwortsatz:** Die Ergiebigkeit beträgt 100 m²/l, der Materialbedarf 6,0 l.

**Einordnung:** Weil nichts verdunstet, ist der Materialbedarf sehr niedrig — ein Vorteil lösemittelfreier Systeme (siehe L-168).

*Bewertung: Die Ergiebigkeitsformel wird mit VFK = 100 % korrekt angewandt, und die Einordnung erkennt den geringen Materialbedarf als Folge des lösemittelfreien Aufbaus.*

**Frage 3** **(Anwendung, 7 Punkte)**

Ein deckend pigmentierter, etwas dickerer Lack soll strahlungsgehärtet werden. Warum kann hier die Elektronenstrahlhärtung gegenüber der UV-Härtung Vorteile bieten?

**Problem bei UV:** UV-Licht muss die Schicht durchdringen, um den Photoinitiator zu aktivieren. Pigmente absorbieren und streuen das Licht, sodass tiefere Lagen nicht ausreichend härten.

**Vorteil ESH:** Elektronen können unter geeigneten Bedingungen deutlich tiefer eindringen und erzeugen die Radikale direkt in der Schicht — ohne Photoinitiator und weitgehend unabhängig von der optischen Durchlässigkeit.

**Folge:** Auch pigmentierte und dickere Schichten können so durchhärten.

**Abwägung:** Der Nachteil ist die aufwendige, teure Anlage — welches Verfahren im Einzelfall vorzuziehen ist, hängt von Schichtdicke, Pigmentierung und Anlagenparametern ab.

*Bewertung: Der Grund wird an der Lichtdurchlässigkeit festgemacht: Pigmente behindern die UV-Härtung, während Elektronen tiefer eindringen können. Die Antwort vermeidet eine pauschale Rangfolge und benennt Anlagennachteil sowie Abhängigkeit von den konkreten Bedingungen.*

# L-25 · 2K-Polyurethanlacke — Die Isocyanatreaktion

*NCO trifft OH — und die Nebenreaktion mit Wasser*

**Prüfungsteil 1** · A 8.3 · B 12

In 2K-PUR-Lacken reagieren Isocyanatgruppen mit OH-Gruppen zu Urethan — nach dem Mischen läuft die Reaktion an, die Topfzeit ist begrenzt.

## Die Grundreaktion

Ein Zweikomponenten-Polyurethanlack besteht aus einem OH-haltigen Bindemittel (Stammlack) und einem Isocyanat-Härter. Beim Mischen reagiert die Isocyanatgruppe (–N=C=O) mit der OH-Gruppe zu einer Urethanbindung. Es verknüpfen sich viele Ketten zu einem Netzwerk — daraus kommen Härte, Beständigkeit und Haftung (siehe L-03, L-20). Wie viele OH-Gruppen das Bindemittel trägt, sagt seine OH-Zahl (mg KOH je g Bindemittel, siehe L-27): n(OH) = OH-Zahl · Masse / 56 100 — daraus folgt der stöchiometrische Härterbedarf.

## Reaktionsgeschwindigkeit

Wie schnell die Reaktion läuft, hängt von Temperatur und Isocyanattyp ab: Aromatische Isocyanate reagieren deutlich schneller als (cyclo)aliphatische. Beschleunigen lässt sich die Härtung mit Katalysatoren — Zinnverbindungen wie Dibutylzinndilaurat (DBTL) oder tertiäre Amine wie DABCO. Organozinn-Verbindungen wie DBTL sind allerdings REACH-beschränkt; zunehmend werden zinnfreie Katalysatoren (z. B. auf Bismut- oder Zinkbasis) eingesetzt. Den Geschwindigkeitsunterschied nutzt man gezielt bei der Wahl des Härters (siehe L-26).

## Die Nebenreaktion mit Wasser

Isocyanat reagiert auch mit Wasser: Es entsteht zunächst eine instabile Carbamidsäure, die zu einem Amin und Kohlendioxid zerfällt; das Amin reagiert mit weiterem Isocyanat zu Harnstoff. Im 2K-Lack ist das ein Verlust — das freigesetzte $CO_2$ kann außerdem Blasen verursachen. Deshalb müssen Rohstoffe und Anlage trocken sein. Dieselbe Reaktion nutzt man umgekehrt gezielt bei einkomponentigen, feuchtigkeitshärtenden PUR-Lacken, die mit der Luftfeuchte aushärten.

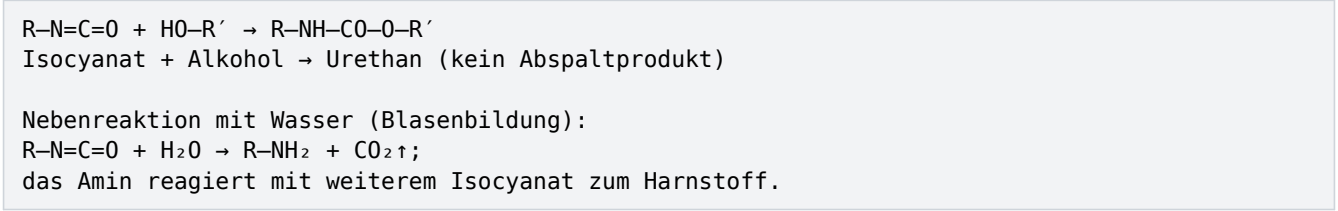
**Merksatz**

Nach dem Zusammengeben der beiden Komponenten läuft die Vernetzung sofort an; die Viskosität steigt. Die Zeit, in der sich der Lack noch verarbeiten lässt, ist die Topfzeit. Es darf nur so viel angemischt werden, wie sich in dieser Zeit verarbeiten lässt.

## Warum 2K-PUR so beliebt ist

2K-Polyurethanlacke härten schon bei Raumtemperatur zu sehr widerstandsfähigen Filmen: hart und zugleich elastisch, gut haftend, chemikalien- und abriebbeständig; wetter- und vergilbungsbeständig sind sie allerdings nur mit aliphatischen oder cycloaliphatischen Härtern (siehe L-26). Sie sind deshalb Standard für hochwertige Industrie-, Holz- und Reparaturlacke. Verarbeitet werden sie meist in Butylacetat, Xylol oder Methoxypropylacetat — diese Lösemittel tragen selbst keine OH- oder NH-Gruppen und reagieren deshalb nicht mit dem Isocyanat-Härter.

## Reaktionsgleichung: Urethanbildung (Polyaddition)




**Merksatz**

NCO + OH ergibt Urethan; NCO + Wasser ergibt Harnstoff und $CO_2$. Die erste Reaktion ist erwünscht, die zweite ein Verlust — und nach dem Mischen tickt die Topfzeit.

**Stichwörter:** 2K-PUR, Polyurethanlack, Isocyanat, NCO-Gruppe, Urethanbindung, OH-Gruppe, Stammlack, Härter, Topfzeit, DBTL, DABCO, Katalysator, Carbamidsäure, Harnstoff, Kohlendioxid
*Quellen: Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur; Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie*

## Übungsblatt Ü-25 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**
Beschreiben Sie die erwünschte Reaktion in einem 2K-PUR-Lack und die Nebenreaktion mit Wasser. Welche Folgen hat die Nebenreaktion?

**Erwünschte Reaktion:** Die Isocyanatgruppe (–N=C=O) reagiert mit der OH-Gruppe des Bindemittels zu einer Urethanbindung; viele Ketten vernetzen zu einem Netzwerk.
**Nebenreaktion mit Wasser:** Isocyanat reagiert mit Wasser über eine instabile Carbamidsäure zu einem Amin und $CO_2$; das Amin bildet mit weiterem Isocyanat Harnstoff.
**Folge 1:** Isocyanat, das mit Wasser reagiert, fehlt für die Vernetzung — ein Verlust.
**Folge 2:** Das freigesetzte $CO_2$ kann Blasen im Film verursachen; deshalb müssen Rohstoffe und Anlage trocken sein.
*Bewertung: Beide Reaktionen werden mit ihren Produkten (Urethan bzw. Harnstoff und $CO_2$) benannt, und die praktischen Folgen der Nebenreaktion (Verlust, Blasen, Trockenheit) werden richtig abgeleitet.*

**Frage 2** **(Berechnung, 10 Punkte)**
100 g eines OH-Bindemittels mit der OH-Zahl 150 mg KOH/g sollen stöchiometrisch (NCO : OH = 1 : 1) mit einem Härter von 21 % NCO-Gehalt vernetzt werden. Wie viel Härter wird benötigt? (M(NCO) = 42,02 g/mol; M(KOH) = 56,1 g/mol)

**Schritt 1 — Stoffmenge OH:** n(OH) = OH-Zahl · m / 56 100 = 150 · 100 / 56 100 = 0,267 mol
**Schritt 2 — NCO-Bedarf (1:1):** n(NCO) = n(OH) = 0,267 mol
**Schritt 3 — Masse NCO:** m(NCO) = 0,267 mol · 42,02 g/mol = 11,2 g
**Schritt 4 — Härtermenge:** m(Härter) = 11,2 g / 0,21 = 53,5 g
**Antwortsatz:** Auf 100 g Bindemittel kommen rund 53,5 g Härter.
*Bewertung: Die OH-Zahl wird über die Stoffmenge geführt, für 1:1 dem NCO gleichgesetzt und zuletzt über den NCO-Gehalt in Härtermasse umgerechnet. Die Einheiten werden durchgehend mitgeführt.*

**Frage 3** **(Anwendung, 7 Punkte)**
Ein Lackierer mischt eine große Menge 2K-PUR-Lack an, verarbeitet aber nur die Hälfte. Nach einer Stunde ist der Rest zäh und lässt sich nicht mehr spritzen. Erklären Sie und geben Sie zwei Konsequenzen für die Praxis.

**Erklärung:** Nach dem Mischen läuft die Vernetzung sofort an; die Viskosität steigt. Die Topfzeit ist überschritten — der Lack ist bereits zu weit vernetzt (angeliert).
**Konsequenz 1:** Nur so viel anmischen, wie sich innerhalb der Topfzeit verarbeiten lässt.
**Konsequenz 2:** Verarbeitungszeit vorab kennen; sie hängt von Härtertyp, Katalysator und Temperatur ab (wärmer = kürzer).
**Zusatz:** Angeliertes Material lässt sich durch Verdünnen nicht wiederherstellen — die Vernetzung ist bereits abgelaufen.
*Bewertung: Das Anliegen wird auf die Topfzeit zurückgeführt und mit konkreten Praxiskonsequenzen (Mengenplanung, Temperaturabhängigkeit) verbunden — nicht nur beschrieben, sondern gedeutet.*

# L-26 · Isocyanate — Härter für 2K-PUR

*Aromatisch oder aliphatisch, und warum aus Monomeren Oligomere werden*

**Prüfungsteil 1** · A 8.3 · B 12

Aromatische Härter sind schnell und günstig, aber vergilben; aliphatische sind wetterfest. Die sensibilisierenden Monomere werden zu Oligomeren umgesetzt.

## Die Bausteine: Diisocyanate

Härter für 2K-PUR bauen auf Diisocyanaten auf. Aromatische Typen sind Toluylendiisocyanat (TDI) und Diphenylmethandiisocyanat (MDI); sie tragen die Isocyanatgruppe an einem aromatischen Ring. Aliphatisch ist Hexamethylendiisocyanat (HDI) — eine reine, offenkettige Kohlenstoffkette ohne Ring. Cycloaliphatisch ist Isophorondiisocyanat (IPDI): Es trägt einen gesättigten Ring (vom Isophoron) und besitzt sogar zwei unterschiedlich reaktive NCO-Gruppen — eine ringständige (sekundäre) cycloaliphatische und eine primäre aliphatische an der Seitenkette. Ohne Katalysator reagiert die ringständige Gruppe schneller; mit Zinnkatalysator (DBTL) kehrt sich das um, dann ist die Gruppe an der Seitenkette die schnellere. Angeliefert und verarbeitet werden diese Härter meist in Butylacetat, Xylol oder Methoxypropylacetat (siehe L-25) — entscheidend ist, dass das Lösemittel selbst frei von OH- und NH-Gruppen ist, sonst würde es mit dem NCO reagieren, statt nur zu verdünnen.

## Warum Oligomere statt Monomere

Monomere Diisocyanate unterscheiden sich stark in ihrer Flüchtigkeit; ihre Isocyanatgruppen können die Atemwege sensibilisieren. Deshalb setzt man sie zu höhermolekularen Oligomeren um: Diese haben einen sehr geringen Dampfdruck — das senkt vor allem die Flüchtigkeit — und eine höhere Funktionalität, die zugleich die Vernetzungsdichte des Films erhöht. Der freie Monomeranteil wird niedrig gehalten. Seit dem 24. August 2023 dürfen Diisocyanate für industrielle und gewerbliche Anwendungen oberhalb der REACH-Schwelle von 0,1 Gew.-% nur verwendet werden, wenn die vorgeschriebene Schulung zur sicheren Verwendung erfolgreich absolviert wurde; maßgeblich ist die Konzentration der Diisocyanate einzeln und in Kombination — nicht lediglich der freie Monomeranteil eines Polyisocyanats. Ganz ungefährlich sind die Oligomere aber nicht: Ihre freien Isocyanatgruppen wirken weiter haut- und atemwegssensibilisierend, vor allem als Spritznebel (Aerosol) — beim Spritzen bleiben Kabine und Atemschutz Pflicht. Das allgemeine Muster zeigt L-173.

## Die wichtigsten Oligomere

- Isocyanurat (Trimer) — drei Isocyanate zu einem Ring verknüpft; wetter- und chemikalienbeständig.
- Biuret — aus drei Isocyanaten über eine Harnstoffbrücke; ähnlich beständig.
- Uretdion (Dimer) — zwei Isocyanate zu einem Ring; abspaltungsfreier Vernetzer, u. a. in Pulverlacken.
- Allophanat und Addukte mit Triolen (z. B. Trimethylolpropan) — weitere Härtertypen.
- Noch größer: NCO-terminierte Präpolymere — große Vorstufenmoleküle mit freien Isocyanat-Enden — für feuchtigkeitshärtende 1K-PUR-Systeme, z. B. Zinkstaubgrundierungen (siehe L-101). Zu unterscheiden von Präpolymeren für wässrige Polyurethandispersionen (siehe L-74) — dort läuft die Kettenverlängerung im Wasser ab, nicht über Luftfeuchtigkeit.

## Aromatisch, aliphatisch oder cycloaliphatisch

Aromatische Härter (TDI, MDI) sind reaktiv und kostengünstig, neigen aber zur Vergilbung unter Licht — sie werden deshalb bevorzugt für Grundierungen, Füller und Innenanwendungen eingesetzt. Aliphatische und cycloaliphatische Härter (HDI, IPDI) sind wetter- und vergilbungsbeständig und damit die Wahl für hochwertige Decklacke, etwa in der Automobilreparatur. Unter ihnen ergibt das aliphatische HDI eher flexible, das cycloaliphatische IPDI eher harte Filme.

### Die Kennzahl: NCO-Gehalt

Härter werden über ihren NCO-Gehalt (Massenanteil freier Isocyanatgruppen) charakterisiert. Er sagt, wie viel reaktive Gruppe je Gramm zur Verfügung steht, und ist die Grundlage für die Berechnung des Mischungsverhältnisses mit dem OH-Bindemittel (siehe L-27). Je höher der NCO-Gehalt, desto weniger Härter wird je Gramm Bindemittel gebraucht.

### Reaktionsgleichung: Monomer → Oligomer

```
Trimerisierung zum Isocyanurat:
  3 O=C=N–R–N=C=O → Isocyanurat-Ring (3 freie NCO)

Biuret-Bildung (über Wasser):
  R–NCO + H₂O → R–NH₂ + CO₂
  R–NH₂ + 2 R–NCO → Biuret (3 freie NCO)

Aus den flüchtigen, sensibilisierenden Diisocyanat-Monomeren werden so dampfdruckarme
   Härter mit mehreren NCO-Gruppen.
```

**Merksatz**

Die Farbe entscheidet die Wahl: aromatisch für Grundierungen (günstig, aber vergilbend), aliphatisch für Decklacke (wetterfest). Monomere werden zu Oligomeren, damit sie weniger flüchtig sind — sensibilisierend (vor allem als Spritznebel) bleiben sie aber.

**Stichwörter:** Diisocyanat, TDI, MDI, HDI, IPDI, aromatisches Isocyanat, aliphatisches Isocyanat, cycloaliphatisch, Oligomer, Isocyanurat, Biuret, Allophanat, NCO-Gehalt, vergilbungsbeständig, Härter

*Quellen: Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur; Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie*

---

## Übungsblatt Ü-26 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Warum werden monomere Diisocyanate zu Oligomeren umgesetzt, und was unterscheidet aromatische von aliphatischen Härtern?

**Warum Oligomere:** Monomere Diisocyanate sind flüchtig und wirken atemwegssensibilisierend. Oligomere haben einen sehr geringen Dampfdruck und eine höhere Funktionalität — sie sind sicherer und wirksamer.

**Aromatisch:** TDI, MDI: reagieren schnell, sind günstig, vergilben aber unter Licht — für Grundierungen, Füller, innen.

**Aliphatisch:** HDI, IPDI: wetter- und vergilbungsbeständig — für hochwertige Decklacke, z. B. Automobilreparatur.

**Merkpunkt:** Die Vergilbungsneigung entscheidet, ob ein Härter für Decklacke taugt.

*Bewertung: Der Sicherheitsgrund (Flüchtigkeit, Giftigkeit) für die Oligomerisierung wird genannt, und aromatisch/aliphatisch werden über Vergilbung und Anwendung klar getrennt.*

**Frage 2** **(Berechnung, 9 Punkte)**

Ein HDI-Biuret-Härter hat einen NCO-Gehalt von 22 %. Berechnen Sie die NCO-Äquivalentmasse (Masse Härter je Äquivalent NCO). (M(NCO) = 42,02 g/mol)

**Überlegung:** Eine NCO-Gruppe wiegt 42,02 g/mol. Bei 22 % NCO enthalten 100 g Härter 22 g NCO.

**Stoffmenge NCO in 100 g:** n(NCO) = 22 g / 42,02 g/mol = 0,524 mol, also 0,524 Äq. NCO

**NCO-Äquivalentmasse:** EW = 100 g / 0,524 Äq. = 191 g/Äq.

**Kurzformel:** EW = 4 200 / NCO-% = 4 200 / 22 = 191 g/Äq.

**Antwortsatz:** Auf jedes Mol reaktiver NCO-Gruppen kommen rund 191 g Härter.

*Bewertung: Die Äquivalentmasse wird sauber über die Stoffmenge hergeleitet und mit der Kurzformel 4200/NCO-% bestätigt. Der Wert ist die Grundlage für das Mischungsverhältnis (siehe L-27).*

**Frage 3** **(Anwendung, 7 Punkte)**

Für die Reparaturlackierung eines roten Autos wird ein glänzender, dauerhaft wetterbeständiger 2K-PUR-Decklack gebraucht. Welchen Härtertyp wählen Sie, und warum nicht den günstigeren aromatischen?

**Wahl:** Einen aliphatischen Härter auf Basis HDI oder IPDI (z. B. als Isocyanurat oder Biuret).

**Begründung:** Aliphatische Härter sind vergilbungs- und wetterbeständig — Glanz und Farbton bleiben im Außeneinsatz erhalten.

**Warum nicht aromatisch:** Aromatische Härter (TDI, MDI) sind zwar günstiger und schneller, vergilben aber unter Licht — für einen Decklack inakzeptabel.

**Einordnung:** Der aromatische Typ wäre für eine darunterliegende Grundierung oder einen Füller geeignet, nicht für den Decklack.

*Bewertung: Der aliphatische Härter wird mit der Wetter- und Vergilbungsbeständigkeit begründet und der aromatische bewusst der Grundierung zugeordnet — die geforderte Abwägung nach Anwendung.*

# L-27 · 2K-PUR — OH-Bindemittel und Stöchiometrie

*Welcher OH-Träger, und wie viel Härter über OH-Zahl und NCO-Gehalt*

**Prüfungsteil 2** · A 10 · B 12

Das OH-Bindemittel bestimmt Charakter und Beständigkeit des Lacks; seine OH-Zahl bestimmt zusammen mit dem NCO-Gehalt des Härters das Mischungsverhältnis.

## Die OH-Träger für 2K-PUR

Die OH-Gruppen liefert das Bindemittel (der Stammlack). Für 2K-PUR kommen vor allem hydroxyfunktionelle Acrylatharze, gesättigte Polyester und Polyether infrage, außerdem Alkyde und Epoxidester. Die Wahl bestimmt Härte, Elastizität und Wetterbeständigkeit des Films. Gelöst werden diese OH-Bindemittel in NCO-unreaktiven Lösemitteln — Butylacetat, Xylol, Methoxypropylacetat (siehe L-25). Alkohole und Wasser scheiden aus, weil ihre OH-Gruppen selbst mit dem Isocyanat reagieren und den Härter verbrauchen. Aufpassen bei der Verwechslung von Methoxypropylacetat (geeignet) mit Methoxypropanol (ein Alkohol, ungeeignet); Gebinde und Verdünnung müssen trocken sein.

## Acrylatharze

Hydroxyfunktionelle Acrylatharze sind hart und besonders wetter- und vergilbungsbeständig — das gilt aber nicht für jeden Typ gleich gut: Reine (styrolfreie) Acrylatharze sind am wetterbeständigsten. Styrolhaltige Acrylat-Mischpolymerisate sind günstiger und härter, aber wegen des aromatischen Styrol-Bausteins UV-empfindlicher und neigen eher zu Kreidung. Für hochwertige, dauerhaft bewitterte Decklacke — Automobil- und Automobilreparaturlacke, hochwertige Industrielacke — wählt man deshalb reine, styrolfreie Typen. Typische OH-Zahlen liegen je nach Typ etwa zwischen 50 und 140 mg KOH/g; für festkörperreiche Decklacke werden die höheren Werte (etwa 120 bis 140 mg KOH/g) bevorzugt. Sie werden meist mit aliphatischen Härtern kombiniert, um die Wetterbeständigkeit voll auszuschöpfen (siehe L-26).

## Polyester und Polyether

Gesättigte Polyester (siehe L-19) decken über die Bausteinwahl eine breite Härte-Spanne ab, von flexibel bis hart. Polyether sind flexibel und preiswert, aber weniger wetterbeständig: Die C–H-Bindungen direkt neben dem Ethersauerstoff sind photochemisch leicht angreifbar — UV-Licht und Luftsauerstoff bilden dort Hydroperoxide, die zu Kettenspaltung, Vergilbung und Versprödung führen. Polyester sind dafür UV-stabiler, aber anfälliger für Hydrolyse. Polyether werden deshalb dort eingesetzt, wo Elastizität wichtiger ist als die Bewitterung.

## Die Kennzahl OH-Zahl

Die OH-Zahl (mg KOH je g Harz) ist historisch aus der Titration abgeleitet: Die OH-Gruppen werden mit Essigsäureanhydrid acetyliert, der Überschuss wird zu Essigsäure hydrolysiert, und diese freie Essigsäure titriert man mit KOH — gegen einen Blindversuch ohne Probe. Die Differenz zwischen Blindwert und Probe sagt, wie viel Anhydrid die OH-Gruppen verbraucht haben. Die Kennzahl steckt damit direkt eine Stoffmenge in sich: Weil jede OH-Gruppe genau eine Acetylgruppe bindet und dieser Verbrauch 1 mg KOH je 1/56,1 mmol entspricht, liefert OH-Zahl / 56,1 unmittelbar die Stoffmenge OH je Gramm Harz in mmol, bzw. OH-Zahl / 56 100 in mol je Gramm (Faktor 1000 wegen mg → g). Je höher die OH-Zahl, desto mehr Mol reaktiver OH-Gruppen stecken in derselben Harzmasse — und desto mehr Härter wird gebraucht. Aus dieser Stoffmenge folgt die OH-Äquivalentmasse (56 100 / OH-Zahl): die Harzmasse, die genau 1 Mol OH-Gruppen liefert. Zum Vergleich lässt sich die OH-Zahl auch in den OH-Gehalt in Massenprozent umrechnen: OH-% = OH-Zahl · 17 / 561 (die OH-Gruppe selbst wiegt 17 g/mol) — für die eigentliche Stöchiometrie-Rechnung braucht es diesen Umweg aber nicht, dort zählt direkt die Stoffmenge n(OH).

## Was ein Äquivalent beim 2K-PUR bedeutet

Auch hier ist ein Äquivalent keine Masse, sondern eine Stoffmenge: Ein Äquivalent OH ist ein Mol reaktiver Hydroxylgruppen, ein Äquivalent NCO ein Mol reaktiver Isocyanatgruppen. Anders als beim Aminhärter (siehe L-29) braucht es dafür keine Zählregel je Molekül — jede OH-Gruppe zählt als ein Äquivalent, jede NCO-Gruppe ebenso.

Deshalb lautet die eigentliche Frage nie „Wie viele Gramm Härter?“, sondern „Wie viele Mol reaktive NCO-Gruppen bringt diese Härtermenge mit?“ Genau diese molare NCO-Menge muss zur molaren OH-Menge des Bindemittels passen. 500 g Bindemittel plus 500 g Härter ergeben deshalb nicht automatisch ein stöchiometrisch richtiges Verhältnis — siehe das Rechenbeispiel weiter unten; ein zweites, vollständig durchgerechnetes Beispiel steht in L-58.

## Stöchiometrie mit dem Härter

Als stöchiometrischer Ausgangspunkt wird das Verhältnis NCO : OH meist auf etwa 1 : 1 eingestellt; die tatsächlich erreichbare Vernetzung hängt zusätzlich von Funktionalität, Nebenreaktionen und den Härtungsbedingungen ab. Ein deutlicher NCO-Überschuss reagiert mit Luftfeuchte: Über die instabile Carbaminsäure entstehen ein Amin und $CO_2$ — bei dicken Schichten sichtbar als Blasen; der Film wird harnstoffreicher und kann verspröden. Ein NCO-Unterschuss lässt OH-Gruppen unvernetzt zurück, der Film bleibt weicher, klebriger und weniger chemikalienbeständig. Aus der OH-Zahl des Bindemittels und dem NCO-Gehalt des Härters — bzw. aus ihren Äquivalentmassen — ergibt sich das Mischungsverhältnis (siehe L-25, L-26). So passt die Härtermenge genau zur Zahl der OH-Gruppen. In der Praxis wählt man oft einen leichten NCO-Überschuss, um die Reaktion mit Restfeuchte auszugleichen.

## Typische Fehler bei der Stöchiometrie

In Prüfung und Betrieb entstehen die meisten Fehler nicht bei der Chemie, sondern bei den Zahlen. Häufig wird die Einheit der OH-Zahl verwechselt und mit Massenprozent OH gerechnet, wo mg KOH/g gemeint ist (beide unterscheiden sich um den Faktor 33), die Kennzahl wird vergessen (meist 1,02 bis 1,10 für einen leichten NCO-Überschuss), oder der Festkörpergehalt von Härter und Bindemittel bleibt unberücksichtigt. Die sichere Reihenfolge lautet immer: zuerst die Stoffmenge der OH-Gruppen bestimmen, daraus die nötige NCO-Masse, dann über den NCO-Gehalt die Härtermenge. Dreisatz und konsequente Einheitenkontrolle verhindern die teuersten Fehler.

## Kennzahlen und Stöchiometrie

```
OH-Gehalt aus der OH-Zahl:
  OH-% = OH-Zahl · 17 / 561

Stoffmenge OH (m = Bindemittel-Festkörper in g):
  n(OH) = m · OH-Zahl / 56100   [mol]

NCO-Äquivalentmasse des Härters:
  M(NCO-Äq) = 42,02 / (NCO-Gehalt/100)   [g/Äq.]

Härtermenge (Kennzahl k; k = 1,0 ist stöchiometrisch,
in der Praxis meist k = 1,02 bis 1,10 als leichter NCO-Überschuss):
  m(Härter) = n(OH) · M(NCO-Äq) · k
```

### Rechenbeispiel: Härtermenge

```
Gegeben: 200 g Bindemittel-Festkörper mit OH-Zahl 130 mg KOH/g;
Härter mit NCO-Gehalt 21 %; Kennzahl k = 1,05 (leichter NCO-Überschuss).

Stoffmenge OH:       n(OH) = 200 · 130 / 56100 ≈ 0,463 mol
NCO-Äquivalentmasse: M(NCO-Äq) = 42,02 / (21/100) ≈ 200,1 g/Äq.
Härtermenge:         m(Härter) = n(OH) · M(NCO-Äq) · k
                     = 0,463 · 200,1 · 1,05 ≈ 97,3 g

Kontrolle: n(NCO) = m(Härter) · (NCO-Gehalt/100) / 42,02
           = 97,3 · 0,21 / 42,02 ≈ 0,486 mol
Erwartet:  n(OH) · k = 0,463 · 1,05 ≈ 0,486 mol ✓
→ 200 g Bindemittel-Festkörper + 97,3 g Härter-Festkörper: Das Bindemittel liefert 0,463
   mol OH, der Härter 0,486 mol NCO – die Differenz ist genau der vorgesehene 5-prozentige
   NCO-Überschuss aus der Kennzahl k = 1,05. Achtung auf die Lieferform: Liegt der Härter
   als 75-prozentige Lösung vor, sind 97,3 / 0,75 = 129,7 g Lieferware einzuwiegen.
```

**Merksatz**

Das OH-Bindemittel gibt dem 2K-PUR-Lack seinen Charakter — reines, styrolfreies Acrylat für Wetterbeständigkeit, Polyester für die Härte-Spanne. Die Härtermenge folgt aus OH-Zahl und NCO-Gehalt: NCO : OH als Ausgangspunkt 1 : 1, in der Praxis mit einer Kennzahl von 1,02 bis 1,10.

**Stichwörter:** OH-Bindemittel, 2K-PUR, Acrylatharz, hydroxyfunktionell, gesättigter Polyester, Polyether, Hydroperoxid, OH-Zahl, OH-Gehalt, NCO-Gehalt, Äquivalentmasse, Stöchiometrie, Mischungsverhältnis, Wetterbeständigkeit, Kennzahl, Einheitenkontrolle

*Quellen: Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur; Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie*

## Übungsblatt Ü-27 — Musterlösungen

**Frage 1** (Verständnis, 8 Punkte)

Nennen Sie drei OH-Bindemittel für 2K-PUR und je eine Stärke. Welches wählen Sie für einen wetterbeständigen Automobildecklack?

**Acrylatharz:** Hart und besonders wetter- und vergilbungsbeständig.
**Gesättigter Polyester:** Über die Bausteinwahl breite Härte-Spanne, von flexibel bis hart (siehe L-19).
**Polyether:** Flexibel und preiswert, aber weniger wetterbeständig.
**Wahl für Decklack:** Das Acrylatharz — seine Wetter- und Vergilbungsbeständigkeit ist für einen Außendecklack entscheidend.
*Bewertung: Drei Bindemittel werden mit passender Stärke genannt, und die Wahl für den Decklack wird an der Wetterbeständigkeit festgemacht — nicht beliebig.*

**Frage 2** (Berechnung, 12 Punkte)

Ein OH-Acrylatharz (OH-Zahl 150 mg KOH/g) wird mit 200 g Festkörper vorgelegt und mit einem Polyisocyanat (NCO-Gehalt 20 %) bei der Kennzahl 1,05 vernetzt. Berechnen Sie a) den OH-Gehalt in Massenprozent, b) die OH-Äquivalente, c) die NCO-Äquivalentmasse und d) die Härtermenge. (OH-Gruppe = 17 g/mol, KOH = 56,1 g/mol, NCO = 42,02 g/mol)

**a) Überlegung:** Jede OH-Gruppe wird bei der Bestimmung durch ein KOH (56,1 g/mol) erfasst; die OH-Gruppe selbst wiegt 17 g/mol.
**a) OH-Gehalt:** OH-% = OH-Zahl · 17 / 561 = 150 · 17 / 561 ≈ 4,55 %
**b) OH-Äquivalente:** n(OH) = m · OH-Zahl / 56100 = 200 · 150 / 56100 = 0,535 mol
**c) NCO-Äquivalentmasse:** aus dem NCO-Gehalt: 42,02 / 0,20 = 210,1 g/Äq.
**d) Härtermenge:** m(Härter) = n(OH) · NCO-Äquivalentmasse · Kennzahl = 0,535 · 210,1 · 1,05 = 118 g
**Deutung Kennzahl:** Die Kennzahl 1,05 bedeutet 5 % NCO-Überschuss; er gleicht Nebenreaktionen des Isocyanats aus, vor allem die mit Luftfeuchte.
*Bewertung: Der Weg OH-Gehalt → OH-Äquivalente → NCO-Äquivalentmasse → Härtermenge ist die Kernrechnung jedes 2K-PUR-Ansatzes. Die Umrechnung nutzt den richtigen Faktor 17/561 aus den Molmassen von OH und KOH; die Kennzahl wird korrekt als Überschussfaktor eingesetzt und gedeutet.*

**Frage 3** **(Anwendung, 7 Punkte)**

Warum stellt man das Verhältnis NCO : OH möglichst auf 1 : 1 ein? Was passiert bei deutlichem Über- oder Unterschuss an Härter?

**Ziel 1:1:** Bei 1 : 1 steht rechnerisch jeder OH-Gruppe eine NCO-Gruppe gegenüber; das ist die Voraussetzung für einen möglichst hohen Vernetzungsgrad. Wie weit die Vernetzung tatsächlich läuft, hängt zusätzlich von Funktionalität, Nebenreaktionen und Härtungsbedingungen ab.

**Zu viel Härter (NCO-Überschuss):** Überschüssiges Isocyanat reagiert mit Luftfeuchte ($CO_2$, mögliche Blasen) und bleibt sonst ungenutzt; der Film kann spröder werden.

**Zu wenig Härter (OH-Überschuss):** Nicht alle OH-Gruppen reagieren; der Film bleibt weicher und weniger beständig.

**Praxis:** Deshalb wird das Mischungsverhältnis über OH-Zahl und NCO-Gehalt berechnet und genau eingehalten.

*Bewertung: Das 1:1-Ziel wird begründet und beide Abweichungen mit ihren konkreten Folgen (Feuchtereaktion/Sprödigkeit bzw. Weichheit) beschrieben. Der Bezug zur Berechnung schließt den Bogen.*

# L-28 · 2K-Epoxidharzlacke — Harze und Kennzahlen

*Bisphenol-A-Harze, Epoxidwert und Epoxidäquivalent*

**Wahlqualifikation** · B 12 · B 8

Epoxidharze tragen reaktive Epoxidgruppen; ihr Epoxidwert bzw. Epoxidäquivalent sagt, wie viel Härter für die Vernetzung nötig ist.

## Woraus Epoxidharze bestehen

Die wichtigsten Epoxidharze werden aus Bisphenol A und Epichlorhydrin hergestellt. Der einfachste Fall (n = 0) ist der Bisphenol-A-diglycidylether mit zwei Epoxidgruppen. Mit steigendem n wächst die Molmasse, und es entstehen mehr OH-Gruppen entlang der Kette. Da jedes Molekül weiterhin nur zwei endständige Epoxidgruppen trägt, nimmt die Zahl der Epoxidgruppen je Gramm Harz ab. Die Umsetzung erfolgt in Gegenwart von Natronlauge.

## Flüssig oder fest

Niedermolekulare Harze (kleines n) sind flüssig und eignen sich besonders für lösemittelfreie oder festkörperreiche 2K-Lacke. Höhermolekulare Harze (großes n) sind fest und werden meist in lösemittelhaltigen Systemen eingesetzt, weil sie sich sonst kaum verarbeiten lassen — eine zwingende Notwendigkeit ist das Lösemittel aber nicht in jedem Fall, festkörperreiche Formulierungen mit sehr hochviskosen Harzen sind ebenfalls möglich. Wo gelöst wird, sind Xylol, Butanol und Butylglykol sowie Ketone wie Methylisobutylketon (MIBK) typisch; welches Gemisch passt, hängt von Molmasse, gewünschter Verdunstungsgeschwindigkeit und dem Aminhärter ab (siehe L-29).

## Bisphenol A, Bisphenol F und Novolak — der Unterschied

Bisphenol-F-Epoxidharze sind chemisch eng mit dem Bisphenol-A-Typ verwandt, tragen aber eine schlanke $CH_2$-Brücke statt der sperrigen $C(CH_3)_2$-Brücke zwischen den beiden Phenolringen; das ergibt bei vergleichbarer Molmasse eine niedrigere Viskosität — vorteilhaft für lösemittelarme, festkörperreiche Systeme. Die Epoxidfunktionalität bleibt wie bei Bisphenol A vom Harzaufbau (n) abhängig.

Epoxid-Novolake sind dagegen strukturell anders aufgebaut: Sie entstehen aus einem Phenol-Formaldehyd-Oligomer mit mehreren phenolischen OH-Gruppen entlang der Kette, die alle glycidyliert werden — dadurch tragen sie mehr als zwei Epoxidgruppen je Molekül und sind typischerweise höherfunktionell als der Bisphenol-A- oder -F-Diglycidylether. Das kann bei geeigneter Härtung eine höhere Vernetzungsdichte ermöglichen — für höhere Chemikalien- und Temperaturbeständigkeit, etwa bei Rohrinnenbeschichtungen oder chemikalienfesten Industrieböden. Der Preis dafür: Novolak-Systeme sind meist höherviskoser bzw. lösemittelhaltiger, verlangen oft höhere Härtungstemperaturen und ergeben spürbar sprödere Filme als der Standard-Bisphenol-A-Typ — sie sind deshalb eine gezielte Wahl für hohe Beständigkeit, nicht die Standardqualität für jede Anwendung.

## Die Kennzahl Epoxidwert

Der Epoxidwert gibt an, wie viele val Epoxidgruppen in 100 g Harz stecken. Er hängt am Epoxidäquivalent — der Masse Harz je Epoxidgruppe: Epoxidwert = 100 / Epoxidäquivalentmasse. Bei gleicher Harzmasse und gleichem angestrebten Äquivalentverhältnis gilt: Je höher der Epoxidwert, desto mehr reaktive Gruppen stecken in dieser Masse und desto mehr Härter wird gebraucht.

## Das Epoxidäquivalent

Für ein difunktionelles Harz ist das Epoxidäquivalent gerade die halbe Molmasse (Molmasse / 2), weil zwei Epoxidgruppen je Molekül vorliegen. Mit steigender Molmasse steigt das Epoxidäquivalent und der Epoxidwert sinkt — es gibt weniger Epoxidgruppen je Gramm. Nicht verwechseln: Die Epoxidgruppe selbst ($C_2H_3O$) wiegt nur rund 43 g/mol — das ist die Masse der Struktureinheit, nicht die Formulierungskennzahl. Für die Rezeptur zählt das Epoxidäquivalentgewicht (EEW), also die Harzmasse je Epoxidgruppe. Anders gesagt: Ein Äquivalent ist ein Mol Epoxidgruppen, und das EEW ist die Harzmasse, die genau dieses eine Mol enthält (siehe L-29).

## Wozu 2K-Epoxidlacke

2K-Epoxidharzlacke haften sehr gut, besonders auf Metall, und sind chemikalien- und wasserbeständig. Sie sind die klassischen Bindemittel für Korrosionsschutz, Industrie- und Bodenbeschichtungen; die gute Haftung ist dabei entscheidend (siehe L-12). Nachteilig sind Vergilbung und Kreidung im Außenlicht. Als 2K-EP-Zinkstaub- oder Zinkphosphat-Grundierungen sind sie ein wichtiger Baustein im schweren Korrosionsschutz (siehe L-99).

## Gesundheit der Rohstoffe

Die Ausgangsstoffe sind nicht harmlos: Bisphenol A ist als fortpflanzungsgefährdend eingestuft und als besonders besorgniserregender Stoff (SVHC) wegen seiner endokrinen Wirkung gelistet — für Lebensmittelkontaktmaterialien ist BPA in der EU grundsätzlich verboten (Verordnung (EU) 2024/3190, siehe L-110 für die genauen Übergangsfristen). Epichlorhydrin, das bei der Harzherstellung eingesetzte Synthesereagenz, ist krebserzeugend. Beide werden bei der Harzherstellung weitestgehend umgesetzt bzw. gebunden; je nach Harztyp und Herstellverfahren können aber Restmonomere oder andere niedermolekulare Bestandteile im fertigen Harz vorhanden sein — „völlig reststofffrei“ lässt sich pauschal nicht behaupten. Beim Umgang mit dem noch nicht ausgehärteten Harz und mit Reststoffen gelten deshalb Schutzmaßnahmen. Erst die Reaktion mit dem sensibilisierenden Aminhärter (siehe L-29) macht aus dem flüssigen Harz den weitgehend inerten, ausgehärteten Film.

## Reaktionsgleichung: Epoxidharz-Synthese

Der Epoxidring (Oxiran) – gespannter Dreiring aus 2 C- und 1 O-Atom:

Genau dieser Ring sitzt an den Kettenenden des fertigen Harzes.

Bildung – Bisphenol A + Epichlorhydrin, mit NaOH:

$$\text{Bisphenol-A-(OH)}_2 + 2\ \text{Epichlorhydrin} + 2\ \text{NaOH} \rightarrow \text{Bisphenol-A-diglycidylether} + 2\ \text{NaCl} + 2\ \text{H}_2\text{O}$$

Idealisierte Gesamtbilanz: Industrielle Epoxidharze sind je nach Herstellverfahren tatsächlich Gemische unterschiedlicher Oligomere (verschiedene n), nicht eine einzelne Reinsubstanz.

Die Endgruppen sind Epoxid-(Oxiran-)Ringe; der Epoxidwert gibt die Zahl der Epoxidäquivalente je 100 g Harz an (Definition je nach Norm).

**Merksatz**

Epoxidwert und Epoxidäquivalent sind zwei Seiten derselben Kennzahl: Epoxidwert = 100 / Epoxidäquivalent. Sie sagen, wie viele Epoxidgruppen zu vernetzen sind — und damit, wie viel Härter (siehe L-29).

**Stichwörter:** Epoxidharz, 2K-EP, Bisphenol A, Epichlorhydrin, Diglycidylether, Epoxidgruppe, Epoxidwert, Epoxidäquivalentmasse, Bisphenol F, Novolak, Molmasse, Korrosionsschutz, Chemikalienbeständigkeit

*Quellen: Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur; Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie*

## Übungsblatt Ü-28 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Woraus werden die wichtigsten Epoxidharze hergestellt, und wie ändern sich Molmasse, OH- und Epoxidgruppen mit steigendem n?

**Ausgangsstoffe:** Bisphenol A und Epichlorhydrin. Der einfachste Fall (n = 0) ist der Bisphenol-A-diglycidylether mit zwei Epoxidgruppen.
**Mit steigendem n:** Die Molmasse wächst.
**OH-Gruppen:** Es entstehen mehr OH-Gruppen entlang der Kette.
**Epoxidgruppen:** Je Gramm Harz gibt es weniger Epoxidgruppen — der Epoxidwert sinkt.
*Bewertung: Die Ausgangsstoffe werden genannt und die drei Trends (Molmasse hoch, OH hoch, Epoxidgruppen je Gramm runter) richtig zugeordnet — nicht verwechselt.*

**Frage 2** **(Berechnung, 9 Punkte)**

Ein difunktionelles flüssiges Epoxidharz hat die Molmasse 380 g/mol. Berechnen Sie das Epoxidäquivalent und den Epoxidwert.

**Epoxidäquivalent:** Bei zwei Epoxidgruppen je Molekül: EÄ = Molmasse / 2 = 380 / 2 = 190 g/Äq.
**Epoxidwert:** Epoxidwert = 100 / EÄ = 100 / 190 = 0,53 (val je 100 g)
**Antwortsatz:** Das Harz hat ein Epoxidäquivalent von 190 g/Äq. und einen Epoxidwert von 0,53.
**Zum Vergleich:** Das ist ein unabhängiges Beispiel mit anderer Molmasse, keine Kontrolle desselben Harzes: Ein n=0-Harz aus Bisphenol-A-diglycidylether (DGEBA) aus der Literatur hat EÄ ≈ 170 g/Äq. und damit Epoxidwert ≈ 0,59 — die Formel Epoxidwert = 100/EÄ liefert bei anderer Molmasse also folgerichtig einen anderen Wert.
*Bewertung: Das Epoxidäquivalent wird korrekt als halbe Molmasse (difunktionell) bestimmt und der Epoxidwert daraus abgeleitet. Der Vergleich mit einem Literaturharz zeigt, dass dieselbe Formel bei anderer Molmasse folgerichtig einen anderen Wert liefert — er ist kein Gegencheck derselben Rechnung.*

**Frage 3** **(Anwendung, 7 Punkte)**

Für eine lösemittelfreie Bodenbeschichtung wird ein Epoxidharz gebraucht. Wählen Sie zwischen einem niedermolekularen und einem hochmolekularen Harz und begründen Sie.

**Wahl:** Ein niedermolekulares (flüssiges) Epoxidharz mit kleinem n.
**Begründung Viskosität:** Flüssige Harze lassen sich ohne Lösemittel verarbeiten — passend für ein lösemittelfreies System.
**Begründung Reaktivität:** Der höhere Epoxidwert bietet viele Vernetzungsstellen für einen harten, chemikalienbeständigen Boden.
**Gegenprobe:** Ein hochmolekulares festes Harz ließe sich ohne Lösemittel kaum verarbeiten und wäre für diesen Zweck typischerweise ungeeignet.
*Bewertung: Die Wahl wird an der Lösemittelfreiheit (flüssig statt fest) und am Epoxidwert festgemacht; die Gegenprobe zeigt, warum das feste Harz nicht passt.*

# L-29 · Epoxid-Härter

*Amine, Polyaminoamide und die NH-Äquivalentmasse*

**Wahlqualifikation** · B 12 · B 8

Epoxidgruppen werden von N-H-haltigen Härtern geöffnet; die NH-Äquivalentmasse gibt an, wie viel Gramm Härter auf ein aktives N-H entfallen. Zusammen mit dem Epoxidäquivalent des Harzes und dem Ansatz 1 : 1 ergibt sich daraus die Härtermenge.

## Wie die Härtung abläuft

Der Härter trägt aktive N-H-Gruppen. Jede N-H-Gruppe öffnet eine Epoxidgruppe des Harzes und bildet dabei eine Bindung und eine neue OH-Gruppe. So verknüpfen Harz und Härter zu einem dichten Netzwerk — daraus kommen Härte, Haftung und Chemikalienbeständigkeit. Amin-Epoxid-Systeme reagieren grundsätzlich ohne zusätzlichen Katalysator. Wie schnell und wie vollständig sie durchhärten, hängt aber vom Amintyp, von der Temperatur und von der Formulierung ab — bei niedrigen Temperaturen setzt man deshalb Beschleuniger ein.

## Was mit der neu entstehenden OH-Gruppe passiert

Bei jeder Ringöffnung entsteht neben der neuen N-C-Bindung auch eine neue OH-Gruppe (siehe Reaktionsgleichung unten). Diese OH-Gruppe könnte im Prinzip selbst mit einer weiteren Epoxidgruppe reagieren (Veretherung), das läuft bei Raumtemperatur und normaler Rezeptur aber deutlich langsamer als die Amin-Epoxid-Addition und wird für die Stöchiometrie-Rechnung vernachlässigt — gezählt wird nur das Verhältnis Epoxid : aktives N-H. Relevant wird die Veretherung erst bei deutlichem Epoxidüberschuss, bei erhöhter Temperatur bzw. Nachhärtung, oder wenn gezielt ein basischer Katalysator eingesetzt wird. Genau deshalb dosiert man Epoxid- und aktive N-H-Äquivalente möglichst genau 1 : 1. Ein Aminüberschuss ist dabei keine Sicherheitsreserve: Nicht abreagiertes Amin bleibt als Weichmacher im Film, kann ausblühen, stört die Haftung der Folgeschicht und wirkt zudem sensibilisierend.

## Aliphatische und cycloaliphatische Amine

Aliphatische Polyamine wie Diethylentriamin (DETA) sind sehr reaktiv, härten schnell und ergeben harte, beständige Filme — dafür kurze Topfzeit. An feuchter, kühler Luft nehmen sie $CO_2$ und Wasser auf und bilden an der Oberfläche Ammoniumcarbamat und -hydrogencarbonat (in der Lackpraxis kurz Amincarbonat, englisch amine blush): ein weißlicher, oft klebrig-öliger Belag. Er wirkt als Trennschicht: Die nächste Lackschicht haftet darauf nicht. Cycloaliphatische Amine wie Isophorondiamin (IPD) sind tendenziell reaktionsträger und dadurch etwas gutmütiger — die tatsächliche Reaktivität hängt aber auch von der konkreten Formulierung, Temperatur und eingesetzten Beschleunigern ab. Amin-Härter werden häufig in Butanol oder Butylglykol angeliefert bzw. verschnitten — beide sind mit den Harzlösemitteln aus L-28 (Xylol, MIBK) gut mischbar. Gegen das Ausblühen hilft in erster Linie, nicht unter etwa 10 °C und nicht bei hoher Luftfeuchte zu applizieren. Formulierseitig setzt man ausblühungsarme Härter ein (Addukte, Polyaminoamide); alkoholische Lösemittelanteile wie Butanol können bereits gebildeten Belag wieder anlösen. Ist er entstanden, wird er vor dem Überbeschichten mit Wasser abgewaschen.

## Polyaminoamide und weitere Härter

Polyaminoamide (aus Dimerfettsäure und Aminen) härten langsamer, sind flexibler und benetzen gut — bewährt im Korrosionsschutz. Imidazoline und Addukte sind weitere Typen. Mannich-Basen (aus Phenol, Formaldehyd und Amin) zeigen typischerweise Vorteile bei niedriger Temperatur und Feuchte und härten dort schneller aus als viele andere Amintypen — auch das ist eine Systemtendenz, keine feste Eigenschaft jeder Mannich-Base. Sie enthalten herstellungsbedingt Restanteile an Phenol bzw. Alkylphenolen und sind entsprechend gekennzeichnet; im Baustellen-Korrosionsschutz nimmt man deshalb zunehmend Phenalkamine: Mannich-Basen aus Cardanol (Cashewnussschalenöl) statt aus Phenol, mit derselben Kälte- und Feuchtetoleranz und deutlich geringerer Neigung zum Ausblühen. Die Härterwahl steuert damit Topfzeit, Härte und Flexibilität des Films.

## Die Kennzahl NH-Äquivalentmasse

Die NH-Äquivalentmasse (international auch AHEW, Aminwasserstoff-Äquivalentgewicht) ist die Masse Härter je aktiver N-H-Gruppe: Molmasse geteilt durch die Zahl der aktiven Wasserstoffatome. Beispiel DETA: Molmasse 103 g/mol, fünf aktive N-H → AHEW = 103/5 = 20,6 g je Äquivalent. Je kleiner der Wert, desto weniger Härter wird gebraucht.

## Was ein Äquivalent eigentlich ist

Ein Äquivalent ist keine Masse, sondern eine Stoffmenge — bezogen auf die reaktive Funktion. Ein Äquivalent entspricht einem Mol reaktiver Gruppen: auf der Harzseite ein Mol Epoxidgruppen, auf der Härterseite ein Mol aktiver Wasserstoffatome am Stickstoff.

Gezählt wird dabei je Stickstoff: eine primäre Aminogruppe –$NH_2$ bringt zwei aktive Wasserstoffatome mit, eine sekundäre –NH– eines, ein tertiäres Stickstoffatom keines. Beim DETA sind es zwei primäre und eine sekundäre Gruppe, also 2 + 2 + 1 = 5 aktive N-H — genau die fünf aus dem Rechenbeispiel.

Deshalb dürfen die Grammzahlen ruhig weit auseinanderliegen. 750 g Harz mit EEW 375 sind 2,00 Äquivalente, also 2,00 mol Epoxidgruppen; 250 g Härter mit AHEW 125 sind ebenfalls 2,00 Äquivalente, also 2,00 mol aktive Wasserstoffatome. Massenverhältnis 3 : 1, Äquivalentverhältnis 1 : 1 — das ist kein Widerspruch, sondern der ganze Zweck der Kennzahl. Verglichen werden die reaktiven Gruppen, nicht die Massen.

## Stöchiometrie

Für die Vernetzung setzt man Epoxid- und NH-Äquivalente 1 : 1 an: jede Epoxidgruppe soll eine N-H-Gruppe finden. Aus Epoxidäquivalent des Harzes (siehe L-28) und NH-Äquivalentmasse des Härters ergibt sich die Härtermenge — ähnlich wie beim 2K-PUR (siehe L-27). Ein grober Über- oder Unterschuss verschlechtert Härte und Beständigkeit.

## Rechenbeispiel: Härtermenge

```
Gegeben: 100 g Epoxidharz mit EEW = 200 g/Äq.;
Aminhärter mit NH-Äquivalentmasse (AHEW) = 100 g/Äq.

Epoxidäquivalente:  n = 100 / 200 = 0,50 eq
Härtermenge:        m = 0,50 · 100 = 50 g

Kontrolle: 100 g Harz liefern 0,50 Äq Epoxid, 50 g Härter liefern 0,50 Äq aktives N-H –
beide Seiten stimmen überein.
→ 100 g Harz + 50 g Härter; auf dem Gebindeetikett steht das als
   Mischungsverhältnis 2 : 1 in Gewichtsteilen.
```

## Gesundheit und Schutz

Amine sind reizend bis ätzend und stark sensibilisierend: Der wiederholte Hautkontakt mit Epoxidharz und Aminhärter ist eine der häufigsten Ursachen beruflicher Kontaktallergien (Epoxid-Allergie). DETA etwa ist eingestuft als hautätzend (Skin Corr. 1B, H314) und hautsensibilisierend (Skin Sens. 1, H317); einen Arbeitsplatzgrenzwert nach TRGS 900 gibt es dafür nicht — das entbindet nicht vom Minimierungsgebot. Deshalb konsequent Nitrilhandschuhe nach der Durchbruchzeit des Herstellers (kein Latex), Schutzbrille und Absaugung an der Entstehungsstelle, beim Spritzen zusätzlich Atemschutz; das Sicherheitsdatenblatt des konkreten Produkts ist maßgeblich.

## Molekülgröße und Gefahr

Wie bei den Isocyanaten (siehe L-26) spielt die Molekülgröße eine wichtige Rolle: Kleine, flüchtige Amine wie DETA sind über Dämpfe und Hautkontakt besonders kritisch; höhermolekulare Addukte und Polyaminoamide sind weniger flüchtig und dadurch milder. Die Flüchtigkeit ist aber nur einer von mehreren Faktoren — die tatsächliche Gefährdung hängt zusätzlich von der chemischen Reaktivität, dem Sensibilisierungspotenzial, möglicher Ätzwirkung, dem Expositionsweg (Haut, Atemwege, Aerosol/Spritznebel) und der Konzentration ab — ein an sich weniger flüchtiges Amin kann trotzdem stark sensibilisierend oder ätzend wirken. Im vollständig ausgehärteten Netzwerk sind die reaktiven N-H-Gruppen weitgehend umgesetzt; eine gewisse Restreaktivität ist je nach System, Härtungsgrad und -bedingungen dennoch nicht grundsätzlich auszuschließen. Das Vergrößern (Oligomer, Addukt, Präpolymer) senkt vor allem die Flüchtigkeit; ganz verschwindet die Sensibilisierungsgefahr erst, wenn die reaktive Gruppe weitgehend abreagiert ist (Grundlagen dazu in L-173).

## Reaktionsgleichung: Epoxid + Amin

```
Der Epoxidring vor der Reaktion – gespannter Dreiring:

    O
   / \
  C---C

Ringöffnende Addition (Polyaddition):
Epoxidring + H₂N–R → –CH(OH)–CH₂–NH–R

Das Amin öffnet den gespannten Ring; er wird zur offenen Kette mit
neuer OH-Gruppe (β-Hydroxy-Aminbindung).
Ein primäres Amin bringt je Stickstoff zwei aktive N-H mit und kann damit zwei
   Epoxidgruppen anlagern. Zum Netzwerk kommt es aber erst, wenn der Härter insgesamt mehr
   als zwei aktive N-H trägt – DETA fünf, IPD vier. Ein Härter mit nur zwei aktiven N-H
   würde ein difunktionelles Epoxidharz lediglich zu linearen Ketten verknüpfen.
Kein Abspaltprodukt.
```

**Merksatz**

N-H öffnet Epoxid: die NH-Äquivalentmasse bestimmt zusammen mit dem Epoxidäquivalent die Härtermenge. Aminwahl steuert Topfzeit, Härte und ob der Film ausblüht.

**Stichwörter:** Epoxid-Härter, Amin, Diethylentriamin, DETA, Isophorondiamin, IPD, Polyaminoamid, Imidazolin, Mannich-Base, NH-Äquivalentmasse, aktives N-H, Veretherung, Ausblühen, Amincarbonat, Topfzeit, Korrosionsschutz

*Quellen: Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur; Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie*

# Übungsblatt Ü-29 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Wie öffnet ein Amin-Härter die Epoxidgruppe, und worin unterscheiden sich aliphatische Amine, cycloaliphatische Amine und Polyaminoamide?

**Reaktion:** Eine aktive N-H-Gruppe des Härters öffnet die Epoxidgruppe; es entsteht eine Bindung und eine neue OH-Gruppe. Harz und Härter vernetzen so zum Netzwerk.

**Aliphatische Amine:** z. B. DETA: sehr reaktiv, schnelle Härtung, harte Filme, aber kurze Topfzeit und Neigung zum Ausblühen.

**Cycloaliphatische Amine:** z. B. IPD: reaktionsträger, längere Topfzeit, gutmütiger.

**Polyaminoamide:** langsamer, flexibler, gute Benetzung — bewährt im Korrosionsschutz.

*Bewertung: Der Reaktionsschritt (N-H öffnet Epoxid, neue OH-Gruppe) wird beschrieben und die drei Härtertypen nach Reaktivität und Eigenschaften unterschieden.*

**Frage 2** **(Berechnung, 12 Punkte)**

Diethylentriamin (DETA) hat die Molmasse 103 g/mol. (a) Leiten Sie aus der Struktur $H_2N–CH_2CH_2–NH–CH_2CH_2–NH_2$ die Zahl der aktiven N-H her. (b) Berechnen Sie die NH-Äquivalentmasse und die Härtermenge je 100 g eines Epoxidharzes mit dem Epoxidäquivalent 190 g/Äq. (Verhältnis 1 : 1). (c) Wie viel Mol reaktive Gruppen stehen sich dabei gegenüber?

**(a) Aktive N-H:** Je Stickstoff zählt man: primäre Aminogruppe $–NH_2$ zwei aktive Wasserstoffatome, sekundäre –NH– eines, tertiäres N keines. DETA hat zwei primäre und eine sekundäre Gruppe: 2 + 2 + 1 = 5 aktive N-H.

**(b) NH-Äquivalentmasse:** NH-Äq = Molmasse / Zahl aktiver N-H = 103 / 5 = 20,6 g/Äq. (rund 21)

**Epoxid-Äquivalente in 100 g Harz:** 100 g / 190 g/Äq. = 0,526 Äq

**NH-Bedarf (1:1):** 0,526 Äq N-H nötig

**Härtermenge:** 0,526 Äq · 20,6 g/Äq. = 10,8 g

**Antwortsatz:** Auf 100 g Harz kommen rund 10,8 g DETA.

**(c) Reaktive Gruppen:** 0,526 Äquivalente sind 0,526 mol Epoxidgruppen auf der Harzseite und 0,526 mol aktive Wasserstoffatome auf der Härterseite — Massenverhältnis rund 9 : 1, Äquivalentverhältnis 1 : 1.

*Bewertung: Die Zahl der aktiven N-H wird aus der Struktur hergeleitet und nicht auswendig genannt; die NH-Äquivalentmasse folgt daraus, und über die Epoxid-Äquivalente des Harzes ergibt sich die Härtermenge. In Teil (c) muss erkennbar sein, dass ein Äquivalent ein Mol reaktiver Gruppen ist — deshalb ist das Massenverhältnis ein ganz anderes als das Äquivalentverhältnis.*

**Frage 3** **(Anwendung, 7 Punkte)**

Eine 2K-EP-Korrosionsschutzgrundierung soll bei kühler, feuchter Witterung auf einer Baustelle appliziert werden. Welcher Härtertyp bietet sich an, und welches Problem aliphatischer Amine ist zu bedenken?

**Empfehlung:** Eine Mannich-Base — sie zeigt typischerweise Vorteile bei niedriger Temperatur und Feuchte und härtet dort meist schneller aus als andere Amintypen.

**Alternative:** Ein Polyaminoamid, wenn Flexibilität und gute Benetzung im Vordergrund stehen (langsamere Härtung).

**Problem aliphatischer Amine:** Bei kühler, feuchter Luft neigen sie zum Ausblühen: Sie reagieren mit $CO_2$ und Feuchte zu einem weißlichen Amincarbonat-Belag.

**Folge:** Die Härterwahl richtet sich nach den Applikationsbedingungen, nicht nur nach der Endhärte.

*Bewertung: Die Mannich-Base wird korrekt für kalte, feuchte Bedingungen gewählt und das Ausblühen aliphatischer Amine als konkretes Risiko benannt — die geforderte Verbindung von Chemie und Baustellenpraxis.*

# L-30 · Einbrennlacke — Grundlagen

*Reaktive Einkomponentenlacke, die erst in der Hitze vernetzen*

**Prüfungsteil 1** · A 8.3 · B 12

Ein Einbrennlack enthält Bindemittel und Vernetzer in einem Gebinde — sie sind bei Raumtemperatur lagerstabil und reagieren erst beim Einbrennen.

## Was ein Einbrennlack ist

Ein Einbrennlack ist ein Beschichtungsstoff, dessen wesentliche chemische Vernetzung durch erhöhte Temperatur beschleunigt und unter den vorgesehenen Einbrennbedingungen erreicht wird — typische Einbrenntemperaturen liegen je nach Bindemittelsystem etwa zwischen 120 und 180 °C, bei speziellen Systemen auch darunter oder darüber. Er enthält ein reaktives Bindemittel und einen Vernetzer, deren Reaktion bei Raumtemperatur so langsam abläuft, dass eine ausreichende Lager- und Verarbeitungsstabilität erreicht wird; erst beim Einbrennen wird die Vernetzung stark beschleunigt. Er zählt zu den chemisch härtenden Lacken — die endgültigen Filmeigenschaften entstehen wesentlich durch die chemische Vernetzung, nicht nur durch bloßes Verdunsten (siehe L-02).

## Warum die Hitze nötig ist

Die Einbrenntemperatur sorgt dafür, dass die Vernetzung (etwa OH-Gruppe plus Aminoharz) innerhalb der vorgesehenen Einbrennzeit einen ausreichend vernetzten, belastbaren Film ergibt. Ein Säurekatalysator kann die nötige Temperatur und Zeit senken (siehe L-31). Höhere Temperatur beschleunigt die Reaktion — führt aber nicht automatisch zu einem besseren Film: Zu hohe Temperatur oder zu lange Einbrennzeit kann zu Überhärtung, Vergilbung, Zersetzung oder anderen Filmfehlern führen. Die richtige Kombination aus Bindemittel, Vernetzer, Katalysator, Temperatur und Zeit entscheidet.

## Der Aufbau

Den reaktiven Teil bildet ein OH-haltiges Bindemittel — Alkyd (siehe L-16), gesättigter Polyester (siehe L-19) oder Acrylat (siehe L-27). Als Vernetzer kommen drei chemisch unterschiedliche Familien infrage: ein Aminoharz (Melamin-, Harnstoff-, Benzoguanamin- oder Glykolurilharz, siehe L-31), ein verkapptes Isocyanat oder ein Phenolharz (ein Phenol-Formaldehyd-Resolharz, meist kombiniert mit Epoxidharz statt mit Alkyd/Polyester). Phenolharz-Systeme sind chemikalien- und korrosionsbeständiger als Aminoharz-Systeme, dafür dunkler und stärker vergilbend — typisch für Dosen- und Fasslackierungen. Erst Bindemittel und Vernetzer zusammen ergeben den Film.

**Merksatz**

Anders als beim 2K-Lack (siehe L-25) stehen beide Partner in einem Gebinde, weil sie bei Raumtemperatur kaum reagieren. Das erspart Mischen und Topfzeit — dafür braucht es den Ofen. Angeliefert und gelagert wird der Lack fertig gemischt. Das macht die Verarbeitung einfach und reproduzierbar.

## Wo Einbrennlacke eingesetzt werden

Typisch ist die Serienlackierung, wo eingebrannt werden kann und hohe Beständigkeit gefragt ist: Automobil-Serienlackierung, Coil- und Bandblech-Coating, Geräte, Maschinen und Industrielacke. Für Reparaturen vor Ort eignen sie sich nicht. Der Ofen begrenzt die Anwendung zudem auf hitzebeständige Werkstücke — meist Metall.

### Gesundheit und Umwelt

Einbrennlacke bringen eigene Gesundheits- und Umweltaspekte mit: Das Einbrennen kostet viel Energie (Ofen bei 120–180 °C oder mehr). Bei der Vernetzung von Aminoharz-Systemen können flüchtige Spaltprodukte entstehen — je nach Harztyp Formaldehyd, bei etherifizierten Aminharzen häufig auch Alkohole; die Ofenabluft wird deshalb erfasst und ggf. nachbehandelt. Für Innenraumanwendungen (z. B. Möbel, Bauteile) gelten Emissionsanforderungen: Hier geht es um Stoffe, die noch aus dem fertigen, ausgehärteten Film in die Raumluft abgegeben werden können — vor allem Restformaldehyd. Für Lebensmittelkontaktmaterialien (z. B. Dosen-, Fasslacke) gelten zusätzlich Migrationsanforderungen: Hier geht es darum, was aus dem Film in das verpackte Lebensmittel übergehen kann — das betrifft nicht nur Formaldehyd, sondern auch andere Bestandteile des Beschichtungssystems. Beide Anforderungsarten prüfen also unterschiedliche Übergänge (Luft bzw. Lebensmittel) und werden getrennt bewertet. Lösemittelhaltige Einbrennlacke setzen VOC frei; die Abluft kann thermisch oder katalytisch nachbehandelt werden. Bei verkappten Isocyanaten wird beim Entkappen das Blockierungsmittel frei — das freigesetzte Isocyanat selbst reagiert dagegen sofort mit dem Bindemittel weiter (siehe L-33 und L-34). Der Säurekatalysator (z. B. p-Toluolsulfonsäure) wirkt reizend bis ätzend; die genaue Einstufung hängt von Konzentration und Formulierung ab.

### Reaktionsprinzip: Vernetzung beim Einbrennen

```
Lagerstabil bei Raumtemperatur, Reaktion erst in der Hitze:
  Bindemittel–OH + Vernetzer–X →(Δ) Bindemittel–O–Vernetzer + H–X

Je nach Vernetzer wird ein anderes Molekül frei:
  Aminoharz (–CH₂–OR): spaltet R–OH ab
  freies Methylol (–CH₂–OH): spaltet H₂O ab
  verkapptes Isocyanat: gibt in der Hitze das NCO frei

Die Vernetzung ist meist säurekatalysiert.
```

**Merksatz**

Der Einbrennlack ist ein reaktives Einkomponentensystem: bei Raumtemperatur lagerstabil, beim Einbrennen vernetzt. Bindemittel und Vernetzer sind bereits zusammen im Gebinde.

**Stichwörter:** Einbrennlack, Einbrennen, Vernetzer, reaktives Bindemittel, Aminoharz, verkapptes Isocyanat, Phenolharz, Säurekatalysator, Serienlackierung, Coil Coating, Automobil, lagerstabil, einkomponentig, Einbrenntemperatur, Migrationsanforderungen

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur*

---

## Übungsblatt Ü-30 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Was ist ein Einbrennlack, und worin unterscheidet er sich von einem 2K-Lack?

**Einbrennlack:** Ein reaktives Einkomponentensystem: Bindemittel und Vernetzer sind in einem Gebinde, reagieren bei Raumtemperatur kaum und vernetzen erst beim Einbrennen (meist 120–180 °C).

**2K-Lack:** Zwei getrennte Komponenten, die erst kurz vor der Verarbeitung gemischt werden und dann bei Raumtemperatur reagieren (siehe L-25).

**Kernunterschied:** Der Einbrennlack braucht keine Mischung und hat keine Topfzeit, dafür einen Ofen; der 2K-Lack härtet ohne Hitze, hat aber eine begrenzte Topfzeit.

**Gemeinsam:** Beide härten chemisch (nicht nur physikalisch) zu vernetzten, beständigen Filmen.

*Bewertung: Der Einbrennlack wird als lagerstabiles 1K-System beschrieben und klar gegen das 2K-System abgegrenzt (Ofen statt Topfzeit). Die Gemeinsamkeit der chemischen Härtung wird erkannt.*

**Frage 2** **(Berechnung, 9 Punkte)**

Ein Einbrenn-Klarlack wird aus Alkydharz und Melaminharz im Festkörperverhältnis 70 : 30 gebaut. Für 8,0 kg Klarlack mit 55 % Festkörper: Wie viel Alkyd- und wie viel Melamin-Festkörper sind enthalten?

**Gegeben:** Lack = 8,0 kg; Festkörper = 55 %; Verhältnis Alkyd : Melamin = 70 : 30

**Schritt 1 — Festkörper gesamt:** 8,0 kg · 0,55 = 4,4 kg

**Schritt 2 — Alkyd:** 4,4 kg · 0,70 = 3,08 kg

**Schritt 3 — Melamin:** 4,4 kg · 0,30 = 1,32 kg

**Antwortsatz:** Der Klarlack enthält 3,08 kg Alkyd- und 1,32 kg Melamin-Festkörper; die restlichen 3,6 kg sind Lösemittel.

*Bewertung: Zuerst wird der Gesamtfestkörper aus dem Festkörpergehalt bestimmt, dann im Verhältnis aufgeteilt. Dass der Rest Lösemittel ist, wird richtig erkannt.*

**Frage 3** **(Anwendung, 7 Punkte)**

Warum eignet sich ein Einbrennlack für die Automobil-Serienlackierung, aber nicht für eine Reparatur vor Ort auf einer Baustelle?

**Serienlackierung:** Im Werk kann bei 120–180 °C eingebrannt werden; der Lack ist lagerstabil, ohne Topfzeit, und ergibt sehr beständige Filme in kurzer Taktzeit — ideal für die Serie.

**Baustelle:** Vor Ort fehlt der Ofen; ohne die Einbrenntemperatur vernetzt der Lack nicht ausreichend.

**Alternative:** Für die Reparatur nimmt man daher raumtemperaturhärtende Systeme wie 2K-PUR (siehe L-25, L-26).

**Kernpunkt:** Die Einbrenntemperatur ist der entscheidende Vorteil in der Serie und zugleich der Grund, warum es vor Ort nicht geht.

*Bewertung: Die Eignung wird an der Verfügbarkeit der Einbrenntemperatur festgemacht und die Baustelle folgerichtig dem 2K-System zugeordnet. Das ist die geforderte Abwägung.*

# L-31 · Aminoharze — Aufbau und Vernetzung

*Von der NH-Gruppe über Methylolether zum Netzwerk*

**Prüfungsteil 2** · A 10 · B 12

Aminoharze vernetzen über Methylol- und Methylolethergruppen mit den OH-Gruppen des Bindemittels — säurekatalysiert und beim Einbrennen.

## Die vier Aminoharze

Aminoharze sind stickstoffhaltige Verbindungen mit NH-Gruppen, die als Vernetzer in Einbrennlacken dienen (siehe L-30). Die vier wichtigsten Grundbausteine sind Melamin, Harnstoff, Benzoguanamin und Glykoluril. Sie sind selbst kein Filmbildner, sondern der Härter für ein OH-haltiges Bindemittel. Trotz des Namens haben Aminoharze nichts mit der Vergilbung von Epoxid-Amin-Systemen zu tun (siehe L-28): Aminoharze sind deutlich vergilbungsärmer und werden — kombiniert mit einem wetterbeständigen Acrylatharz — auch in Automobildecklacken eingesetzt (siehe L-32). Mit steigendem Aminoharz-Anteil und beim Überbrennen nimmt die Vergilbung allerdings zu (siehe unten).

## Von der Aminogruppe zum Methylolether

Zuerst reagieren die NH-Gruppen mit Formaldehyd zu Methylolgruppen (–N–$CH_2$–OH). Ob und wie vollständig diese anschließend mit einem Alkohol — meist Butanol oder Methanol — zu Methylolethern verethert werden, ist keine Konstante, sondern eine gezielte Rezeptur-Entscheidung: Bei vollveretherten Typen (z. B. HMMM, siehe L-32) sind praktisch alle Methylolgruppen verethert, bei teilveretherten Typen bleibt bewusst ein Teil als freie Methylolgruppe erhalten. Die Veretherung macht das Harz lagerstabil und in Lacklösemitteln verträglich. Je nach Alkohol (Methanol oder Butanol) und Veretherungsgrad entstehen sehr unterschiedliche Harztypen (siehe L-32). Butanolveretherte, teilveretherte Typen lösen sich gut in Butanol, Xylol oder deren Gemischen; hoch veretherte, polare Typen wie HMMM sind zusätzlich mit Wasser oder Butylglykol verdünnbar (siehe L-32).

## Wie sie vernetzen

Beim Einbrennen laufen zwei Vernetzungswege parallel: Fremdvernetzung — die Methylol- und Methylolethergruppen des Aminoharzes reagieren mit den OH-Gruppen des Bindemittels, unter Abspaltung von Alkohol (bei veretherten Methylolethern) bzw. Wasser (bei freien Methylolgruppen); das verknüpft Aminoharz und Bindemittel. Selbstvernetzung — Methylol- bzw. Methylolethergruppen zweier Aminoharzmoleküle reagieren auch miteinander (–N–$CH_2$–OR + HO–$CH_2$–N– → –N–$CH_2$–O–$CH_2$–N– + R–OH; entsprechend reagieren zwei freie Methylolgruppen unter Wasserabspaltung); das verknüpft Aminoharz-Moleküle untereinander, unabhängig vom Bindemittel. Als Faustregel gilt: Je höher der Veretherungsgrad (wenig freie Methylol-/NH-Gruppen, z. B. HMMM), desto mehr überwiegt die Fremdvernetzung mit dem Bindemittel — bei vollveretherten Typen fast ausschließlich. Teilveretherte Handelsharze tragen meist beide Gruppentypen im selben Molekül — bei ihnen laufen beide Wege nebeneinander ab, mit stärkerem Anteil Selbstvernetzung. Beide Wege sind Kondensationsreaktionen — anders als die Additionsreaktion beim Isocyanat (2K-PUR, siehe L-25). Der abgespaltene Alkohol bzw. das abgespaltene Wasser muss aus dem Film entweichen — auch dafür dient das Einbrennen.

## Säurekatalyse

Die Vernetzung ist säurekatalysiert: Ein Säurekatalysator wie p-Toluolsulfonsäure senkt Einbrenntemperatur und -zeit deutlich und spart damit Energie. Für die Lagerstabilität setzt man „blockierte“ (neutralisierte) Säuren ein, die erst in der Hitze frei werden und dann wirken. Gesundheitlich ist der Säurekatalysator (p-Toluolsulfonsäure) reizend bis ätzend; wichtiger noch: Aminoharze können bei Herstellung, Einbrennen und aus dem ausgehärteten Film Formaldehyd freisetzen — in welchem Ausmaß, hängt stark von Veretherungsgrad und Harztyp ab: Ein hoch veretherter Typ wie HMMM (siehe L-32) trägt praktisch keine freien Methylolgruppen mehr und setzt entsprechend wenig Formaldehyd frei, während weniger veretherte oder harnstoffbasierte Typen mehr freisetzen können. Das ist ein Grund für formaldehydarme Typen (Glykoluril, s. u.) und die Emissionsgrenzwerte bei Innenraumanwendungen (siehe L-122).

## Die vier im Vergleich

- Melaminharz — Grundkörper ist ein Triazinring mit drei $NH_2$-Gruppen: hohe Funktionalität, dadurch hart, chemikalien- und wetterbeständig; gehört zu den wichtigsten und am breitesten eingesetzten Aminoharzen. Endanwendung: Automobil-Decklacke und -Klarlacke, Coil-Coating, Möbel- und Industrielacke — überall dort, wo Härte und Wetterbeständigkeit gefragt sind.
- Harnstoffharz — Grundkörper ist Harnstoff mit nur zwei $NH_2$-Gruppen: niedrigere Funktionalität als Melaminharz, dadurch weniger vernetzungsdicht, weniger hart und weniger wetterbeständig; dafür günstiger — eher für Innenanwendungen. Endanwendung: Möbel- und Holzlacke, Grundierungen für Innenbauteile, wo Kosten wichtiger sind als Wetterbeständigkeit.
- Benzoguanaminharz — wie Melamin ein Triazinring, aber eine der drei Aminogruppen ist durch einen Phenylrest ersetzt; der unpolare Phenylrest verbessert Chemikalien- und Alkalibeständigkeit sowie Haftung, senkt aber die Funktionalität deutlich: zwei statt drei Aminogruppen, also höchstens vier statt sechs Methylolgruppen. Endanwendung: Lackierungen für Haushaltsgeräte (Waschmaschinen, Kühlschränke, Herde), wo Reinigungsmittel- und Chemikalienbeständigkeit besonders gefragt sind.
- Glykolurilharz — chemisch kein Triazin, sondern ein bizyklischer Bis-Harnstoff mit vier NH-Gruppen, die durch benachbarte Carbonylgruppen weniger reaktiv sind als bei Melamin; deshalb reicht bei der Herstellung ein geringerer Formaldehyd-Überschuss — das Harz wird formaldehydärmer. Endanwendung: hochwertige, emissionsarme Einbrennlacke — etwa Verpackungs- und Coil-Coating-Lacke oder Beschichtungen mit strengen Innenraum- bzw. Lebensmittelkontakt-Anforderungen (siehe L-30).

## Stöchiometrie oder Überschuss?

Anders als beim 2K-PUR rechnet man Aminoharze nicht stöchiometrisch aus: Ihre Funktionalität ist nicht scharf definiert (es sind Gemische), und die Selbstvernetzung konkurriert mit der Fremdvernetzung. Man arbeitet deshalb mit einem empirisch optimierten Mischungsverhältnis (OH-Harz zu Aminoharz, grob im Bereich 70:30 bis 80:20; bei manchen Systemen auch bis 90:10). Das Verhältnis steuert den Film: mehr Aminoharz gibt einen härteren, chemikalien- und wärmebeständigeren, aber spröderen und stärker vergilbenden Film; in dieselbe Richtung wirkt ein zu langes oder zu heißes Einbrennen (Überbrennen); weniger Aminoharz einen weicheren, flexibleren.

## Reaktionsgleichung: Aminoharz-Vernetzung

Vernetzung mit dem OH-Bindemittel (Kondensation), zwei Fälle:
veretherter Methylolether:
$-N-CH_2-OR + HO-Bindemittel \rightarrow -N-CH_2-O-Bindemittel + R-OH$
freie Methylolgruppe:
$-N-CH_2-OH + HO-Bindemittel \rightarrow -N-CH_2-O-Bindemittel + H_2O$

Abspaltprodukt ist also der Alkohol R–OH bei veretherten Methylol-
ethern und Wasser bei freien Methylolgruppen. Einbrennen unter Säurekatalyse.
(Vereinfachtes Vernetzungsschema.)

### Reaktionsgleichung: Aminoharz-Synthese

```
Anlagerung von Formaldehyd (Methylolierung):
Melamin(–NH₂) + CH₂O → Melamin(–NH–CH₂OH)  (schematisch – Melamin trägt tatsächlich drei
   exocyclische Aminogruppen, hier nur eine gezeigt)

Verethern mit Alkohol (verbessert Löslichkeit und Lagerung):
–NH–CH₂OH + HO–R → –NH–CH₂–O–R + H₂O
```

**Merksatz**

NH plus Formaldehyd ergibt Methylol, plus Alkohol den Methylolether. Beim Einbrennen vernetzen diese Gruppen säurekatalysiert mit den OH-Gruppen des Bindemittels. Melamin ist dabei der wichtigste Baustein.

**Stichwörter:** Aminoharz, Melamin, Harnstoff, Benzoguanamin, Glykoluril, Triazinring, Methylolgruppe, Methylolether, Formaldehyd, Fremdvernetzung, Selbstvernetzung, Säurekatalyse, p-Toluolsulfonsäure, blockierte Säure, Einbrennlack

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur*

---

## Übungsblatt Ü-31 — Musterlösungen

**Frage 1** (Verständnis, 8 Punkte)

Wie wird aus einer NH-Gruppe eine Methylolether-Gruppe, und wie vernetzt ein Aminoharz mit dem Bindemittel?

**Schritt 1 — Methylol:** Die NH-Gruppe reagiert mit Formaldehyd zu einer Methylolgruppe (–N–CH₂–OH).

**Schritt 2 — Methylolether:** Die Methylolgruppe wird mit einem Alkohol (Butanol oder Methanol) zum Methylolether verethert; das macht das Harz lagerstabil und verträglich.

**Vernetzung:** Beim Einbrennen reagieren diese Gruppen mit den OH-Gruppen des Bindemittels (Fremdvernetzung, unter Abspaltung von Alkohol/Wasser) und teils miteinander (Selbstvernetzung).

**Bedingung:** Die Reaktion ist säurekatalysiert und läuft erst bei Einbrenntemperatur ausreichend schnell.

*Bewertung: Die zwei Bildungsschritte (Formaldehyd, dann Alkohol) werden getrennt und die Vernetzung als Reaktion der Methylol(ether)gruppen mit den OH-Gruppen beschrieben — mit Säurekatalyse und Hitze als Bedingung.*

**Frage 2** (Berechnung, 9 Punkte)

Einem Einbrennlack soll p-Toluolsulfonsäure als Säurekatalysator zu 0,5 % (bezogen auf den Bindemittel-Festkörper) zugesetzt werden. Für 12 kg Bindemittel-Festkörper: Wie viel Wirkstoff wird benötigt, und wie viel einer 40%-igen Katalysatorlösung?

**Gegeben:** Bindemittel-Festkörper = 12 kg; Katalysator = 0,5 % Wirkstoff; Lösung = 40 %-ig

**Wirkstoffmenge:** 12 kg · 0,005 = 0,060 kg = 60 g

**Als 40%-Lösung:** 60 g / 0,40 = 150 g Katalysatorlösung

**Antwortsatz:** Benötigt werden 60 g Wirkstoff, entsprechend 150 g der 40%-igen Lösung.

**Kontrolle:** Die 150 g Lösung enthalten 60 g Wirkstoff und 90 g Lösemittel.

*Bewertung: Der Wirkstoffanteil wird auf den Bindemittel-Festkörper bezogen und dann über den Lösungsgehalt in Einwaage umgerechnet. Die Kontrolle zeigt das Verständnis von Wirkstoff und Lösemittel.*

**Frage 3** (Anwendung, 7 Punkte)

Warum setzt man in einem lagerstabilen Einbrennlack eine „blockierte“ Säure statt der freien p-Toluolsulfonsäure ein?

**Problem freier Säure:** Freie Säure würde die Vernetzung schon bei Raumtemperatur langsam anstoßen — der Lack würde beim Lagern anreagieren und an Stabilität verlieren.

**Blockierte Säure:** Die Säure wird neutralisiert (blockiert) und ist bei Raumtemperatur unwirksam.

**Freisetzung:** Erst beim Einbrennen wird sie in der Hitze frei und katalysiert dann die Vernetzung.

**Nutzen:** So bleibt der Lack lagerstabil und härtet trotzdem beim Einbrennen zuverlässig.

*Bewertung: Der Zielkonflikt Lagerstabilität gegen Reaktivität wird erkannt und über die Blockierung/Freisetzung in der Hitze aufgelöst — genau der Grund für blockierte Säuren.*

# L-32 · Melaminharze — Typen und Kombination

*Vollverethert oder teilverethert, und das richtige Bindemittel*

**Prüfungsteil 2** · A 10 · B 12

Vollveretherte Melaminharze brauchen mehr Säure und vernetzen mit dem Bindemittel; teilveretherte sind reaktiver und selbstvernetzend.

## Warum Melamin führend ist

Melaminharze gehören zu den wichtigen Aminoharz-Vernetzern für Einbrennlacke und können hohe Härte und gute Wetterbeständigkeit ermöglichen (siehe L-31); die erreichbaren Eigenschaften hängen vom Melaminharztyp und vom Kombinationspartner ab. Über den Veretherungsgrad und die Molmasse lassen sich sehr verschiedene Typen einstellen. Reines Melaminharz ist spröde; erst die Kombination mit einem flexiblen OH-Harz ergibt brauchbare Filme.

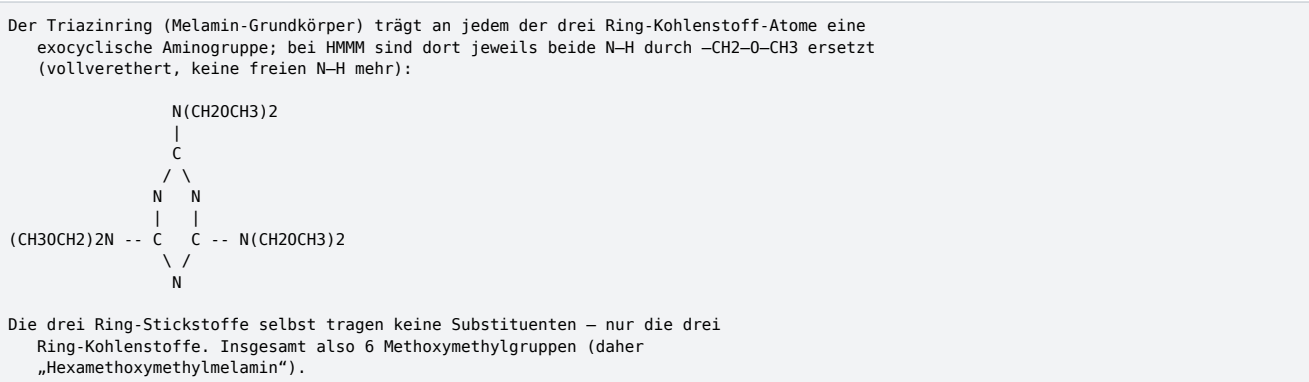
## Vollveretherte Typen (HMMM)

Hexamethoxymethylmelamin ist niedermolekular und vollständig verethert — es trägt keine freien NH-Gruppen mehr. Die Methoxymethylgruppen machen HMMM zudem deutlich polarer als butanolveretherte Typen; das macht es gut verträglich mit polaren, wasserverdünnbaren Bindemitteln — HMMM ist deshalb ein wichtiger Vernetzer für viele wässrige und High-Solid-Systeme, etwa in wasserbasierten Automobil-Basislacken — dort meist mit Wasser und Butylglykol bzw. Butyldiglykol als Colöser verdünnt. Solche Typen brauchen eine stärkere Säurekatalyse, vernetzen fast nur mit dem Bindemittel (wenig Selbstvernetzung) und ergeben flexible, gut haftende Filme. Sie sind zudem lagerstabil und breit mit Bindemitteln verträglich. Die stärkere Säurekatalyse wirkt dabei wie bei allen Aminoharzen: Der Katalysator protoniert die Methylolether-Gruppe und macht sie reaktiver für den Austausch mit der OH-Gruppe des Bindemittels. Ein Teil des Katalysators bleibt nach dem Einbrennen im Film zurück; deshalb setzt man bevorzugt blockierte (neutralisierte) Säuren ein, die erst in der Hitze aktiv werden — das begrenzt die im fertigen Film verbleibende freie Säuremenge und schont Hydrolyse- und Korrosionsbeständigkeit.

## Teilveretherte Typen

Teilveretherte Melaminharze enthalten noch freie NH- bzw. Iminogruppen. Sie sind meist mit Butanol verethert, dadurch unpolarer und gut verträglich mit klassischen, lösemittelbasierten Alkyd- und Polyestersystemen — Standardvernetzer etwa in konventionellen Industrie- und Möbellacken, dort typischerweise gelöst in Butanol, Xylol oder deren Gemischen. Sie sind reaktiver, brauchen weniger Säurekatalysator und neigen stärker zur Selbstvernetzung; oft sind sie höhermolekular. Die freien NH-Gruppen liefern zusätzliche Vernetzungsstellen. Den Typ wählt man nach gewünschter Einbrenntemperatur, Reaktivität und System (lösemittelbasiert oder wässrig).

## Hexamethoxymethylmelamin (HMMM) — Struktur



## Kombinationspartner

Melaminharz wird mit einem OH-Bindemittel kombiniert: Alkyd (siehe L-16) ist günstig, vergilbt aber; gesättigter Polyester (siehe L-19) deckt eine breite Härte-Spanne ab; Acrylat (siehe L-27) ist wetter- und vergilbungsbeständig und damit erste Wahl für Automobildecklacke und andere hochwertige Außenlacke.

## Das Mischungsverhältnis

Anders als beim NCO:OH- oder Epoxid:Amin-Verhältnis (siehe L-27, L-29) gibt es hier keine saubere Äquivalentrechnung: Ein Teil der Methylol-/Methylolethergruppen reagiert nicht mit dem Bindemittel, sondern mit sich selbst (Selbstkondensation, siehe L-31) — wie viel, hängt von Veretherungsgrad, Katalysator und Einbrennbedingungen ab. Das Mischungsverhältnis wird deshalb weitgehend empirisch festgelegt: über das technische Merkblatt des Harzherstellers und über Filmprüfungen (Pendelhärte, Lösemittelbeständigkeit, Flexibilität). Als Richtwert enthält das Bindemittel etwa 70 bis 80 % OH-Harz und 20 bis 30 % Melaminharz (Festkörper). Mehr Melamin macht härter und chemikalienbeständiger, aber auch spröder — das Optimum liegt im mittleren Bereich, nicht am Rand. Zu wenig Melamin lässt den Film dagegen weich und wenig beständig.

## Gesundheit und Umwelt

Wie alle Aminoharze können Melaminharze bei Herstellung und Einbrennen Formaldehyd freisetzen; Ausmaß und Relevanz hängen von Harztyp, Veretherungsgrad, Katalyse und Härtungsgrad ab — daher Ofenabsaugung, formaldehydarme Typen und Emissionsgrenzwerte für Innenraum und Verpackung (siehe L-31 und L-122). Das Einbrennen ist zudem energieintensiv.

## Veretherungsgrad entscheidet

```
Beide Typen entstehen aus derselben Grundreaktion (Methylolierung + Veretherung, siehe
   L-31):
  Melamin–NH₂ + CH₂O → Melamin–NH–CH₂OH
  –NH–CH₂OH + HO–R → –NH–CH₂–O–R + H₂O

Der Unterschied ist der Veretherungsgrad:
  vollverethert (HMMM) – alle Methylolgruppen verethert, KEINE freien NH mehr
  teilverethert – ein Teil bleibt als –NH–CH₂OH bzw. freies NH, LIEFERT zusätzliche
   Vernetzungsstellen
```

**Merksatz**

HMMM (vollverethert) braucht mehr Säure und vernetzt mit dem Bindemittel; teilveretherte Typen sind reaktiver und selbstvernetzend. Das Verhältnis OH-Harz zu Melamin steuert Härte und Beständigkeit.

**Stichwörter:** Melaminharz, HMMM, Hexamethoxymethylmelamin, vollverethert, teilverethert, Iminogruppe, freie NH-Gruppen, Säurekatalyse, Selbstvernetzung, Kombinationspartner, Alkyd, Acrylat, Automobildecklack, Mischungsverhältnis

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur*

## Übungsblatt Ü-32 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Worin unterscheiden sich vollveretherte (HMMM) und teilveretherte Melaminharze in Reaktivität und Katalysebedarf?

**Vollverethert (HMMM):** Keine freien NH-Gruppen; braucht stärkere Säurekatalyse und vernetzt fast nur mit dem Bindemittel (wenig Selbstvernetzung); niedermolekular, flexible Filme.
**Teilverethert:** Enthält noch freie NH-/Iminogruppen; reaktiver, braucht weniger Säure und neigt stärker zur Selbstvernetzung; oft höhermolekular.
**Ursache:** Die freien NH-Gruppen der teilveretherten Typen sind zusätzliche, reaktive Vernetzungsstellen.
**Folge:** Der Typ bestimmt, wie viel Säurekatalysator nötig ist und wie stark das Harz mit sich selbst vernetzt.
*Bewertung: Beide Typen werden über freie NH-Gruppen, Reaktivität und Katalysebedarf klar getrennt, und der Zusammenhang (freie NH = mehr Reaktivität, weniger Säure nötig) wird begründet.*

**Frage 2** **(Berechnung, 9 Punkte)**

Ein Einbrennklarlack soll im Bindemittel 30 % Melaminharz (Festkörper) enthalten. Vorhanden sind 4,2 kg Alkyd-Festkörper. Wie viel Melamin-Festkörper wird gebraucht, und was passiert bei deutlich mehr Melamin?

**Ansatz:** Das Alkydharz ist der Rest: 100 % − 30 % = 70 %. Also entspricht 4,2 kg dem 70 %-Anteil.
**Bindemittel gesamt:** 4,2 kg / 0,70 = 6,0 kg
**Melamin-Festkörper:** 6,0 kg · 0,30 = 1,8 kg
**Antwortsatz:** Es werden 1,8 kg Melamin-Festkörper gebraucht.
**Bei mehr Melamin:** Der Film wird härter und chemikalienbeständiger, aber spröder — das Optimum liegt im mittleren Bereich (etwa 20–30 % Melamin).
*Bewertung: Der Alkydanteil wird richtig als 70 %-Rest erkannt und daraus das Bindemittel und der Melaminanteil berechnet. Die Folge von zu viel Melamin (Sprödigkeit) wird korrekt benannt.*

**Frage 3** **(Anwendung, 7 Punkte)**

Welches OH-Bindemittel wählen Sie zusammen mit einem Melaminharz für einen wetterbeständigen Automobildecklack, und warum nicht Alkyd?

**Wahl:** Ein hydroxyfunktionelles Acrylatharz (siehe L-27).
**Begründung:** Acrylatharze sind besonders wetter- und vergilbungsbeständig — für einen Außendecklack entscheidend.
**Warum nicht Alkyd:** Alkydharze sind günstiger und gut verträglich, vergilben aber stärker und sind weniger wetterbeständig — für einen hochwertigen Decklack außen ungeeignet.
**Einordnung:** Alkyd/Melamin wird häufig für wirtschaftliche Industrie- und Einbrennlacke eingesetzt. Acrylat/Melamin eignet sich besonders für Anwendungen mit hohen Anforderungen an Wetter- und Vergilbungsbeständigkeit, beispielsweise hochwertige Automobil-Decklacke.
*Bewertung: Das Acrylatharz wird mit Wetter- und Vergilbungsbeständigkeit begründet und das Alkyd bewusst den weniger anspruchsvollen Anwendungen zugeordnet — die geforderte Abwägung nach Anwendung.*

# L-33 · Verkappte Polyisocyanate — Prinzip und Anwendung

*Ein blockiertes Isocyanat als lagerfähiger 1K-Einbrennhärter*

**Prüfungsteil 1** · A 8.3 · B 12

Verkappen macht aus dem reaktiven Isocyanat einen lagerfähigen 1K-Härter, der erst in der Hitze entkappt und dann mit den OH-Gruppen vernetzt.

## Das Problem und die Idee

Freies Isocyanat reagiert schon bei Raumtemperatur mit OH-Gruppen (siehe L-25) — für einen lagerstabilen Einkomponentenlack ist das zu reaktiv. Bei einem verkappten Polyisocyanat wird die NCO-Gruppe deshalb zeitweise blockiert („verkappt“), sodass sie bei Raumtemperatur unreaktiv ist. Die Isocyanatfunktion wird dabei nicht dauerhaft verändert, sondern durch eine reversible chemische Blockierung maskiert.

## Verkappen und Entkappen

Ein Verkappungsmittel wird an die NCO-Gruppe gebunden; so bleibt der Härter bei Raumtemperatur lagerstabil. Beim Einbrennen spaltet das Verkappungsmittel in der Hitze wieder ab (Entkappung); das nun freie Isocyanat reagiert mit den OH-Gruppen des Bindemittels zu Urethan (siehe L-27). Bei klassisch abspaltenden Blockern wird das freigesetzte Verkappungsmittel dabei häufig aus dem Film freigesetzt und kann emittieren (siehe L-34) — bei Malonester-Typen, die anders reagieren (siehe L-34), liegt der Fall anders.

## Ein 1K-Einbrennlack

Dadurch lassen sich Isocyanat-Härter und OH-Bindemittel in einem Gebinde lagern — bei geeigneter Formulierung lagerstabil und praktisch ohne Topfzeit — und erst im Ofen vernetzen (siehe L-30). Das ist der Unterschied zum 2K-PUR (siehe L-25), bei dem beide erst kurz vor der Verarbeitung gemischt werden. So verbindet das System die Beständigkeit von Polyurethan mit der einfachen Handhabung eines Einkomponentenlacks. Lösemittelbasierte 1K-PUR-Einbrennlacke werden meist in Xylol, Butylacetat oder aromatenreichen Lösemittelgemischen (Solvesso) verarbeitet; die kathodische Elektrotauchlackierung dagegen ist, wie im Abschnitt Anwendung beschrieben, ein wässriges System.

## Die potenzielle NCO-Zahl

Der Härter wird über seinen potenziellen NCO-Gehalt charakterisiert — den Anteil, der beim Entkappen frei wird. Daraus berechnet man das Mischungsverhältnis mit dem OH-Bindemittel genauso wie beim freien Isocyanat (siehe L-26, L-27) — wie vollständig und schnell die Vernetzung tatsächlich abläuft, hängt aber zusätzlich von Kinetik, Katalyse und möglichen Nebenreaktionen ab, nicht allein von der rechnerischen NCO-Menge.

## Anwendung

Verkappte Polyisocyanate ergeben 1K-PUR-Einbrennlacke: Coil-Coating, Drahtlacke, Can-Coating, kathodische Tauchlackierung (Elektrotauchlack) und Automobil — alles reale, breit eingesetzte Serienlackierungs-Verfahren, kein theoretischer Sonderfall. Wichtig ist dabei, zwei Dinge auseinanderzuhalten: „Elektrotauchlack“ bezeichnet nur das Auftragsverfahren (die elektrophoretische Abscheidung aus einem wässrigen Tauchbad unter Gleichspannung), nicht eine bestimmte Chemie. Bei der kathodischen Elektrotauchlackierung wird dafür meist ein Epoxid-Amin-Harz eingesetzt: Es wird mit Säure protoniert und dadurch wasserlöslich bzw. -dispergierbar gemacht, damit es sich im wässrigen Bad an der Kathode (dem Werkstück) abscheidet; als Härter dient dabei je nach System und Hersteller häufig, aber nicht zwingend immer, ein verkapptes Polyisocyanat. Verkappte Polyisocyanate finden sich generell überall dort, wo eingebrannt werden kann und die Beständigkeit von Polyurethan gefragt ist. Der Ofen begrenzt die Anwendung auf hitzebeständige Werkstücke.

### Reaktion, Temperatur und Sicherheit

Nach dem Entkappen läuft dieselbe Additionsreaktion wie beim 2K-PUR ab (NCO plus OH). Die nötige Temperatur hängt vom Verkappungsmittel, der NCO-Struktur, dem Katalysator und der Objekttemperatur ab (Entkappungstemperatur, siehe L-34); als grobe Größenordnung liegt sie oft im Einbrennbereich um 140–180 °C, ist aber keine feste Kenngröße. Beim Entkappen werden das Blockierungsmittel (etwa Caprolactam) und die reaktiven Isocyanatgruppen frei — die Ofenabluft ist abzusaugen.

### Reaktionsgleichung: Verkappung

```
Additionsreaktion, NCO-Gruppe wird blockiert:
  R–N=C=O + H–X ⇌ R–NH–C(=O)–X   (X-H = Verkappungsmittel)

Die NCO-Funktion wird dabei chemisch maskiert; die genaue Struktur der Bindung hängt vom
   Blocker ab. Vereinfachtes Gleichgewichtsschema – ob und bei welcher Temperatur sich die
   Lage nach links (Entkappung) verschiebt, hängt vom konkreten Blocker, Isocyanattyp,
   Katalysator und Medium ab, nicht von einem einfachen Temperatur-Umschalter (siehe L-34).

Potenzielle NCO-Zahl (analog zum freien NCO-Gehalt, siehe L-26):
  gibt an, wie viel Prozent NCO beim Entkappen frei werden – Grundlage der
   Mischungsrechnung mit dem OH-Bindemittel.
```

**Merksatz**

Verkappen blockiert die NCO-Gruppe für die Lagerung; die Hitze entkappt sie wieder. So wird aus einem 2K-Reaktionspartner ein lagerfähiger 1K-Einbrennhärter — ideal für die Serienlackierung.

**Stichwörter:** verkapptes Polyisocyanat, blockiertes Isocyanat, Verkappungsmittel, Entkappung, 1K-Einbrennlack, potenzielle NCO-Zahl, NCO-Gehalt, Urethan, Coil Coating, Drahtlack, Elektrotauchlack, lagerstabil, Einbrennen
*Quellen: Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur; Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie*

## Übungsblatt Ü-33 — Musterlösungen

**Frage 1** (Verständnis, 8 Punkte)

Wie macht die Verkappung aus einem reaktiven Isocyanat einen lagerfähigen 1K-Härter?

**Ausgangsproblem:** Freies Isocyanat reagiert schon bei Raumtemperatur mit OH-Gruppen — für ein Einkomponentensystem zu reaktiv (siehe L-25).
**Verkappen:** Ein Verkappungsmittel wird an die NCO-Gruppe gebunden und blockiert sie; bei Raumtemperatur ist der Härter dadurch unreaktiv und lagerstabil.
**Entkappen:** Beim Einbrennen spaltet das Verkappungsmittel in der Hitze wieder ab; das freie Isocyanat reagiert dann mit den OH-Gruppen zu Urethan.
**Ergebnis:** Härter und OH-Bindemittel können zusammen in einem Gebinde lagern und erst im Ofen vernetzen.
*Bewertung: Der Ablauf Blockieren – Lagern – Entkappen – Vernetzen wird vollständig und in der richtigen Reihenfolge beschrieben, und der Vorteil (1K, lagerstabil) wird benannt.*

**Frage 2** (Berechnung, 9 Punkte)

Ein verkappter Polyisocyanat-Härter hat einen potenziellen NCO-Gehalt von 14 % (der beim Entkappen frei wird). Berechnen Sie die NCO-Äquivalentmasse. (M(NCO) = 42,02 g/mol)

**Überlegung:** „Potenzieller“ NCO-Gehalt ist der Anteil freier NCO-Gruppen nach dem Entkappen — für die Stöchiometrie rechnet man damit wie mit freiem Isocyanat (siehe L-26).
**Stoffmenge NCO in 100 g:** 14 g / 42,02 g/mol = 0,333 mol, also 0,333 Äq. NCO
**NCO-Äquivalentmasse:** 100 g / 0,333 Äq. = 300 g/Äq.
**Kurzformel:** EW = 4 200 / NCO-% = 4 200 / 14 = 300 g/Äq.
**Antwortsatz:** Auf jedes Mol (potenzieller) NCO-Gruppen kommen rund 300 g Härter.
*Bewertung: Die Äquivalentmasse wird über die Stoffmenge hergeleitet und mit der Kurzformel bestätigt. Dass der potenzielle NCO-Gehalt wie freies Isocyanat gerechnet wird, ist der entscheidende Punkt.*

**Frage 3** **(Anwendung, 7 Punkte)**

Warum wählt man für eine Serienlackierung mit Einbrennofen oft ein verkapptes 1K-System statt eines 2K-PUR?

**1K-Vorteil:** Härter und Bindemittel sind in einem Gebinde — kein Mischen, keine Topfzeit, kein Verschnitt durch angelierte Reste.

**Passt zum Ofen:** Da ohnehin eingebrannt wird, stört die nötige Entkappungstemperatur nicht; sie liefert die Härtung gleich mit.

**Beständigkeit:** Man erhält die Polyurethan-Beständigkeit (hart, elastisch, chemikalien- und wetterbeständig) in einem lagerstabilen Lack.

**Wann 2K:** Ohne Ofen (z. B. Reparatur vor Ort) bleibt das 2K-PUR die Wahl (siehe L-25).

*Bewertung: Der 1K-Vorteil (keine Topfzeit) wird mit der ohnehin vorhandenen Einbrenntemperatur verknüpft und das 2K-System korrekt der ofenlosen Anwendung zugeordnet.*

# L-34 · Verkappungsmittel und Entkappungstemperatur

*Welches Mittel blockiert wie sicher — und wann es wieder frei wird*

**Prüfungsteil 1** · A 8.3 · B 12

Das Verkappungsmittel bestimmt Lagerstabilität und Entkappungstemperatur; klassisch abspaltende Blocker entweichen meist beim Einbrennen, Malonester-Typen vernetzen über einen anderen, nicht abspaltenden Mechanismus.

## Was ein gutes Verkappungsmittel leistet

Ein Verkappungsmittel muss die NCO-Gruppe bei Raumtemperatur sicher blockiert halten (für die Lagerstabilität) und sie beim Einbrennen bei möglichst niedriger Temperatur wieder freigeben (siehe L-33). Beide Anforderungen ziehen in verschiedene Richtungen — die Auswahl ist ein Kompromiss: niedrig entkappend spart Energie, hoch entkappend gibt mehr Lagersicherheit. Es soll außerdem verträglich und möglichst farbstabil sein. Verarbeitet wird der fertig verkappte Härter wie in L-33 beschrieben meist in Xylol, Butylacetat oder aromatenreichen Lösemittelgemischen (Solvesso).

## Die wichtigsten Verkappungsmittel

- ε-Caprolactam und Phenole — hohe Entkappungstemperatur. Caprolactam ist ein zyklisches Amid (Siebenring aus sechs Kohlenstoffatomen und dem Ring-Stickstoff, M = 113,2 g/mol; es ist zugleich das Monomer für Polyamid 6); der Ring-NH addiert reversibel an das Isocyanat. Weil die Amidbindung stabil ist, braucht das Entkappen entsprechend viel Energie — daher die hohe Temperatur.
- Methylethylketoxim (Butanonoxim) — verbreitet, mittlere Temperatur.
- 1,2,4-Triazol und 3,5-Dimethylpyrazol — mittlere Temperatur.
- Malonester (Diethylmalonat) und Acetessigester — niedrige Temperatur.

## Die Entkappungstemperatur

Sie hängt vom Verkappungsmittel, vom Isocyanat, vom Katalysator, von der Heizrate und vom Prüfverfahren ab. Eine universelle Rangliste der Verkappungsmittel gibt es deshalb nicht: Je nach Messverfahren (DSC, TGA, IR, Lackprüfung) nennt die Literatur um 10 bis 30 K auseinanderliegende Werte, und die Reihenfolge zweier benachbarter Blocker kann im konkreten System kippen. Als systemabhängige Orientierungsbereiche — keine Stoffkonstanten — liegt die Entkappungstemperatur etwa bei Malonester und Acetessigester (~110–130 °C) über 3,5-Dimethylpyrazol (~120–140 °C) und 1,2,4-Triazol (~130–150 °C) zu Butanonoxim (~135–160 °C) und Phenolen (~150–160 °C) bis ε-Caprolactam (~160–180 °C). Besonders dicht beieinander liegen Dimethylpyrazol, Triazol und die Oxime. Ein Katalysator — üblich sind Zinn- oder Bismutverbindungen wie Dibutylzinndilaurat (siehe L-116) — kann sie zusätzlich senken; auch die Katalysatormenge beeinflusst sie.

## Emission bedenken

Beim Entkappen entweicht das Verkappungsmittel bei klassisch abspaltenden Blockern meist aus dem Film und belastet die Abluft — es ist ein flüchtiger Bestandteil. Menge und Auswahl sind deshalb auch unter dem Gesichtspunkt der Emission zu sehen (siehe L-168). Manche Verkappungsmittel sind zudem geruchsintensiv oder toxikologisch zu bewerten.

**Merksatz**

Malonat- und Acetessigester-Systeme reagieren anders als die übrigen Verkappungsmittel: Der Blocker spaltet nicht zuerst ab, bevor das Isocyanat mit dem Bindemittel reagiert. Möglich wird das durch die besondere Struktur des Malonesters: Seine beiden Estercarbonyle sind durch die dazwischenliegende, aktivierte Methylengruppe (dort sitzt die Bindung zum Isocyanat) besonders reaktionsbereit für eine Umesterung — die OH-Gruppe des Bindemittels greift direkt am Estercarbonyl an und tauscht die Bindungspartner (umesterungsartiger Austausch) — wobei der Alkohol des Esters, beim Diethylmalonat also Ethanol, frei wird. Dadurch wird kein eigenständiges, flüchtiges Verkappungsmittel frei. Sie brauchen dafür meist einen Katalysator. Die konkrete Emissionssituation bleibt aber auch hier systemabhängig und ist im Einzelfall zu prüfen — „emissionsarm“ pauschal für jeden Malonester-Typ zu behaupten wäre zu weitgehend.

### Reaktionsgleichung: Entkappung (verkapptes Isocyanat)

```
Allgemein (thermisches Gleichgewicht):
blockiertes Isocyanat ⇌ Isocyanat + Blockierungsmittel

Beispiel (Alkohol als Blocker):
R–NH–CO–O–R′ →(Δ) R–N=C=O + R′–OH

Das freigesetzte Isocyanat reagiert dann mit dem OH-Bindemittel zum
Urethan (siehe L-25). Die Entkappungstemperatur hängt vom
Blockierungsmittel ab.
```

**Merksatz**

Niedrige Entkappungstemperatur spart Energie, hohe erhöht die Lagerstabilität. Klassisch abspaltende Verkappungsmittel entweichen beim Einbrennen; Malonester- und Acetessigester-Typen tauschen ihre Bindungspartner stattdessen direkt mit der OH-Gruppe (ähnlich einer Umesterung), wodurch die klassische Blocker-Emission entfällt — die tatsächliche Emissionsbilanz bleibt aber systemabhängig. Die Auswahl richtet sich nach Einbrenntemperatur, Lagerstabilität und Emission.

**Stichwörter:** Verkappungsmittel, Entkappungstemperatur, Caprolactam, Butanonoxim, Methylethylketoxim, Phenol, Malonester, Diethylmalonat, Acetessigester, Triazol, Dimethylpyrazol, Umesterung, Emission, emissionsarm
*Quellen: Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur; Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie*

## Übungsblatt Ü-34 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**
Wovon hängt die Entkappungstemperatur ab? Nennen Sie je zwei Verkappungsmittel mit niedriger und mit hoher Entkappungstemperatur.

**Abhängigkeit:** Von der Kombination aus Verkappungsmittel und Isocyanat, zusätzlich von Katalysator und Katalysatormenge sowie von Heizrate und Prüfverfahren — eine universelle Rangliste der Verkappungsmittel gibt es deshalb nicht.
**Niedrige Temperatur:** Malonester (Diethylmalonat) und Acetessigester (Orientierungsbereich etwa 110–130 °C, systemabhängig).
**Hohe Temperatur:** Phenole (etwa 160 °C) und ε-Caprolactam (etwa 170–180 °C).
**Zielkonflikt:** Niedrige Entkappungstemperatur spart Energie, hohe erhöht die Lagerstabilität.
*Bewertung: Die Abhängigkeit von der Kombination wird erkannt und je zwei Beispiele richtig eingeordnet. Der Zielkonflikt Energie gegen Lagerstabilität rundet die Antwort ab.*

**Frage 2** **(Berechnung, 9 Punkte)**

Ein caprolactam-verkapptes Polyisocyanat enthält je 100 g Härter 0,15 mol verkappte NCO-Gruppen. Beim Einbrennen wird je NCO-Gruppe ein Molekül Caprolactam (M = 113 g/mol) frei. Wie viel Caprolactam entweicht je 100 g Härter, und was folgt daraus?

**Gegeben:** 0,15 mol verkappte NCO-Gruppen je 100 g; je Gruppe ein Caprolactam; M = 113 g/mol

**Stoffmenge Caprolactam:** 0,15 mol (eine je NCO-Gruppe)

**Masse:** 0,15 mol · 113 g/mol = 17,0 g je 100 g Härter

**Folge:** Rund 17 % der Härtermasse entweichen beim Einbrennen als Verkappungsmittel — das belastet die Abluft und muss abgeführt/behandelt werden (siehe L-168).

**Antwortsatz:** Je 100 g Härter werden etwa 17 g Caprolactam frei.

*Bewertung: Die Stöchiometrie (ein Caprolactam je NCO-Gruppe) wird richtig angesetzt und die Emissionsfolge quantitativ eingeordnet — nicht nur die Zahl, sondern ihre Bedeutung.*

**Frage 3** **(Anwendung, 7 Punkte)**

Für ein emissionsärmeres Einbrennsystem soll ein Verkappungsmittel gewählt werden. Welches bietet sich an, und warum?

**Wahl:** Ein Malonester (Diethylmalonat).

**Begründung:** Malonester-Systeme reagieren anders: Der Blocker spaltet nicht zuerst ab. Stattdessen greift die OH-Gruppe des Bindemittels direkt am Estercarbonyl des Malonesters an und die Bindungspartner werden umesterungsartig getauscht; frei wird dabei der Esteralkohol (bei Diethylmalonat also Ethanol). Die aktivierte Methylengruppe zwischen den beiden Estercarbonylen senkt nur die nötige Temperatur, sie ist nicht der Angriffsort. Dadurch wird kein eigenständiges, flüchtiges Verkappungsmittel frei.

**Vorteil:** Dadurch ist die Emission gegenüber klassisch abspaltenden Typen wie Caprolactam oder Butanonoxim tendenziell geringer — die tatsächliche Emissionsbilanz bleibt aber systemabhängig und ist zu prüfen.

**Zusatznutzen:** Malonester entkappt zudem bei niedriger Temperatur — das spart Energie.

*Bewertung: Der Malonester wird korrekt gewählt und der abweichende Mechanismus (Transesterifizierung statt Abspaltung) als Grund genannt — mit der richtigen Einschränkung, dass die Emission dadurch geringer, aber nicht pauschal 'emissionsfrei' oder 'emissionsarm' ist.*

# L-35 · Phenolharze — Resole und Novolake

*Selbsthärtend oder auf einen Vernetzer angewiesen*

**Prüfungsteil 2** · A 10 · B 12

Resole können über ihre Methylolgruppen selbsthärten; Novolake benötigen einen zusätzlichen Vernetzer. Phenolharzsysteme ergeben häufig harte und chemikalienbeständige Filme und sind meist stärker gefärbt bzw. vergilbungsanfällig als helle Decklacksysteme.

## Woraus Phenolharze bestehen

Phenolharze entstehen aus Phenol und Formaldehyd. Je nach Mengenverhältnis und Katalyse bilden sich zwei grundverschiedene Typen: Resole und Novolake. Phenolharze gehören zu den ältesten Kunstharzen der Lacktechnik; chemisch entsteht das Harz durch Polykondensation. Sie dienen als Vernetzer und Bindemittel vor allem in Einbrennlacken (siehe L-30).

## Warum ortho und para?

Phenol und Formaldehyd reagieren zunächst zu Methylolphenolen (siehe Reaktionsgleichung unten). Entscheidend ist, wo am Ring das passiert: Die OH-Gruppe des Phenols macht den Ring an den Positionen direkt daneben (ortho) und ihr gegenüber (para) besonders reaktionsfreudig. Deshalb entstehen bevorzugt o- und p-Methylolphenole; bei größerem Formaldehydüberschuss werden auch mehrere Positionen methyloliert. Wie genau der Angriff abläuft, unterscheidet sich je nach Katalyse: Unter saurer Katalyse (Novolak) wird das Formaldehyd zunächst aktiviert und greift den elektronenreichen Ring an; unter basischer Katalyse (Resol) liegt das Phenol als noch reaktionsfreudigeres Phenolat-Ion vor, das seinerseits das Formaldehyd angreift — am Ergebnis (bevorzugt ortho/para) ändert das nichts.

## Resole

Resole werden mit Formaldehyd-Überschuss unter basischer Katalyse hergestellt. Sie enthalten Methylolgruppen und sind selbsthärtend: Beim Einbrennen vernetzen sie über diese Methylolgruppen — ähnlich wie die Aminoharze (siehe L-31). Sie sind allein oder als Vernetzer für andere Bindemittel einsetzbar — ein Beispiel: In EP/PF-Einbrennlacken ist das Epoxidharz das Bindemittel und das Resol der Vernetzer (siehe unten) — lange das Standardsystem für Konservendosen-Innenlacke. Weil das klassische Epoxidharz auf Bisphenol A beruht und BPA für Lebensmittelkontakt in der EU verboten ist (siehe L-28, L-110), wird es dort durch BPA-freie Systeme abgelöst; für Fass-, Rohr- und Behälterbeschichtungen ohne Lebensmittelkontakt bleibt es wichtig. Zum Ablauf: Das Resol liefert die Methylolgruppen, die beim Einbrennen mit den Hydroxylgruppen des Epoxidharzes reagieren. Gelöst werden Resole meist in Alkoholen wie Butanol oder Ethanol, oft zusammen mit dem Epoxidharz-Lösemittel (Xylol, Glykolether, siehe L-28) im Gemisch.

## Novolake

Novolake werden mit Phenol-Überschuss unter saurer Katalyse hergestellt. Sie enthalten praktisch keine freien Methylolgruppen — unter Phenolüberschuss ist der Formaldehyd weitgehend zu Methylenbrücken abreagiert — und härten deshalb nicht von selbst, sondern bleiben schmelzbar — sie brauchen einen Vernetzer, meist Hexamethylentetramin oder ein Resol, das die fehlenden Methylolgruppen liefert.

## Eigenschaften

Phenolharzfilme sind hart, chemikalien- und korrosionsbeständig — aber spröde, dunkel und stark vergilbend. Wegen der Sprödigkeit setzt man sie fast immer in Kombination ein, mit Epoxidharz, Alkydharz oder Öl. Weil sie dunkel sind und vergilben, setzt man sie nur dort ein, wo die Farbe keine Rolle spielt, nicht für helle oder weiße Decklacke. Dafür haften sie gut auf Metall und vertragen hohe Temperaturen; ihre Chemikalienbeständigkeit macht sie im Korrosionsschutz wertvoll.

## Anwendung und EP/PF

Resole werden meist direkt eingesetzt, häufig kombiniert mit Epoxidharz (EP/PF, siehe oben): Diese Kombination ist eine wichtige, verbreitete Wahl für Can-Coating, Fass- und Rohrbeschichtungen sowie Drahtlacke; dabei liefert das Epoxid Haftung und Flexibilität, das Phenolharz Härte und Beständigkeit. In der Lacktechnik nutzt man Novolake auf zwei Wegen: als phenolischen Härter für Epoxidsysteme (siehe L-93) oder — nach Umsetzung mit Epichlorhydrin — als hochfunktionelles Epoxidharz (Epoxidnovolak, siehe L-28) — die vielen phenolischen OH-Gruppen des Novolaks ergeben dabei besonders viele Epoxidgruppen je Molekül und damit eine hohe Vernetzungsdichte, wichtig für chemisch stark beanspruchte Beschichtungen wie Rohrinnenbeschichtungen und Industrieböden. Das entstehende Epoxidnovolak-System wird wie andere 2K-Epoxidharzlacke meist in Xylol oder Glykolethern gelöst (siehe L-28).

## Reaktionsgleichung: EP/PF-Vernetzung

Bei phenolischen OH-Gruppen läuft die Vernetzung als nucleophile Ringöffnung des Epoxidrings ab – die phenolische OH-Gruppe greift am endständigen Epoxid-Kohlenstoff ($CH_2$) an:

$$EP{-}O{-}CH_2{-}CH(-O-)CH_2 + PF{-}OH \rightarrow EP{-}O{-}CH_2{-}CH(OH){-}CH_2{-}O{-}PF$$

Es entsteht eine neue C–O-Bindung und eine β-Hydroxyether-Struktur. Bei Resolharzen kommen zusätzlich Methylol-Kondensationen hinzu (siehe oben). Da beide Harze mehrere funktionelle Gruppen tragen, entsteht mit steigendem Umsatz ein verzweigtes, schließlich dreidimensionales Netzwerk.

## Einbrennen und Sicherheit

Als Einbrennharze vernetzen Resole in der Hitze, Novolake mit ihrem Vernetzer ebenfalls: Bis etwa 150 °C entsteht die noch schmelzbare B-Stufe, die vollvernetzte C-Stufe erst bei Temperaturen um 200 °C — EP/PF-Innenlacke für Fässer und Behälter werden deshalb bei rund 200 °C Objekttemperatur eingebrannt. Dabei werden Wasser und Formaldehyd abgespalten; beim Novolak zerfällt das Hexamethylentetramin zusätzlich zu Formaldehyd und Ammoniak, der dabei als alkalischer Katalysator wirkt. Die Ofenabluft muss abgesaugt werden. Formaldehyd ist harmonisiert eingestuft als krebserzeugend Kategorie 1B (H350) und als vermutlich keimzellmutagen Kategorie 2 (H341); der Arbeitsplatzgrenzwert nach TRGS 900 beträgt 0,3 ml/m³ (0,37 mg/m³), Spitzenbegrenzung Überschreitungsfaktor 2, Kategorie I. Auch das Phenol selbst ist ätzend, akut toxisch und hautresorptiv (AGW 2 ml/m³ = 8 mg/m³); freies Restmonomer ist bei Phenolharzen der Regelfall. Dieselbe Formaldehyd-Problematik tritt bei den Aminoharzen auf (siehe L-31), die beim Einbrennen ebenfalls Formaldehyd abspalten.

## Reaktionsgleichung: Phenol-Formaldehyd-Kondensation

Methylolierung des Phenols:

$$Phenol + CH_2O \rightarrow Methylolphenol\ (o\text{-}/p\text{-}CH_2OH)$$

Kondensation zum Netzwerk (Ar = aromatischer Rest, hier ein substituierter Phenolring) – zwei Brückentypen:

$$\text{Methylenbrücke:} \quad Ar{-}CH_2OH + H{-}Ar \rightarrow Ar{-}CH_2{-}Ar + H_2O$$

$$\text{Methylenetherbrücke:} \quad Ar{-}CH_2OH + HO{-}CH_2{-}Ar \rightarrow Ar{-}CH_2{-}O{-}CH_2{-}Ar + H_2O$$

(Unter bestimmten Bedingungen können Etherbrücken beim Erhitzen Formaldehyd freisetzen und teilweise in Methylenbrücken übergehen – das ist aber kein allgemeingültiger, immer ablaufender Mechanismus; die Phenolharz-Nachkondensation ist insgesamt komplexer, als das vereinfachte Schema zeigt.)

Resol: basisch, Formaldehyd-Überschuss – Novolak: sauer, Phenol-Überschuss.

(Vereinfachtes Reaktionsmodell.)

### Merksatz

Resol = mit Methylolgruppen, selbsthärtend; Novolak = ohne Methylolgruppen, braucht Vernetzer. Beide sind hart und beständig, aber dunkel — daher innen und im Korrosionsschutz, nicht als heller Decklack.

**Stichwörter:** Phenolharz, Resol, Novolak, Phenol, Formaldehyd, Methylolgruppe, selbsthärtend, Hexamethylentetramin, Vernetzer, EP/PF, Epoxidnovolak, Can-Coating, Konservendosen-Innenlack, Korrosionsschutz, vergilbend, elektrophile Substitution (saure Katalyse), Phenolat-Ion (basische Katalyse), Arylrest, ortho/para

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur*

## Übungsblatt Ü-35 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Worin unterscheiden sich Resole und Novolake in Herstellung und Härtung?

**Resol — Herstellung:** Aus Phenol und Formaldehyd mit Formaldehyd-Überschuss unter basischer Katalyse; enthält Methylolgruppen.

**Resol — Härtung:** Selbsthärtend: vernetzt beim Einbrennen über seine Methylolgruppen (ähnlich Aminoharzen, siehe L-31).

**Novolak — Herstellung:** Mit Phenol-Überschuss unter saurer Katalyse; enthält keine Methylolgruppen.

**Novolak — Härtung:** Härtet nicht von selbst; braucht einen Vernetzer (Hexamethylentetramin oder ein Resol).

*Bewertung: Beide Typen werden nach Herstellung (Überschuss, Katalyse) und Härtung (selbsthärtend vs. Vernetzer nötig) klar getrennt. Der Bezug zu den Methylolgruppen ist der Kernpunkt.*

**Frage 2** **(Berechnung, 9 Punkte)**

Ein EP/PF-Innenlack für Stahlfässer wird aus Epoxidharz und Phenolharz im Festkörperverhältnis 80 : 20 gebaut. Für 6,0 kg Klarlack mit 40 % Festkörper: Wie viel EP- und wie viel PF-Festkörper sind enthalten?

**Gegeben:** Lack = 6,0 kg; Festkörper = 40 %; EP : PF = 80 : 20

**Schritt 1 — Festkörper gesamt:** 6,0 kg · 0,40 = 2,4 kg

**Schritt 2 — Epoxidharz:** 2,4 kg · 0,80 = 1,92 kg

**Schritt 3 — Phenolharz:** 2,4 kg · 0,20 = 0,48 kg

**Antwortsatz:** Der Lack enthält 1,92 kg EP- und 0,48 kg PF-Festkörper; die restlichen 3,6 kg sind Lösemittel.

*Bewertung: Erst wird der Gesamtfestkörper bestimmt, dann im Verhältnis aufgeteilt. Dass der Rest Lösemittel ist, wird erkannt — die EP/PF-Kombination ist als Standard für Fass- und Behälterinnenlacke eingeordnet.*

**Frage 3** **(Anwendung, 7 Punkte)**

Warum eignet sich ein Phenolharz(-Epoxid)-Lack für einen Fass-Innenlack, aber nicht für einen weißen Außendecklack?

**Für das Fass:** Phenolharzfilme sind sehr chemikalien- und korrosionsbeständig — genau das braucht die Fassinnenseite gegen das Füllgut. Die Farbe ist innen unwichtig.

**Gegen den Decklack:** Phenolharze sind dunkel und stark vergilbend; ein weißer, heller Decklack ließe sich damit nicht sauber und lichtbeständig herstellen.

**Regel:** Phenolharze setzt man dort ein, wo Beständigkeit zählt und Farbe egal ist.

**Alternative außen:** Für helle Außendecklacke nimmt man wetter- und vergilbungsbeständige Systeme wie Acrylat/Melamin (siehe L-32).

*Bewertung: Die Eignung wird an Chemikalien-/Korrosionsbeständigkeit festgemacht und die Untauglichkeit außen an Farbe und Vergilbung — mit einer passenden Alternative. Das ist die geforderte Abwägung.*

# L-36 · Selbstvernetzende Einbrennlacke

*Bindemittel und Vernetzer in einem Molekül*

**Prüfungsteil 1** · A 8.3 · B 12

Ein selbstvernetzendes Bindemittel trägt die reaktiven Gruppen selbst und vernetzt beim Einbrennen mit sich — ohne separaten Vernetzer.

## Was Selbstvernetzung bedeutet

Bei der Fremdvernetzung liefert ein eigener Vernetzer die reaktiven Gruppen — etwa ein Aminoharz (siehe L-31). Ein selbstvernetzendes Bindemittel trägt dagegen die reaktiven Gruppen selbst und vernetzt beim Einbrennen mit sich, ohne zweite Komponente. Selbstvernetzung beschreibt also die Herkunft der Reaktivgruppen (keine getrennte Vernetzerkomponente), nicht eine einzige bestimmte Reaktion. Verarbeitet werden solche selbstvernetzenden Bindemittel je nach Harztyp meist in Xylol, Butanol oder Butylglykol — vollständig lösemittelfrei sind sie in der Regel nicht.

## Selbstvernetzende Acrylatharze

Sie entstehen als Copolymere aus Acryl- und Methacrylestern mit reaktiven Comonomeren, zum Beispiel methyloliertem Acrylamid. Solche Filme sind hart und chemikalienbeständig; die Reaktivität steckt fest im Copolymer. Wichtig ist, zwei Schritte zu unterscheiden: Der Harzhersteller baut das Grundpolymer per radikalischer Copolymerisation auf — das ist Herstellungschemie des Harzes, nicht die Vernetzung im Lack. Beim Einbrennen des fertigen Lacks reagieren dann die Methylolgruppen der Ketten miteinander (Kondensation) — anders als bei den strahlungshärtenden Acrylaten (radikalische Vernetzung über C=C-Doppelbindungen, siehe L-24) ist die Vernetzung hier also eine thermische Kondensation, keine radikalische.

## Reaktionsgleichung: Methylolacrylamid-Vernetzung

```
Grundbausteine der Copolymerisation:
Acrylat: CH2=CH–COOR   Methacrylat: CH2=C(CH3)–COOR

Reaktives Comonomer (N-Methylolacrylamid):
CH2=CH–CO–NH–CH2OH

Die C=C-Doppelbindung wird bei der radikalischen Copolymerisation verbraucht; die
   Methylolgruppe –CH2OH bleibt als reaktive Seitengruppe im fertigen Polymer erhalten.

Vernetzung beim Einbrennen (Kondensation, vgl. Aminoharz L-31):
Polymer–CH2OH + HOCH2–Polymer → Polymer–CH2–O–CH2–Polymer + H2O
```

## Selbstvernetzende Polyester

Auch gesättigte Polyester lassen sich mit eingebauten reaktiven Gruppen selbstvernetzend gestalten — meist über einen gezielten Überschuss an freien OH- und COOH-Gruppen im selben Harz, die beim Einbrennen bei hohen Temperaturen (grobe Richtgröße etwa 200–230 °C ohne Katalysator, mit geeignetem Veresterungskatalysator niedriger) direkt miteinander verestern und dabei Wasser abspalten — chemisch dieselbe Veresterungsreaktion wie beim Harzaufbau selbst, nur jetzt zwischen bereits fertigen Kettenenden. Sie quervernetzen beim Einbrennen zu zähen, temperaturbeständigen Filmen und werden in verschiedenen spezialisierten Einbrennsystemen eingesetzt — typisch, aber nicht ausschließlich in Draht- und Elektroisolierlacken.

## Vorteil und Grenze

Der Vorteil: keine zweite Komponente, kein Mischen, einfache und lagerstabile Handhabung. Die Grenze: Härte und Flexibilität lassen sich nicht mehr über das Mischungsverhältnis einstellen — sie stecken bereits im Harz und werden bei dessen Aufbau festgelegt. Ein weiterer Grund, warum man 1K-Selbstvernetzung nicht grundsätzlich bevorzugt: Anders als 2K-PUR (siehe L-25), das auch bei Raumtemperatur härtet, braucht ein selbstvernetzendes Einbrennsystem wie die übrigen Einbrennlacke immer den Ofen (siehe L-30) — für hitzeempfindliche Werkstücke, Vor-Ort-Arbeiten oder Reparaturlackierung fällt es damit aus, ganz unabhängig vom Eigenschaftsprofil.

### Anwendung

Typisch sind Drahtlacke, Coil-Coating und Elektroisolierlacke — überall dort, wo ein robustes, einfach handhabbares Einbrennsystem gefragt ist und die Filmeigenschaften nicht laufend variiert werden müssen. Auch in der Serienlackierung sind sie wegen der einfachen Handhabung beliebt.

**Merksatz**

Selbstvernetzung heißt: Das Bindemittel trägt die reaktiven Gruppen selbst und braucht keine getrennte Vernetzerkomponente. Beim Einbrennen reagieren die Gruppen miteinander — mit fest eingebauten Eigenschaften, ideal für robuste Serienanwendungen.

**Stichwörter:** selbstvernetzend, Selbstvernetzung, Fremdvernetzung, Acrylatharz, Methacrylester, methyloliertes Acrylamid, Comonomer, gesättigter Polyester, Veresterung, Drahtlack, Elektroisolierlack, Coil Coating, Einbrennlack, Einkomponentensystem

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur*

## Übungsblatt Ü-36 — Musterlösungen

**Frage 1** (Verständnis, 8 Punkte)

Was bedeutet Selbstvernetzung, und worin unterscheidet sie sich von der Fremdvernetzung mit einem Aminoharz?

**Selbstvernetzung:** Das Bindemittel trägt die komplementären reaktiven Gruppen selbst und vernetzt beim Einbrennen mit sich — ohne zweite Komponente.
**Fremdvernetzung:** Ein eigener Vernetzer (z. B. Aminoharz, siehe L-31) liefert die reaktiven Gruppen; er wird zum Bindemittel zugegeben.
**Unterschied:** Selbstvernetzend gibt es nur ein reaktives Harz; fremdvernetzend gibt es Harz plus Vernetzer, deren Verhältnis man einstellen kann.
**Gemeinsam:** Beide härten beim Einbrennen chemisch zum Netzwerk.
*Bewertung: Der Kernunterschied — reaktive Gruppen im Harz selbst vs. in einem separaten Vernetzer — wird klar herausgearbeitet und die Gemeinsamkeit (chemische Härtung beim Einbrennen) erkannt.*

**Frage 2** (Berechnung, 8 Punkte)

Ein selbstvernetzender Klarlack hat 50 % Festkörper. Wie viel Lack wird für 3,0 kg Trockenfilm benötigt, und wie viel Lösemittel entweicht dabei?

**Gegeben:** Festkörper = 50 %; gewünschter Trockenfilm = 3,0 kg
**Ansatz:** Lackmenge = Trockenfilm / Festkörpergehalt
**Rechnung:** 3,0 kg / 0,50 = 6,0 kg
**Antwortsatz:** Es werden 6,0 kg Lack benötigt; davon sind 3,0 kg Lösemittel.
*Bewertung: Aus Trockenfilm und Festkörpergehalt wird die Lackmenge korrekt berechnet, und der Lösemittelanteil wird richtig erkannt.*

**Frage 3** (Anwendung, 7 Punkte)

Nennen Sie je einen Vorteil und eine Grenze eines selbstvernetzenden Systems gegenüber einem Fremdvernetzungslack.

**Vorteil:** Nur eine reaktive Komponente — kein Mischen, keine zweite Komponente, einfache und lagerstabile Handhabung.
**Grenze:** Härte und Flexibilität lassen sich nicht mehr über das Mischungsverhältnis einstellen; sie stecken bereits im Harz.
**Folge:** Braucht man ein maßgeschneidertes Eigenschaftsprofil, ist die Fremdvernetzung flexibler.
**Einordnung:** Selbstvernetzend eignet sich für robuste Standardanwendungen wie Draht- und Coil-Lacke.
*Bewertung: Vorteil (Einfachheit) und Grenze (weniger Einstellbarkeit) werden korrekt gegenübergestellt und mit einer passenden Anwendungseinordnung verbunden.*

# L-37 · Silicon-Einbrennlacke

*Das Si-O-Si-Gerüst für Hitze- und Wetterbeständigkeit*

**Wahlqualifikation** · B 12

Siliconharze tragen ein anorganisches Silicium-Sauerstoff-Gerüst — das macht sie außergewöhnlich hitze- und wetterbeständig.

## Was Siliconharze sind

Siliconharze sind Bindemittel mit einem Silicium-Sauerstoff-Gerüst (Si-O-Si, Siloxan). Anders als die organischen Harze mit Kohlenstoffgerüst haben sie ein anorganisches Rückgrat, an dessen Silicium-Atomen organische Substituenten (z. B. Methyl- oder Phenylgruppen) sitzen — diese bestimmen Verträglichkeit, Flexibilität und Reaktivität mit, während das Si–O–Si-Rückgrat sie außergewöhnlich hitze- und wetterbeständig macht. Sie entstehen durch Hydrolyse von Chlorsilanen (z. B. $R–SiCl_3$ oder $R_2SiCl_2$, R = Methyl- oder Phenylrest) mit Wasser zu Silanolen ($R–Si(OH)_3$), die anschließend unter Wasserabspaltung zu Si-O-Si-Oligomeren kondensieren — dem eigentlichen Siliconharz. Ein typisches Beispiel ist ein Methylphenylsiloxanharz (gemischte Methyl- und Phenylsubstituenten am Si-Gerüst), wie es in hitzebeständigen Industrielacken eingesetzt wird. Auch Mischformen aus Silicon und organischem Harz sind verbreitet. Man erkennt sie am Silicium im Gerüst.

## Methylharz oder Phenylharz

Welche organischen Gruppen am Silicium sitzen, entscheidet über die Eigenschaften. Man unterscheidet deshalb zwei Grundtypen.

Methylsiliconharze tragen überwiegend Methylgruppen. Sie sind hart und wenig thermoplastisch, dauerhaft hitzebeständig bis etwa 180 bis 200 °C und haften gut auf mineralischen Untergründen. Dafür lassen sie sich nur schlecht pigmentieren und sind mit organischen Harzen kaum verträglich. Geliefert werden sie meist als Lösung mit rund 50 % Festkörper.

Phenylsiliconharze enthalten mindestens etwa 20 % Phenylgruppen. Die sperrigen Phenylringe wirken als innere Weichmacher: Sie erhöhen die Dauerhitzebeständigkeit auf etwa 200 bis 250 °C, verbessern die Verträglichkeit mit organischen Polymeren deutlich und machen das Harz besser pigmentierbar und glänzender. Der Festkörper der Lieferform liegt höher, bis etwa 80 %.

Für die Praxis wichtig: Lösungen von Methyl- und Phenylharzen sind untereinander unverträglich und lassen sich nicht mischen.

## Wie sie härten

Die Harze tragen reaktive Gruppen (etwa Alkoxysilan- oder Silanolgruppen). Alkoxysilangruppen hydrolysieren zunächst zu Silanolgruppen — das dafür verbrauchte Wasser stammt dabei meist aus der Luftfeuchtigkeit, die in den Film diffundiert — und kondensieren anschließend unter Abspaltung von Wasser oder Alkohol zum Si-O-Si-Netzwerk (Formel siehe unten, „Reaktionsgleichung: Silicon-Kondensation“). Je nach System läuft die Vernetzung überwiegend thermisch beim Einbrennen ab oder wird zusätzlich durch Luftfeuchte unterstützt — nicht jedes Silicon-Einbrennsystem härtet primär feuchtigkeitsgetrieben. Das entstehende Netzwerk ist thermisch sehr stabil.

## Rein oder kombiniert

Reine Siliconharze sind sehr hitzebeständig, aber teuer und eher spröde. Zudem sind reine Siliconharze mit rein organischen Harzen wegen ihrer unterschiedlichen Polarität oft nur begrenzt verträglich — einfaches Zusammenmischen kann zu Trübung, Entmischung oder ungleichmäßigen Filmen führen. Deshalb kombiniert man sie meist gezielt mit organischen Harzen wie Alkyd, Polyester oder Acrylat (siliconmodifiziert, siehe L-17), um Verträglichkeit, Verarbeitung und Kosten zu verbessern. Gelöst werden Siliconharze und siliconmodifizierte Systeme meist in Xylol oder Toluol, teils im Gemisch mit Testbenzin für die organische Komponente. Tendenziell steigt die Hitzebeständigkeit mit dem Siliconanteil, aber nicht linear und nicht universell — Harzstruktur, Vernetzungsgrad und Formulierung wirken mit; ein höherer Siliconanteil bedeutet in jedem Fall einen teureren Lack.

## Abmischung oder chemische Kopplung?

„Siliconmodifiziert“ bedeutet nicht automatisch, dass Silicon- und organisches Harz nur zusammengemischt sind. Bei manchen Systemen — dokumentiert etwa für Silicon-Alkyde — werden OH-Gruppen des Alkydharzes während der Harzherstellung gezielt mit hydrolysierten, silanolhaltigen Siliconkomponenten umgesetzt: Alkyd–OH + HO–Si≡ → Alkyd–O–Si≡ + H2O. Dabei entsteht eine echte chemische Bindung zwischen den beiden Strukturelementen, keine bloße physikalische Mischung. Nach demselben Prinzip gibt es auch Silicon-Epoxid-Kombinationen: Sie verbinden die Haftung und Chemikalienbeständigkeit des Epoxids mit der Hitze- und Wetterbeständigkeit des Silicons — wieder entweder als reine Abmischung oder mit chemischer Kopplung zwischen den OH- bzw. Epoxidgruppen des einen und den Silanolgruppen des anderen Harzes.

## Eigenschaften

Die Stärken sind sehr gute Hitzebeständigkeit und Wetterbeständigkeit. Wie hoch die Temperaturbeständigkeit tatsächlich reicht, ist immer eine Eigenschaft des gesamten Beschichtungssystems — sie hängt von Siliconstruktur, organischem Anteil, Vernetzungsgrad, Pigmentierung, Schichtdicke und Atmosphäre ab (etwa oxidierende Luft gegenüber sauerstoffarmer Umgebung, die die Beständigkeit bei Hitze unterschiedlich stark beansprucht), nicht allein vom Siliconanteil. Als grobe Orientierung: siliconmodifizierte organische Harze (Silicon-Polyester, Silicon-Alkyd) liegen oft im Bereich von etwa 150 bis 250 °C, bestimmte pigmentierte Hochtemperatursysteme auf Basis reiner Siliconharze mit hitzebeständigen Pigmenten (Aluminium, Keramik) können deutlich darüber liegen, bis in den Bereich von 500 bis 600 °C — das gilt aber nur für diese speziellen Systeme unter genau festgelegten Prüfbedingungen, nicht für reine Siliconharze schlechthin; feste Grenzwerte sind das ohnehin nicht. Die Schwächen sind Sprödigkeit und geringe Dehnbarkeit: Das stark vernetzte, anorganische Si-O-Si-Gerüst ergibt einen harten, aber wenig flexiblen Film; Elastizität und Haftung bringt erst die Kombination mit einem organischen Harz. Die weichen, gummiartigen Silicone sind dagegen die linearen Elastomere, nicht die Lack-Siliconharze. Dazu kommt ein höherer Preis als bei rein organischen Bindemitteln. Sie vergilben kaum und kreiden wenig, was der Wetterbeständigkeit zugutekommt.

## Wie weit die Hitzebeständigkeit reicht

Wie hoch ein Hitzeschutzsystem tatsächlich gehen kann, entscheidet weniger das Bindemittel allein als die Pigmentierung. Daraus ergibt sich eine gut merkbare Leiter:

- bis etwa 350 °C: hitzebeständige anorganische Buntpigmente wie Eisenoxidrot, Chromoxidgrün, Cobaltblau, Nickeltitangelb, Spinellschwarz und Titandioxid — hier sind farbige Lacke möglich
- bis etwa 450 °C: Grundierungen mit Zinkstaub
- bis etwa 650 °C: lamellare Pigmente, Aluminium und Glimmer

Oberhalb von etwa 350 °C brennen die organischen Gruppen ab. Zurück bleibt ein anorganisches, zusammengesintertes Gerüst: hart und chemikalienfest, aber spröde. Dabei hilft ausgerechnet der Phenylanteil — die abbrennenden Phenylgruppen hinterlassen kleine Hohlräume, die das Gerüst flexibilisieren. Deshalb übersteht eine solche Beschichtung selbst bei 600 °C wiederholtes Abschrecken mit kaltem Wasser, ohne zu reißen.

## Schichtdicke und Einbrennbedingungen

Beim Einbrennen entsteht aus der Kondensation Alkohol, der aus dem Film entweichen muss. Für hitzebeständige Siliconharzlacke gilt deshalb eine Obergrenze von etwa 30 µm Trockenschichtdicke. Wird dicker appliziert, bleibt der Alkohol im Film und es entstehen Blasen. Über eine höhere Pigmentvolumenkonzentration wird der Film durchlässiger, dadurch lässt sich die Blasengrenze schrittweise anheben.

Für die vollständige Härtung ohne Katalysator gelten Richtwerte, an denen sich gut ablesen lässt, dass Zeit und Temperatur gegeneinander austauschbar sind:

- Phenylmethyl-Siliconharz: 45 min bei 250 °C
- Siliconpolyester: 30 min bei 200 °C, 15 min bei 250 °C oder 10 min bei 270 °C

Katalysatoren wie Säuren, Zinn- oder Titanverbindungen senken diese Werte, sind aber nur begrenzt einsetzbar: Zu viel Katalysator verschlechtert die Lagerstabilität und kann zu Vergilbung und Versprödung führen. Verbindlich ist immer das technische Merkblatt des Herstellers.

## Siliconpolyester — die dekorative Variante

Siliconpolyester sind die dekorative Variante für Dauertemperaturen bis etwa 250 °C. Sie sind wenig thermoplastisch, halten ihre Härte also auch oberhalb von 150 °C — wichtig überall dort, wo heiße Oberflächen zugleich mechanisch beansprucht werden. Bei Haushaltsgeräten kommt ein eigenes Prüfkriterium dazu: die Detergensbeständigkeit, also der Widerstand gegen tensidhaltige, stark alkalische Reiniger. Typische Teile sind Toaster, Heizlüfter, Herde, Töpfe und Pfannen.

Bei der Verarbeitung sind polare Lösemittel wie Ketone und Ester zu bevorzugen. Rein aliphatische Lösemittel sind ungeeignet, Alkohole nur im Gemisch — und dann nur leichtflüchtige, denn hochsiedende Alkohole verschlechtern die Vergilbungsbeständigkeit des Films deutlich.

## Anwendung

Eingesetzt werden sie als hitzebeständige Lacke — reine, pigmentierte Hochtemperatursysteme direkt auf Metall bei Auspuffanlagen, Motorbauteilen, Grills, Kaminen und Industrieöfen, wo die höchsten Temperaturen auftreten — und als siliconmodifizierte Fassaden- und Wetterschutzlacke (Silicon-Polyester, Silicon-Alkyd) für Fassadenbeschichtungen, Coil-Coating an Gebäudeverkleidungen und stark bewitterte Stahlkonstruktionen, wo organische Bindemittel der Bewitterung nicht mehr standhalten. Für farbige Systeme werden meist siliconmodifizierte Harze bevorzugt; reine Siliconharze bleiben Spezialanwendungen wie den genannten Hochtemperaturfällen vorbehalten.

### Reaktionsgleichung: Silicon-Kondensation

```
Zwei Silanolgruppen (oder eine Silanol- und eine Alkoxygruppe) verbinden sich unter
   Abspaltung eines kleinen Moleküls zu einer neuen Si–O–Si-Bindung – das baut das Netzwerk
   Schritt für Schritt an jeder reaktiven Gruppe im Harz auf:

Silanol-Kondensation zum Si–O–Si-Netzwerk:
≡Si–OH + HO–Si≡ → ≡Si–O–Si≡ + H₂O

Aus Alkoxysilan zunächst Hydrolyse, dann Kondensation:
≡Si–OR + H₂O → ≡Si–OH + R–OH, danach Kondensation wie oben.

Silanol kann auch direkt mit einer Alkoxygruppe kondensieren:
≡Si–OH + RO–Si≡ → ≡Si–O–Si≡ + R–OH
```

**Merksatz**

Das anorganische Si-O-Si-Gerüst macht Siliconharze hitze- und wetterbeständig. Rein sind sie teuer und spröde, als Modifizierung organischer Harze ein guter Kompromiss — für Hitzeschutz und Fassaden.

**Stichwörter:** Siliconharz, Siloxan, Si-O-Si, Silicium, Chlorsilan, Alkoxysilan, Silanol, hitzebeständig, wetterbeständig, siliconmodifiziert, Silicon-Epoxid, Auspufflack, Fassadenlack, anorganisches Gerüst, Hitzeschutz, Methylsiliconharz, Phenylsiliconharz, Siliconpolyester, Detergensbeständigkeit, Trockenschichtdicke, Einbrennbedingungen
*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur; Heilen/Herrwerth, Silicone Resins and their Combinations*

## Übungsblatt Ü-37 — Musterlösungen

**Frage 1** (Verständnis, 8 Punkte)
Warum sind Siliconharze so hitze- und wetterbeständig, und warum kombiniert man sie oft mit organischen Harzen?

**Grund der Beständigkeit:** Sie haben ein anorganisches Silicium-Sauerstoff-Gerüst (Si-O-Si) statt eines Kohlenstoffgerüsts; dieses ist gegen Hitze und Bewitterung viel widerstandsfähiger.
**Härtung:** Reaktive Gruppen (Alkoxysilan/Silanol) vernetzen beim Einbrennen bzw. mit Feuchte zu einem Si-O-Si-Netzwerk.
**Warum kombiniert:** Reine Siliconharze sind teuer und spröde; die Kombination mit Alkyd, Polyester oder Acrylat verbessert Verarbeitung und Kosten.
**Preis der Kombination:** Dafür sinkt die Hitzebeständigkeit gegenüber dem reinen Siliconharz etwas.
*Bewertung: Die Beständigkeit wird auf das anorganische Si-O-Si-Gerüst zurückgeführt und die Kombination mit organischen Harzen als Kompromiss zwischen Beständigkeit, Preis und Verarbeitung erklärt.*

**Frage 2** (Berechnung, 8 Punkte)
Ein siliconmodifiziertes Bindemittel soll 30 % Siliconharz (Festkörper) enthalten. Für 4,0 kg Bindemittel-Festkörper: Wie viel Siliconharz-Festkörper wird gebraucht?

**Gegeben:** Bindemittel-Festkörper = 4,0 kg; Siliconanteil = 30 %
**Rechnung:** 4,0 kg · 0,30 = 1,2 kg
**Rest:** Die übrigen 70 % = 2,8 kg sind das organische Harz.
**Antwortsatz:** Es werden 1,2 kg Siliconharz-Festkörper gebraucht.
*Bewertung: Der Siliconanteil wird korrekt aus dem Bindemittel-Festkörper berechnet und der organische Rest richtig ergänzt.*

**Frage 3** (Anwendung, 7 Punkte)
Für einen Hitzeschutzlack an einer Auspuffanlage soll ein Bindemittel gewählt werden. Welches, und warum kein gewöhnliches Alkyd- oder Acrylatharz?

**Wahl:** Ein Siliconharz (oder ein stark siliconmodifiziertes Harz).
**Begründung:** Das anorganische Si-O-Si-Gerüst hält die hohen Temperaturen am Auspuff aus.
**Warum nicht organisch:** Alkyd- oder Acrylatharze mit Kohlenstoffgerüst würden bei diesen Temperaturen verkohlen bzw. zersetzt — sie sind nicht hitzebeständig genug.
**Abwägung:** Der höhere Preis und die Sprödigkeit des reinen Siliconharzes sind für diesen Zweck vertretbar; Elastizität und Haftung brächte erst die Kombination mit einem organischen Harz.
*Bewertung: Das Siliconharz wird mit der Hitzebeständigkeit begründet und die Untauglichkeit organischer Harze an deren Kohlenstoffgerüst festgemacht. Die Preis/Härte-Abwägung wird fair genannt.*

Kapitel 3

# Pigmente, Füllstoffe und Additive

# L-38 · Überlackierbarkeit und Ausbluten

*Wenn ein Pigment in den Decklack wandert*

**Prüfungsteil 2** · A 10 · B 14

Ausbluten ist die Migration eines löslichen Farbmittels bzw. eines löslichen Bestandteils aus einer unteren Schicht in die darüber aufgebrachte Beschichtung; treibende Kraft ist ein Konzentrationsgefälle. Beherrscht wird es über die Wahl nicht blutender Farbmittel und — als kausal stärkste Maßnahme — über eine geeignete Sperrschicht.

## Das Problem Ausbluten

Manche Farbmittel sind im Lösemittel des Decklacks leicht löslich. Beim Überlackieren wandern sie aus dem Untergrund in den frisch aufgebrachten Decklack und verfärben ihn. Diesen Vorgang nennt man Ausbluten (englisch bleeding). Sichtbar wird er als Verfärbung oder Fleckenbildung im Decklack. Betroffen sind nicht nur lösliche Pigmentanteile: Ebenso können Farbstoffe, Hilfsstoffe oder lösliche Bestandteile aus Altbeschichtungen migrieren — deshalb spricht man fachlich allgemeiner von der Migration eines löslichen Farbmittels bzw. Bestandteils aus der unteren Schicht.

## Der klassische Fall Toluidinrot

Ein bekanntes Beispiel ist Toluidinrot (C.I. Pigment Red 3, C.I. 12120), ein Monoazo-Rotpigment: Es blutet aus einem roten Grundlack in einen weißen Decklack und färbt ihn rosa. Ob ein Decklack einen Grundlack ohne Verfärbung überdeckt, prüft man mit einem Überlackiertest: Grundlack auf eine Prüfkarte oder ein Blech auftragen und vollständig durchtrocknen lassen; eine Hälfte der Fläche mit dem weißen Decklack überlackieren, die andere als Referenz frei lassen; nach Durchtrocknung, nach 24 Stunden und nach Wärmelagerung (etwa 24 h bei 50 °C) den Farbunterschied zur Referenz beurteilen — visuell oder farbmetrisch als Farbabstand ΔE (siehe L-163). Toluidinrot ist günstig und farbstark, blutet aber leicht — ein Beispiel dafür, dass ein preiswertes Pigment lacktechnisch teuer werden kann.

## Wovon es abhängt

- Vom Lösemittel des Decklacks — stärker lösende Lösemittel begünstigen das Ausbluten in der Tendenz; entscheidend sind aber die Löslichkeit des Farbmittels im Decklacksystem, die Diffusionsgeschwindigkeit, die Quellung des Untergrunds und das Zusammenspiel dieser Größen.
- Von der Temperatur — höhere Temperatur beschleunigt Diffusion sowie Löse- und Quellvorgänge meist deutlich; die konkrete Wirkung ist systemabhängig.
- Vom Farbmittel selbst — manche bluten stark, andere gar nicht.
- Vom Bindemittel — seine Löslichkeit und Quellung beeinflussen, wie mobil das Farbmittel wird.
- Vom Schichtaufbau — Grundierung, Sperrschichten und Schichtdicke bestimmen den Transportweg.
- Von der Kontaktzeit — je länger der Film nass bzw. quellfähig bleibt, desto mehr Stoff kann migrieren.

## Gegenmaßnahmen

Man wählt nicht blutende, unlösliche Farbmittel; setzt eine geeignete Sperr- bzw. isolierende Zwischenschicht ein; oder nimmt einen Decklack mit schwächer lösendem Lösemittelgemisch — es kommt auf die Lösekraft an, nicht auf die Lösemittelmenge; ein wasserverdünnbarer Decklack über einem lösemittelhaltigen Grundlack löst das Problem oft ganz. Auch eine niedrigere Applikations- und Trocknungstemperatur verringert die migrierte Menge. Und man verkürzt die Kontaktzeit: Ein schneller ablüftendes Lösemittelgemisch lässt dem Farbmittel weniger Zeit zum Wandern. Gegenläufig wirkt dabei die Temperatur — sie beschleunigt zwar die Migration, verkürzt aber die Nassphase; forciert getrocknet wird deshalb nur so warm, wie es zum Verkürzen der Nassphase nötig ist, und zwei dünne Aufträge sind hier besser als ein dicker nasser. Ein dickerer, gut deckender Decklack kann die sichtbare Verfärbung zwar verringern (optische Maskierung), stoppt die Diffusion aber nicht automatisch — eine echte Sperrwirkung erfordert eine geeignete Barriere- bzw. Zwischenschicht oder ein kompatibles Gesamtsystem. Soll Migration sicher verhindert werden, ist die Sperrschicht deshalb die kausal stärkste Maßnahme. Welche Maßnahme passt, hängt von Untergrund, Decklack und Anforderung ab.

## Abgrenzung: Weichmacher-Migration und Wachsausblühen

Nicht jede Wanderung eines Stoffs in eine andere Schicht ist Ausbluten im engeren Sinn. Weichmacher-Migration folgt demselben Grundprinzip wie das Ausbluten — Diffusion entlang eines Konzentrationsgefälles, meist aus weichmacherhaltigen Systemen (z. B. PVC-Plastisolen) in eine angrenzende Schicht; hier wandert aber kein Farbmittel, sondern der Weichmacher selbst, was die Nachbarschicht erweichen, kleben oder trüben lassen kann. Wachsausblühen (englisch blooming) ist dagegen ein anderer Mechanismus — nicht zu verwechseln mit dem Ausschwimmen von Pigmenten (siehe L-54): Ein im Bindemittel nur begrenzt verträgliches Wachsadditiv (z. B. für Kratzfestigkeit oder Slip zugesetzt) reichert sich wegen seiner geringen Oberflächenenergie an der eigenen Filmoberfläche an und bildet dort einen dünnen, meist wachsartig-matten Belag — kein Konzentrationsgefälle in eine zweite Schicht hinein, sondern eine Entmischung an der eigenen Oberfläche. Höhere Applikations- oder Trocknungstemperatur verstärkt dieses Ausblühen: In der Wärme löst sich mehr Wachs im Bindemittel und wird beweglicher; beim Abkühlen sinkt die Löslichkeit wieder, und das überschüssige Wachs scheidet sich an der Oberfläche ab. Genau das kann die Zwischenhaftung einer nachfolgenden Schicht empfindlich stören, da der ausgeblühte Wachsfilm wie eine Trennschicht wirkt — ein in der Praxis bekanntes Problem bei zu warm applizierten oder getrockneten wachshaltigen Systemen.

## Was eine Sperrschicht leistet

Eine Sperr- bzw. Isolierschicht muss vor allem eines: Sie darf sich beim nachfolgenden Überlackieren nicht selbst wieder anlösen oder quellen lassen — sonst transportiert sie den migrierenden Stoff einfach weiter. Formuliert wird sie deshalb meist mit einem Bindemittel, das gegenüber dem Lösemittel des Decklacks möglichst unempfindlich ist, etwa ein Schellackgrund (siehe L-15) oder ein dicht vernetztes 2K-System. Häufig verstärkt man die Sperrwirkung zusätzlich physikalisch durch plättchenförmige Barrierepigmente wie Aluminium oder Glimmer, die den Diffusionsweg durch den Film verlängern (Tortuositätseffekt, siehe L-40) — chemische Beständigkeit des Bindemittels und physikalische Barriere durch die Pigmentform wirken so zusammen.

## Warum das die Lacklaborantin angeht

Überlackierbarkeit ist eine typische Prüf- und Formulierfrage: Der Überlackiertest (siehe oben) gehört zur Beurteilung jedes Beschichtungsaufbaus (siehe L-65). Wer Pigmentauswahl und Lösemittel schon in der Entwicklung darauf abstimmt, vermeidet Reklamationen im Feld — auffälliges Ausbluten ist ein klassischer Reklamationsgrund.

## Prinzip: Löslichkeit und Diffusion

```
Ausbluten ist keine chemische Reaktion, sondern Stofftransport durch gerichtete Diffusion:

  Farbmittel (Grundlack) ⇌ gelöst
        │  löst sich zusätzlich im Lösemittel des Decklacks
        ▼
  Diffusion in den nassen Decklackfilm → Verfärbung

Vereinfacht gilt das 1. Ficksche Gesetz in einer Raumrichtung: J = −D · Δc/Δx − der
   Stoffstrom J ist umso größer, je stärker sich die Konzentration c über die Strecke x
   ändert (Δc/Δx ist das Konzentrationsgefälle) und je größer der Diffusionskoeffizient D
   ist. Das Minuszeichen sagt: Der Stoff wandert von hoher zu niedriger Konzentration. Im
   realen Lackfilm kommen Löslichkeit, Quellung und Polymerstruktur hinzu. Die Wanderung
   läuft, solange ein Konzentrationsgefälle UND ausreichende Löslichkeit bestehen; sie
   verstärkt sich in der Tendenz mit stärker lösendem Lösemittel, höherer Temperatur und
   längerer Kontaktzeit vor der Durchtrocknung.
```

**Merksatz**

Ausbluten ist Migration eines löslichen Farbmittels in den Decklack — Stofftransport, keine chemische Reaktion. Abhängig von Löslichkeit, Lösemittel, Temperatur, Quellung und Kontaktzeit. Beherrscht wird es über die Wahl nicht blutender Farbmittel, eine Sperrschicht und eine kurze Kontaktzeit; mehr Schichtdicke maskiert nur, sie stoppt die Diffusion nicht. Ergiebigkeit und Materialbedarf (A = 10 · VFK / TSD, dazu der Auftragswirkungsgrad) gehören nicht hierher — sie sind in L-68 gesammelt.

**Stichwörter:** Überlackierbarkeit, Ausbluten, bleeding, Toluidinrot, Migration, Diffusion, Konzentrationsgefälle, Quellung, Überlackiertest, Decklack, Grundlack, Deckvermögen, Sperrschicht, isolierende Zwischenschicht, Weichmacher-Migration, Wachsausblühen, Blooming, Lösemittel, nicht blutendes Farbmittel, Reklamation
*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur*

# Übungsblatt Ü-38 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Was versteht man unter Ausbluten, und wovon hängt es ab?

**Ausbluten:** Die Migration eines löslichen Farbmittels bzw. eines löslichen Bestandteils aus einer unteren Schicht in die darüber aufgebrachte Beschichtung, die dadurch verfärbt wird (englisch bleeding). Es handelt sich um Stofftransport durch Diffusion, nicht um eine chemische Reaktion.

**Abhängigkeit 1 — Löslichkeit und Lösemittel:** Entscheidend ist die Löslichkeit des Farbmittels im jeweiligen System; stärker lösende Decklack-Lösemittel begünstigen das Ausbluten in der Tendenz.

**Abhängigkeit 2 — Temperatur:** Höhere Temperatur beschleunigt Diffusion sowie Löse- und Quellvorgänge meist deutlich.

**Abhängigkeit 3 — Farbmittel:** Das Farbmittel selbst: manche bluten stark, andere gar nicht.

**Abhängigkeit 4 — Bindemittel und Schichtaufbau:** Löslichkeit und Quellung des Bindemittels bestimmen die Mobilität; Grundierung, Sperrschichten und Schichtdicke bestimmen den Transportweg. Auch die Kontaktzeit vor der Durchtrocknung wirkt sich aus.

*Bewertung: Ausbluten wird korrekt als Migration eines löslichen Farbmittels (Stofftransport, keine Reaktion) definiert; mindestens drei Einflussgrößen einschließlich Bindemittel und Schichtaufbau werden genannt.*

**Frage 2** **(Berechnung, 9 Punkte)**

Ein deckender weißer Decklack (Volumenfestkörper 50 %) wird mit 40 µm Trockenschichtdicke auf 250 m² gespritzt (Auftragswirkungsgrad 65 %). Berechnen Sie Ergiebigkeit, theoretischen Materialbedarf und praktischen Bedarf. Erklären Sie anschließend, warum eine dickere Deckschicht die Sichtbarkeit des Ausblutens verringern kann, warum sie die Diffusion aber nicht zwingend stoppt und warum eine Sperrschicht wirksamer sein kann.

**Ergiebigkeit:** A = 10 · VFK / TSD = 10 · 50 / 40 = 12,5 m²/l

**Materialbedarf (theoretisch):** V = 250 m² / 12,5 m²/l = 20,0 l — das ist der Bedarf ohne Auftragsverluste.

**Praktischer Bedarf:** Mit dem vorgegebenen Auftragswirkungsgrad von 65 % beim Spritzen: 20,0 l / 0,65 ≈ 30,8 l.

**Antwortsatz:** Ergiebigkeit 12,5 m²/l; theoretischer Materialbedarf 20,0 l, beim Spritzen mit 65 % Auftragswirkungsgrad rund 30,8 l.

**Warum mehr Schichtdicke hilft:** Eine dickere, gut deckende Schicht enthält mehr Weißpigment über der Störstelle und verdünnt das eingewanderte Farbmittel auf ein größeres Filmvolumen — die Verfärbung wird an der Oberfläche weniger sichtbar. Zusätzlich verlängert sich der Diffusionsweg.

**Warum das die Diffusion nicht stoppt:** Es handelt sich nur um optische Maskierung und eine Verlangsamung. Solange Konzentrationsgefälle und Löslichkeit bestehen, wandert das Farbmittel weiter — die Verfärbung kann zeitverzögert trotzdem auftreten.

**Warum eine Sperrschicht wirksamer ist:** Eine geeignete Sperr-/Zwischenschicht setzt an der Ursache an: Sie bietet dem Farbmittel kein geeignetes Löse- bzw. Diffusionsmedium und unterbricht damit den Transportweg selbst, statt ihn nur zu verlängern.

*Bewertung: Die Ergiebigkeitsformel wird korrekt angewandt und der Materialbedarf daraus abgeleitet; dass 20,0 l der theoretische Wert ohne Auftragsverluste sind, muss erkennbar sein. Die Antwort unterscheidet außerdem sauber zwischen optischer Maskierung durch Schichtdicke und echter Sperrwirkung durch eine Barriereschicht.*

**Frage 3** **(Anwendung, 7 Punkte)**

Ein weißer Decklack über einem mit Toluidinrot pigmentierten Grundlack verfärbt sich rosa. Nennen und begründen Sie zwei Gegenmaßnahmen.

**Maßnahme 1 — Farbmittel:** Im Grundlack ein nicht blutendes, unlösliches Pigment statt Toluidinrot verwenden — dann steht kein lösliches Farbmittel für die Migration zur Verfügung.

**Maßnahme 2 — Sperrschicht:** Eine geeignete isolierende Zwischenschicht einsetzen, die den Transportweg unterbricht. Das ist die kausal stärkste Maßnahme, wenn die Migration sicher verhindert werden soll.

**Ergänzung:** Zusätzlich einen Decklack mit schwächer lösendem Lösemittelgemisch wählen — es kommt auf die Lösekraft an, nicht auf die Lösemittelmenge. Mehr Schichtdicke allein maskiert die Verfärbung nur, sie stoppt die Diffusion nicht.

**Kernpunkt:** Man setzt an der Ursache (lösliches Farbmittel) oder am Transportweg (Lösemittel, Sperrschicht) an — nicht nur an der optischen Wahrnehmung.

*Bewertung: Zwei wirksame Gegenmaßnahmen werden genannt und an Ursache bzw. Transportweg begründet — nicht nur aufgezählt, sondern erklärt, warum sie wirken.*

# L-39 · Pigmente und Füllstoffe

*Einteilung der Farbmittel und die Pigmentvolumenkonzentration*

**Prüfungsteil 1** · A 10 · A 8.4

Pigmente sind unlöslich und geben Farbe oder Funktion, Füllstoffe geben Volumen und Eigenschaften — die PVK gibt an, welchen Volumenanteil Pigment und Füllstoff am gesamten nichtflüchtigen Anteil des Films (Pigment + Füllstoff + Bindemittel-Festkörper) haben.

## Systematik der Farbmittel

Farbmittel ist der genormte Oberbegriff für Pigmente und Farbstoffe zusammen (siehe DIN EN ISO 4618, vgl. L-01) — keine umgangssprachliche Bezeichnung, sondern ein fester Fachbegriff.

- Anorganische Farbmittel: natürliche und synthetische anorganische Pigmente.
- Organische Farbmittel: Pigmente (unlöslich) und Farbstoffe (löslich).

Füllstoffe gehören ausdrücklich nicht dazu, auch wenn sie optische Eigenschaften beeinflussen und in speziellen Fällen die Deckfähigkeit mitbestimmen können (siehe L-40).

Synthetische anorganische Pigmente lassen sich weiter in Weiß-, Schwarz-, Bunt- und Glanzpigmente unterteilen. Glanzpigmente sind meist anisometrisch aufgebaut — ihre Teilchen sind also nicht kugelig (isometrisch), sondern länglich oder plättchenförmig. Genau diese Form richtet sich beim Trocknen parallel zur Oberfläche aus und erzeugt so den metallischen Glanz bzw. den Perlmutteffekt. Beispiele sind Metalleffekt- und Perlglanzpigmente.

## Definitionen

Ein Pigment ist eine aus Teilchen bestehende, im Anwendungsmedium praktisch unlösliche Substanz, die dekorativ als Farbmittel oder funktional wegen ihrer korrosionshemmenden oder anderer besonderer Eigenschaften verwendet wird. Ein Füllstoff ist eine meist pulverförmige, im Anwendungsmedium praktisch unlösliche Substanz mit allenfalls geringer farbgebender Wirkung, eingesetzt zur Vergrößerung des Volumens, zur Erzielung technischer Eigenschaften wie Abrieb- oder Steinschlagbeständigkeit und zur Beeinflussung optischer Eigenschaften. In speziellen Fällen wie Dispersionsfarben werden Füllstoffe ähnlich wie Weißpigmente zur Erhöhung der Deckfähigkeit eingesetzt.

## Wichtige Pigmente und Füllstoffe

Wichtige Pigmente im Lack:

- Titandioxid ($TiO_2$) — das wichtigste Weißpigment; es besitzt — abhängig von Pigmenttyp, Partikelgröße, Dispergierung und Formulierung — ein sehr hohes Deckvermögen.
- Ruß (Carbon Black) — das wichtigste Schwarzpigment.
- Eisenoxidpigmente (rot, gelb, braun, schwarz) — die wichtigsten anorganischen Buntpigmente: günstig und wetterfest.

Wichtige Füllstoffe:

- Calciumcarbonat (Kreide/Calcit) — gehört zu den wichtigsten und sehr häufig eingesetzten Füllstoffen, insbesondere in vielen Bauten- und Industriebeschichtungen.
- Talkum (Magnesiumsilicat) — plättchenförmig, verbessert Schleifbarkeit und Barrierewirkung.
- Kaolin (China Clay) und Baryt (Bariumsulfat) — weitere wichtige Füllstoffe: Kaolin trägt je nach Formulierung zur Mattierung bei, ist aber kein reines Mattierungsmittel (siehe L-40); Baryt sorgt vor allem für hohe Dichte und Chemikalienbeständigkeit.

## Organische oder anorganische Pigmente?

Bei der Pigmentwahl stehen sich zwei Gruppen mit deutlich unterschiedlichem Profil gegenüber.

Anorganische Pigmente sind Metalloxide, -sulfide und Mischoxide. Ihre Farbpalette ist begrenzter und die Farbtöne wirken stumpfer, dafür sind sie licht-, wetter- und temperaturbeständig — hitzebeständige Typen werden auch in Email, Keramik und Baustoffen eingesetzt, wo weit höhere Temperaturen auftreten, als ein Lackfilm je erreicht. Viele von ihnen decken gut und sind vergleichsweise günstig. Ältere Vertreter wie Cadmium- und Bleichromatpigmente sind heute allerdings stark beschränkt und für Neuentwicklungen ohne Bedeutung (siehe L-41).

Organische Pigmente sind unlösliche Verbindungen aus denselben Stoffklassen wie die Farbstoffe. Sie liefern klarere, brillantere Farbtöne und eine höhere Farbstärke, sind teils transparent und werden deshalb für Druckfarben, Effektlacke und das Einfärben von Kunststoffen gebraucht. Dafür sind sie deutlich teurer, und ihre Temperaturbeständigkeit ist begrenzt — als grobe Orientierung wird oft ein Bereich um 200 °C genannt, der je nach Klasse und Typ aber erheblich abweichen kann.

In der Praxis kombiniert man beide: ein anorganisches Pigment für Deckvermögen und Beständigkeit, ein organisches für Brillanz und Farbstärke im Farbton. Die Klassen der organischen Pigmente, ihre Bezeichnung nach Colour Index und ihr Verhalten beim Dispergieren behandelt L-42.

## Welcher Farbton kommt aus welcher Gruppe?

Warum die Aufteilung überhaupt so verläuft, entscheidet der Brechungsindex. Anorganische Pigmente liegen deutlich über dem des Bindemittels, streuen das Licht stark und decken deshalb gut. Organische Pigmente liegen nahe am Bindemittel, streuen kaum und wirken transparent bis schwach deckend (siehe L-44). Daraus folgt die Grundregel: Deckvermögen kommt in der Regel von anorganischen Pigmenten, Brillanz und Farbstärke von organischen.

Nach Farbtonbereichen sieht die Aufteilung in der Praxis so aus:
• Weiß — ausschließlich anorganisch. Titandioxid ist wegen seines hohen Brechungsindex alternativlos; ein organisches Weißpigment gibt es nicht.
• Schwarz — überwiegend Ruß, daneben Eisenoxidschwarz.
• Gelb und Orange — anorganisch: Eisenoxidgelb (erdig und stumpf, dafür sehr wetterfest, deckend und günstig) sowie Bismutvanadat (PY 184), das einen für ein anorganisches Pigment ungewöhnlich reinen, grünstichigen Gelbton mit hervorragendem Deckvermögen und sehr guter Wetterechtheit liefert und deshalb Bleichromat und Cadmiumgelb ersetzt hat; oberhalb von etwa pH 12 ist es allerdings nicht alkalistabil. Organisch: Azo- und Benzimidazolon-Typen sowie DPP-Orange, wenn der Ton satt und brillant sein soll.
• Rot — anorganisch nur Eisenoxidrot, wetterfest und günstig, aber stumpf. Alle satten, brillanten Rottöne kommen organisch: Chinacridon, DPP, Perylen (siehe L-42).
• Blau — anorganisch vor allem Ultramarinblau: günstig, aber säureempfindlich. In der Breite dominiert organisch das Kupferphthalocyanin.
• Grün — anorganisch Chromoxidgrün, ein Chrom(III)-Oxid und damit kein Cr(VI)-Thema: sehr wetterfest und deckend, aber stumpf. Brillante Grüntöne liefert Phthalocyaningrün.
• Violett — praktisch nur organisch, vor allem Chinacridon; anorganische Violettpigmente sind eine Nische.
• Effektfarbtöne — Aluminium- und Perlglanzpigmente sind anorganisch (siehe oben, Systematik der Farbmittel).

Die Kostenfrage folgt derselben Linie: Eisenoxide und Titandioxid sind die günstigen Massenpigmente, die organischen Hochleistungsklassen ein Vielfaches teurer — ein weiterer Grund, deckende Bunttöne aus beiden Gruppen zu kombinieren.

Bei Gelb-, Orange- und Rottönen reicht auch das nicht immer: Dort erreicht man selbst mit mehreren Lagen kein zufriedenstellendes Deckvermögen. Gelöst wird das nicht über den Decklack, sondern über den Untergrund. Ein Grund- oder Zwischenanstrich mit hohem Titandioxid-Anteil übernimmt das Verbergen des Untergrunds, der Decklack nur noch den Farbton. Rein weiß grundiert man dabei nicht: Weiß hellt den Farbton auf, Grau vergraut ihn. Üblich ist ein Grund, der bereits in Richtung des Decklackfarbtons abgetönt ist — ein rötlich getönter Weißgrund unter Rot, ein gelblicher unter Gelb. Gemessen und beurteilt wird das Deckvermögen über das Kontrastverhältnis (siehe L-166).

## Effektpigmente als Rohstoff: Typen und Handhabung

Die Systematik oben spricht von Glanzpigmenten; die heutige Norm nennt sie Effektpigmente. Ihre optische Wirkung im Film — Flop, Interferenz, Ausrichtung — behandelt L-114. Hier geht es um den Rohstoff selbst.

Metalleffektpigmente sind Metallblättchen, weit überwiegend aus Aluminium; daneben gibt es Goldbronzen aus Kupfer und Kupfer-Zink-Legierungen sowie Zinkblättchen. Aluminiumblättchen werden aus Aluminiumpulver in Kugelmühlen flachgewalzt. Die Substanz, die dabei als Mahlhilfsmittel dient, bleibt auf der Oberfläche und bestimmt, wie sich das Pigment später im Film verhält:

• Leafing-Typen (Stearinsäure-Belegung) steigen im nassen Film auf und legen sich knapp unter die Oberfläche — es entsteht eine geschlossene, spiegelnde Metallschicht. Gewünscht ist das bei Silberbronze-, Hitzeschutz- und Dachanstrichen. Ein Decklack haftet auf dieser Schicht nicht zuverlässig; deshalb kommen Leafing-Typen nicht unter einen Klarlack.

• Non-Leafing-Typen (Belegung mit Ölsäure oder anderen ungesättigten Fettsäuren) bleiben im Film gleichmäßig verteilt und lassen sich überlackieren. Der Metallic-Aufbau aus Basislack und Klarlack im Automobilbereich braucht diesen Typ.

Geliefert wird Aluminiumpigment meist als Paste mit etwa zwei Dritteln Metallanteil in Testbenzin, seltener als Pulver oder Granulat. Aluminiumpulver ist staubexplosionsfähig — deshalb sind Pasten im Labor der Regelfall, und Rohstoffgebinde bleiben dicht verschlossen.

Drei Regeln für das Einarbeiten:

• Nicht vermahlen, nur verteilen. Die Plättchen sind dünn und brechen unter Scherung. Gebrochene Plättchen vergrauen den Effekt: Brillanz und Flop gehen verloren und kommen nicht wieder. Perlmühle und hohe Dissolverdrehzahlen scheiden aus. Die Paste wird zuerst mit Lösemittel oder etwas Bindemittel angeteigt, damit die Agglomerate schonend aufgehen, und erst dann bei niedriger Drehzahl untergerührt.

• Zum Anteigen keine Chlorkohlenwasserstoffe verwenden. Aluminium kann mit ihnen heftig reagieren.

• Im Wasserlack entwickelt unbehandeltes Aluminium Wasserstoff: Das Metall reagiert mit dem Wasser, das Gebinde baut Druck auf, und das Gas ist zündfähig. Wasserlacke verlangen deshalb stabilisierte Qualitäten: Aluminiumblättchen, deren Oberfläche passiviert oder mit Siliciumdioxid beziehungsweise Polymer umhüllt ist. Wässrige Ansätze mit Aluminiumpigment werden trotzdem nie gasdicht verschlossen — Herstellerangaben zur Entlüftung beachten.

Perlglanzpigmente sind keine Metallblättchen, sondern durchscheinende Trägerplättchen — meist Glimmer — mit einer dünnen Metalloxidschicht; sie brechen ebenso leicht, entwickeln aber keinen Wasserstoff. Vorsicht bei Interferenzpigmenten: Es gibt sie auch auf Aluminiumträger, und dann gilt die Wasserstoffregel wieder. Ob ein Aluminiumkern vorliegt, steht im technischen Merkblatt, nicht im Namen.

## Ruß — das wichtigste Schwarzpigment

Ruß ist das Schwarzpigment schlechthin und wird deshalb gesondert behandelt.

Gewonnen wird er durch unvollständiges Verbrennen oder Zersetzen von Kohlenwasserstoffen. Drei Verfahren sind für die Lackindustrie von Bedeutung: das Furnace-Verfahren, aus dem der größte Teil der Pigmentruße stammt, das Gasruß-Verfahren mit traditionell den feinsten Typen und das Flammruß-Verfahren mit den gröbsten. Auch die Oberfläche hängt am Verfahren: Beim Gasruß-Verfahren wird sie noch im Prozess oxidiert, das Pigment reagiert deshalb sauer; Furnaceruße reagieren basisch.

Was ein Ruß im Lack leistet, hängt an drei Merkmalen:
• Primärteilchengröße. Je feiner, desto höher die Schwärze im Vollton und desto höher die Farbstärke. Der Unterton kippt dabei mit der Anwendung: In der Weißaufhellung geben feine Ruße bräunliche und grobe Ruße bläuliche Grautöne — im Vollton ist es umgekehrt, dort wirken feine Ruße blaustichig und grobe bräunlich. Ein tiefes, blaustichiges Schwarz verlangt also den feinen Typ, ein neutral-bläuliches Grau eher den groben. Feinheit kostet Dispergieraufwand.
• Struktur. Die Primärteilchen sind zu verzweigten Aggregaten verwachsen; je stärker verzweigt, desto „höher“ die Struktur. Hochstrukturierte Ruße binden mehr Bindemittel, machen die Mahlpaste zäher — und nur mit ihnen lässt sich eine Beschichtung elektrisch ableitfähig einstellen. Ein praktisches Maß für die Struktur ist die Ölaufnahmezahl — gleiches Prinzip wie die Ölzahl in L-40, aber eine eigene Prüfmethode mit eigenen Zahlenwerten.
• Oberflächenchemie. Eine unpolare Rußoberfläche wird von polaren Bindemitteln schlecht benetzt. Für wässrige und polare Systeme werden Ruße deshalb oxidativ nachbehandelt; die sauren Gruppen auf der Oberfläche verbessern Benetzung und Stabilisierung. Der pH-Wert einer Rußaufschlämmung zeigt, ob die Oberfläche sauer ist — sei es vom Verfahren her wie beim Gasruß oder durch Nachbehandlung.

Im Labor ist Ruß das anspruchsvollste Standardpigment: sehr große spezifische Oberfläche (siehe L-44), feste Aggregate, hoher Netz- und Dispergiermittelbedarf. Geliefert wird er als Pulver oder als Perlruß; Perlruß staubt deutlich weniger, braucht aber mehr Energie beim Dispergieren. Pulverruß ist extrem feinteilig, staubt und färbt alles an: Einwiegen unter Absaugung, geschlossen arbeiten, Handschuhe. Wie Carbon Black gesundheitlich einzustufen ist, steht im Sicherheitsdatenblatt des jeweiligen Produkts; für lungengängige Feinstäube gilt in jedem Fall, die Exposition so gering wie möglich zu halten (siehe L-40).

## Pigmentvolumenkonzentration

```
PVK = V(Pigment + Füllstoff) / V(Pigment + Füllstoff + Bindemittel-Festkörper) · 100 %

Volumen jeweils als Masse geteilt durch Dichte.
```

## Warum die PVK zentral ist

Die PVK gibt an, welcher Anteil des Film-Volumens auf Pigment und Füllstoff entfällt und welcher auf den Bindemittel-Festkörper. Dieses Verhältnis beeinflusst maßgeblich Glanz, Deckvermögen, Porigkeit und mechanische Eigenschaften des fertigen Films — ihre Wirkung ist jedoch immer im Zusammenhang mit Pigmenten, Bindemittel und weiterer Formulierung zu betrachten.

## Die kritische PVK (KPVK)

Die kritische PVK (KPVK) ist der Punkt, an dem gerade so viel Bindemittel vorhanden ist, dass alle Hohlräume zwischen den Teilchen vollständig gefüllt sind. Unterhalb der KPVK ist genug Bindemittel da — dichter, glänzender, gut schützender Film. Oberhalb reicht es nicht mehr, es bleibt Luft im Film: Glanz und Beständigkeit fallen ab, die Porosität steigt (matt, kreidend); das Deckvermögen dagegen nimmt zu — die Luftporen streuen zusätzlich Licht (Trockendeckvermögen, siehe L-55). Man rezeptiert deshalb mit bewusstem Abstand zur KPVK; das Verhältnis PVK/KPVK zeigt, wie nah man dran ist. Konzept, Rechenbeispiel und Ölzahl-Abschätzung in L-55 und L-59.

## Größenordnungen

Die spezifische Oberfläche (BET-Oberfläche, gemessen über Gasadsorption) gibt die Oberfläche bezogen auf die Masse an — also in m² je Gramm Substanz; „spezifisch“ heißt hier „je Masseneinheit“, nicht die Gesamtoberfläche einer Charge. Von Pigmenten kann sie bis zu 100 m²/g betragen, bei Ruß und pyrogener Kieselsäure noch weit mehr. Sie ist für Lacklaboranten wichtig: Eine hohe BET-Oberfläche erhöht häufig die zu benetzende Fläche und damit den Bedarf an Bindemittel bzw. Netz-/Dispergiermittel und kann die Dispergierung erschweren. Zudem muss beim Zerteilen der Agglomerate neue Oberfläche geschaffen werden — das kostet Dispergierenergie —, und feinteilige Pigmente reagglomerieren ohne ausreichende Stabilisierung leichter, was Farbton und Glanz verändert (siehe L-44, L-53). Ölzahl (die Leinölmenge je 100 g Pigment bis zur zusammenhängenden, kittartigen Paste — DIN EN ISO 787-5, siehe L-40) und kritische PVK (siehe L-55) hängen jedoch vom gesamten Pigment-/Füllstoff- und Bindemittelsystem ab und sind nicht allein durch die BET-Oberfläche bestimmt. Daraus entsteht die große innere Grenzfläche zwischen Bindemittel und Pigment. Bemerkenswert am Rande: Viele feinteilige Pigmente und Füllstoffe wie Rußpigmente oder pyrogene Kieselsäure liegen mit Durchmessern unter 100 nm im Bereich dessen, was heute Nanopartikel genannt wird — altbekannte Lackrohstoffe unter neuer Überschrift.

**Merksatz**

Farbmittel ist der genormte Oberbegriff für Pigmente und Farbstoffe — Füllstoffe gehören nicht dazu. Pigmente sind im Anwendungsmedium praktisch unlöslich und liegen als Teilchen vor; Füllstoffe geben Volumen und technische Eigenschaften. Deckvermögen kommt in der Regel von anorganischen Pigmenten, Brillanz und Farbstärke von organischen — deshalb wird kombiniert. Effektpigmente werden verteilt, nicht vermahlen; unbehandeltes Aluminium gehört nicht in ein wässriges System. Ruß ist das wichtigste Schwarzpigment und zugleich das am schwersten zu dispergierende. Die PVK setzt das Volumen von Pigment und Füllstoff ins Verhältnis zum Gesamtvolumen der nichtflüchtigen Anteile; ihr Abstand zur kritischen PVK entscheidet über Glanz, Deckvermögen und Beständigkeit.

**Stichwörter:** Farbmittel, Pigment, Farbstoff, Füllstoff, Weißpigment, Buntpigment, Glanzpigment, Effektpigment, anisometrisch, Titandioxid, Deckvermögen, PVK, Pigmentvolumenkonzentration, Dispergieren, spezifische Oberfläche, Nanopartikel, organische Pigmente, anorganische Pigmente, Farbstärke, Temperaturbeständigkeit, Brechungsindex, Eisenoxidpigment, Bismutvanadat, Ultramarinblau, Chromoxidgrün, Farbtonbereich, Metalleffektpigment, Aluminiumpigment, Leafing, Non-Leafing, Perlglanzpigment, Ruß, Furnaceruß, Gasruß, Flammruß, Rußstruktur, Schwärze, Perlruß, Oberflächennachbehandlung, Goldbronze, Staubexplosion
*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur; Ignatowitz, Chemie für Schule und Beruf (Europa-Lehrmittel); DIN EN ISO 4618; DIN EN ISO 787-5*

## Übungsblatt Ü-39 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 7 Punkte)**

Unterscheiden Sie Pigment, Farbstoff und Füllstoff.

**Pigment:** Eine aus Teilchen bestehende, im Anwendungsmedium praktisch unlösliche Substanz. Sie wird dekorativ als Farbmittel oder funktional wegen korrosionshemmender beziehungsweise anderer besonderer Eigenschaften verwendet.

**Farbstoff:** Ebenfalls ein Farbmittel, jedoch im Anwendungsmedium löslich; es handelt sich überwiegend um organische Verbindungen.

**Füllstoff:** Eine meist pulverförmige, im Anwendungsmedium praktisch unlösliche Substanz mit nur geringen farbgebenden Eigenschaften. Eingesetzt zur Vergrößerung des Volumens, zur Erzielung technischer Eigenschaften wie Abrieb- oder Steinschlagbeständigkeit und zur Beeinflussung optischer Eigenschaften.

**Abgrenzung:** Das entscheidende Unterscheidungsmerkmal zwischen Pigment und Farbstoff ist die Löslichkeit, zwischen Pigment und Füllstoff die farbgebende Wirkung. In Sonderfällen wie Dispersionsfarben werden Füllstoffe allerdings ähnlich wie Weißpigmente zur Erhöhung der Deckfähigkeit eingesetzt.

*Bewertung: Die beiden Abgrenzungskriterien werden ausdrücklich benannt. Der genannte Sonderfall zeigt, dass die Grenze zwischen Pigment und Füllstoff in der Praxis fließend ist.*

**Frage 2** **(Berechnung, 9 Punkte)**

Ein weißer Glanzlack enthält 220 g Titandioxid (4,1 g/cm³) und 340 g Bindemittel-Festkörper (1,05 g/cm³). Berechnen Sie die PVK und beurteilen Sie, ob eine unterkritische Pigmentierung vorliegt.

**Volumina:** $V(TiO_2)$ = 220 g / 4,1 g/cm³ = 53,66 cm³ V(Bindemittel) = 340 g / 1,05 g/cm³ = 323,81 cm³

**Gesamtvolumen:** V(gesamt) = 53,66 + 323,81 = 377,47 cm³

**Rechnung:** PVK = 53,66 / 377,47 · 100 % = 14,2 %

**Beurteilung:** Bei unterkritischer Pigmentierung liegt die PVK unterhalb der kritischen PVK; das Bindemittel füllt dann alle Hohlräume zwischen den Pigmentteilchen vollständig aus. Die kritische PVK ist keine feste Zahl — sie hängt von Teilchengröße, -form, Ölzahl und Packungsstruktur des konkreten Systems ab. Mit 14,2 % liegt der Wert aber so deutlich unter jedem realistischen KPVK-Bereich, dass die Pigmentierung sicher unterkritisch ist, unabhängig vom genauen System.

**Antwortsatz:** Die PVK beträgt 14,2 %. Es liegt eine deutlich unterkritische Pigmentierung vor, wie sie für glänzende Beschichtungen erforderlich ist.

*Bewertung: Die Beurteilung erklärt den Begriff der kritischen PVK, statt ihn nur zu verwenden, und stellt den Bezug zum Glanz her.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**

Erläutern Sie, warum eine hohe spezifische Oberfläche des Pigments die Dispergierung erschwert.

**Größenordnung:** Die spezifische Oberfläche von Pigmenten kann bis zu 100 m²/g betragen.

**Folge für die Grenzfläche:** Beim Dispergieren muss die gesamte Pigmentoberfläche vom Bindemittel benetzt werden. Je größer die spezifische Oberfläche, desto größer die zu benetzende Fläche und desto mehr Netz- und Dispergiermittel wird benötigt.

**Energiebedarf:** Zugleich muss beim Zerteilen der Agglomerate neue Oberfläche geschaffen werden, was Energie erfordert. Der Energiebedarf steigt mit der angestrebten Feinheit.

**Stabilität:** Feinteilige Pigmente neigen wegen der großen Oberfläche zudem stärker zur Reagglomeration. Ohne ausreichende Stabilisierung durch Netz- und Dispergiermittel flocken sie wieder aus, was Farbtonverschiebungen und Glanzverlust zur Folge hat.

*Bewertung: Die Antwort behandelt Benetzung, Energieeintrag und Stabilisierung als drei getrennte Aspekte. Der Bezug zu Farbton und Glanz zeigt die praktische Bedeutung.*

# L-40 · Füllstoffe — Typen und Eigenschaften

*Volumen, PVK, Ölzahl und Rheologie — mit Arbeitsschutz bei kristallinem Siliciumdioxid*

**Prüfungsteil 1** · A 8.4

Füllstoffe sind meist weiße, kaum deckende Mineralteilchen; sie geben Volumen, stellen die PVK ein und beeinflussen über Teilchenform, Ölzahl und spezifische Oberfläche auch Rheologie, Mechanik und Barrierewirkung. Quarzhaltige Typen erfordern konsequenten Staubschutz.

## Was Füllstoffe sind

Füllstoffe sind überwiegend anorganische, im Bindemittel praktisch unlösliche Feststoffe mit nur geringem Farb- und Deckvermögen (siehe L-39). Sie beeinflussen gezielt Volumen, Kosten, Rheologie, mechanische Eigenschaften, Oberflächenstruktur, Barrierewirkung und PVK. Ihre Wirkung hängt dabei nicht nur von der chemischen Zusammensetzung ab, sondern ebenso von Partikelgröße, Partikelgrößenverteilung, Teilchenform und Oberflächenchemie.

## Wichtige Füllstofftypen

• Calciumcarbonat ($CaCO_3$, Kreide/Calcit) — Vorteil: günstig, leicht dispergierbar, vielseitig für Volumen, Kosten, Rheologie und mechanische Eigenschaften. Nachteil: säureempfindlich (reagiert z. B. mit saurem Regen), dadurch begrenzte Bewitterungs- und Chemikalienbeständigkeit; für sich genommen mechanisch eher weich.
• Talkum (Magnesiumsilicat, plättchenförmig) — Vorteil: gute Barrierewirkung, Rheologie, Schleifbarkeit. Nachteil: kann Glanz und Deckvermögen mindern; muss frei von faserigen (asbestähnlichen) Verunreinigungen sein.
• Baryt/Schwerspat ($BaSO_4$) — Vorteil: chemisch sehr beständig und säurefest, geringer Bindemittelbedarf, hoher Füllgrad möglich; deshalb in hochwertigen Grundierungen und Füllern. Nachteil: hohe Dichte (rund 4,4 $g/cm^3$) — hohes Gewicht und höhere Kosten je Liter Lack, Neigung zum Absetzen; kaum verstärkende oder rheologische Wirkung.
• Kaolin/China Clay ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$) — Vorteil: plättchenförmig, gute Rheologie und Schleifbarkeit; calciniertes Kaolin streut zusätzlich Licht und kann einen Teil des Titandioxids ersetzen. Nachteil: mindert bei hohem Anteil den Glanz; die mattierende Wirkung hängt stark von der Rezeptur ab.
• Kieselgur (siliciumdioxidreich, hochporös) — Vorteil: starke Mattierung, weil die porösen Teilchen im trocknenden Film eine feine Oberflächenrauheit erzeugen; dieselbe Porosität bedingt die hohe Ölzahl und die große Oberfläche; die hohe Porosität kann daneben auch Feuchtigkeit binden. Nachteil: hoher Bindemittelbedarf treibt die Rezepturkosten und erschwert die Dispergierung; je nach Aufbereitung erhöhtes Gesundheitsrisiko durch kristallines $SiO_2$ (siehe Arbeitssicherheit unten).
• Glimmer (Schichtsilicate, plättchenförmig) — Vorteil: Barrierewirkung, mechanische Verstärkung, geringere Schwindung und dadurch höhere Rissbeständigkeit des Films. Nachteil: mindert häufig den Glanz deutlich, erschwert bei hohem Anteil den Verlauf.
• Quarzmehl (kristallines $SiO_2$) — Vorteil: hohe Härte und Abriebfestigkeit. Nachteil: krebserzeugend bei inhalativer Exposition — konsequenter Arbeitsschutz zwingend (siehe unten); wichtig ist dabei die Abgrenzung zu amorphen Kieselsäuren (z. B. pyrogene Kieselsäure, gefällte Kieselsäure): Deren Siliciumdioxid ist nicht kristallin aufgebaut und gilt arbeitsmedizinisch als deutlich unbedenklicher als kristallines Quarzmehl — beide sind chemisch „$SiO_2$“, aber wegen der unterschiedlichen Struktur nicht gleich zu bewerten.
• Bentonit (Tonmineralgemisch, meist Montmorillonit-reich) — Vorteil: Rheologie, Thixotropie, Sedimentations- und Standfestigkeit. Nachteil: Der Typ muss zum System passen — natürliche Natrium-Bentonite für wässrige Systeme, organisch modifizierte Bentonite (Organoclays) für lösemittelhaltige. Organoclays brauchen einen polaren Aktivator und hohe Scherung; ohne beides bleibt die Wirkung aus oder der Film wird trüb. Bentonite sind außerdem empfindlich gegenüber Formulierungsänderungen. Genau genommen wird Bentonit wegen der geringen Einsatzmenge und der gezielten Wirkung in der Praxis zu den Rheologieadditiven gezählt und nicht zu den Volumen-Füllstoffen (vgl. die Additiv-Definition in L-01). Er wird hier mit aufgeführt, weil er wie die übrigen Füllstoffe ein teilchenförmiges Mineral ist.

## Wie Füllstoffe geordnet werden

Was einen weißen Feststoff zum Füllstoff macht und nicht zum Weißpigment, ist keine Frage der Chemie, sondern der Optik. Üblicherweise zieht man die Grenze bei der Brechzahl: Weißpigmente liegen über 1,7, Füllstoffe im Allgemeinen darunter. Die Norm selbst (DIN EN ISO 18451-1) macht die Zuordnung dagegen von der Anwendung abhängig und nennt keinen festen Brechzahlwert. Weil die Bindemittel selbst um 1,5 liegen, ist der Sprung an der Grenzfläche zum Füllstoff klein — das Licht wird kaum abgelenkt, der Füllstoff verschwindet optisch im Film und deckt nicht. Titandioxid in der Rutil-Modifikation liegt bei rund 2,7 und streut das Licht an jeder Grenzfläche stark; Anatas erreicht nur etwa 2,55 und deckt deshalb schlechter (siehe L-166). Das gilt für Filme unterhalb der kritischen PVK; darüber sitzen Luftgrenzflächen im Film, und dann streut auch ein Füllstoff (siehe L-55). Und es erklärt, warum sich Weißpigment nicht beliebig durch Füllstoff ersetzen lässt.

Nach der Chemie ordnet man Füllstoffe nach der Stoffgruppe — bei den Salzen nach dem Anion:
• Sulfate: Bariumsulfat, als Mineral Schwerspat, als Fällungsprodukt Blanc fixe. Chemisch träge, schwer, geringer Bindemittelbedarf.
• Silicate: Glimmer, Talkum und Kaolin — Schichtsilicate, deshalb plättchenförmig, deshalb barrierewirksam.
• Carbonate: Calciumcarbonat als natürliche Kreide, als gemahlener Kalkstein oder Marmor (Calcit) und als gefälltes Produkt; dazu Dolomit, das Calcium-Magnesium-Carbonat: Es verhält sich wie Calcit, ist aber härter und verträgt Säure etwas besser.
• Oxide, hier vor allem Siliciumdioxid: synthetisch als gefällte und pyrogene Kieselsäure, beide amorph — sie wirken als Mattierungs- und Rheologiemittel und werden im Labor meist zu den Additiven gezählt; natürlich als Quarzmehl (kristallin) oder als naturbelassene Kieselgur (amorph). Kristallin oder amorph ist hier eine Arbeitsschutzfrage (siehe unten) — und calcinierte Kieselgur kann Cristobalit enthalten und zählt dann zu den kristallinen Stäuben.

Bei Carbonaten und Sulfaten gibt es jede Sorte zweimal: als gemahlenes Mineral und als synthetisch gefälltes Produkt. Das gefällte Produkt ist reiner, weißer und gleichmäßiger im Korn, kostet aber ein Vielfaches — Blanc fixe neben Schwerspat zeigt den Unterschied.

Weil Füllstoffe nicht decken sollen, dürfen ihre Teilchen gröber sein als die eines Weißpigments, das auf sein Streuoptimum eingestellt ist (siehe L-44).

## Form bestimmt die Wirkung — aber nicht allein

Die Teilchenform beeinflusst Packung, Orientierung, Rheologie und Barrierewirkung. Annähernd isometrische (kugelige) Teilchen ermöglichen eine kompakte Packung und dienen vor allem der Volumeneinstellung. Plättchenförmige Teilchen wie Talkum, Glimmer oder bestimmte Tonminerale orientieren sich dagegen im Film und verlängern so den Diffusionsweg für Wasser, Sauerstoff und andere Medien (Tortuositätseffekt), was die Barrierewirkung verbessern kann. Wie stark, entscheiden Orientierung und Packung der Plättchen im Film.

## Ölzahl und PVK

Die Ölzahl gibt an, wie viel Leinöl (in g je 100 g Feststoff) man einarbeiten muss, bis aus dem Pulver eine zusammenhängende, kittartige Paste entsteht — bestimmt nach DIN EN ISO 787-5. Sie ist damit ein Maß für den Bindemittelbedarf und weist auf eine große bzw. schwer zugängliche Oberfläche hin. Wichtig: Eine hohe Ölzahl erhöht nicht automatisch die PVK — die PVK ist eine rechnerische Rezepturgröße. Die Ölzahl beeinflusst stattdessen den Bindemittelbedarf und kann damit die kritische PVK (KPVK) des konkreten Systems senken; die tatsächliche PVK rückt dadurch näher an die KPVK heran, und Glanz und Beständigkeit können kippen (siehe L-55). Die KPVK selbst ist keine feste Zahl, sondern hängt von Partikelgröße, Teilchenform, Oberfläche, Ölzahl und Packungsstruktur des jeweiligen Systems ab.

## Spezifische Oberfläche und Dispergierung

Mit steigender spezifischer Oberfläche wächst der Bedarf an Bindemittel, Netz- und Dispergiermittel sowie an Dispergierenergie. Viele Pigmente und Füllstoffe liegen im Bereich einiger bis etwa 100 m²/g; hochdisperse Materialien wie bestimmte Ruße oder pyrogene Kieselsäuren können dagegen mehrere hundert m²/g erreichen und sind entsprechend anspruchsvoller zu dispergieren. Sehr feinteilige Feststoffe besitzen zudem eine hohe Oberflächenenergie und neigen ohne ausreichende Stabilisierung zur Reagglomeration bzw. Flokkulation.

## Rheologie: Warum manche Füllstoffe stark wirken

Feinteilige oder plättchenförmige Füllstoffe können über Partikel-Partikel-Wechselwirkungen und ihre große Oberfläche die Strukturviskosität eines Lackes erhöhen. Tonminerale wie Bentonit können in geeigneten Systemen ausgeprägte thixotrope Strukturen erzeugen und so Sedimentationsstabilität und Standfestigkeit verbessern; die konkrete Wirkung hängt stark von Bindemittel, Lösemittel/Wasser, Oberflächenchemie und Dispergierung ab.

## Arbeitssicherheit: Quarz und kristallines Siliciumdioxid

Bei quarzhaltigen Füllstoffen ist die inhalative Exposition gegenüber alveolengängigem kristallinem Siliciumdioxid (insbesondere Quarz und Cristobalit) zu vermeiden — eine langfristige bzw. hohe Exposition kann schwere Lungenerkrankungen verursachen. Nach TRGS 906 gelten Tätigkeiten mit alveolengängigem kristallinem Siliciumdioxid als krebserzeugend (IARC Gruppe 1). Einen klassischen AGW gibt es nicht; maßgeblich sind der Beurteilungsmaßstab von 0,05 mg/m³ in der alveolengängigen Fraktion und der EU-Grenzwert von 0,1 mg/m³ (A). Zum Vergleich: Der allgemeine Staubgrenzwert nach TRGS 900 liegt bei 1,25 mg/m³ (A) — Quarzfeinstaub ist also rund 25-mal strenger geregelt. Entscheidend ist dabei ausdrücklich die kristalline Struktur, nicht die bloße chemische Formel $SiO_2$: Amorphe Kieselsäuren — etwa pyrogene Kieselsäure oder gefällte Kieselsäure, wie sie als Rheologieadditiv eingesetzt werden (siehe L-23) — besitzen kein geordnetes Kristallgitter und gelten arbeitsmedizinisch als deutlich unbedenklicher als kristallines Quarzmehl oder Cristobalit; sie unterliegen nicht derselben Karzinogenitätseinstufung. Schutzprinzip bei den kristallinen Formen: Staubentwicklung möglichst vermeiden → staubarme Arbeitsverfahren → wirksame technische Absaugung an der Entstehungsstelle → organisatorische Maßnahmen → geeigneter Atemschutz, wenn eine Exposition nicht ausreichend ausgeschlossen werden kann. Bei Kieselgur hängt die tatsächliche Gefährdung vom Gehalt und von der Form des enthaltenen kristallinen $SiO_2$ ab — nicht jede Kieselgur ist gleich zu bewerten: Naturbelassene, ungebrannte Kieselgur besteht überwiegend aus amorphem $SiO_2$ mit nur geringem kristallinen Anteil. Wird sie dagegen kalziniert (insbesondere flussmittelkalziniert), wandelt sich ein erheblicher Teil des amorphen $SiO_2$ in kristallines Cristobalit um — Gehalt an gefährlichem kristallinem $SiO_2$ und Gesundheitsrisiko steigen dadurch deutlich. Auskunft über Aufbereitungsart und tatsächlichen Gehalt gibt das Sicherheitsdatenblatt des konkreten Produkts.

**Merksatz**

Füllstoffe geben nicht nur Volumen: Sie beeinflussen Rheologie, Mechanik, Optik, Barrierewirkung und Kosten. Plättchenförmige Teilchen können über den Tortuositätseffekt die Barrierewirkung verbessern. Hohe Ölzahl bedeutet hohen Bindemittelbedarf und kann die KPVK senken — sie erhöht nicht automatisch die PVK selbst. Bei kristallinem $SiO_2$ steht die Vermeidung von Staubexposition im Vordergrund.

**Stichwörter:** Füllstoff, Calciumcarbonat, Talkum, Baryt, Kaolin, China Clay, Kieselgur, Glimmer, Quarzmehl, Bentonit, Rheologieadditiv, Montmorillonit, Ölzahl, PVK, KPVK, Tortuosität, Quarzfeinstaub, Cristobalit, amorphe Kieselsäure, Schwerspat, Blanc fixe, Dolomit, Schichtsilicat, Brechzahl, gefällte Kieselsäure, Calcit

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur; DIN EN ISO 18451-1; DIN EN ISO 787-5*

## Übungsblatt Ü-40 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Wozu dienen Füllstoffe, und wie beeinflusst ihre Teilchenform die Wirkung? Nennen Sie drei Typen.

**Aufgabe:** Volumen geben und dadurch die PVK einstellen, Kosten senken, Rheologie und Oberflächenstruktur beeinflussen, mechanische Eigenschaften und Barrierewirkung verbessern — bei nur geringem Farb- und Deckvermögen. Manche Typen (Kieselgur, gefällte Kieselsäure) wirken zusätzlich mattierend.

**Form:** Kugelig gibt Volumen; plättchenförmig (Talkum, Glimmer) verbessert Barrierewirkung und mechanische Verstärkung und erhöht dadurch die Rissbeständigkeit des Films.

**Typen:** z. B. Calciumcarbonat, Talkum, Baryt/Schwerspat, Kaolin, Kieselgur, Quarzmehl.

*Bewertung: Aufgabe, Formeinfluss und drei Typen werden korrekt genannt.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**

Wie groß ist das Volumen von 44 g Baryt (Schwerspat) mit einer Dichte von 4,4 g/cm³?

**Formel:** $V = m / \rho$

**Rechnung:** $V = 44\ g / 4{,}4\ g/cm^3 = 10\ cm^3$

**Deutung:** Wegen der hohen Dichte nimmt Baryt trotz hoher Masse wenig Volumen ein — wichtig für die PVK-Rechnung.

*Bewertung: Das Volumen wird korrekt aus Masse und Dichte berechnet und im PVK-Zusammenhang gedeutet.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**

Welche Arbeitsschutzmaßnahme ist beim Umgang mit Quarzmehl und quarzhaltiger Kieselgur nötig, und warum?

**Gefahr:** Nicht die Formel $SiO_2$ entscheidet, sondern Kristallstruktur und Korngröße: Gefährlich ist die alveolengängige Fraktion kristallinen Siliciumdioxids (Quarz, Cristobalit) — nach TRGS 906 gelten solche Tätigkeiten als krebserzeugend. Quarzmehl ist immer kristallin; bei Kieselgur entscheidet die Aufbereitung: naturbelassene, ungebrannte Kieselgur ist überwiegend amorph, kalzinierte enthält erhebliche Cristobalit-Anteile. Welcher Typ vorliegt, sagt das Sicherheitsdatenblatt.

**Maßnahme, in dieser Rangfolge:** 1. Staubentwicklung vermeiden — geschlossene Gebinde, staubarme Einwaageform, Substitution durch amorphe Kieselsäure prüfen. 2. Staubarme Arbeitsverfahren. 3. Wirksame Absaugung an der Entstehungsstelle bzw. Abzug. 4. Organisatorisch: Zutritt begrenzen, feucht reinigen — nie trocken kehren oder ausblasen. 5. Erst wenn eine Exposition dann noch nicht ausgeschlossen ist: partikelfiltrierender Atemschutz.

*Bewertung: Die Gefahr wird an Kristallstruktur und alveolengängiger Korngröße festgemacht — nicht an der Summenformel — und die Unterscheidung zwischen naturbelassener und kalzinierter Kieselgur getroffen. Die Maßnahmen stehen in der richtigen Rangfolge: Vermeidung und Technik vor Organisation, persönlicher Atemschutz zuletzt.*

# L-41 · Korrosionsschutz-Pigmente

*Zinkphosphat statt Blei und Chromat*

**Prüfungsteil 1** · A 9

Korrosionsschutzpigmente wirken über drei unterschiedliche Mechanismen, die moderne Systeme meist kombinieren: aktiv-passivierend (Zinkphosphat), kathodisch-opfernd (Zinkstaub) oder rein physikalisch als Barriere (Eisenglimmer). Zinkphosphat ist dabei kein kathodischer Schutz, sondern gehört zu den wichtigsten aktiv-passivierenden Korrosionsschutzpigmenten und ist in vielen modernen Beschichtungssystemen etabliert; die früher üblichen Blei- und Chromat-Pigmente sind giftig bzw. krebserzeugend und heute stark beschränkt bzw. weitgehend nicht mehr zulässig.

## Drei Grundprinzipien des Korrosionsschutzes

Für Lacklaboranten ist die Unterscheidung von aktivem chemischem Schutz, kathodischem Schutz und Barriereschutz zentral; moderne Beschichtungssysteme kombinieren diese Mechanismen meist. Aktive Pigmente (z. B. Zinkphosphat) beeinflussen die elektrochemischen Korrosionsreaktionen an der Metalloberfläche, Zinkstaub schützt den Stahl als Opferanode, und Barrierematerialien wie Eisenglimmer erschweren rein physikalisch den Transport von Wasser, Sauerstoff und Ionen durch den Film. Wichtig ist dabei die Abgrenzung zwischen den ersten beiden: Aktiver Schutz durch Zinkphosphat ist kein kathodischer Schutz. Zinkphosphat opfert sich nicht wie Zinkstaub, sondern wirkt passivierend — es hemmt die Korrosionsreaktion chemisch an der Metalloberfläche, ohne selbst als unedleres Metall bevorzugt zu korrodieren. Kathodisch, im Sinne einer echten Opferanode, arbeitet unter den hier behandelten Pigmenten nur Zinkstaub.

## Zinkphosphat — der Standard heute

Zinkphosphat (idealisiert $Zn_3(PO_4)_2$) und modifizierte Phosphate gehören zu den wichtigsten chromfreien aktiv-passivierenden Korrosionsschutzpigmenten und sind im Vergleich zu den alten Blei- und Chromatpigmenten deutlich weniger problematisch — sie sind in vielen modernen Beschichtungssystemen etabliert. Unter korrosiven Bedingungen kann das schwerlösliche Pigment in begrenztem Umfang Phosphat-Spezies bereitstellen, die an der Metalloberfläche zu schützenden Reaktionsprodukten beitragen; der genaue Mechanismus hängt von Pigment, Bindemittel, pH-Wert, Feuchteangebot und Untergrund ab, es entsteht also nicht immer eine einzige, einheitlich definierte „Passivierungsschicht“. Die Umweltgefährlichkeit von Zinkphosphat ist zudem stoff- und rezepturabhängig und darf nicht pauschal als ungiftig bezeichnet werden; gelöstes Zink kann aquatisch toxisch wirken.

## Weitere aktive Pigmente

Zinkphosphat wird selten allein eingesetzt: Weil es für sich nur mäßig wirkt, kombiniert man es meist mit Zinkoxid und organischen Inhibitoren. Zinkoxid puffert saure Abbauprodukte ab, hebt den pH-Wert an der Metalloberfläche und bildet in fettsäurehaltigen Bindemitteln Zinkseifen, die den Film verstärken; organische Inhibitoren steigern die Schutzwirkung zusätzlich (Synergie). Beispiele für solche organischen Inhibitoren sind Benzotriazol (klassisch zum Schutz von Kupfer und Kupferlegierungen), organische Phosphonsäuren bzw. deren Salze und Tannin(säure)-Derivate. Sie wirken meist, indem sie an der Metalloberfläche adsorbieren und dort einen dünnen, schwer durchlässigen Schutzfilm bilden, oder indem sie mit Metallionen stabile, schwerlösliche Komplexe bilden, die die Korrosionsreaktion blockieren — je nach Inhibitortyp überwiegt der eine oder der andere Mechanismus. Zinkstaub (kathodischer Schutz, siehe oben) wird in Zinkstaub-Grundierungen genutzt.

## Nicht mehr einsetzbar: Blei- und Chromat-Pigmente

Früher waren Bleimennige ($Pb_3O_4$) sowie Zink- und Bleichromat sehr wirksam. Blei bzw. Bleiverbindungen sind giftig und zusätzlich als fortpflanzungsgefährdend eingestuft, Chromat (Chrom(VI)) ist krebserzeugend; beide sind heute unter REACH beschränkt bzw. zulassungspflichtig und werden praktisch nicht mehr eingesetzt. Dasselbe gilt für Cadmium-Pigmente. Historische Beschichtungen können bei Sanierungsarbeiten weiterhin angetroffen werden und erfordern eine entsprechende Gefährdungsbeurteilung.

## Auswahl heute

Man wählt umweltverträglichere aktive Pigmente wie Zinkphosphat und Zinkstaub und ergänzt sie durch Barriereschutz. Diesen liefern plättchenförmige (lamellare) Pigmente — allen voran Eisenglimmer (Micaceous Iron Oxide, MIO), dazu Aluminium- und Glasflakes: Sie richten sich beim Trocknen parallel zur Oberfläche aus und verlängern so den Weg, den Wasser und Ionen durch den Film nehmen müssen (labyrinthartige Sperrwirkung, Tortuositätseffekt). Eisenglimmer ist das klassische Barriere-Pigment im schweren Korrosionsschutz (Stahlbau, Brücken); es wirkt rein physikalisch und muss das Metall nicht chemisch passivieren (siehe auch L-40). Beim Einarbeiten gilt: Dissolver ja, Perlmühle nein. Eisenglimmer ist trotz des Namens kein Glimmer, sondern plättchenförmiges Eisenoxid — härter als Aluminiumblättchen, aber wer die Plättchen zerbricht, verliert die Sperrwirkung: Die Bruchstücke wirken nur noch matt und rötlich-braun und schützen nicht mehr.

## Reaktionsgleichungen: Korrosion und aktiver Schutz

```
Eisenkorrosion – Anode:
Fe → Fe²⁺ + 2 e⁻

Sauerstoffreduktion – Kathode:
O₂ + 2 H₂O + 4 e⁻ → 4 OH⁻

Erste Rostbildung (vereinfacht):
Fe²⁺ + 2 OH⁻ → Fe(OH)₂ → (weitere Oxidation) → FeOOH und weitere Rostbestandteile

Zinkstaub als Opferanode (unedler als Fe, wird bevorzugt oxidiert):
Zn → Zn²⁺ + 2 e⁻

Zinkoxid neutralisiert saure Abbauprodukte:
ZnO + 2 H⁺ → Zn²⁺ + H₂O

Zinkoxid kann in fettsäurehaltigen Bindemitteln zusätzlich Zinkseifen bilden:
ZnO + 2 RCOOH → Zn(RCOO)₂ + H₂O
```

## Die modernsten Typen

Der Trend geht zu chromat- und zunehmend auch zinkfreien Systemen. Zinkphosphat wird dafür modifiziert und dotiert — etwa als Zink-Aluminium-Phosphat oder Zink-Molybdänphosphat, oft mit Zinkoxid, Molybdat oder Zirkonat kombiniert. Aufgrund der Umweltbewertung bestimmter zinkhaltiger Phosphate und des Trends zu geringerer Umweltbelastung gewinnen zinkfreie bzw. zinkreduzierte Korrosionsschutzpigmente an Bedeutung: Aluminium-Ortho-, -Poly- und -Tripolyphosphate sowie calciummodifizierte Pigmente (Calcium-Ionenaustauscher auf Kieselsäure), die passivierende Ionen langsam freisetzen. In der Entwicklung sind nanoskalige und „smarte“ Pigmente, die Inhibitoren erst bei beginnender Korrosion gezielt (mikroverkapselt) abgeben.

**Merksatz**

Drei Mechanismen, nicht zu verwechseln: Aktiver, passivierender Schutz (Zinkphosphat) hemmt die Korrosionsreaktion chemisch an der Metalloberfläche — Zinkphosphat opfert sich dabei nicht. Kathodischer Schutz (Zinkstaub: $Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2\ e^-$) opfert dagegen tatsächlich das unedlere Zink als Opferanode. Barriereschutz (z. B. Eisenglimmer/MIO) verlängert rein physikalisch den Diffusionsweg. Moderne Systeme kombinieren mehrere Mechanismen. Blei (Mennige), Chromat (Chrom(VI)) und Cadmium sind giftig/krebserzeugend und heute stark beschränkt bzw. nicht mehr zulässig.

**Stichwörter:** Korrosionsschutz, Zinkphosphat, Zinkstaub, Zinkoxid, Zinkseife, Passivierung, aktiv-passivierend, Opferanode, Kathodenschutz, Barriereschutz, Eisenglimmer, MIO, Tortuosität, Bleimennige, Chromat, Chrom(VI), REACH, Inhibitor, Benzotriazol

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur*

## Übungsblatt Ü-41 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Worin unterscheidet sich aktiver Korrosionsschutz vom Barriereschutz? Nennen Sie den heutigen Standard und erklären Sie die Wirkung von Zinkstaub.

**Aktiv vs. Barriere:** Aktive Pigmente passivieren das Metall chemisch; Barriereschutz hält nur Wasser und Ionen fern.

**Standard heute:** Zinkphosphat und modifizierte Phosphate — im Vergleich zu Blei- und Chromatpigmenten deutlich weniger problematisch.

**Zinkstaub:** Wirkt kathodisch: Das unedlere Zink opfert sich und schützt das Eisen (Opferanode).

*Bewertung: Aktiv/Barriere, Zinkphosphat als Standard und der kathodische Zinkstaub-Mechanismus werden korrekt erklärt.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**

Eine Korrosionsschutzgrundierung enthält 15 % Zinkphosphat bezogen auf die Gesamtrezeptur. Wie viel Zinkphosphat ist in einem Ansatz von 500 g enthalten?

**Rechnung:** $m = 500\ g \cdot 15/100 = 75\ g$

**Antwortsatz:** Der Ansatz enthält 75 g Zinkphosphat.

*Bewertung: Die Prozentrechnung ist korrekt.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**

Warum werden Blei- und Chromat-Pigmente nicht mehr eingesetzt, und was verwendet man stattdessen?

**Gefahr:** Blei ist giftig, Chromat (Chrom(VI)) krebserzeugend; beide sind unter REACH beschränkt bzw. zulassungspflichtig und werden praktisch nicht mehr eingesetzt.

**Ersatz:** Zinkphosphat und modifizierte Phosphate sowie — je nach System — Zinkstaub; gegenüber den früher eingesetzten Blei- und Chromatpigmenten deutlich weniger problematisch. Die Umwelt- und Gesundheitsbewertung erfolgt jedoch stoff- und anwendungsbezogen.

*Bewertung: Die Toxizität/Verbotslage und der Ersatz durch Zinkphosphat/Zinkstaub werden korrekt genannt.*

# L-42 · Organische Farbmittel: Farbstoffe und Pigmente

*Chromophor und Auxochrom, die wichtigsten Pigmentklassen, Colour Index*

**Prüfungsteil 1** · A 8.4

Farbmittel sind entweder unlösliche Pigmente oder Farbstoffe, die im Anwendungsmedium molekular gelöst bzw. verteilt vorliegen; die Farbe entsteht aus einem Chromophor im konjugierten Molekülsystem, das ein Auxochrom verschiebt und vertieft. Dieselben Stoffklassen liefern beide — Phthalocyanine, Chinacridone, DPP, Perylene und Azoverbindungen sind die wichtigsten organischen Pigmente im Lack, benannt nach dem Colour Index.

## Pigment oder Farbstoff

Farbmittel teilt man in Pigmente und Farbstoffe. Pigmente sind im Anwendungsmedium unlöslich und liegen als Teilchen vor (siehe L-39). Farbstoffe liegen dagegen im Anwendungsmedium molekular verteilt vor. Auf den Zusatz „im Anwendungsmedium“ kommt es an: Dieselbe Substanz kann in einem Bindemittel gelöst sein und in einem anderen als Feststoff vorliegen. Gelöste Farbstoffe ergeben brillante, transparente Farbtöne, sind aber meist weniger licht- und wetterecht als Pigmente.

## Chromophor und Auxochrom

Die Farbigkeit eines Farbstoffs beruht auf dem Chromophor, einer Gruppe mit beweglichen (delokalisierten) Elektronen, die sichtbares Licht absorbiert — etwa die Azo-Gruppe (–N=N–); die genaue Absorptionslage hängt vom gesamten konjugierten System ab, nicht vom Chromophor allein. Ein Auxochrom (wörtlich „Farbvermehrer“) ist dagegen eine Atomgruppe, die für sich allein kein sichtbares Licht absorbiert: Sie trägt ein freies Elektronenpaar, das sie als Elektronendonor in das konjugierte System des Chromophors einspeist. Dadurch verschiebt und vertieft sie dessen Absorption (meist zu längeren Wellenlängen, bathochromer Effekt) und beeinflusst zusätzlich die Löslichkeit. Typische Auxochrome sind –OH, –$NH_2$, –NHR, –$NR_2$ und –OR. Davon zu unterscheiden sind elektronenziehende Gruppen wie –$NO_2$ und –$SO_3H$ (Antiauxochrome); –$SO_3H$ dient im Farbstoff vor allem als löslichkeitsvermittelnde Gruppe. Auf die Bindung an das Substrat wirkt das Auxochrom dagegen nicht zwangsläufig — dafür ist das gesamte Molekül maßgeblich.

## Azo-Farbstoffe

Azo-Farbstoffe (Ar–N=N–Ar′) tragen die Azo-Gruppe als Chromophor und decken einen weiten Farbbereich preisgünstig ab. Als Faustregel erreichen Azo-Farbmittel im Mittel nicht die Licht- und Wetterechtheit hochwertiger Klassen wie Phthalocyanine oder Chinacridone — das ist die prüfungsrelevante Orientierung. Die Stoffklasse ist allerdings sehr groß: Die Echtheit reicht von gering bis sehr gut (etwa bei Metallkomplex- oder Benzimidazolon-Typen), eine pauschale Bewertung als „wenig echt“ wäre also falsch; einzelne Azo-Farbstoffe können bei erhöhter Temperatur migrieren oder sublimieren, ein allgemeiner Temperatur-Grenzwert existiert dafür nicht, das ist stark vom einzelnen Farbstoff abhängig. Sulfonatgruppen erhöhen die Wasserlöslichkeit und den ionischen Charakter — über die Echtheit sagt das nichts aus.

## Metallkomplex-Farbstoffe

Bindet man einen Farbstoff über ein Metallatom zu einem Komplex, meist als 1:1- oder 1:2-Komplex, steigen die Echtheitseigenschaften häufig deutlich; die genauen Eigenschaften hängen aber vom Metall, den Liganden und dem Komplexaufbau ab. Auch die Löslichkeit richtet sich danach: Viele lösen sich gut in Alkoholen und Ketonen, andere nicht. Eingesetzt werden sie zum Beispiel in Folienlacken.

## Einsatz in Lacken

Farbstoffe nutzt man dort, wo Transparenz und Brillanz gefragt sind — etwa in Folienlacken, Holzbeizen oder Signierfarben. Wo hohe Wetter- und Lichtechtheit zählt, sind Pigmente überlegen; oft kombiniert man beide.

## Die vier großen Farbmittelklassen

Farbstoffe und organische Pigmente werden nach demselben Schema geordnet — nach der chemischen Gruppe, die die Farbe trägt. Vier Klassen decken den größten Teil ab:

• Azo-Farbmittel — Chromophor ist die Azo-Gruppe –N=N–. Mehr als die Hälfte aller Farbstoffe gehört hierher; der Farbbereich reicht von Gelb über Orange bis Rot, die Rohstoffe sind vergleichsweise günstig.

• Carbonyl-Farbmittel — sie tragen mindestens zwei konjugierte Carbonylgruppen C=O. Dazu zählen die Anthrachinon-Farbmittel sowie Indigo und Indanthrenblau; die Klasse liefert hochwertige Gelb-, Rot-, Violett- und Blautöne.

• Triphenylmethan-Farbmittel (Triarylmethan-Farbmittel) — Grundkörper ist das Triphenylmethan; als Auxochrome wirken Amino- oder Hydroxygruppen in para-Stellung. Klassische Vertreter sind Fuchsin (Rosanilin), Malachitgrün und Kristallviolett (Hexamethylpararosanilin). Sie sind ausgesprochen brillant und farbstark, aber wenig lichtecht. Im Lack und in der Druckfarbe werden sie überwiegend als Verlackungspigmente eingesetzt; das macht sie unlöslich, verbessert aber die Lichtechtheit nicht. Nicht hierher gehören Fluorescein und Eosin: Ältere Schulsystematiken führen sie als Phthaleine bei den Triphenylmethanfarbstoffen mit, nach dem Colour Index sind es Xanthenfarbstoffe.

• Phthalocyanin-Farbmittel — ein großes Ringsystem mit einem zentralen Metallatom, meist Kupfer. Sie liefern Blau- und Grüntöne mit sehr guter Lichtechtheit; Kupferphthalocyaninblau ist das wichtigste organische Blaupigment im Lack.

Wichtig für die Praxis: Dieselbe chemische Klasse tritt sowohl als löslicher Farbstoff als auch als unlösliches Pigment auf. Ob ein Molekül Farbstoff oder Pigment ist, entscheidet die Löslichkeit im Anwendungsmedium, nicht die Zugehörigkeit zur Klasse.

## Vom Farbstoff zum Pigment: die Verlackung

Ein wasserlöslicher Farbstoff lässt sich in ein unlösliches Pigment überführen: Trägt er saure Gruppen wie –$SO_3H$ oder –COOH, fällt man ihn mit einem Metallsalz und erhält das schwerlösliche Salz. Dieses Verfahren heißt Verlackung, das Produkt Verlackungs- oder Lackpigment. Gebräuchliche Fällungsmittel sind Calcium-, Barium-, Strontium- und Aluminiumsalze.

Chemisch ändert sich am Chromophor nichts — der Farbton bleibt weitgehend erhalten. Was sich ändert, ist die Löslichkeit: Aus einem molekular gelösten Farbstoff wird ein Teilchen, das dispergiert werden muss. Damit gelten für das Produkt die Regeln der Pigmentverarbeitung (siehe L-53).

Typische Vertreter sind PR 53:1 (Bariumlack eines Azofarbstoffs, Lake Red C) und PR 57:1 (Calciumsalz, Lithol-Rubin) — beide Standardpigmente im Offsetdruck. Verlackungspigmente sind farbstark und günstig, erreichen aber nicht die Licht- und Wetterechtheit der Hochleistungsklassen; ihr Schwerpunkt liegt deshalb bei Druckfarben, nicht bei Außenlacken.

## Der Colour Index: wie Pigmente bezeichnet werden

Handelsnamen sagen nichts über die Chemie — dasselbe Pigment heißt bei jedem Anbieter anders. Verbindlich ist der Colour Index, das internationale Verzeichnis der Farbmittel.

Maßgeblich für die Praxis ist der Generic Name: Er nennt Verwendungsklasse, Farbe und laufende Nummer. „Pigment Blue 15“, kurz PB 15. Die Farbkürzel folgen dem Englischen — Y Gelb, O Orange, R Rot, V Violett, B Blau, G Grün, Br Braun, Bk Schwarz, W Weiß. Daneben führt der Colour Index eine Constitution Number, die den Stoff rein chemisch einordnet; im Laboralltag spielt sie kaum eine Rolle.

Wichtiger ist der Zusatz nach dem Doppelpunkt: Er kennzeichnet eine Variante desselben Farbmittels — bei Buntpigmenten meist eine andere Kristallmodifikation oder eine stabilisierte Form, bei Verlackungspigmenten das Fällungsmetall (PR 53:1 ist der Bariumlack des Farbstoffs PR 53, PR 57:1 das Calciumsalz). PB 15:1 und PB 15:3 sind chemisch dasselbe Kupferphthalocyanin, unterscheiden sich aber im Farbton und im Verhalten.

Für die Praxis heißt das: Im technischen Merkblatt steht der Colour Index. Wer ihn liest, weiß, welche Klasse vorliegt und was von Echtheit und Verarbeitung zu erwarten ist — auch bei unbekanntem Handelsnamen. Und beim Lieferantenwechsel genügt es nicht, dass auf beiden Gebinden „PB 15“ steht; die Ziffer nach dem Doppelpunkt gehört in die Spezifikation.

## Die wichtigsten organischen Pigmentklassen im Lack

Die oben genannten Farbmittelklassen treten überwiegend als unlösliche Pigmente auf. Fünf Gruppen decken den Lackbedarf weitgehend ab.

Phthalocyanine sind die wichtigste Klasse für Blau und Grün: hohe Farbstärke bei sehr guter Licht-, Wetter- und Chemikalienbeständigkeit, dazu vergleichsweise moderater Preis. Kupferphthalocyaninblau (PB 15) ist das meistverwendete organische Buntpigment überhaupt; der chlorierte Ring ergibt Phthalocyaningrün (PG 7).

Chinacridone decken Rot bis Violett ab. Unsubstituiertes Chinacridon ist PV 19, das 2,9-Dimethyl-Derivat PR 122 (Magenta). Sehr gute Wetterechtheit und reine Farbtöne machen sie zum Standard im Automobil- und Industrielack.

Diketopyrrolopyrrol-Pigmente (DPP) sind die jüngste der großen Klassen und liefern kräftige Orange- und Rottöne: PO 73, PR 255 (gelbstichiges Rot), PR 254 (mittleres Rot). Sie sind sehr beständig gegen Licht, Wetter, Lösemittel, Hitze und Chemikalien.

Perylenpigmente ergänzen den Bereich Rot bis Bordeaux; PR 179 ist ein bekannter Vertreter. Ihre Stärke ist die Wetterechtheit.

Azopigmente sind mengenmäßig die größte Gruppe und decken Gelb, Orange und Rot günstig ab. Die einfachen Typen sind für Innenanwendungen und Druckfarben gedacht; die Benzimidazolon-Typen erreichen dagegen Echtheiten, die für Außenanwendungen taugen.

Praxisregel: Blau und Grün kommen fast immer aus der Phthalocyanin-Klasse. Für wetterfeste Rot- und Gelbtöne greift man zu Chinacridon, DPP, Perylen oder Benzimidazolon — nicht zu einfachen Azopigmenten.

## Kristallmodifikation: warum PB 15:1 und PB 15:3 verschieden blau sind

Dieselbe Verbindung kann in mehreren Kristallformen vorliegen. Beim Kupferphthalocyanin sind zwei technisch bestimmend: die rotstichige α-Form (PB 15, 15:1, 15:2) und die grünstichige β-Form (PB 15:3, 15:4). Daneben gibt es die stark rotstichige ε-Form (PB 15:6), die vor allem in Automobil-Metalliclacken eingesetzt wird.

Die β-Form ist die thermodynamisch stabilere. Das hat eine unmittelbare Praxisfolge: Eine unstabilisierte α-Form kann sich im Lack umwandeln — begünstigt durch aromatische Lösemittel, erhöhte Temperatur und lange Lagerung. Der Farbton kippt dann sichtbar ins Grünstichige, und die dabei wachsenden Kristalle können ausflocken. Deshalb gibt es stabilisierte Typen, und deshalb steht die Modifikation im Colour Index mit im Namen.

Für den Lacklaboranten heißt das: Bei einer Farbtonabweichung nach Lagerung oder Temperaturbelastung ist die Kristallmodifikation ein ernstzunehmender Verdacht — nicht nur die Dosierung.

## Umwelt und Sicherheit

Organische Pigmente sind als Stoff meist toxikologisch unauffällig. Der Grund liegt in ihrer Definition: Sie sind im Anwendungsmedium praktisch unlöslich und werden deshalb vom Körper kaum aufgenommen. Die Aufmerksamkeit gehört nicht dem Pigmentmolekül selbst, sondern drei anderen Punkten.

Zersetzungsprodukte bei Hitze: Diarylidpigmente — die gelben und orangen Azopigmente auf Benzidinbasis — zersetzen sich oberhalb von etwa 200 °C und setzen dabei 3,3′-Dichlorbenzidin frei, ein krebserzeugendes aromatisches Amin. Für Dispersionsfarben ist das ohne Bedeutung, für Einbrennlacke, Pulverlack, Coil Coating und die Extrusion dagegen sehr wohl. Die Temperaturbeständigkeit eines Pigments ist deshalb nicht nur eine Farbtonfrage, sondern auch eine des Arbeitsschutzes.

Verunreinigungen aus der Herstellung: In handelsüblichen Pigmenten sind herstellungsbedingt chlorierte Nebenprodukte nachgewiesen worden, in stark schwankenden Gehalten. Das ist kein Grund, auf organische Pigmente zu verzichten, aber einer, Spezifikation und Lieferantenqualifizierung ernst zu nehmen und auf freigegebene Qualitäten zu achten.

Schwermetalle — differenziert betrachtet: Blei, Cadmium, Quecksilber und Chrom(VI) sind aus modernen Rezepturen verschwunden. Für Verpackungen begrenzt die EU-Verpackungsverordnung (EU) 2025/40 (PPWR, anwendbar seit 12.08.2026; sie hat die frühere Richtlinie 94/62/EG abgelöst) die Summe aus Blei, Cadmium, Quecksilber und Chrom(VI) unverändert auf 100 mg/kg, und Bleichromat- sowie Cadmiumpigmente haben für Neuentwicklungen keine Bedeutung mehr (siehe L-41).

Andere Metalle sind dagegen weiterhin selbstverständlich im Einsatz. Kupfer sitzt im Zentrum jedes Kupferphthalocyanins und damit im meistverwendeten organischen Buntpigment überhaupt; bei der Verlackung wird mit Barium-, Calcium- oder Strontiumsalzen gefällt, und PR 53:1 als Bariumlack gehört zu den verbreiteten Rotpigmenten im Druck. Ein organisches Pigment ist also nicht schon deshalb metallfrei, weil es organisch heißt.

Der Unterschied liegt im Element und in der Bindungsform: Kupfer ist im Chelatring fest eingebaut, Barium liegt als schwerlösliches Salz vor. Beurteilt wird deshalb nicht das Wort „Schwermetall“, sondern der konkrete Stoff anhand von Einstufung, Sicherheitsdatenblatt und den Grenzwerten der jeweiligen Anwendung — Verpackung, Lebensmittelkontakt oder Spielzeug (Migration bestimmter Elemente nach DIN EN 71-3).

Im Labor bleibt das Alltagsthema der Staub: Pigmentpulver ist feinteilig, beim Einwiegen und Einrühren entsteht Staub. Absaugung oder Abzug, Feinstaubmaske und geschlossenes Arbeiten sind Standard — unabhängig davon, wie harmlos der Stoff eingestuft ist. Für Druckfarben mit Lebensmittelkontakt gilt zusätzlich die EuPIA Charter on Raw Material Selection and Exclusion, die die frühere Exclusion Policy abgelöst hat (siehe L-149).

**Merksatz**

Pigment unlöslich (Teilchen), Farbstoff im Medium molekular gelöst bzw. verteilt. Der Chromophor absorbiert im Zusammenspiel mit dem konjugierten System das Licht, das Auxochrom verschiebt Absorptionslage, Intensität und Löslichkeit — eine pauschal bessere Substratbindung oder Echtheit lässt sich daraus nicht ableiten. Azo- und Metallkomplex-Farbstoffe streuen in Lichtechtheit und Löslichkeit stark, je nach konkretem Molekül — Farbstoffe glänzen durch Transparenz, Pigmente meist durch Beständigkeit. Der Colour Index nennt Klasse, Farbe und Modifikation: PB 15:3 ist die grünstichige β-Form des Kupferphthalocyanins. Verlackung macht aus einem löslichen Farbstoff ein unlösliches Pigment.

**Stichwörter:** Farbstoff, Farbmittel, Chromophor, Auxochrom, konjugiertes System, Azo-Farbstoff, Metallkomplex-Farbstoff, Lichtechtheit, Sublimation, transparent, Folienlack, molekulare Verteilung,

Farbmittelklassen, Carbonyl-Farbmittel, Anthrachinon, Indigo, Triphenylmethan, Phthalocyanin, Verlackung, Lackpigment, Colour Index, Generic Name, Kupferphthalocyanin, Chinacridon, Diketopyrrolopyrrol, DPP, Perylen, Benzimidazolon, Kristallmodifikation, Rekristallisation, Diarylidpigment, 3,3′-Dichlorbenzidin, Schwermetalle, Richtlinie 94/62/EG, DIN EN 71-3

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; Ignatowitz, Chemie für Schule und Beruf (Europa-Lehrmittel); DIN EN 71-3*

---

## Übungsblatt Ü-42 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Grenzen Sie Pigment und Farbstoff voneinander ab und erklären Sie die Begriffe Chromophor und Auxochrom.

**Pigment vs. Farbstoff:** Pigmente sind im Medium unlöslich (Teilchen); Farbstoffe liegen im Anwendungsmedium molekular gelöst bzw. verteilt vor — entscheidend ist die molekulare Verteilung im jeweiligen Medium. Gelöste Farbstoffe wirken brillanter/transparenter, sind aber meist weniger echt.

**Chromophor:** Die Gruppe mit beweglichen Elektronen, die zusammen mit dem gesamten konjugierten System sichtbares Licht absorbiert (z. B. die Azo-Gruppe –N=N–).

**Auxochrom:** Eine Gruppe wie –OH oder $–NH_2$, die Absorptionslage, Intensität und Löslichkeit beeinflusst — eine pauschal bessere Bindung ans Substrat lässt sich daraus nicht ableiten.

*Bewertung: Die Abgrenzung über molekulare Verteilung sowie Chromophor und Auxochrom werden fachlich korrekt und ohne unzulässige Verallgemeinerung erklärt.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**

Ein transparenter Folienlack enthält 2,5 % Metallkomplex-Farbstoff bezogen auf die Gesamtrezeptur. Ein Ansatz von 200 g wird hergestellt. Berechnen Sie die Farbstoffmasse. Erläutern Sie anschließend, warum eine Erhöhung der Farbstoffkonzentration nicht unbegrenzt zu einer höheren Brillanz führt und welche Rolle Löslichkeit bzw. Aggregation dabei spielen.

**Rechnung:** $m(\text{Farbstoff}) = 200\ \text{g} \cdot 2{,}5/100 = 5\ \text{g}$

**Löslichkeitsgrenze:** Solange der Farbstoff molekular gelöst bleibt, steigt die Farbstärke mit der Konzentration. Oberhalb der Löslichkeitsgrenze im Bindemittel können Farbstoffmoleküle jedoch aggregieren bzw. ausfallen.

**Folge für die Brillanz:** Aggregierte oder ausgefällte Anteile wirken trüb/streuend statt transparent-brillant — eine weitere Konzentrationssteigerung bringt dann keinen zusätzlichen Brillanzgewinn mehr, im Gegenteil kann der Farbton stumpf wirken.

*Bewertung: Die Prozentrechnung ist korrekt; zusätzlich wird die Grenze der Brillanzsteigerung fachlich richtig über Löslichkeit und Aggregation begründet.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**

Wann setzt man einen Farbstoff ein, wann besser ein Pigment?

**Farbstoff:** Wenn Transparenz und Brillanz gefragt sind (z. B. Folienlacke, Holzbeizen).

**Pigment:** Wenn hohe Licht- und Wetterechtheit zählt.

**Kombination:** Oft kombiniert man beide, um Brillanz und Beständigkeit zu verbinden.

*Bewertung: Die Auswahl wird an Transparenz gegen Echtheit sinnvoll festgemacht.*

**Frage 4** **(Anwendung, 8 Punkte)**

Ein deckender, brillant roter Industrielack für den Außeneinsatz soll formuliert werden. Begründen Sie Ihre Pigmentwahl und erklären Sie, was die Angabe „PB 15:3“ auf einem Merkblatt bedeutet.

**Deckvermögen:** Organische Pigmente haben einen Brechungsindex nahe dem des Bindemittels und decken deshalb schlecht. Das Deckvermögen kommt über ein anorganisches Pigment — hier Titandioxid — oder über eine ausreichende Schichtdicke.

**Farbton:** Ein satter, brillanter Rotton lässt sich anorganisch nicht erreichen; Eisenoxidrot bleibt stumpf. Gewählt wird ein organisches Hochleistungspigment: Chinacridon, DPP oder Perylen — alle mit guter Wetterechtheit.

**Aufbau:** Kombination aus anorganischem Grundgerüst für Deckvermögen und organischem Pigment für den Farbton — nicht das organische Pigment allein.

**PB 15:3:** Colour-Index-Bezeichnung: Pigment Blue, laufende Nummer 15, also Kupferphthalocyanin; der Zusatz :3 kennzeichnet die grünstichige β-Modifikation, die thermodynamisch stabilere Kristallform.

**Warum das zählt:** Beim Lieferantenwechsel genügt „PB 15“ nicht: Andere Modifikationen ergeben einen anderen Farbton und können bei Wärme und aromatischen Lösemitteln umkristallisieren.

*Bewertung: Die Antwort trennt Deckvermögen und Farbton sauber und begründet beides physikalisch. Der Colour Index wird in seine Bestandteile zerlegt, und der Zusatz nach dem Doppelpunkt wird als Kristallmodifikation mit Praxisfolge erkannt.*

# L-43 · Tagesleuchtfarben

*Fluoreszenz, geringe Lichtechtheit und der Dreischichtaufbau*

**Prüfungsteil 1** · A 8.4 · B 13

Tagesleuchtpigmente sind mit Fluoreszenzfarbstoff eingefärbte Kunststoffpulver: Sie wandeln kurzwelliges Licht in langwelliges um und leuchten dadurch heller, ohne dabei mehr Energie abzugeben, als sie absorbieren — brauchen aber wegen geringer Lichtechtheit einen UV-Schutz.

## Was Tagesleuchtfarben sind

Tagesleuchtfarben wirken auffällig hell, weil sie zusätzlich zum normal reflektierten Licht einen Teil der kurzwelligen bzw. UV-nahen Strahlung in sichtbares Licht umwandeln und mit abstrahlen — möglich macht das die Fluoreszenz. Insgesamt geben sie dabei nie mehr Energie ab, als sie absorbiert haben; die höhere wahrgenommene Helligkeit und Leuchtdichte entsteht durch diese zusätzliche sichtbare Emission, die eine normale Farbe nicht liefert. Tagesleuchtpigmente gehören streng genommen nicht zur Gruppe der klassischen Pigmente: Es sind Fluoreszenzfarbstoffe, eingebettet in eine transparente polymere Matrix — je nach Pigmenttyp aus unterschiedlichen Kunststoffen; häufig sind es Melamin-Toluolsulfonamid-Formaldehyd-Harze, Benzoguanamin-Harze oder formaldehydfreie Polyester- und Polyesteramid-Typen.

## Fluoreszenz — das Prinzip

Das Pigment absorbiert kurzwellige Strahlung (UV und kurzwelliges sichtbares Licht): Ein Molekül geht dabei in einen angeregten Zustand über ($M + h\nu \rightarrow M^*$) und gibt einen Teil der Energie als längerwelliges, sichtbares Licht wieder ab ($M^* \rightarrow M + h\nu'$; Stokes-Verschiebung: $\lambda(\text{Emission}) > \lambda(\text{Absorption})$, da $E(\text{emittiert}) < E(\text{absorbiert})$). Die Emission klingt nach der Anregung sehr schnell ab — typischerweise im Nanosekundenbereich; darin unterscheidet sich die Fluoreszenz von der Phosphoreszenz, bei der das Leuchten nach dem Abschalten der Lichtquelle noch deutlich länger nachhält.

## Geringe Lichtechtheit

Der Preis für die Leuchtkraft ist eine im Vergleich zu vielen klassischen Pigmenten geringere UV- und Wetterbeständigkeit: Organische Fluoreszenzfarbstoffe bauen unter UV-Licht vergleichsweise schnell ab, der Ton verblasst; Matrix und Stabilisierung beeinflussen die tatsächliche Haltbarkeit. Tagesleuchtfarben werden deshalb vor allem dort eingesetzt, wo Signalwirkung wichtiger ist als lange Haltbarkeit — etwa bei Verkehrsleitkegeln und -schildern, Rettungswesten und -booten, Warnkleidung, Arbeitsschutzkennzeichnung sowie an Sport- und Freizeitgeräten, die schnell und aus großer Entfernung auffallen sollen.

## Der Dreischichtaufbau

Weil Tagesleuchtfarben schlecht decken und empfindlich sind, baut man sie meist in drei Schichten auf: zuerst ein weißer, hoch deckender Grundlack — er wirft das Licht durch die transparente Leuchtschicht zurück und steigert dadurch die Leuchtkraft —, dann die eigentliche Tagesleuchtfarbe, zuletzt ein schützender Klarlack. Dieser filtert UV-Strahlung nur, wenn er geeignete UV-Absorber enthält, die die relevanten Wellenlängen wirksam abdecken; zusätzlich eingesetzte HALS-Lichtschutzmittel (Hindered Amine Light Stabilizer, sterisch gehinderte Amine) sind keine UV-Filter im engeren Sinn, bremsen aber die photooxidative Schädigung. Die Leuchtschicht wird in mehreren Spritzgängen aufgetragen; wie viel Trockenschicht ein Gang liefert, ergibt sich aus dem Volumenfestkörper: $TSD = NSD \cdot VFK/100$. Ein Gang mit 40 µm nass und 45 % Volumenfestkörper hinterlässt also 18 µm trocken, und die Gesamtschichtdicke stellt man über die Zahl der Gänge ein. Je dicker die Leuchtschicht, desto höher Leuchtkraft und Lichtechtheit; der konkrete Zielwert ist systemabhängig und richtet sich nach Farbstärke, Untergrund und Herstellervorgabe.

### Formulierung

Neben dem Tagesleuchtpigment enthält die Farbe ein Bindemittel (zum Beispiel Polyacrylat), Lichtschutzmittel zur Verbesserung der Beständigkeit sowie Rheologie- und Netz-/Dispergieradditive. Weil das Pigment ein weiches Kunststoffpulver ist, werden beim Dispergieren übermäßige Scherung und Temperaturbelastung vermieden, um die Pigmentmatrix nicht unnötig zu schädigen.

**Merksatz**

Tagesleuchtpigment = Fluoreszenzfarbstoff im Kunststoffpulver: kurzwelliges Licht rein, langwelliges (mit Stokes-Verschiebung) und binnen Nanosekunden wieder raus — ohne Nachleuchten, aber auch ohne Energiegewinn. Leuchtstark, aber lichtempfindlich — daher Dreischichtaufbau mit schützendem Klarlack, der UV nur mit geeigneten UV-Absorbern wirklich filtert.

**Stichwörter:** Tagesleuchtfarbe, Tagesleuchtpigment, Fluoreszenz, Phosphoreszenz, Stokes-Verschiebung, Lichtechtheit, Dreischichtaufbau, UV-Absorber, HALS, Lichtschutzmittel, Leuchtkraft, Klarlack, UV-Beständigkeit
*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie*

---

## Übungsblatt Ü-43 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Erklären Sie, warum eine Tagesleuchtfarbe heller wirkt als eine normale Farbe, und worin sich Fluoreszenz von Phosphoreszenz unterscheidet.

**Leuchtwirkung:** Das Pigment gibt zusätzlich zum reflektierten Licht umgewandelte, vorher unsichtbare bzw. kurzwellige Strahlung als sichtbares Licht ab. Insgesamt wird nie mehr Energie abgegeben, als absorbiert wurde — die höhere wahrgenommene Helligkeit entsteht durch diese zusätzliche sichtbare Emission.

**Umwandlung:** Kurzwellige Strahlung (UV, kurzwelliges Sichtbares) regt das Molekül an (M + hν → M*); es gibt anschließend einen Teil der Energie als längerwelligeres, sichtbares Licht wieder ab (M* → M + hν′, Stokes-Verschiebung).

**Fluoreszenz vs. Phosphoreszenz:** Fluoreszenz klingt nach der Anregung sehr schnell ab (typischerweise im Nanosekundenbereich); bei Phosphoreszenz hält das Leuchten nach dem Abschalten der Lichtquelle deutlich länger nach.

*Bewertung: Die Antwort erklärt die Zusatzabstrahlung physikalisch korrekt (keine Energieerzeugung) und grenzt die kurze Fluoreszenz-Lebensdauer klar von der länger nachleuchtenden Phosphoreszenz ab.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**

Eine Tagesleuchtfarbe wird in 7 Spritzgängen aufgetragen, je 40 µm nass, bei einem Volumenfestkörper von 45 %. Berechnen Sie die Gesamt-Trockenschichtdicke. Welche Annahmen müssen erfüllt sein, damit sich die Trockenschichtdicken der einzelnen Gänge einfach addieren lassen, und welche praktischen Abweichungen können auftreten?

**Trockenschicht je Gang:** TSD = NSD · VFK/100 = 40 µm · 45/100 = 18 µm

**Gesamt:** 18 µm · 7 Gänge = 126 µm

**Annahmen für einfache Addition:** Der Volumenfestkörper ist für alle Gänge gleich, jeder Gang wird mit derselben Nassschichtdicke aufgetragen, und aus jedem Gang entweicht der flüchtige Anteil vollständig — bleibt Lösemittel im Film zurück, gilt die Beziehung TSD = NSD · VFK/100 nicht mehr. Ausreichendes Ablüften zwischen den Gängen ist dafür die praktische Voraussetzung.

**Praktische Abweichungen:** Ungleichmäßiger Auftrag, unterschiedliche Ablüftzeiten zwischen den Gängen, Lösemittelrückhalt in unteren Schichten oder Verlauf/Nivellierung können die tatsächliche Gesamtschichtdicke von diesem rechnerischen Wert abweichen lassen.

*Bewertung: Die Trockenschicht je Gang wird korrekt aus dem Volumenfestkörper berechnet; zusätzlich werden die Additivitätsannahmen und mögliche Praxisabweichungen fachlich richtig benannt.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**

Warum wird über die Tagesleuchtschicht ein Klarlack gesetzt, welche Rolle spielen UV-Absorber und HALS dabei, und welcher Zielkonflikt kann bei der UV-Absorption entstehen?

**Problem:** Die Fluoreszenzfarbstoffe haben eine geringe UV-/Lichtechtheit und bauen unter Sonnenlicht vergleichsweise schnell ab.

**UV-Absorber und HALS:** Ein Klarlack filtert UV-Strahlung nur, wenn er geeignete UV-Absorber enthält, die die relevanten Wellenlängen wirksam absorbieren; HALS sind keine UV-Filter im engeren Sinn, sondern fangen bei der photooxidativen Schädigung entstehende Radikale ab und bremsen so den Abbau zusätzlich.

**Zielkonflikt:** Absorbiert der UV-Absorber auch im Bereich der Anregungswellenlängen des Fluoreszenzfarbstoffs, schützt er zwar die Schicht, schwächt aber gleichzeitig die Fluoreszenzanregung und damit die Leuchtkraft — UV-Schutz und Leuchtkraft müssen deshalb sorgfältig aufeinander abgestimmt werden.

*Bewertung: Die Antwort unterscheidet UV-Absorber und HALS korrekt und erkennt den Zielkonflikt zwischen UV-Schutz und Fluoreszenzanregung.*

# L-44 · Teilchengröße und spezifische Oberfläche

*Warum feine Teilchen alles verändern*

**Prüfungsteil 1** · A 9 · A 10 · A 8.4

Mit abnehmender Teilchengröße steigt bei vergleichbarer Form und Dichte die spezifische Oberfläche stark an — das verändert Benetzung, Dispergiermittel- und Bindemittelbedarf sowie Rheologie. Optische Eigenschaften besitzen jedoch häufig ein Teilchengrößenoptimum.

## Das Würfelmodell

Ein Würfel von 1 cm Kantenlänge hat 6 cm² Oberfläche. Teilt man ihn in allen drei Raumrichtungen je zehnmal, erhält man 1000 Würfel von 1 mm Kantenlänge — mit zusammen 60 cm² Oberfläche. Jede weitere Zehnteilung verzehnfacht die Gesamtoberfläche erneut. Das Modell ist idealisiert: Es beschreibt eine kompakte, geometrisch ähnliche Zerteilung ohne Poren und ohne Größenverteilung — genau deshalb macht es den Zusammenhang so anschaulich.

## Oberflächenwachstum bei dezimaler Zerteilung

| Kantenlänge | Anzahl Würfel | Gesamtoberfläche |
|---|---|---|
| 1 cm | 1 | 6 cm² |
| 1 mm | $10^3$ | 60 cm² |
| 1 µm | $10^{12}$ | 6 m² |
| 10 nm | $10^{18}$ | 600 m² |

## Warum das lacktechnisch zählt

Atome und Moleküle an der Teilchenoberfläche haben einen höheren Energieinhalt als solche im Inneren. Bei sehr kleinen Teilchen im Nanometerbereich liegt deshalb ein erheblicher Anteil aller Bausteine in der Grenzfläche: Für ein kugelförmiges Teilchen von 10 nm Durchmesser ergibt eine angenommene Grenzschichtdicke in der Größenordnung eines Moleküldurchmessers, also etwa 1 nm, einen Randschichtanteil von rund 49 Prozent (Kugelmodell: $1 - ((5\ \text{nm} - 1\ \text{nm})/5\ \text{nm})^3 \approx 0{,}49$). Diese Zahl ist eine Modellabschätzung und nur mit der angenommenen Grenzschichtdicke sinnvoll; ohne diese Angabe ist sie keine allgemeingültige Größe. Ein Kolloid ist dabei ein disperses System mit Teilchen bzw. Struktureinheiten im kolloidalen Größenbereich (etwa 1 nm bis 1 µm); die große spezifische Oberfläche und der höhere Energieinhalt sind eine wichtige Folge davon, nicht die Definition selbst.

## Die Geometrie dahinter

Würfelmodell: $A = 6a^2$, $V = a^3$, also $A/V = 6/a$.
Ideale Kugeln: $S_m = 6/(\rho \cdot d)$ — spezifische Oberfläche aus Dichte ρ und Durchmesser d; mit ρ in g/cm³ und d in µm ergibt sich $S_m$ unmittelbar in m²/g.

Beide Beziehungen zeigen: $A/V \propto 1/d$. Sie gelten aber nur bei gleicher Form und vergleichbarer Dichte und für ideale, nichtporöse Teilchen; reale Pigmente weichen wegen Form, Porosität, Struktur und Größenverteilung ab.

## Anhaltswerte technischer Rohstoffe

- Gasruß — 13 nm — 460 m²/g
- Pyrogene Kieselsäure — 7 nm — 390 m²/g
- Phthalocyaninblau — 50 nm — 72 m²/g
- Titandioxid Rutil, deckend — 250 bis 300 nm — rund 5 bis 6 m²/g (geometrisch nach $S_m = 6/(\rho \cdot d)$ mit ρ rund 4,1 g/cm³; ein unbeschichtetes Pigment dieser Größe misst per BET etwa 7 m²/g, oberflächennachbehandelte Handelsqualitäten dagegen 10 bis 20 m²/g, siehe L-13)
- Titandioxid Rutil, transparent — 10 bis 20 nm — 45 bis 110 m²/g
- Gefälltes Calciumcarbonat — 80 nm — 20 m²/g
- Marmormehl — 2500 nm — 3,4 m²/g
- Gemahlener Quarzsand — 16 000 nm — 0,9 m²/g

## Zwei Folgerungen aus der Tabelle

- Wie erwartet fällt die spezifische Oberfläche mit zunehmender Teilchengröße.
- Anisometrische, also blättchenförmige Teilchen wie Aluminium- oder Perlglanzpigmente besitzen bei gleichem Volumen eine größere Oberfläche als eine Kugel — die Kugel hat von allen Körpern gleichen Volumens die kleinste Oberfläche. Ein pauschales „immer größer als isometrische Teilchen“ ist damit aber nicht belegt: Der Vergleich hängt von der konkreten Geometrie, der Größenverteilung, der Porosität und davon ab, worauf man normiert.
  Bei technischen Pigmenten und Füllstoffen liegt stets eine mehr oder weniger breite Teilchengrößenverteilung vor — die Zahlen sind Mittelwerte.

**Merksatz**

Farbstärke und Deckvermögen steigen mit abnehmender Teilchengröße nicht endlos an, sondern durchlaufen ein Optimum — beim deckenden Rutil-Titandioxid bei 250 bis 300 nm (siehe die Anhaltswerte oben). Die genaue Lage hängt zusätzlich von Brechungsindex, Pigmentkonzentration, Teilchenform und Dispergierung ab, nicht nur von der Teilchengröße. Transparenz und Filtrierbarkeit nehmen dagegen mit dem Dispersitätsgrad stetig zu — bei einem deckenden Buntpigment ist genau das meist unerwünscht. Feiner ist also nicht automatisch besser.

## Praxisfolge

Mit steigender spezifischer Oberfläche wächst der Bedarf an Bindemittel, Netz- und Dispergiermittel, weil mehr Fläche benetzt und stabilisiert werden muss. Zugleich steigt der Energieaufwand beim Dispergieren. Die Ölzahl eines Pigments — die Leinölmenge je 100 g, bis eine zusammenhängende, kittartige Paste entsteht (DIN EN ISO 787-5, siehe L-40) — ist ein praxisnaher Kennwert für diesen Bedarf, aber kein direktes Maß der spezifischen Oberfläche: Teilchenform, Porosität, Struktur und Wechselwirkungen beeinflussen sie zusätzlich. Beim Dispergieren werden Primärpartikel (die ursprünglich gebildeten Einzelteilchen), stärker gebundene Aggregate und schwächer gebundene Agglomerate unterschieden — Aggregate lassen sich je nach Material nicht beliebig oder vollständig zerlegen. Ziel ist deshalb nicht pauschal die vollständige Zerteilung bis zum Primärpartikel, sondern der für Pigment und Anwendung erforderliche Dispersionsgrad. Ein Grindometer (Hegman-Gauge) beurteilt dabei vor allem noch vorhandene grobe Partikel bzw. Agglomerate, nicht direkt die Primärteilchengröße. Weiter zu „übermahlen“ bringt nichts, kostet nur Energie und kann Reagglomeration begünstigen (siehe L-53).

**Stichwörter:** spezifische Oberfläche, BET, Teilchengröße, Primärteilchendurchmesser, Würfelmodell, Kolloid, isometrisch, anisometrisch, Ölzahl, Farbstärke, Deckvermögen, Teilchengrößenoptimum, Teilchengrößenverteilung, Ruß, Kieselsäure, Titandioxid, Marmormehl

*Quellen: Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur; DIN EN ISO 787-5*

## Übungsblatt Ü-44 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 7 Punkte)**

Erläutern Sie am Würfelmodell, wie sich die Oberfläche bei zunehmender Zerteilung verändert.

**Ausgangspunkt:** Ein Würfel von 1 cm Kantenlänge besitzt sechs Flächen von je 1 cm², also 6 cm² Oberfläche.

**Erste Teilung:** Teilt man ihn in allen drei Raumrichtungen je zehnmal, entstehen 10 · 10 · 10 = 1000 Würfel mit 1 mm Kantenlänge. Ihre Gesamtoberfläche beträgt 60 cm² — das Zehnfache.

**Regel:** Jede weitere dezimale Zerteilung verzehnfacht die Gesamtoberfläche erneut, während das Volumen unverändert bleibt. Formal: $A = 6a^2$, $V = a^3$, also $A/V = 6/a$ — die spezifische Oberfläche ist umgekehrt proportional zur Kantenlänge.

**Größenordnung:** Bei 1 µm Kantenlänge sind es bereits 6 m², bei 10 nm rund 600 m² — aus demselben Kubikzentimeter Material.

**Grenzen des Modells:** Das Würfelmodell ist idealisiert: Es setzt eine kompakte, geometrisch ähnliche Zerteilung ohne Poren und ohne Größenverteilung voraus. Reale Pigmente weichen wegen Form, Porosität, Struktur und Verteilung davon ab.

*Bewertung: Der Rechenweg der ersten Teilung wird ausgeschrieben, die Regel A/V = 6/a daraus abgeleitet, mit einer Größenordnung belegt und der idealisierte Charakter des Modells benannt.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**

Ein deckendes Titandioxid hat einen Primärteilchendurchmesser von etwa 280 nm und eine spezifische Oberfläche von 6 m²/g. Eine transparente Type hat 15 nm. Schätzen Sie deren spezifische Oberfläche ab und beurteilen Sie das Ergebnis.

**Überlegung:** Die spezifische Oberfläche ist bei gleicher Dichte und Form umgekehrt proportional zum Teilchendurchmesser ($S_m = 6/(\rho \cdot d)$).

**Ansatz:** $O(2) = O(1) \cdot d(1) / d(2)$

**Rechnung:** $O(2) = 6\ m^2/g \cdot 280\ nm / 15\ nm = 112\ m^2/g$

**Annahmen der Näherung:** Die Rechnung setzt gleiche Dichte, gleiche (idealisierte, nichtporöse) Form und vergleichbare Größenverteilung voraus. Reale Typen weichen durch Porosität, Oberflächenbehandlung, Aggregatstruktur und breite Verteilung ab — der reale Messwert kann deshalb deutlich abweichen.

**Abgleich:** Für ultrafeine, transparente Titandioxid-Typen werden je nach Produkt Größenordnungen von etwa 45 bis 110 m²/g angegeben; das ist ein produktabhängiger Erfahrungsbereich, kein allgemeingültiger Literaturwert. Die Abschätzung trifft die richtige Größenordnung.

**Beurteilung:** Die transparente Type hat also rund die zwanzigfache spezifische Oberfläche. Entsprechend höher sind Bindemittelbedarf, Netz- und Dispergiermittelbedarf sowie der Dispergieraufwand.

*Bewertung: Die Abschätzung wird korrekt durchgeführt, ihre Annahmen werden ausdrücklich bewertet und der Vergleichsbereich wird als produktabhängig statt als allgemeiner Literaturwert eingeordnet.*

**Frage 3** **(Anwendung, 7 Punkte)**

Ein Kollege möchte die Farbstärke eines Eisenoxidpigments erhöhen und schlägt vor, ein noch feineres Pigment einzusetzen. Beurteilen Sie diesen Vorschlag.

**Der Vorschlag greift zu kurz:** Eine Verringerung der Teilchengröße führt nicht unbegrenzt zu höherer Farbstärke oder höherem Deckvermögen — die optische Wirkung besitzt vielmehr einen optimalen Teilchengrößenbereich.

**Typische Größenordnung:** Bei roten Eisenoxidpigmenten liegt dieser günstige Bereich häufig bei einigen hundert Nanometern, etwa um 300 nm (reale Pigmente sind dabei nie ideal kugelförmig, und die genaue Lage hängt zusätzlich von Brechungsindex, Konzentration, Teilchenform und Dispergierung ab). Wird das Pigment deutlich feiner, kann die Lichtstreuung abnehmen und das Pigment zunehmend transparent werden.

**Weitere Folgen:** Mit abnehmender Teilchengröße steigt die spezifische Oberfläche; dadurch können Bindemittel-, Netz- und Dispergiermittelbedarf sowie der Dispergieraufwand steigen. Auch die Neigung zu Reagglomeration oder Flockulation kann zunehmen, wenn die Teilchen nicht ausreichend stabilisiert werden.

**Empfehlung:** Vor einem Pigmentwechsel sollte geprüft werden, welche Teilchengröße das vorhandene Pigment besitzt und wo es relativ zum optimalen Bereich liegt. Eine weitere Verfeinerung ist nicht automatisch vorteilhaft.

*Bewertung: Eine gute Antwort erkennt, dass „feiner = farbstärker“ nicht allgemein gilt, nennt den typischen optimalen Größenbereich und berücksichtigt zusätzlich die Auswirkungen der größeren spezifischen Oberfläche auf Benetzung, Dispergierung und Stabilität.*

# L-45 · BET-Methode und spezifische Oberfläche

*Warum feine Teilchen mehr Bindemittel brauchen*

**Prüfungsteil 1** · A 7.1

Die BET-Methode bestimmt die spezifische Oberfläche über die physikalische Adsorption eines Gases, meist Stickstoff: Aus der Adsorptionsisotherme wird die Monolagenkapazität und daraus die Oberfläche in m²/g berechnet. Die BET-Fläche ist nicht mit Ölzahl oder PVK gleichzusetzen.

## Warum spezifische Oberfläche

Die spezifische Oberfläche (Oberfläche je Gramm) eines Pigments oder Füllstoffs beeinflusst Farbstärke, Deckvermögen, Bindemittelbedarf und Rheologie.

## Das BET-Prinzip

Die Methode nach Brunauer, Emmett und Teller misst die physikalische Adsorption eines Gases — meist Stickstoff, $N_2(g) \rightleftharpoons N_2(ads)$ — an der zugänglichen Pigmentoberfläche bei verschiedenen Relativdrücken. Aus der Adsorptionsisotherme berechnet man nach dem BET-Modell die Menge Gas einer Monoschicht (Monolagenkapazität) und daraus die spezifische Oberfläche in m² je Gramm. Erfasst wird dabei die für das Messgas zugängliche Fläche — je nach Material also auch innere Poren- und Strukturflächen. Die BET-Oberfläche ist deshalb nicht immer identisch mit der rein geometrischen Oberfläche der einzelnen Teilchen.

## Zusammenhang mit der Teilchengröße

Je kleiner der Teilchendurchmesser, desto größer die spezifische Oberfläche — bei vergleichbarer Form und Dichte gilt näherungsweise $S_m = 6/(\rho \cdot d)$ (siehe L-44). Extrem feine Stoffe wie pyrogene Kieselsäure haben deshalb eine sehr hohe BET-Oberfläche und typischerweise auch eine hohe Ölzahl.

## Bedeutung für die Rezeptur

Eine hohe spezifische Oberfläche geht oft mit höherem Bindemittel- und Netzmittelbedarf und einer stärkeren Rheologiewirkung einher — wichtig für die Dispergierung; die Korrelation ist aber systemabhängig und keine feste Gesetzmäßigkeit. Drei Kenngrößen sind sauber auseinanderzuhalten: Die BET-Fläche ist eine Messgröße (m²/g). Die Ölzahl ist ein empirischer, praxisnaher Kennwert für den Benetzungsbedarf, aber keine direkte Funktion der BET-Fläche — Teilchenform, Porosität, Struktur und Oberflächenchemie spielen mit hinein. Die PVK schließlich ist eine reine Volumenverhältnisgröße, PVK = V(Pigment + Füllstoff) / [V(Pigment + Füllstoff) + V(Bindemittel-Festkörper)] (siehe L-39); aus einer hohen BET-Fläche folgt deshalb keine höhere PVK. Beeinflusst wird über den Bindemittelbedarf allenfalls die kritische PVK des Systems (siehe L-55).

## Arbeitssicherheit

Gemessen wird bei der Temperatur des siedenden Stickstoffs (77 K), also im Bad aus flüssigem Stickstoff. Stickstoff ist nicht giftig, verdrängt aber Sauerstoff: Ein Liter der Flüssigkeit setzt beim Verdampfen rund 700 Liter Gas frei — in kleinen oder schlecht belüfteten Räumen besteht Erstickungsgefahr, deshalb auf ausreichende Lüftung achten. Beim Umfüllen zusätzlich Kälteschutzhandschuhe und Gesichtsschutz tragen, weil flüssiger Stickstoff schwere Kälteverbrennungen verursacht. Der Umgang mit hochfeinen Pigment- und Füllstoffpulvern erfordert zusätzlich Staubminimierung, Absaugung und Atemschutz, weil feine Stäube lungengängig sind; bei alveolengängigem kristallinem $SiO_2$ bestehen darüber hinaus besondere inhalative Gesundheitsgefahren (siehe L-40).

**Merksatz**

BET misst über Gasadsorption die zugängliche spezifische Oberfläche (m²/g). Kleinere Teilchen bedeuten tendenziell mehr Oberfläche und damit meist höheren Benetzungs- und Bindemittelbedarf — die Ölzahl bleibt aber ein empirischer Kennwert und keine direkte Funktion der BET-Fläche, und die PVK ist eine davon unabhängige Volumengröße. Feine Pulver nur mit Staubschutz handhaben; Stickstoff ist nicht giftig, aber sauerstoffverdrängend.

**Stichwörter:** BET-Methode, spezifische Oberfläche, Gasadsorption, Adsorptionsisotherme, Monolagenkapazität, Stickstoff, Teilchengröße, Ölzahl, PVK, pyrogene Kieselsäure, Dispergierung, Staubschutz
*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; DIN ISO 9277*

## Übungsblatt Ü-45 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**
Was misst die BET-Methode, und nach welchem Prinzip? Grenzen Sie die BET-Fläche anschließend gegen Ölzahl und PVK ab.

**Größe:** Die spezifische Oberfläche eines Pigments oder Füllstoffs in m² je Gramm — genauer: die für das Messgas zugängliche Adsorptionsoberfläche, je nach Material einschließlich innerer Poren- und Strukturflächen.
**Prinzip:** Physikalische Gasadsorption (meist Stickstoff, $N_2(g) \rightleftharpoons N_2(ads)$) bei verschiedenen Relativdrücken; aus der Adsorptionsisotherme wird nach dem BET-Modell die Monolagenkapazität und daraus die Oberfläche berechnet.
**Namensgeber:** Brunauer, Emmett und Teller.
**Abgrenzung:** Die BET-Fläche ist eine Messgröße und nicht mit der Ölzahl (empirischer Benetzungskennwert) oder der PVK (Volumenverhältnisgröße) gleichzusetzen.
*Bewertung: Messgröße, Monolagenkonzept und Adsorptionsprinzip werden korrekt beschrieben und gegen Ölzahl und PVK abgegrenzt.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**
Ein Pigment hat eine spezifische Oberfläche von 10 m²/g. Ein feineres Pigment gleicher Dichte und Form hat den halben Teilchendurchmesser. Berechnen Sie die idealisierte spezifische Oberfläche. Nennen Sie anschließend drei Gründe, warum der reale BET-Messwert von dieser Rechnung abweichen kann.

**Zusammenhang:** Für ideale, nichtporöse Teilchen gilt $S_m = 6/(\rho \cdot d)$, die spezifische Oberfläche ist also umgekehrt proportional zum Durchmesser: $O_2 = O_1 \cdot d_1/d_2$ (siehe L-44).
**Rechnung:** Halber Durchmesser ($d_2 = d_1/2$): $O_2 = 10 \cdot d_1/(d_1/2) = 10 \cdot 2 = 20$ m²/g
**Abweichungsgrund 1 — Porosität:** BET erfasst auch innere Poren- und Strukturflächen; poröse Materialien liefern deutlich höhere Messwerte als die geometrische Rechnung.
**Abweichungsgrund 2 — Form und Struktur:** Reale Teilchen sind nicht ideal kugelförmig; anisometrische Formen, Aggregate und Agglomerate verändern die zugängliche Fläche.
**Abweichungsgrund 3 — Größenverteilung:** Technische Pigmente haben stets eine breite Teilchengrößenverteilung, die Rechnung arbeitet dagegen mit einem einzigen Mittelwert. Auch Oberflächenbehandlungen können die zugängliche Fläche verändern.
*Bewertung: Die umgekehrte Proportionalität wird korrekt angewendet und die Grenzen der idealisierten Rechnung werden mit mindestens drei fachlich stichhaltigen Gründen belegt.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**

Erklären Sie die Auswirkungen einer hohen BET-Fläche auf Benetzung, Ölzahl, Bindemittel-/Netzmittelbedarf, Dispergierung und Rheologie. Begründen Sie, warum daraus nicht automatisch eine höhere PVK folgt. Welchen Schutz braucht der Umgang mit solchen Pulvern?

**Benetzung und Ölzahl:** Mehr zugängliche Oberfläche muss benetzt werden; der Benetzungsbedarf und damit typischerweise auch die gemessene Ölzahl steigen. Die Ölzahl bleibt aber ein empirischer Kennwert und keine direkte Funktion der BET-Fläche — Form, Porosität, Struktur und Oberflächenchemie wirken mit.

**Bindemittel-/Netzmittelbedarf und Dispergierung:** Bindemittel-, Netz- und Dispergiermittelbedarf sowie der nötige Energieeintrag steigen tendenziell; feinteilige Feststoffe neigen zudem stärker zur Reagglomeration und müssen ausreichend stabilisiert werden.

**Rheologie:** Große Oberfläche und Partikel-Partikel-Wechselwirkungen erhöhen häufig Viskosität und Strukturviskosität — die Stärke des Effekts ist systemabhängig.

**Warum die PVK nicht automatisch steigt:** Die PVK ist eine reine Volumenverhältnisgröße: PVK = V(Pigment + Füllstoff) / [V(Pigment + Füllstoff) + V(Bindemittel-Festkörper)]. Sie wird durch die Rezeptur festgelegt, nicht durch eine Messgröße wie die BET-Fläche. Ein höherer Bindemittelbedarf senkt allenfalls die kritische PVK des Systems — die tatsächliche PVK rückt dadurch näher an die KPVK, steigt aber nicht von selbst (siehe L-55).

**Arbeitsschutz:** Feine Pulver sind lungengängig; Staubfreisetzung minimieren, Absaugung und Atemschutz einsetzen. Bei alveolengängigem kristallinem $SiO_2$ gelten besondere Anforderungen (siehe L-40).

*Bewertung: Die Antwort trennt BET-Fläche, Ölzahl und PVK sauber voneinander und begründet fachlich richtig, dass aus einer hohen BET-Fläche keine höhere PVK folgt; der Staubschutz wird korrekt genannt.*

# L-46 · Rheologie-Additive

*Von pyrogener Kieselsäure bis Polyurea: Thixotropie gegen Ablaufen und Absetzen*

**Prüfungsteil 1** · A 8.4

Rheologie-Additive steuern das Fließverhalten: über unterschiedliche Wirkprinzipien — Partikelnetzwerk, alkalisches Quellen oder hydrophobe Assoziation — bauen manche ein reversibles, zeitabhängig rückstellendes Netzwerk auf (Thixotropie); andere wirken vor allem über reine Viskositätsanhebung oder scherverdünnendes (pseudoplastisches) Verhalten ohne ausgeprägte Zeitabhängigkeit.

## Wozu Rheologie-Additive

Rheologie-Additive (Thixotropier- oder Verdickungsmittel) stellen das Fließverhalten eines Lacks ein. Sie sollen zwei Dinge zugleich leisten: den Lack beim Auftragen dünnflüssig machen und ihn danach schnell wieder verfestigen, damit er nicht abläuft und die Pigmente nicht absetzen.

## Scheinbare Viskosität

```
Bei einem Newtonschen Fluid ist die Viskosität bei gegebener Temperatur unabhängig von der
   Schergeschwindigkeit. Lacke sind dagegen meist nicht-newtonsch – ihre gemessene
   Viskosität hängt von den Messbedingungen ab. Die bei einer bestimmten
   Schergeschwindigkeit ermittelte Viskosität heißt scheinbare Viskosität:

ηapp = τ / γ̇

ηapp = scheinbare Viskosität, τ = Schubspannung, γ̇ = Schergeschwindigkeit; für ein
   Newtonsches Fluid gilt dagegen schlicht τ = η · γ̇ mit konstantem η. Eine
   Viskositätsangabe ist deshalb nur zusammen mit Temperatur und Messbedingungen
   aussagekräftig – bei nicht-newtonschen Lacken beeinflussen zusätzlich Messhistorie,
   Scherrate und Messgeometrie den ermittelten Wert.
```

## Thixotropie als Prinzip

Das gelingt über ein reversibles Netzwerk im Lack: Unter Scherung — Rühren, Spritzen, Rollen — bricht es auf und die Viskosität sinkt; in Ruhe baut es sich wieder auf und die Viskosität steigt. Wichtig ist die Abgrenzung zur reinen Scherverdünnung: Scherverdünnung beschreibt nur, dass die scheinbare Viskosität mit steigender Schergeschwindigkeit sinkt — eine Abhängigkeit von der Schergeschwindigkeit, nicht zwingend von der Zeit. Thixotropie geht weiter: Struktur und Viskosität sinken unter geeigneter Scherbeanspruchung und bauen sich danach zeitabhängig wieder auf. Scherverdünnung allein ist noch keine Thixotropie. Umgekehrt gilt aber auch: Eine Hysterese in der Fließkurve allein beweist noch keine bestimmte mikroskopische Netzwerkstruktur — sie ist ein Messbefund, dessen Deutung vom System abhängt.

## Pyrogene Kieselsäure: Herstellung und Aufbau

Pyrogene (hochdisperse) Kieselsäure entsteht durch Flammenhydrolyse von $SiCl_4$ in einer $H_2/O_2$-Flamme — traditionell und in der Fachliteratur häufig Knallgasflamme genannt. Die Gesamtbilanz lautet:

$$SiCl_4 + 2\ H_2 + O_2 \rightarrow SiO_2 + 4\ HCl$$

Der Name darf nicht über den Ablauf täuschen: Es ist keine einstufige Verbrennung, sondern ein kontrollierter Hochtemperaturprozess. Dabei entstehen Primärpartikel im Nanometerbereich, die zu Aggregaten verschmelzen und sich zu lockeren Agglomeraten zusammenlagern — daher die sehr große spezifische Oberfläche und die hohe Ölzahl. An der Oberfläche sitzen reaktive Silanolgruppen (Si–OH), bei nativer Kieselsäure etwa 2 bis 3 je nm².

Zur Bezeichnung: „HDK“ ist ein Markenname eines bestimmten Herstellers, kein Gattungsbegriff. Fachlich korrekt heißt der Rohstoff pyrogene oder hochdisperse Kieselsäure.

## Hydrophile (native) Kieselsäure

Sie trägt die volle Silanoldichte. Über Wasserstoffbrücken zwischen den Silanolgruppen (≡Si–OH ⋯ HO–Si≡) baut sie ein strukturgebendes Netzwerk auf — in unpolaren und wenig polaren Systemen besonders ausgeprägt.

In Wasser und in stark polaren Bindemitteln finden die Silanolgruppen dagegen genug Partner im Medium selbst; die Partikel-Partikel-Wechselwirkung wird dadurch abgeschwächt. Warum sie dort trotzdem eingesetzt wird, steht weiter unten unter „Formulierungsgeschick“.

## Hydrophobe (nachbehandelte) Kieselsäure

Ein Teil der Silanolgruppen wird chemisch mit organischen Silanen umgesetzt, zum Beispiel mit Chlortrimethylsilan (TMCS):

$$\equiv Si–OH + (CH_3)_3Si–Cl \rightarrow \equiv Si–O–Si(CH_3)_3 + HCl$$

Industriell werden auch Hexamethyldisilazan, Dimethyldichlorsilan oder Polydimethylsiloxan (PDMS) verwendet. Je nach Mittel unterscheiden sich Oberflächenbelegung, Rest-Silanolgehalt und Wechselwirkung mit dem Bindemittel.

Die Struktur entsteht dann nicht mehr über Silanol-Wasserstoffbrücken, sondern darüber, wie gut die organische Oberfläche zum Medium passt:
• Unpolares Medium: Die organische Oberfläche passt gut dazu — die Partikel lagern sich kaum zusammen, die Strukturwirkung bleibt gering.
• Polares Medium, vor allem Wasser: Die Oberfläche wird schlecht benetzt. Zwei solche Oberflächen legen sich aneinander und verkleinern so ihre Kontaktfläche zum Medium — daher die kräftige Strukturbildung.

Faustregel: Native Typen wirken oft schon in eher unpolaren Systemen gut, hydrophobierte gerade in mittel- bis hochpolaren Harzsystemen wie 2K-Epoxid. Oberfläche, Aggregatstruktur, Dispergierzustand und Bindemittelchemie wirken aber mindestens ebenso stark.

## Wie viel Bindemittel sie bindet

Schon kleine Mengen wirken stark. Die hohe Ölzahl weist auf einen hohen Vehicle-Bedarf hin — sie ist aber ein empirischer Prüfkennwert und kein stöchiometrischer Bindemittelbedarf: Die im Ölzahl-Test aufgenommene Menge darf nicht 1:1 als Bindemittelzugabe ins Rezept übernommen werden. Auf die Pigmentvolumenkonzentration (PVK, siehe L-55) lässt sich daraus ebenfalls nicht schließen; sie wird aus den tatsächlichen Volumenanteilen von Feststoff- und Bindemittelphase berechnet.

## Sonderfall: PDMS-behandelte Kieselsäure

Bei mit Polydimethylsiloxan (PDMS) nachbehandelten Typen ist nicht zwangsläufig das gesamte PDMS kovalent an die Oberfläche gebunden — manche Produkte enthalten laut technischem Datenblatt zusätzlich freies, migrierfähiges Siliconöl. Das kann die Oberflächenenergie des fertigen Films deutlich senken und je nach Formulierung zu Benetzungsstörungen, Kratern oder Problemen bei Überlackierung und Haftung führen. Bei Lacken, die später überlackiert, bedruckt oder verklebt werden, lohnt sich deshalb ein Blick ins Datenblatt, ob und wie viel freies PDMS enthalten ist — in anderen Anwendungen kann der leicht ölige Charakter dagegen durchaus erwünscht sein.

## Organophile Schichtsilicate

Schichtsilicate wie Bentonit/Montmorillonit oder Hectorit sind natürlich vorkommende, plättchenförmige 2:1-Schichtsilicate; daneben gibt es gereinigte und synthetische Typen mit besser kontrollierter Zusammensetzung. Für lösemittelhaltige Lacke werden sie meist organophil modifiziert (Organoclays): Austauschbare Kationen zwischen den Schichten werden durch organische, meist ammoniumbasierte Modifikatoren ersetzt. Im geeigneten Medium quellen bzw. delaminieren die Plättchen teilweise und bilden ein reversibles Netzwerk — anschaulich oft „Kartenhausstruktur“ genannt, ein vereinfachtes Modell, keine exakte Struktur jedes Systems. Unter Scherung bricht es auf, in Ruhe baut es sich wieder auf — Thixotropie; je nach Typ als Pulver direkt eingearbeitet oder zunächst als Vor-Gel aktiviert; manche moderne Typen benötigen keine chemische Aktivierung.

Natürlich gewonnene Rohstoffe können je nach Lagerstätte Begleitminerale enthalten — das beeinflusst Reinheit, Kationenaustauschkapazität, Quellvermögen und auch die Eigenfarbe, was bei hellen und transparenten Lacken unerwünscht ist. Gereinigte oder synthetische Typen bieten hier oft Vorteile. Bei den organischen Modifikatoren ist nicht das Amin selbst das Problem — je nach chemischer Struktur, thermischer Stabilität und Reinheit können sie aber Farbe und Langzeitstabilität beeinflussen; bei hellen oder hochtemperaturbeanspruchten Lacken sind deshalb farbstabile Typen zu wählen.

Wichtig: „Bentone“ ist keine allgemeine Bezeichnung für Schichtsilicate, sondern ein Markenname für bestimmte organisch modifizierte Produkte.

## Wässrige Verdicker: ASE, HASE, HEUR

Für Wasserlacke gibt es neben Celluloseethern (z. B. Hydroxyethylcellulose) drei wichtige synthetische Verdickerklassen mit unterschiedlichem Wirkprinzip. ASE (Alkali-Swellable Emulsions) sind carboxylgruppenhaltige Acrylatpolymere: Im sauren Zustand liegen die Ketten kompakt vor; bei Neutralisation (–COOH + $OH^-$ → $–COO^-$ + $H_2O$) werden sie geladen, stoßen sich elektrostatisch ab und quellen auf — die Viskosität steigt. HASE-Verdicker sind hydrophob modifizierte ASE-Typen: Zusätzlich zum Quellen assoziieren sich ihre hydrophoben Seitengruppen untereinander und mit dem Bindemittel — ein stärkeres, formulierungsabhängiges Netzwerk. HEUR-Verdicker (hydrophob modifizierte Polyurethane) verdicken dagegen fast ausschließlich über hydrophobe Assoziation mit dem Bindemittel und anderen hydrophoben Domänen, nicht über das Quellen einzelner Ketten. Sie können eine sehr gute Balance aus Verlauf und Standfestigkeit liefern — pauschal „den besten Verlauf“ ergeben sie aber nicht, denn das Ergebnis ist stark formulierungsabhängig.

## Organische Strukturgeber für Lösemittel- und 100-%-Systeme

Neben Kieselsäure und Schichtsilicaten gibt es organische Thixotropiermittel für lösemittelhaltige, lösemittelfreie und High-Solid-Systeme: Polyamid- und Amidwachse bilden über Wasserstoffbrücken zwischen den Amidgruppen und kristalline Domänen ein faserartiges, reversibles Netzwerk — starke Thixotropierung, aber anspruchsvolle Aktivierung (Temperatur, Scherung). Hydriertes Rizinusöl und verwandte Fettsäurederivate strukturieren ähnlich über Wasserstoffbrücken und kristalline Bereiche. Polyurea-Additive (Harnstoffgruppen –NH–CO–NH–) bilden über assoziierte Harnstoffgruppen ein feinteiliges Netzwerk und eignen sich gut für hochwertige, festkörperreiche Systeme; Morphologie und Wirkung hängen dabei stark von Chemie, Konzentration und Aktivierung ab. Bei allen wachsartigen Strukturgebern gilt: Sie sind nicht automatisch filmneutral — bei schlechter Verträglichkeit können sie an die Oberfläche wandern (Ausschwitzen/Blooming) und Haftung sowie Überlackierbarkeit der nächsten Schicht beeinträchtigen.

## Auswahl nach System

Welches Additiv passt, hängt vom System ab: Pyrogene Kieselsäure bevorzugt man in lösemittelhaltigen und lösemittelfreien Systemen und in klaren Lacken — sie dickt so fein ein, dass der Film nicht trübt (ein Vorteil gegenüber Bentoniten); Schichtsilicate wirken ebenfalls in lösemittelhaltigen Lacken. In wässrigen und stark polaren Systemen verändert das Medium die Oberflächenwechselwirkungen; deshalb müssen Oberfläche und Rheologieadditiv gezielt auf das System abgestimmt werden — neben hydrophilen Kieselsäure- und Hectorit-Typen kommen dort insbesondere Celluloseether sowie ASE-, HASE- und HEUR-Verdicker zum Einsatz.

## Lieferform: wässrige Dispersion

Pyrogene Kieselsäure gibt es nicht nur als Pulver, sondern auch als fertige wässrige Dispersion. Der Grund ist die Einarbeitung: Das Pulver staubt stark (Inhalationsrisiko) und muss mit hoher Scherung desagglomeriert werden, sonst bleiben Stippen. Handelsübliche Dispersionen sind bereits gut vor-dispergiert und stabilisiert und lassen sich staubfrei und reproduzierbar einrühren — praktisch vor allem für Wasserlacke. „Fertig desagglomeriert“ ist dabei zu absolut formuliert: Wie die Aggregatstruktur tatsächlich vorliegt und wie viel Scherenergie beim Einarbeiten noch nötig ist, hängt vom konkreten Produkt ab. Genutzt wird sie dort weniger zum Verdicken (im Wässrigen wirkt sie schwächer) als zur Mattierung, für Kratz- und Abriebfestigkeit, gegen Verblocken (Antiblocking) und zum Absetzschutz. Nicht verwechseln mit Kieselsol (kolloidale Kieselsäure): einzelne $SiO_2$-Nanokügelchen aus einem anderen Prozess, die eher als Härtungs- und Bindemittelkomponente sowie in Sol-Gel-Beschichtungen dienen. Die Dispersion ist nur die Lieferform — die Kieselsäure selbst bleibt pyrogen.

## Formulierungsgeschick: Kieselsäure im Wasserlack

Nach der einfachen Logik dürfte hydrophile Kieselsäure im Wasserlack kaum wirken: Die Silanolgruppen finden im Wasser genug Partner, das Partikelnetzwerk bleibt schwach. Trotzdem liefert sie dort Rheologie und Absetzschutz. Drei Beiträge wirken zusammen:

1. Struktur vor Wechselwirkung. Die Aggregate sind stark verzweigt und sperrig. Sie packen schlecht und schließen viel flüssige Phase ein. Schon Zehntelprozent erzeugen dadurch eine Fließgrenze bei kleiner Scherung — dieser Beitrag ist rein geometrisch und kommt ohne Anziehung zwischen den Partikeln aus. Für Absetzschutz reicht er allein; die gedämpfte Abstoßung aus Punkt 2 und die Wasserstoffbrücken zum Bindemittel aus Punkt 3 kommen additiv hinzu.

2. Die Ladung als Stellgröße. Oberhalb von pH 3 ist die Oberfläche negativ geladen (siehe L-50), bei pH 8–9 stoßen sich die Aggregate deshalb ab. Neutralisationsamine, Elektrolyte aus Rohstoff und Prozesswasser sowie mehrwertige Ionen schwächen diese Abstoßung — was in L-50 als Störung beschrieben wird, ist hier Teil des Wirkmechanismus.

3. Belegung mit Lackbestandteilen. Silanolgruppen binden über Wasserstoffbrücken an Ether-, Hydroxyl-, Urethan- und Amidgruppen des Bindemittels. Adsorbiert eine Polymerkette an zwei Aggregaten, entsteht eine Brücke — und aus vielen Brücken ein Netzwerk mit der Kieselsäure als Knotenpunkt.

## Welchen Typ im Wasserlack?

Der Hydrophobierungsgrad ist keine Ja-Nein-Frage, sondern ein Regler:

• Hydrophile Typen lassen sich sauber in Wasser einarbeiten, bauen aber wegen der Ladungsabstoßung nur moderat Struktur auf.
• Stark hydrophobierte Typen könnten im polaren Medium kräftig strukturieren, sind aber schwer zu benetzen, schwimmen auf und neigen zu Stippen. PDMS-behandelte Typen bringen zusätzlich das Risiko freien Siliconöls mit.

Der Engpass ist also die Einarbeitung, nicht der Wirkmechanismus. Ein Teil der Typenwahl im Wässrigen ist deshalb schlicht Verarbeitbarkeit — häufig greift man zu vordispergierten Lieferformen.

## Kombination mehrerer Rheologie-Additive

Ein einzelnes Additiv muss Standfestigkeit und Verlauf gleichzeitig bedienen — zwei Anforderungen in verschiedenen Scherbereichen. Zwei Additive mit unterschiedlichem Wirkprinzip lassen sich dagegen getrennt einstellen. Das ist der übliche Weg im Wasserlack:

• Pyrogene Kieselsäure oder Hectorit liefern die Struktur bei sehr kleiner Scherung — Fließgrenze, Absetzschutz, Standfestigkeit an der senkrechten Fläche.
• HEUR- und HASE-Verdicker liefern Viskosität im mittleren und höheren Scherbereich — Verlauf, Applikationsverhalten, Farbaufnahme der Rolle.
• Celluloseether heben die Niedrigscherviskosität stark an, bringen aber meist schlechteren Verlauf mit; sie werden zunehmend durch assoziative Typen ersetzt.

Synergie: Die Polyethersegmente eines HEUR können an der Kieselsäureoberfläche adsorbieren, während die hydrophoben Enden mit der Bindemitteldispersion assoziieren. Die Kieselsäure wird so zum zusätzlichen Knoten im assoziativen Netzwerk — die Kombination bringt dann mehr als die Summe der Einzelwirkungen.

Die Kehrseite, die man kennen muss: Assoziative Verdicker adsorbieren auch unspezifisch. Eine Feststoffphase mit sehr großer Oberfläche kann den Verdicker regelrecht aufsaugen und dem System entziehen — die Viskosität sinkt, obwohl man ein verdickendes Additiv zugegeben hat. Nach jeder Änderung an Pigmentierung, Feststoffgehalt oder Kieselsäuredosierung ist die Verdickerdosierung deshalb neu auszubalancieren.

## Praxis: typische Dosierbereiche

Als grobe Orientierung aus Anwendungsbeispielen eines Herstellers (Wacker, pyrogene Kieselsäure HDK®): Für reinen Absetzschutz genügen oft schon 0,5 bis 1 Gew.-%; für ausgeprägte Thixotropie und Ablaufschutz (Anti-Sag) werden eher 1 bis 2 Gew.-% eingesetzt, bei High-Build-Beschichtungen mit hoher Nassschichtdicke bis zu etwa 4 Gew.-%. In Pulverlacken werden 0,2 bis 0,5 Gew.-% als Rieselhilfe eingesetzt — trocken als Post-Blend nach der Mahlung, nicht zur Rheologiesteuerung der Schmelze (siehe L-97; zur Schmelzviskosität L-90); in Druckfarben liegen die Mengen bei etwa 0,3 bis 1 Gew.-%. Als grobe Faustregel gilt außerdem: Typen mit höherer spezifischer (BET-)Oberfläche wirken rheologisch stärker, lassen sich aber schwerer dispergieren (siehe L-45) — Typen mit kleinerer Oberfläche sind leichter einzuarbeiten. Diese Bereiche sind herstellerseitige Anwendungsbeispiele und keine allgemeingültige Formulierungsregel; die tatsächlich nötige Dosierung hängt vom Gesamtsystem ab und muss im Labor bestimmt werden.

### Typische Formulierungsfehler

• Nur eine einzelne Viskositätszahl (z. B. Brookfield) betrachten — sie beschreibt das komplexe Fließverhalten nur unvollständig.
• Überdosieren — zu viel Struktur verschlechtert Verlauf, Glanz und Spritzbarkeit.
• Einarbeitung unterschätzen — besonders Kieselsäure, Schichtsilicate und Wachse brauchen die richtige Aktivierung.
• Additiv isoliert betrachten — Bindemittel, Pigmente und andere Additive beeinflussen die Wirkung mit.
• Thixotropie mit reiner Scherverdünnung verwechseln — die zeitabhängige Rückstellung ist ein eigenes Phänomen.
• Hydrophil/hydrophob als starre Systemregel verstehen — die tatsächliche Wirkung hängt vom ganzen System ab.

**Merksatz**

Viele Rheologie-Additive geben Thixotropie über ein reversibles, zeitabhängiges Netzwerk — unter Scherung dünn, in Ruhe wieder fest; manche wirken aber auch nur scherverdünnend oder heben schlicht die Viskosität an, ohne ausgeprägte Zeitabhängigkeit. Pyrogene Kieselsäure (Wasserstoffbrücken-Netzwerk über Silanolgruppen — die Ölzahl ist dabei nur ein empirischer Struktur-/Absorptionskennwert, weder ein direktes Maß für die Zahl der Wasserstoffbrücken noch ein stöchiometrischer Bindemittelbedarf und schon gar keine PVK-Formel) und organophile Schichtsilicate (Kartenhaus als didaktisches Modell) sind die Klassiker gegen Ablaufen und Absetzen. In Wasserlacken übernehmen zunehmend ASE/HASE/HEUR diese Rolle; in Lösemittel- und 100-%-Systemen ergänzen Polyamidwachse, Rizinusölderivate und Polyurea das Bild.

**Stichwörter:** Rheologieadditiv, Thixotropiermittel, pyrogene Kieselsäure, hochdisperse Kieselsäure, Ölzahl, Bentonit, Montmorillonit, Hectorit, Organoclay, Schichtsilicat, Verdicker, ASE, HASE, HEUR, Polyamidwachs, Polyurea, Ausschwitzen, Ablaufen, Absetzen, Thixotropie, wässrige Dispersion, Kieselsol, Antiblocking, Dosierbereich, Anti-Sag
*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur; Wacker Chemie AG, HDK® – Pyrogenic Silica, Product Overview und Coatings and Printing Inks (Broschüren)*

## Übungsblatt Ü-46 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**
Was leisten Rheologie-Additive, und wie funktioniert die Thixotropie? Grenzen Sie sie von reiner Scherverdünnung ab und nennen Sie zwei Beispiele für thixotropierende Additive.

**Aufgabe:** Sie machen den Lack beim Auftragen dünnflüssig und danach schnell wieder fest — gegen Ablaufen und Absetzen.
**Thixotropie:** Über ein reversibles Netzwerk: unter geeigneter Scherbeanspruchung bricht es auf (Viskosität sinkt), in Ruhe baut es sich zeitabhängig wieder auf (Viskosität steigt).
**Abgrenzung:** Reine Scherverdünnung bedeutet nur, dass die scheinbare Viskosität mit steigender Schergeschwindigkeit sinkt — ohne die zeitabhängige Rückstellung. Scherverdünnung allein ist noch keine Thixotropie.
**Beispiele:** Pyrogene Kieselsäure (Silanol-Wasserstoffbrücken) und organophile Schichtsilicate (Kartenhaus-Modell); in Wasserlacken ASE, HASE und HEUR.
*Bewertung: Aufgabe und reversibles Netzwerk werden korrekt beschrieben; für die volle Punktzahl muss Thixotropie ausdrücklich von reiner Scherverdünnung abgegrenzt und mit Beispielen belegt werden.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**

5 g pyrogene Kieselsäure besitzen eine Ölzahl von 300 (g Öl je 100 g). Berechnen Sie die rechnerische Ölaufnahme. Erklären Sie anschließend, warum dieser Wert nicht 1:1 als Bindemittelzugabe in die Rezeptur übernommen werden darf, und nennen Sie zwei weitere Faktoren, die den tatsächlichen Vehicle-Bedarf beeinflussen.

**Ölaufnahme:** m(Öl) = 5 g · 300/100 = 15 g

**Warum nicht 1:1:** Die Ölzahl ist ein empirischer Prüfkennwert aus einem genormten Anreibeversuch mit einem Standardöl bis zu einem definierten Endpunkt — kein stöchiometrischer Bindemittelbedarf. Im Lack liegt ein anderes Vehicle mit anderer Polarität, Molmasse und Benetzungsfähigkeit vor, und Netz-/Dispergiermittel verändern den Bedarf zusätzlich.

**Faktor 1 — Dispergierzustand:** Wie weit Aggregate und Agglomerate aufgeschlossen werden, verändert die tatsächlich benetzte Oberfläche und damit den Vehicle-Bedarf.

**Faktor 2 — Bindemittel- und Additivchemie:** Adsorption des Bindemittels an der Partikeloberfläche, Oberflächenbehandlung der Kieselsäure sowie Art und Menge der Netz- und Dispergiermittel bestimmen mit, wie viel Vehicle wirklich gebunden wird. Auch die Gesamtrezeptur (weitere Pigmente/Füllstoffe) spielt hinein.

*Bewertung: Die Ölaufnahme wird korrekt berechnet; entscheidend ist die Einordnung der Ölzahl als empirischer Kennwert und die Nennung von mindestens zwei weiteren Einflussgrößen auf den realen Vehicle-Bedarf.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**

Ein Klarlack zeigt nach Zugabe von 1,5 % pyrogener Kieselsäure eine deutlich bessere Standfestigkeit, aber schlechteren Verlauf. Erklären Sie den Zielkonflikt und warum eine Überdosierung die Beschichtung insgesamt verschlechtern kann und in welchem Fall sich das System dabei der kritischen PVK nähert. Nennen Sie drei Stellgrößen zur Optimierung.

**Der Zielkonflikt:** Standfestigkeit braucht ein tragfähiges Netzwerk bei niedriger Scherung, Verlauf dagegen ausreichend niedrige Viskosität in der Phase nach dem Auftrag. Dasselbe Netzwerk, das das Ablaufen verhindert, bremst auch das Verlaufen — beides wird über denselben Strukturaufbau eingestellt.

**Folgen der Überdosierung:** Die sehr große Oberfläche und die starke Strukturwirkung erhöhen den Vehicle-/Bindemittelbedarf und prägen das Netzwerk zu stark aus. Verlauf und Spritzbarkeit verschlechtern sich; je nach System können Glanz, Transparenz, Oberflächenbild und mechanische Eigenschaften leiden.

**Bezug zur PVK — korrekt formuliert:** Eine Annäherung an die kritische PVK ist möglich, wenn durch die zusätzliche Feststoffphase das tatsächliche Volumenverhältnis entsprechend steigt. Sie folgt aber nicht allein aus der hohen Ölzahl: Die PVK wird aus den realen Volumenanteilen von Feststoff- und Bindemittelphase berechnet (siehe L-55).

**Stellgröße 1 — Dosierung und Typ:** Konzentration reduzieren und einen Typ mit passender Oberflächenchemie bzw. geringerer Strukturwirkung wählen.

**Stellgröße 2 — Dispergierung/Aktivierung:** Scherenergie und Einarbeitungsverfahren anpassen; unzureichender oder übermäßiger Eintrag verändert die Netzwerkstruktur deutlich.

**Stellgröße 3 — Aufteilung auf zwei Additive:** Der wirksamste Hebel: Die Rheologie nicht einem Additiv aufbürden, sondern auf zwei mit unterschiedlichem Scherbereich verteilen — Kieselsäure oder Hectorit für die Fließgrenze bei kleiner Scherung, ein assoziativer Verdicker für Viskosität und Verlauf im mittleren Bereich. Beide lassen sich dann getrennt einstellen. Dazu Lösemittelbalance, Ablüftverhalten und Netz-/Dispergiermittel abstimmen.

*Bewertung: Der Zielkonflikt zwischen Standfestigkeit und Verlauf wird erklärt, die PVK-Aussage fachlich korrekt über die Volumenanteile statt über die Ölzahl begründet und drei praxistaugliche Stellgrößen genannt.*

# L-47 · Additive — wichtige Gruppen im Überblick

*Kleine Mengen, große Wirkung: von Netzmitteln bis Lichtschutz*

**Prüfungsteil 1** · A 8.4

Additive verbessern Herstellung und Eigenschaften in kleinen Mengen. Zu den besonders wichtigen Additivgruppen gehören Netz-/Dispergiermittel, Rheologie-Additive, Entschäumer, Verlaufsadditive und Lichtschutzmittel; welche Gruppen im Einzelfall relevant sind, hängt vom Beschichtungssystem und der Anwendung ab.

## Was Additive leisten

Additive werden nur in kleinen Mengen zugegeben, wirken aber stark. Sie verbessern zwei Dinge: die Herstellung (etwa Dispergieren und Entschäumen) und die Endeigenschaften des Films (etwa Verlauf und Beständigkeit). Zu viel des Guten schadet oft — die richtige Dosierung ist entscheidend.

## Netz- und Dispergiermittel

Netzmittel erleichtern das Benetzen der Pigmentoberfläche. Sie adsorbieren an der Grenzfläche und senken dabei die Oberflächenspannung der flüssigen Phase sowie die Grenzflächenspannung fest/flüssig — maßgeblich ist immer das Zusammenspiel beider Größen, nicht eine einzelne Zahl. Dispergiermittel halten die fertige Dispersion gegen Flockulation stabil (siehe L-52). Ohne Dispergiermittel neigen Pigmente zur Flockulation; ob sie sich zusätzlich absetzen, hängt außerdem von Teilchengröße, Dichte, Viskosität und Rheologie des Systems ab — Flockulation und Sedimentation sind zwei verschiedene Vorgänge.

## Wie ein Dispergiermittel stabilisiert

```
Pigmentoberfläche – Ankergruppe – solvatisierte Polymersegmente

Die Ankergruppe adsorbiert über ionische, Säure-Base-, koordinative oder andere spezifische
   Wechselwirkungen an der Feststoffoberfläche. Die solvatisierten Polymersegmente ragen in
   die Flüssigphase und bauen eine sterische bzw. – bei zusätzlicher Ladung –
   elektrosterische Barriere auf, die die Annäherung zweier Teilchen erschwert. Welche
   Ankerchemie passt, hängt von Pigment und Bindemittel ab; ein einzelnes Dispergiermittel
   eignet sich deshalb in aller Regel nicht gleichermaßen gut für alle
   Pigment-Bindemittel-Kombinationen – echte „Universaldispergiermittel“ sind die Ausnahme,
   kein Standard.
```

## Rheologie-Additive

Thixotropier- und Verdickungsmittel steuern das Fließverhalten: Sie verhindern Ablaufen und Absetzen und geben Thixotropie. Klassiker sind pyrogene Kieselsäure und organophile Schichtsilicate (siehe L-46).

## Entschäumer und Verlaufsadditive

Entschäumer zerstören und verhindern Schaum, der bei Herstellung und Applikation zu Störungen führt. Sie wirken durch gezielte Unverträglichkeit: feinste Tröpfchen dringen in die Schaumlamelle ein und destabilisieren sie, sodass sie zerreißt. Genau diese Unverträglichkeit macht sie heikel — zu viel oder ein unpassender Entschäumer erzeugt selbst Oberflächenfehler wie Krater, Stippen oder Glanzverlust; deshalb sorgfältig auswählen und knapp dosieren. Verlaufsadditive — oft Silicone oder Polyacrylate — können den Verlauf verbessern und bestimmte Benetzungs- und Kraterprobleme reduzieren; ein falsch ausgewähltes Additiv kann selbst Krater verursachen. Sie werden ebenfalls knapp dosiert, weil zu viel Silicon die Überlackierbarkeit stört.

### Lichtschutzmittel

Lichtschutzmittel schützen den Film vor UV-Abbau (Vergilbung, Versprödung, Kreidung). Es gibt zwei Wirkprinzipien: UV-Absorber (z. B. Benztriazole) nehmen die UV-Energie auf und wandeln sie in harmlose Wärme um; Radikalfänger vom Typ HALS (sterisch gehinderte Amine) greifen regenerativ in die photooxidativen Radikalprozesse ein — sie werden dabei über einen katalytischen Zyklus vielfach regeneriert und dadurch nur sehr langsam verbraucht, was ihre hohe Langzeitwirksamkeit erklärt; vollständig unverbraucht bleiben sie über sehr lange Bewitterungszeiträume allerdings nicht (Photoabbau, Extraktion, Migration). Kombiniert werden beide, weil sie verschiedene Lücken schließen: Der UV-Absorber folgt dem Lambert-Beer-Gesetz und schützt oberflächennahe Schichten kaum (dort ist der Lichtweg zu kurz), und er wird selbst langsam photochemisch abgebaut; das HALS fängt die trotzdem entstehenden Radikale gerade an der Oberfläche ab.

### Dosierung: das Optimum suchen, nicht „mehr“

Für Additive gilt eine Kurve mit Optimum, keine gerade Linie: Unterdosierung → Wirkung zu gering → Optimum → Überdosierung → neue Fehlerbilder. Deshalb arbeitet man mit einer Dosierungsreihe über mehrere Konzentrationen statt mit einem Erfahrungswert. Pauschale Dosierempfehlungen sind fachlich nicht seriös — maßgeblich sind Datenblatt und Lacktyp. Bewertet wird dabei nicht nur der ursprüngliche Fehler, sondern auch Glanz, Verlauf, Schaum, Haftung, Wasserbeständigkeit, Überlackierbarkeit und Lagerstabilität; ein Additiv, das ein Problem löst und zwei neue schafft, ist keine Lösung.

**Merksatz**

Wichtige Additivgruppen: Netz-/Dispergiermittel (benetzen, stabilisieren), Rheologie-Additive (gegen Ablaufen/Absetzen), Entschäumer (gegen Schaum), Verlaufsadditive (glatte Oberfläche) und Lichtschutzmittel (UV-Absorber + HALS). Immer sparsam dosieren und das Optimum über eine Dosierungsreihe suchen.

**Stichwörter:** Additiv, Netzmittel, Dispergiermittel, Ankergruppe, sterische Stabilisierung, elektrosterisch, Flockulation, Sedimentation, Rheologieadditiv, Entschäumer, Verlaufsadditiv, Lichtschutzmittel, UV-Absorber, HALS, Dosierungsreihe

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur*

## Übungsblatt Ü-47 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Nennen Sie die fünf wichtigsten Additivgruppen und je ihre Hauptaufgabe.

1. **Netz-/Dispergiermittel:** Benetzen die Pigmentoberfläche und stabilisieren die erzeugte Partikelverteilung gegen Flockulation.
2. **Rheologie-Additive:** Stellen Viskosität, Struktur, Standvermögen und Anti-Absetzverhalten ein; geben je nach Typ Thixotropie.
3. **Entschäumer:** Vermindern und zerstören unerwünschten Schaum bei Herstellung und Applikation.
4. **Verlaufsadditive:** Gleichen lokale Oberflächenspannungsunterschiede aus und verbessern dadurch Verlauf und Oberflächenqualität.
5. **Lichtschutzmittel:** Schützen vor photooxidativem Abbau — UV-Absorber und/oder HALS.

*Bewertung: Volle Punktzahl bei korrekter Benennung aller fünf Gruppen mit funktionaler Erklärung. Besonders gut ist eine Antwort, die Ursache und Wirkung verbindet, statt nur Begriffe aufzuzählen.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**

Ein Lack enthält 0,3 % UV-Absorber und 0,2 % HALS bezogen auf die Gesamtrezeptur. Berechnen Sie beide Mengen für einen Ansatz von 800 g. Begründen Sie anschließend, warum man beide Stoffklassen kombiniert, statt einfach mehr UV-Absorber einzusetzen.

**UV-Absorber:** 800 g · 0,3/100 = 2,4 g

**HALS:** 800 g · 0,2/100 = 1,6 g

**Antwortsatz:** 2,4 g UV-Absorber und 1,6 g HALS.

**Unterschiedliche Angriffspunkte:** Der UV-Absorber fängt die Strahlung ab, bevor sie das Bindemittel schädigt, und gibt die Energie überwiegend als Wärme ab. HALS wirken erst danach: Sie greifen regenerativ in die bereits laufende radikalische Photooxidation ein. Beide adressieren also verschiedene Stufen desselben Schadensprozesses.

**Warum nicht einfach mehr UV-Absorber:** Ein UV-Absorber braucht Schichtdicke, um zu wirken — nach dem Lambert-Beerschen Gesetz absorbiert er in den obersten Mikrometern kaum etwas. Genau dort, an der Oberfläche, beginnt aber die Bewitterung. Zusätzlich schützt er sich selbst nicht gegen radikalische Prozesse. Höhere Dosierung kann außerdem Vergilbung, Migration und Kosten erhöhen. Die Kombination ist deshalb wirksamer als eine Erhöhung einer einzelnen Komponente.

*Bewertung: Die Prozentrechnung ist korrekt; für die volle Punktzahl muss die Kombination fachlich über die unterschiedlichen Angriffspunkte begründet werden, nicht nur mit „wirkt besser“.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**

Warum werden Verlaufsadditive auf Siliconbasis nur knapp dosiert?

**Nutzen:** Sie verändern die Oberflächen- und Grenzflächeneigenschaften, gleichen lokale Oberflächenspannungsunterschiede aus und verbessern dadurch den Verlauf; bestimmte Benetzungs- und Kraterprobleme lassen sich so reduzieren. Eine universelle Kratervermeidung sind sie nicht.

**Risiko:** Zu viel Silicon kann Benetzungsstörungen, Krater sowie Probleme bei Überlackierbarkeit und Zwischenhaftung verursachen — dieselbe starke Grenzflächenwirkung, die nutzt, schadet bei Überdosierung.

**Vorgehen bei Kratern:** Zuerst Kontamination, Untergrund, Oberflächenspannung und Applikation prüfen. Erst danach gezielt Netz-/Verlaufsadditive screenen — ein Additiv ersetzt keine saubere Fehlersuche.

**Konsequenz:** Man fährt eine Dosierungsreihe und bestimmt das Optimum, statt pauschal aufzudosieren.

*Bewertung: Der Zielkonflikt zwischen Verlaufswirkung und Überlackierbarkeit wird erkannt und ohne die zu absolute Behauptung formuliert, Verlaufsadditive würden Krater verhindern.*

# L-48 · Weichmacher

*Flexibilität, die im Film bleibt*

**Prüfungsteil 2** · A 10 · B 12

Ein Weichmacher ist ein schwerflüchtiger Stoff, der im Film bleibt und ihn flexibel macht — unverzichtbar vor allem für spröde Filmbildner wie Cellulosenitrat.

## Was ein Weichmacher tut

Weichmacher sind schwerflüchtige Stoffe, die auf ein Bindemittel ähnlich wirken wie ein Lösemittel, aber bei der Verarbeitungstemperatur kaum verdunsten und deshalb im Film bleiben. Genau darin liegt der entscheidende Unterschied: Ein Lösemittel soll den Film verlassen, ein Weichmacher soll darin bleiben — der Vergleich ist eine Lernhilfe, keine Gleichsetzung. Weichmacher machen spröde Filme flexibel und elastisch; Verlauf, Glanz und Fülle können sich ebenfalls verändern, das hängt aber vom konkreten Bindemittel-Weichmacher-System ab. Für von Natur aus spröde Filmbildner wie Cellulosenitrat sind sie unverzichtbar (siehe L-21).

## Wirkprinzip auf Molekülebene

```
Der Weichmacher schiebt sich zwischen die Polymerketten und schwächt die
   zwischenmolekularen Wechselwirkungen. Dadurch werden Kettensegmente beweglicher, und die
   Glasübergangstemperatur Tg sinkt in der Regel – der Film verhält sich bei
   Gebrauchstemperatur weiter oberhalb seines Sprödbereichs und ist damit flexibler.

Merkkette: Weichmacher → Segmentbeweglichkeit ↑ → Tg ↓ → Flexibilität ↑

Wie stark der Effekt ausfällt, hängt von Polymerstruktur, Weichmacherstruktur und
   Konzentration ab.
```

## Gelatinierend oder nichtgelatinierend

Man unterscheidet nach dem Lösevermögen für den Filmbildner. Gelatinierende (primäre) Weichmacher besitzen Lösevermögen für den Filmbildner; sie solvatisieren Cellulosenitrat und bilden mit ihm echte, gelartige Solvate — Beispiele: Dibutylphthalat, Di-2-ethylhexylphthalat, Trikresylphosphat. Nichtgelatinierende (sekundäre) Weichmacher besitzen für den betreffenden Filmbildner kein ausreichendes Lösevermögen — Beispiele für Cellulosenitrat: Ricinusöl, chlorierte Paraffine, Stearate und Oleate. Sie sind nur bis zu einer Verträglichkeitsgrenze mischbar; darüber hinaus wandern sie aus (Ausschwitzen, klebrige Oberfläche). Deshalb werden sie nie allein eingesetzt, sondern nur zusammen mit einem gelatinierenden Weichmacher — etwa um zu verbilligen oder die Kältefestigkeit zu verbessern. Wichtig: Die Zuordnung gilt immer nur gegenüber einem bestimmten Filmbildner — derselbe Weichmacher kann für Cellulosenitrat nichtgelatinierend und für PVC gelatinierend sein. Die Begriffe beschreiben also physikalisches Verhalten, keine toxikologische oder regulatorische Einteilung.

## Esterweichmacher — die chemische Grundlage

```
R–COOH + HO–R´ ⇌ R–COO–R´ + H₂O

Esterweichmacher entstehen formal aus einer Carbonsäure (häufig mehrfunktionell, etwa
   Phthalsäure oder Adipinsäure) und einem Alkohol. Die Gleichung zeigt das
   Bildungsprinzip; technische Weichmacher werden über spezifische Syntheseverfahren
   hergestellt und sind oft Isomerengemische. Über die Wahl von Säure und Alkohol lassen
   sich Molmasse, Polarität und damit Verträglichkeit, Flüchtigkeit und Migrationsneigung
   gezielt einstellen.
```

## Esterweichmacher — die Hauptgruppe

• Phthalate — Dibutylphthalat, Di-2-ethylhexylphthalat.
• Adipate und Sebacate — Ester der Adipin- bzw. Sebacinsäure mit Monoalkoholen.
• Phosphate — Trikresylphosphat und andere Phosphorsäureester; beim Trikresylphosphat sind die neurotoxischen ortho-Kresyl-Isomere der Grund, weshalb heute nur o-kresylarme technische Qualitäten eingesetzt werden.
• Citronensäureester — phthalatfreie Alternative, z. B. Acetyltributylcitrat (ATBC).
• Trimellitate — z. B. Tris(2-ethylhexyl)trimellitat (TOTM): hohe Molmasse, geringe Flüchtigkeit und Migration, für dauerhafte Flexibilisierung.
• Terephthalate — z. B. Bis(2-ethylhexyl)terephthalat (DOTP, auch als Dioctylterephthalat bezeichnet): phthalatfreie Alternative mit guter technischer Eignung.
• Cyclohexandicarbonsäureester — z. B. Diisononylcyclohexan-1,2-dicarboxylat (DINCH): phthalatfrei, gute Verträglichkeit und geringe Migrationsneigung.

## Weitere Typen

Neben den Estern gibt es Chlorkohlenwasserstoff-Weichmacher (chlorierte Paraffine) sowie Weichmacher auf Basis epoxidierter Öle und epoxidierter Fettsäureester. Letztere wirken in chlorhaltigen Systemen zugleich als HCl-Fänger: Der bei der Dehydrochlorierung freigesetzte Chlorwasserstoff greift die Epoxidgruppe an, die daraufhin unter Ringöffnung zu einem chlorhaltigen Hydroxy-Produkt reagiert (Epoxidgruppe + HCl → Ringöffnung → gebundenes Chlorid). Damit wird das abgespaltene HCl abgefangen — sonst würde es die weitere Zersetzung selbst beschleunigen und der Abbau liefe immer schneller ab. Eine einzelne stöchiometrische Gesamtgleichung lässt sich dafür nicht angeben, weil reale epoxidierte Öle unterschiedliche Fettsäureketten und mehrere Epoxidgruppen je Molekül enthalten. Epoxidierte Pflanzenöle und Fettsäureester können je nach Produkt ein günstiges toxikologisches Profil besitzen, die Bewertung muss aber produktspezifisch erfolgen. Daneben werden polymere Weichmacher mit höherer Molmasse eingesetzt, die wegen ihrer Größe kaum aus dem Film auswandern.

## Auswahl und Sicherheit

Bei der Auswahl zählen Verträglichkeit mit dem Bindemittel, Migrationsbeständigkeit, geringe Farbzahl und Lichtbeständigkeit. Gesundheitliche und ökologische Bedenken sind heute mitentscheidend: Bestimmte Weichmacher-Phthalate wie Dibutylphthalat (DBP) und Di-2-ethylhexylphthalat (DEHP) sind unter REACH als besonders besorgniserregend (SVHC) eingestuft und in ihrer Verwendung beschränkt; bestimmte chlorierte Paraffine werden je nach Kettenlänge und Chlorierungsgrad ebenfalls kritisch bewertet. Auch Diisobutylphthalat (DIBP) und Benzylbutylphthalat (BBP) fallen unter dieselbe REACH-Beschränkung. Wichtig dabei: „phthalatfrei“ bedeutet nicht automatisch „toxikologisch unbedenklich“ — auch Ersatzstoffe müssen hinsichtlich Migration, Flüchtigkeit und regulatorischem Status bewertet werden.

**Merksatz**

Der Weichmacher verdunstet nicht, sondern bleibt im Film: Er erhöht die Segmentbeweglichkeit, senkt dadurch meist die Glasübergangstemperatur Tg und macht den Film flexibel. Ester gehören zu den wichtigsten Weichmachergruppen; historisch spielten Phthalate eine große Rolle, heute werden je nach Anwendung zunehmend alternative Weichmacher eingesetzt. Die Auswahl richtet sich nach Verträglichkeit, Migration und heute auch nach Ökologie und Toxikologie.

**Stichwörter:** Weichmacher, Glasübergangstemperatur, Tg, Segmentbeweglichkeit, gelatinierend, nichtgelatinierend, Solvat, Esterweichmacher, Veresterung, Phthalat, Dibutylphthalat, Di-2-ethylhexylphthalat, Adipat, Sebacat, Trikresylphosphat, chlorierte Paraffine, epoxidiertes Öl, HCl-Fänger, Migrationsbeständigkeit
*Quellen: Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur; Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie*

## Übungsblatt Ü-48 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**
Was ist die Aufgabe eines Weichmachers, und worin unterscheiden sich gelatinierende von nichtgelatinierenden Typen?

**Aufgabe:** Ein Weichmacher ist schwerflüchtig, bleibt bei geeigneter Auswahl im Film und erhöht die Beweglichkeit der Polymersegmente. Dadurch sinkt in der Regel die Glasübergangstemperatur Tg, und spröde Filme werden flexibel und elastisch.
**Gelatinierend:** Besitzt Lösevermögen für den Filmbildner und bildet mit Cellulosenitrat echte, gelartige Solvate.
**Nichtgelatinierend:** Hat kein Lösevermögen; bleibt als schwerflüchtige, nur begrenzt verträgliche Phase im Film und wird nur in Kombination eingesetzt.
**Einordnung der Begriffe:** Beide beschreiben das physikalische Verhalten gegenüber dem jeweiligen Filmbildner — keine toxikologische oder regulatorische Kategorie.
**Praxis:** Oft werden beide Typen kombiniert, um ein gewünschtes Eigenschaftsprofil einzustellen.
*Bewertung: Die Aufgabe wird über Segmentbeweglichkeit und Tg begründet statt nur beschrieben, und der Unterschied gelatinierend/nichtgelatinierend wird am Verhalten gegenüber dem Filmbildner festgemacht.*

**Frage 2** **(Berechnung, 9 Punkte)**
Ein Cellulosenitrat-Lack enthält 12 kg Bindemittel-Festkörper. Der Weichmacher soll im Massenverhältnis Weichmacher : Bindemittel = 1 : 4 zugesetzt werden. Berechnen Sie die Weichmachermenge und den Weichmacheranteil am nichtflüchtigen Anteil.

**Gegeben:** Bindemittel = 12 kg; Verhältnis Weichmacher : Bindemittel = 1 : 4
**Weichmachermenge:** 12 kg / 4 = 3,0 kg
**Nichtflüchtiger Anteil:** Bindemittel + Weichmacher = 12 + 3,0 = 15,0 kg
**Weichmacheranteil:** 3,0 kg / 15,0 kg · 100 % = 20 %
**Antwortsatz:** Es werden 3,0 kg Weichmacher zugesetzt; er macht 20 % des nichtflüchtigen Anteils aus.
*Bewertung: Das Verhältnis wird richtig auf das Bindemittel bezogen, und der Anteil wird korrekt auf den gesamten nichtflüchtigen Anteil (Bindemittel plus Weichmacher) berechnet, nicht nur aufs Bindemittel.*

**Frage 3** **(Anwendung, 7 Punkte)**
Welche heute regulatorisch kritisch bewerteten Weichmacher würden Sie für eine neue Formulierung nicht ohne vorherige Prüfung einsetzen, und welche Alternativen kommen infrage?

**Kritisch zu prüfen:** Bestimmte Phthalate wie DEHP, DBP, BBP und DIBP sind aufgrund ihrer Gefahreneigenschaften und REACH-Beschränkungen für zahlreiche Anwendungen problematisch — nicht generell verboten, aber je nach Verwendungszweck stark eingeschränkt.
**Alternativen:** Je nach Einsatz kommen beispielsweise Adipate, Citrate, Trimellitate, Terephthalate, Cyclohexandicarbonsäureester oder polymere Weichmacher infrage.
**Auswahlkriterien:** Verträglichkeit mit dem Bindemittel, Migrationsbeständigkeit, Flüchtigkeit, Beständigkeit sowie die konkreten regulatorischen Anforderungen der Anwendung.
**Wichtiger Vorbehalt:** „Phthalatfrei“ heißt nicht automatisch „toxikologisch unbedenklich“: Auch Ersatzstoffe sind hinsichtlich Exposition, Migration, Flüchtigkeit, Umweltprofil und geltender Regulierung zu bewerten. Maßgeblich ist immer der aktuelle Sicherheitsdatenstand für die konkrete Anwendung.
*Bewertung: Die Antwort nennt konkrete kritische Phthalate mit korrektem Vorbehalt (nicht pauschal verboten), mehrere passende Alternativklassen und erkennt, dass „phthalatfrei“ allein kein Unbedenklichkeitsnachweis ist.*

Kapitel 4

# Dispergierung und Rezeptur

# L-49 · Disperse Systeme und Kolloide

*Phasengrenzflächen, disperse Phase, Teilchengrößen*

**Prüfungsteil 1** · A 9 · A 10

Ein pigmentierter oder gefüllter Lack ist ein disperses System: Die disperse Phase (fein verteilte Pigment-, Füllstoff- und Additivteilchen) liegt in einer kontinuierlichen Phase, dem Dispersionsmittel. Zwischen beiden liegt eine sehr große innere Grenzfläche.

## Was eine Phasengrenzfläche ist

Eine Phasengrenzfläche ist die Grenze zwischen zwei Phasen. Im Lack liegt sie zum Beispiel zwischen den festen Pigmentteilchen und der flüssigen kontinuierlichen Phase. „Nicht mischbar" ist dabei kein taugliches Kriterium — es passt allenfalls auf Flüssigkeitsgemische, nicht auf einen Feststoff in einer Flüssigkeit.

Die äußere Grenzfläche eines Feststoffs oder einer Flüssigkeit zur Gasphase wird üblicherweise Oberfläche genannt — etwa beim noch nicht dispergierten Pigmentpulver, das eine hohe Oberfläche zur Luft besitzt. Streng genommen ist auch sie eine Grenzfläche zwischen zwei Phasen; die Unterscheidung ist Sprachgebrauch, keine harte Trennung.

## Aufbau eines dispersen Systems

Ein disperses System — kurz Dispersion — besteht aus einer fein verteilten dispersen Phase, auch diskontinuierliche oder innere Phase genannt, und einem Dispersionsmittel als kontinuierlicher Phase. Die Grenzfläche zwischen beiden ist wegen der feinen Verteilung sehr groß und bestimmt die Eigenschaften des Systems entscheidend mit.

Pigmentierte oder gefüllte Lacke sind genau solche Systeme. Wegen ihrer im Verhältnis zum Feststoffvolumen enormen inneren Phasengrenzfläche werden sie in der Lacktechnik anschaulich als grenzflächenüberladene Systeme bezeichnet: „überladen" heißt hier, dass sehr viel Grenzflächenenergie im System steckt, mit der Rezeptur und Verarbeitung zurechtkommen müssen — kein streng definierter Fachterminus, sondern ein plastisches Bild für diesen Umstand. Warum diese Energie das System überhaupt instabil macht, erklärt L-50.

## Lacktechnisch wichtige Kombinationen

Im Lackzustand:

- fest in flüssig — Suspension: pigmentierte oder gefüllte Flüssiglacke, Polymerdispersionen
- fest in fest — pigmentierter bzw. gefüllter ausgehärteter Lackfilm. Achtung: Nicht jeder Lackfilm ist eine Dispersion — ein klarer, homogener Film ist keine.
- flüssig in flüssig — Emulsionen, z. B. Öl-in-Wasser-Emulsionen
- gasförmig in flüssig — Schäume

Erst im Applikationszustand:

- fest in gasförmig — Pulverlack im zerstäubten Zustand. Das Pulver selbst ist zunächst nur ein Feststoffgemisch; das Aerosol entsteht beim Sprühen.
- flüssig in gasförmig — zerstäubte Flüssiglacke

Gasförmig in gasförmig gilt nicht als Dispersion: Unter üblichen Bedingungen bilden verschiedene Gase homogene Gasgemische.

Nicht jeder Lack ist ein disperses System: Der klassische, molekular gelöste Klarlack enthält keine disperse Phase und ist deshalb keine Dispersion. Klarlacke mit Polymerdispersionen, Mattierungsmitteln oder Nanopartikeln sind dagegen sehr wohl disperse Systeme.

## Kolloide

Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal ist die Teilchengröße der dispersen Phase. Kolloidal ist eine Zustands- und Größenordnung, grob von etwa 1 nm bis 1 µm (1000 nm); in der Lacktechnik wird häufig auch der Bereich ab etwa 5 nm angegeben. Oberhalb liegen grobe Verteilungen, unterhalb molekulare Lösungen. Wichtig: Diese Einteilung ist keine scharfe Grenze, sondern eine Größenordnung — die Angaben in der Literatur weichen deshalb voneinander ab.

Wie fein und gleichmäßig eine disperse Phase verteilt ist, beschreibt der Dispersitätsgrad — ein Maß für den Zerteilungszustand der dispersen Phase: Je feiner und einheitlicher die Teilchen verteilt sind, desto höher ist er. Maßgeblich ist dabei nicht allein die mittlere Teilchengröße, sondern auch die Teilchengrößenverteilung.

## Größenordnungen in der Praxis

- Technische Pigment- und Füllstoffdispersionen: Primärkristallgrößen von 10 bis 1000 nm, Füllstoffe teilweise darüber. Für die praktische Dispersion ist allerdings nicht die Primärkristallgröße allein maßgeblich — entscheidend sind ebenso die vorhandenen Aggregate und Agglomerate und wie weit sie beim Dispergieren abgebaut werden (siehe L-44, L-53). Dispersionsmittel ist Lösemittel, lösemittelfreies Bindemittel, Bindemittellösung oder Bindemitteldispersion. Im letzten Fall ist das Dispersionsmittel selbst schon ein disperses System — feine Polymerteilchen in Wasser oder Lösemittel —, und es entsteht eine zusätzliche Grenzfläche: neben der zwischen Pigment und Dispersionsmittel jetzt auch die zwischen den Polymerteilchen und ihrem eigenen Medium.
- Technische Bindemittel- und Polymerdispersionen: Polymerteilchen liegen typischerweise im Submikrometerbereich, können aber auch größer sein. Nicht jede technische Polymerdispersion ist deshalb kolloidal.

Je kleiner die Teilchen, desto größer ihre spezifische Oberfläche — „spezifisch“ heißt dabei: bezogen auf die Masse, also Quadratmeter pro Gramm ($m^2/g$), nicht die Oberfläche als Absolutwert. Bei gleicher eingesetzter Masse wächst dadurch auch die insgesamt vorhandene Grenzfläche im Lack. Die Größenordnungen dazu stehen in L-44 und L-45.

## Feine Additive gehören dazu

Zur dispersen Phase zählen nicht nur Pigmente und Füllstoffe, sondern auch sehr feine funktionelle Additive — allen voran pyrogene Kieselsäure und organophile Schichtsilicate. Ihre Primärpartikel sind nur wenige Nanometer groß; in Pulver und Lack liegen sie allerdings als Aggregate und Agglomerate unterschiedlicher Größe vor. Über Wasserstoffbrücken zwischen oberflächenständigen Silanolgruppen (Kieselsäure) beziehungsweise ein Kartenhaus-Gerüst (Schichtsilicate) bilden sie ein reversibles Partikelnetzwerk im Lack: unter Scherung deutlich niedrigere Viskosität, in Ruhe bzw. bei kleiner Scherung wieder strukturierter.

Die Wirkkette lautet: Partikelnetzwerk → Fließgrenze und strukturviskoses Verhalten → bessere Standfestigkeit und geringere Sedimentation. Fließgrenze und Thixotropie sind dabei nicht dasselbe: Eine Fließgrenze beschreibt, ab welcher Belastung das System überhaupt zu fließen beginnt; von Thixotropie spricht man erst, wenn sich die Struktur unter Scherung zeitabhängig abbaut und in Ruhe wieder aufbaut (siehe L-46).

Schon kleine Mengen wirken stark: Wegen ihrer hohen spezifischen Oberfläche und häufig hohen Ölzahl benötigen sie viel flüssige Phase zur Benetzung und können dadurch Rezepturviskosität und Bindemittelbedarf beeinflussen (siehe L-46 und L-55).

**Merksatz**

Disperse Phase = fein verteilte Teilchen, kontinuierliche Phase = umgebendes Dispersionsmittel, dazwischen die Grenzfläche. Viele lacktechnisch wichtige Pigment- und Polymerdispersionen liegen im kolloidalen Bereich — „kolloidal“ ist dabei eine Größenordnung und sagt nichts darüber aus, ob eine Dispersion gut stabilisiert ist. Wer verstehen will, warum ein Lack sich so verhält, wie er sich verhält, muss bei der inneren Grenzfläche anfangen: Sie bestimmt Benetzung, Dispergierung, Stabilisierung und Rheologie.

**Stichwörter:** disperses System, Dispersion, disperse Phase, kontinuierliche Phase, Dispersionsmittel, Phasengrenzfläche, Oberfläche, Kolloid, grenzflächenüberladen, Primärkristallgröße, Aggregat, Agglomerat, Dispersitätsgrad, Fließgrenze, Strukturviskosität, Emulsion, Suspension, Aerosol, Schaum
*Quellen: Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur*

## Übungsblatt Ü-49 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**
Definieren Sie ein disperses System und benennen Sie disperse sowie kontinuierliche Phase mit je einem Beispiel. Erklären Sie am pigmentierten Lack, warum durch die fein verteilten Pigmentteilchen eine große innere Phasengrenzfläche entsteht und warum diese Grenzfläche für die Lackeigenschaften wichtig ist.

**Definition:** Ein disperses System besitzt eine disperse Phase — fein verteilte Teilchen, auch diskontinuierliche oder innere Phase genannt —, die in einer kontinuierlichen Phase (dem Dispersionsmittel) verteilt ist. Zwischen beiden besteht eine Grenzfläche.
**Beispiele:** Disperse Phase: Pigment- oder Füllstoffteilchen im Flüssiglack, Gasblasen im Schaum. Kontinuierliche Phase: die flüssige Bindemittellösung bzw. -dispersion, beim Schaum die flüssige Lackphase.
**Warum die Grenzfläche so groß wird:** Bei gleicher Gesamtmasse steigt die Gesamtoberfläche stark an, je feiner das Material verteilt ist (siehe L-44). Spezifische Oberflächen von einigen bis über hundert Quadratmetern je Gramm sind bei Pigmenten üblich — daraus folgt eine sehr große innere Grenzfläche, weshalb man von grenzflächenüberladenen Systemen spricht.
**Warum das lacktechnisch zählt:** Die gesamte innere Grenzfläche muss benetzt, dispergiert und stabilisiert werden. Sie bestimmt damit Bindemittel- und Dispergiermittelbedarf, Dispergieraufwand, Lagerstabilität und Rheologie — und über Flockulation letztlich auch Farbton und Glanz.
*Bewertung: Die Antwort benennt beide Phasen mit Beispiel, verknüpft Teilchengröße und Grenzfläche und leitet daraus konkrete lacktechnische Konsequenzen ab, statt nur die Definition wiederzugeben.*

**Frage 2** **(Verständnis, 8 Punkte)**
Ordnen Sie Flüssiglack, zerstäubten Pulverlack, Schaum und getrockneten Lackfilm nach disperser Phase und Dispersionsmittel ein. Begründen Sie jede Zuordnung kurz und nennen Sie beim zerstäubten Pulverlack den Fachbegriff für ein Fest-in-Gas-System.

**Flüssiglack (klassisch, lösemittelbasiert):** Pigment- und Füllstoffteilchen = disperse Phase; die flüssige kontinuierliche Phase (Bindemittellösung) = Dispersionsmittel. Bei Wasserlacken kann das Bindemittel selbst als Polymerdispersion vorliegen — dann ist es zusätzlich bzw. stattdessen disperse Phase, und es gibt mehrere disperse Komponenten.
**Zerstäubter Pulverlack:** Feststoffteilchen in Luft = fest in gasförmig, also ein festes Aerosol. Wichtig: Erst im zerstäubten Zustand liegt eine Dispersion vor — das Pulver im Gebinde ist zunächst nur ein Feststoffgemisch.
**Schaum:** Gasblasen = disperse Phase, Flüssigkeit = Dispersionsmittel, also gasförmig in flüssig.
**Getrockneter Lackfilm:** Nur beim pigmentierten bzw. gefüllten Film: Feststoffteilchen in fester Bindemittelmatrix = fest in fest. Ein klarer, homogener Klarlackfilm ist dagegen keine Dispersion.
**Hinweis:** Gasförmig in gasförmig zählt nicht als Dispersion, weil verschiedene Gase unter üblichen Bedingungen homogene Gemische bilden.
*Bewertung: Alle vier Fälle werden mit beiden Angaben und einer kurzen Begründung beantwortet. Für die volle Punktzahl müssen die beiden Einschränkungen erkannt werden: Aerosol erst im zerstäubten Zustand, Fest-in-Fest nur beim pigmentierten Film.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**

Ein Klarlack enthält kein Pigment. Ist er deshalb automatisch kein disperses System? Begründen Sie und nennen Sie einen Fall, in dem ein Klarlack trotz Pigmentfreiheit eine disperse Phase enthalten kann. Woran erkennen Sie, ob das Bindemittel molekular gelöst oder als Polymerteilchen dispergiert vorliegt?

**Antwort:** Nein. Nicht die Pigmentfreiheit entscheidet, sondern ob überhaupt eine disperse Phase in einer kontinuierlichen Phase vorliegt.

**Der klassische Fall:** Bei einem klaren, lösemittelbasierten Bindemittellack kann das Bindemittel molekular gelöst vorliegen. Dann existiert keine innere Phasengrenzfläche, und der Lack ist kein disperses System.

**Fall mit disperser Phase:** Klarlacke mit Mattierungsmitteln, Nanopartikeln oder auf Basis einer wässrigen Polymerdispersion enthalten sehr wohl eine disperse Phase — sie sind disperse Systeme, obwohl kein Pigment enthalten ist.

**Woran man es erkennt:** Entscheidend ist die Frage nach der Grenzfläche: Bei molekularer Lösung liegen einzelne Makromoleküle solvatisiert vor, es gibt keine Phasengrenze und der Lack ist auch im Konzentrat klar. Liegen Polymerteilchen als eigene Phase vor, existiert eine Grenzfläche — erkennbar an Lichtstreuung bzw. Trübung, an der Notwendigkeit einer Stabilisierung und daran, dass der Film erst durch Verfilmung der Teilchen entsteht.

**Folge:** Nur wo eine innere Grenzfläche existiert, stellen sich Benetzung, Dispergierung, Stabilisierung und Flockulation überhaupt als Problem.

*Bewertung: Die Antwort widerlegt den Kurzschluss „kein Pigment = keine Dispersion“, nennt einen konkreten Gegenfall und macht den Unterschied echte Lösung / Dispersion am Vorhandensein der Grenzfläche fest.*

# L-50 · Flockulation und elektrostatische Stabilisierung

*Warum Pigmentdispersionen überhaupt haltbar sind*

**Prüfungsteil 1** · A 9

Eine feine Pigmentdispersion ist thermodynamisch meist instabil, praktisch aber oft jahrelang haltbar — weil elektrostatische oder sterische Stabilisierung eine Energiebarriere aufbaut. Das System bleibt dadurch kinetisch metastabil: Es wäre energetisch günstiger zu flockulieren, tut dies aber nicht von selbst, weil ihm dafür die Energie fehlt, um die Barriere zu überwinden.

## Was Flockulation ist

Als Flockulation oder Flockung bezeichnet man die Zusammenlagerung dispergierter Pigmentteilchen in einem flüssigen Beschichtungsstoff. Sie verkleinert damit die Phasengrenzfläche zwischen Pigment und Dispersionsmittel.

Nicht verwechseln mit Sedimentation: Flockulation ist die Zusammenlagerung der Teilchen, Sedimentation deren schwerkraftbedingtes Absinken. Beides sind verschiedene Vorgänge — Flockulation kann Sedimentation allerdings begünstigen, weil größere Flocken schneller absinken.

## Warum Dispersionen instabil sind

Je feiner ein Pigment verteilt ist, desto größer ist die gesamte Grenzfläche zwischen Pigment und Dispersionsmittel — und desto mehr Energie steckt im System. Grund dafür ist die Grenzflächenspannung (siehe L-12, L-44): Ein Molekül direkt an der Grenzfläche hat weniger Nachbarn als eines im Phaseninneren und ist dadurch energiereicher; je größer die Grenzfläche, desto mehr solcher energiereicher Moleküle gibt es. Größere, zusammengeballte Teilchen haben insgesamt weniger Grenzfläche und damit weniger Energie. Deshalb neigt eine feine Dispersion in vielen Fällen von sich aus dazu, durch Flockulation die Grenzfläche zu verkleinern.

Wichtig für das Verständnis: Diese thermodynamische Tendenz sagt nichts darüber aus, wie schnell das geschieht. Eine Dispersion kann trotz thermodynamischer Instabilität kinetisch stabil bleiben — genau darauf beruht die Lagerstabilität eines Lacks.

## Und warum sie trotzdem halten

Pigmentdispersionen sind unter Umständen jahrelang beständig, weil sie metastabil sind — vergleichbar einer Flasche, die auf einer schrägen Fläche steht: Sie kippt nicht von allein um, obwohl die liegende Flasche energetisch günstiger wäre. Es braucht einen Anstoß, der das System zum Kippen bringt — eine Energiebarriere hält es bis dahin in der instabilen Lage. Genauso bei der Pigmentdispersion: Erst ein Anstoß von außen — bei der Flasche ein Stoß, bei der Pigmentdispersion etwa ein Elektrolyteintrag oder eine pH-Verschiebung Richtung isoelektrischen Punkt — überwindet die Barriere und löst den Übergang in den energieärmeren, geflockten Zustand aus. Genau das leisten die im Folgenden beschriebenen Stabilisierungsarten: Sie bauen eine solche Barriere auf und verhindern oder verzögern so das Zusammenklumpen der Teilchen.

Dasselbe Grundprinzip — thermodynamisch günstig, aber kinetisch gehemmt — begegnet an anderer Stelle im Kompendium wieder: Ein Alkydharzlack reagiert mit Luftsauerstoff, sobald er verstrichen ist; ohne Sikkativ als Katalysator läuft diese Reaktion so viel langsamer, dass der verstrichene Film ein Vielfaches der Zeit bis zur Klebfreiheit braucht (Größenordnung siehe das Leinöl-Beispiel in L-14). Dass derselbe Lack im geschlossenen Gebinde flüssig bleibt, hat einen anderen Grund: Dort fehlt der Sauerstoff als Reaktionspartner. Auch beim Alkyd hält nur die kinetische Hemmung den energetisch günstigeren Zustand auf Abstand — nicht das Ausbleiben der Triebkraft.

## Elektrostatische Stabilisierung

Vor allem in Wasser tragen dispergierte anorganische Pigmente und Füllstoffe meist Ladungen (woher, zeigt der nächste Abschnitt). Da das System insgesamt neutral ist, sammeln sich in der angrenzenden Flüssigkeit ebenso viele Gegenionen um jedes Teilchen — sofern eine solche Oberflächenladung überhaupt vorliegt; nahezu ungeladene Teilchen, etwa am isoelektrischen Punkt (siehe unten), bilden keine wirksame Doppelschicht aus. Wo eine Ladung besteht, ordnen sich die Gegenionen in zwei Bereichen an: direkt an der Teilchenoberfläche eine dünne, fest gebundene Schicht, und weiter außen eine lockerere, sogenannte diffuse Schicht, in der die Ionenkonzentration allmählich auf den Wert des umgebenden Mediums abfällt. Zusammen bilden beide Schichten die elektrische Doppelschicht, auch Ionenwolke genannt.

Nähern sich zwei gleich geladene Teilchen, stoßen sich ihre Ionenwolken gegenseitig ab, bevor sich die Teilchen selbst berühren können — sie bleiben getrennt. Tragen verschiedene Pigmente entgegengesetzte Ladungen, ziehen sie sich dagegen an und lagern sich zusammen (Coflockulation).

Die Ladung direkt an der Teilchenoberfläche lässt sich dabei nicht messen; wie sich die wirksame Ladung trotzdem quantifizieren lässt, zeigt der Abschnitt „Das Zetapotential“ weiter unten.

## Woher die Oberflächenladung kommt — bei oxidischen Pigmenten und Füllstoffen

Auf der Oberfläche oxidischer Pigmente und Füllstoffe – Titandioxid, Eisenoxid, Kieselsäure (auch als Füllstoff im Einsatz), Aluminiumoxid – sitzen OH-Gruppen. Sie entstehen, weil die Metallatome am Rand des Kristallgitters ihre Bindungen nicht mehr zum Nachbaratom absättigen können und stattdessen Wasser anlagern.

Diese OH-Gruppen sind amphoter. Das heißt: Sie können sich je nach Umgebung wie eine Säure oder wie eine Base verhalten – ein Proton abgeben oder eines aufnehmen. Was von beidem passiert, entscheidet der pH-Wert.

Im Sauren gibt es viele $H^+$-Ionen; die OH-Gruppe nimmt eines auf und die Oberfläche wird positiv:
$\equiv M–OH + H^+ \rightleftharpoons \equiv M–OH_2^+$

Im Alkalischen ist es umgekehrt; die OH-Gruppe gibt ihr Proton ab und die Oberfläche wird negativ:
$\equiv M–OH \rightleftharpoons \equiv M–O^- + H^+$

Zur Schreibweise: „M“ steht für das Metallatom des Pigments (Ti, Fe, Al, Si). Die drei Striche „≡“ bedeuten nur, dass dieses Atom fest im Kristallgitter sitzt – es ist ein Oberflächenatom, kein freies Molekül. Man könnte genauso gut „Pigmentoberfläche–OH“ schreiben.

Daraus folgt der zentrale Satz dieser Lerntafel: Ein oxidisches Pigment oder Füllstoff hat keine feste Ladung. Der pH-Wert bestimmt Vorzeichen und Höhe.

Merkkette: pH-Wert → Protonierung/Deprotonierung → Oberflächenladung → elektrische Doppelschicht → Partikelwechselwirkung → Flockulationsneigung.

Die Gleichungen sind ein vereinfachtes Modell für oxidische Oberflächen, keine universelle Beschreibung jeder Pigmentoberfläche – insbesondere nicht organischer Pigmente (siehe nächster Abschnitt).

## Organische Pigmente: ein anderer Ladungsursprung

Organische Pigmente — etwa Azopigmente, Phthalocyanine oder Chinacridone — besitzen kein Metalloxid-Kristallgitter und damit auch keine amphoteren OH-Gruppen wie im vorigen Abschnitt beschrieben. Ihre überwiegend aromatische, hydrophobe Oberfläche liefert von sich aus kaum ionisierbare Gruppen; sie lädt sich in Wasser deshalb kaum nennenswert auf und lässt sich über den pH-Wert praktisch nicht steuern.

Elektrostatisch stabilisiert werden solche Pigmente trotzdem — nur stammt die Ladung von außen: Ein adsorbiertes ionisches Dispergiermittel legt seine eigene Ladung auf die Pigmentoberfläche (siehe L-51, L-52); man spricht dann von einer extrinsischen statt einer nativen Oberflächenladung. Alternativ werden organische Pigmente schon bei der Herstellung oberflächenbehandelt, etwa harzverschnitten (Kolophonium) oder mit sulfonierten bzw. carboxylierten Gruppen ausgerüstet — gerade um eine Dispergierung in Wasser überhaupt zu ermöglichen.

Ruß nimmt eine Zwischenstellung ein: kein Oxid im Sinne dieser Tafel, aber je nach Herstellung mit Carboxyl-, Chinon- (einer sauerstoffhaltigen Ringstruktur) und Lacton-Gruppen (cyclischen Estern) sowie phenolischen OH-Gruppen auf der Oberfläche, die durchaus pH-abhängig reagieren — nur eben nicht über das ≡M–OH-Bild erklärbar.

Wichtig fürs Verständnis: Ist die Ladung erst einmal vorhanden — ob nativ wie bei oxidischen Pigmenten oder extrinsisch wie bei organischen —, gelten Doppelschicht, Zetapotential und Salzempfindlichkeit aus den folgenden Abschnitten gleichermaßen. Nur die Frage, woher die Ladung stammt, unterscheidet sich.

## Salze sind der Feind

- Warum das so ist: Mehr gelöste Ionen bedeuten mehr Gegenionen in unmittelbarer Nähe der geladenen Teilchenoberfläche. Dieselbe Gegenladung lässt sich dadurch auf engerem Raum unterbringen — die diffuse Schicht muss sich nicht mehr so weit ausdehnen, um die Oberflächenladung auszugleichen, und schrumpft. Salze (Elektrolyte) erhöhen also die Ionenstärke und komprimieren die diffuse Doppelschicht. Die Reichweite der elektrostatischen Abstoßung nimmt ab, die Teilchen erreichen leichter den Bereich anziehender Wechselwirkung, und die Dispersion kann flockulieren.
- Mehrwertige Ionen (z. B. aus Calcium- oder Aluminiumsalzen) wirken dabei deutlich stärker flockulierend als einwertige wie Natrium.
- Praxisfolge: In wässrigen Lacken sind Salze möglichst zu vermeiden; Wasserqualität und Rohstoffe sind entsprechend zu prüfen.
- Bei plötzlich auftretender Flockulation lohnt der Blick auf Prozesswasser, Leitfähigkeit, pH-Wert, Neutralisationsmittel, neue Rohstoffchargen und Reinigungsrückstände.
- Zwei Seiten derselben Medaille: Was hier als Störung wirkt, nutzt man beim Rheologieadditiv gezielt aus. Pyrogene Kieselsäure baut ihr Partikelnetzwerk über Wasserstoffbrücken zwischen benachbarten Silanolgruppen auf (siehe L-46) — dafür müssen sich die Aggregate erst nah genug kommen. Auch sie tragen in Wasser eine elektrostatische Abstoßung; bleibt diese ungedämpft stark, halten sie sich gegenseitig auf Abstand, und das Netzwerk kann sich kaum bilden. Wird die Abstoßung — etwa durch die Ionenstärke des wässrigen Mediums — etwas gedämpft, können sich die Aggregate nahe genug kommen, um sich über Wasserstoffbrücken zu verknüpfen: Daraus entsteht ein zusätzlicher Beitrag zu Fließgrenze und Standfestigkeit gegen Absetzen. Im Wasserlack tragen daneben die sperrige Aggregatstruktur und Polymerbrücken bei (siehe L-46).

## pH-Wert und Pigmentladung

Zwischen positiver Ladung im Sauren und negativer im Alkalischen (siehe oben) liegt ein pH-Bereich, in dem die Ladung nahezu verschwindet — dort ist die Dispersion am anfälligsten. Wie sich das messen und einordnen lässt, zeigen die nächsten drei Abschnitte.

## Das Zetapotential

Ein Teilchen zieht seine innere Ionenwolke beim Wandern durch die Flüssigkeit ein Stück weit mit. Nicht die gesamte Wolke bewegt sich mit: Es gibt eine gedachte Trennfläche, an der die mitgeschleppte Schicht endet und das ruhende Medium beginnt — die Scherebene. Das elektrische Potential genau an dieser Ebene heißt Zetapotential (ζ).

Es ist deshalb interessant, weil es die wirksame Ladung beschreibt, die von außen ankommt — also genau das, was zwei sich nähernde Teilchen voneinander spüren. Die Ladung direkt an der Oberfläche ist größer, aber praktisch nicht messbar und für die Abstoßung nicht maßgeblich.

Als grobe Orientierung gilt: Je größer der Betrag, desto stärker die Abstoßung; etwa 30 mV oder mehr — ob positiv oder negativ — deuten auf eine günstige elektrostatische Stabilisierung hin, nahe null ist die Flockulationsneigung am größten. Diese 30 mV sind eine Faustregel und kein Grenzwert: Medium, Ionenstärke, Partikelgröße, Oberflächenchemie und eine zusätzliche sterische Stabilisierung entscheiden mit.

Wichtig fürs Verständnis: Das Zetapotential ist keine Materialkonstante des Pigments, sondern eine Eigenschaft des Systems aus Teilchen und Medium. Es ändert sich mit pH-Wert, Salzgehalt, Dispergiermittel und Lösemittel. Ein guter Wert aus dem einen System sagt deshalb nichts über ein anderes aus.

## Der isoelektrische Punkt

Trägt man das Zetapotential gegen den pH-Wert auf, schneidet die Kurve irgendwo die Nulllinie. Dieser pH-Wert ist der isoelektrische Punkt (IEP). Dort heben sich positive und negative Oberflächenladungen gerade auf, die elektrostatische Abstoßung verschwindet — und die Dispersion flockuliert am leichtesten.

Praxisregel: Den Arbeits-pH deutlich vom IEP entfernt halten, damit ein tragfähiges Zetapotential übrig bleibt. Ein Wasserlack, dessen pH im Lauf der Lagerung in Richtung IEP driftet, kann deshalb noch nach Wochen kippen.

Zwei Feinheiten für die Prüfung: Der IEP ist eine Eigenschaft des konkreten Pigments — Rutil, Eisenoxid und pyrogene Kieselsäure liegen an ganz verschiedenen Stellen der pH-Skala. Und eine Oberflächennachbehandlung verschiebt ihn gezielt; genau dafür werden Pigmente anorganisch nachbehandelt.

## Orientierungswerte — wo die IEP liegen

Die folgenden Bereiche sind Orientierungswerte aus der Literatur. Sie streuen je nach Herstellung, Reinheit und Nachbehandlung erheblich und ersetzen keine Messung am konkreten Produkt.

- Pyrogene Kieselsäure / $SiO_2$ — IEP etwa pH 2–3
- Titandioxid Rutil, unbehandelt — IEP etwa pH 4–6
- Titandioxid mit $Al_2O_3$-Nachbehandlung — IEP verschiebt sich Richtung Aluminiumoxid, etwa pH 8–9
- Aluminiumoxid $Al_2O_3$ — IEP etwa pH 8–9
- Eisenoxidrot $\alpha$-$Fe_2O_3$ — IEP etwa pH 8–9
- Calciumcarbonat — Sonderfall: löst sich merklich an, die Oberflächenchemie wird von den Carbonatgleichgewichten mitbestimmt

## Was man aus den IEP-Werten liest

Kieselsäure ist oberhalb von pH 3 negativ geladen — in einem Wasserlack bei pH 8–9 also weit vom IEP entfernt und gut elektrostatisch stabilisierbar. Eisenoxidrot und aluminiumoxid-nachbehandeltes Titandioxid liegen mit ihrem IEP dagegen genau in diesem Arbeitsbereich; dort ist die Ladung gering und die Flockulationsneigung hoch. Solche Pigmente brauchen deshalb in wässrigen Systemen in der Regel eine sterische bzw. elektrosterische Stabilisierung über das Dispergiermittel — die Ladung allein trägt nicht.

## Größenordnung des Zetapotentials

Gut stabilisierte wässrige Pigmentpasten und Bindemitteldispersionen liegen am Arbeits-pH häufig bei Beträgen von etwa 30 bis 60 mV. Werte nahe null sind ein Warnsignal — mehr aber auch nicht, denn eine rein sterisch stabilisierte Dispersion kann trotz kleinem Zetapotential stabil sein.

## Wie das Zetapotential gemessen wird

Gemessen wird an einer stark verdünnten Dispersion des Pigments, Füllstoffs oder Bindemittel-Latex im jeweiligen Medium, meist als Reihe über den pH-Wert. Man legt ein elektrisches Feld an: Geladene Teilchen wandern, und aus ihrer Wanderungsgeschwindigkeit wird das Zetapotential berechnet.

Zwei Punkte für die Praxis: Ein trockenes Pulver lässt sich nicht messen — die Ladung entsteht erst an der Grenzfläche zur Flüssigkeit. Und weil stark verdünnt gemessen wird, ist das Ergebnis ein Hinweis auf das Verhalten im Lack, kein Abbild davon.

## Coflockulation in der Praxis

Zwei für sich stabile Pigmentpasten können beim Zusammenmischen instabil werden — etwa weil ihre Teilchen entgegengesetzte Oberflächenladungen tragen oder weil die Dispergiermittel um dieselben Adsorptionsplätze konkurrieren. Typisches Bild: Eine Farbtonpaste ist einzeln einwandfrei, verändert aber nach dem Einrühren in den Basislack Farbton, Farbstärke, Glanz oder Rheologie. Untersucht werden muss dann nicht die Einzelpaste, sondern die Wechselwirkung im Endsystem.

## Flockulation im Labor eingrenzen

Geeignete Untersuchungen sind Mahlfeinheit (Grindometer), Mikroskopie, Farbton und Farbstärke, Glanz, Viskosität und Rheologie, Lagerstabilität, Redispergierbarkeit, pH-Wert, Leitfähigkeit bzw. Ionenstärke sowie — falls verfügbar — Zetapotential als pH-Reihe.

Entscheidend ist die Verknüpfung: Ein einzelner Messwert erklärt eine Flockulation selten. Erst die Kombination mehrerer Befunde zu einer Ursache-Wirkungs-Kette grenzt ein, ob ein Elektrolyt-, pH- oder Konkurrenzadsorptionseffekt vorliegt.

## Wo es greift — und die Rolle der Additive

Elektrostatische Stabilisierung ist in polaren Medien mit hoher Dielektrizitätskonstante besonders ausgeprägt. Die Dielektrizitätskonstante (auch relative Permittivität) beschreibt, wie stark ein Medium die elektrische Anziehung zwischen entgegengesetzten Ladungen abschirmt: Bei einem hohen Wert — Wasser liegt bei etwa 80 — trennen sich Ladungen leicht voneinander und bleiben getrennt, sodass sich freie Ionen und eine diffuse Doppelschicht ausbilden können. Bei einem niedrigen Wert — bei den meisten organischen Lösemitteln liegt er deutlich niedriger, oft im Bereich von etwa 2 bis 20 — ziehen sich entgegengesetzte Ladungen stark an, bleiben eng gepaart und lösen sich kaum auf. In Wasser ist die elektrostatische Stabilisierung deshalb in der Lackpraxis ein zentrales Stabilisierungsprinzip, häufig kombiniert mit sterischen Effekten aus dem Dispergiermittel (elektrosterisch).

In unpolaren lösemittelhaltigen und in lösemittelfreien (100%-)Systemen ist die Dielektrizitätskonstante dagegen niedrig; eine Doppelschicht im wässrigen Sinn bildet sich kaum aus, und der elektrostatische Beitrag ist in der Regel gering. Das heißt allerdings nicht, dass es dort überhaupt keine elektrischen Grenzflächenphänomene gäbe — auch in organischen Medien können Ladungen an Grenzflächen auftreten und die Stabilität beeinflussen. Tragend ist dort aber die sterische Stabilisierung über adsorbierte Polymerketten, die die Teilchen mechanisch auf Abstand halten (siehe L-51).

Diese Barrieren entstehen nicht von selbst: Dispergiermittel lagern sich auf der Pigmentoberfläche an und liefern genau die Ladung bzw. die sterische Hülle, die die Teilchen auf Abstand hält — sie verursachen also die Stabilisierung. Netzmittel verbessern zuvor die Benetzung der Pigmentoberfläche. Als Prozesskette gedacht: Benetzung → Dispergierung → Adsorption des Dispergiermittels → Stabilisierung → Lagerstabilität. Mehr Dispergiermittel ist dabei nicht automatisch besser — Überdosierung kann Verträglichkeit, Schaumverhalten, Wasserbeständigkeit und Zwischenhaftung beeinträchtigen. Beide Additivgruppen sind ausführlich in L-52 beschrieben.

**Merksatz**

Eine feine Pigmentdispersion ist wegen ihrer großen Grenzfläche energetisch instabil, hält aber oft jahrelang, weil eine Energiebarriere — elektrostatisch, sterisch oder beides — sie kinetisch metastabil hält, wie eine Flasche, die auf einer schrägen Fläche steht und nicht von allein kippt. Elektrostatisch wirkt das vor allem in Wasser: über die pH-abhängige Pigmentladung und die sie umgebende elektrische Doppelschicht. Das Zetapotential macht diese wirksame Ladung messbar, der isoelektrische Punkt markiert den pH-Bereich mit der größten Flockulationsgefahr. Salze komprimieren die Doppelschicht und schwächen den Schutz — deshalb sind sie in Wasserlacken ein häufiger Auslöser von Flockulation.

**Stichwörter:** Flockulation, Flockung, Sedimentation, Coflockulation, metastabil, kinetische Stabilität, elektrostatische Stabilisierung, elektrische Doppelschicht, diffuse Doppelschicht, Ionenwolke, Ionenstärke, Elektrolyt, pH-Wert, amphotere Oberfläche, Pigmentladung, Zetapotential, isoelektrischer Punkt, Ladungsnullpunkt, Redispergierbarkeit, Dielektrizitätskonstante, organische Pigmente, extrinsische Oberflächenladung, Ruß

*Quellen: Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur*

## Übungsblatt Ü-50 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Erklären Sie mit dem Bild der schräg gestellten Flasche, warum eine Pigmentdispersion trotz ihrer Instabilität jahrelang haltbar sein kann.

**Instabilität:** Eine feine Pigmentdispersion strebt thermodynamisch danach, die Grenzfläche zwischen Pigment und Dispersionsmittel zu verkleinern — also zu flockulieren. Diese Tendenz sagt aber nichts darüber aus, wie schnell das geschieht.

**Das Bild der Flasche:** Eine Flasche, die auf einer schrägen Fläche steht, hat mehr potenzielle Energie als die liegende Flasche — sie kippt aber nicht von selbst um, sondern erst nach einem Anstoß.

**Übertragung:** Genauso liegt zwischen dem heutigen (metastabilen) und dem geflockten Zustand eine Energiebarriere. Solange diese Barriere hoch genug ist, bleibt die Dispersion praktisch beständig — sie ist thermodynamisch instabil, aber kinetisch stabil.

**Rolle der Stabilisierung:** Elektrostatische oder sterische Stabilisierung baut genau diese Barriere auf und erschwert die Annäherung der Teilchen.

*Bewertung: Das Bild der Flasche wird korrekt auf den metastabilen Zustand übertragen. Entscheidend für die volle Punktzahl ist die Unterscheidung von thermodynamischer Triebkraft und kinetischer Hemmung.*

**Frage 2** **(Berechnung, 7 Punkte)**

Für eine Mahlpaste werden 12 kg Titandioxid und 4 kg Kieselsäure als Füllstoff eingesetzt. Das Dispergiermittel wird mit 1,8 % Wirkstoff dosiert, bezogen auf die gesamte Pigment-Füllstoff-Masse. Geliefert wird es als 40%-ige Handelsware. Wie viel Wirkstoff wird benötigt, und wie viel Handelsware muss eingewogen werden?

**Gegeben:** Titandioxid = 12 kg, Kieselsäure (Füllstoff) = 4 kg; Dispergiermittel = 1,8 % Wirkstoff, bezogen auf Pigment + Füllstoff; Handelsware = 40%-ig

**Bezugsmasse:** 12 kg + 4 kg = 16 kg — die Dosierung bezieht sich auf Pigment und Füllstoff zusammen, nicht nur auf das Pigment.

**Wirkstoffmenge:** 16 kg · 0,018 = 0,288 kg = 288 g

**Als 40%-Handelsware:** 288 g / 0,40 = 720 g Handelsware

**Antwortsatz:** Benötigt werden 288 g Wirkstoff, entsprechend 720 g der 40%-igen Handelsware.

**Kontrolle:** Die 720 g Handelsware enthalten 288 g Wirkstoff und 432 g Träger- bzw. Lösemittelanteil.

*Bewertung: Für die volle Punktzahl müssen zwei Schritte erkannt werden: dass sich die Dosierung auf die gesamte disperse Phase — Pigment und Füllstoff zusammen — bezieht, nicht nur auf das Pigment, und dass der Wirkstoffbedarf über den Wirkstoffgehalt der Handelsware in die tatsächliche Einwaage umgerechnet werden muss. Die Kontrolle zeigt das Verständnis von Wirkstoff- und Trägeranteil.*

**Frage 3** **(Anwendung, 7 Punkte)**

Warum sollten in wässrigen Lacken Salze möglichst vermieden werden, und wie grenzen Sie im Labor ein, ob bei einer plötzlich flockulierenden Paste tatsächlich ein Elektrolyteffekt vorliegt?

**Grundmechanismus:** Salze erhöhen die Ionenstärke und komprimieren die diffuse Doppelschicht — die schützende Ionenwolke um jedes Teilchen wird kleiner, die Reichweite der elektrostatischen Abstoßung nimmt ab.

**Folge:** Die Teilchen erreichen dadurch leichter den Bereich anziehender Wechselwirkung, lagern sich zusammen — die Dispersion flockuliert.

**Besonders kritisch:** Mehrwertige Ionen (z. B. aus Calcium- oder Aluminiumsalzen) wirken dabei stärker flockulierend als einwertige wie Natrium.

**Praxisfolge:** Rohstoffe, Wasserqualität und Reinigungsrückstände sind deshalb auf ihren Salzgehalt zu kontrollieren.

**Eingrenzung im Labor:** Leitfähigkeit bzw. Ionenstärke messen (zeigt den Elektrolyteintrag), pH-Wert prüfen (trennt einen pH-Effekt ab), auf mehrwertige Ionen wie $Ca^{2+}$ oder $Mg^{2+}$ untersuchen und — falls verfügbar — das Zetapotential als pH-Reihe aufnehmen.

**Abgrenzung:** Ein einzelner Messwert genügt nicht: Erst die Kombination trennt einen Elektrolyteffekt von einer pH-Verschiebung oder einer Konkurrenzadsorption am Dispergiermittel.

**Verallgemeinerung:** Der Mechanismus gilt unabhängig davon, ob die Ladung nativ vom oxidischen Pigment stammt oder extrinsisch vom adsorbierten Dispergiermittel aufgebracht wird — er betrifft daher grundsätzlich auch elektrostatisch bzw. elektrosterisch stabilisierte organische Pigmente (siehe oben, „Organische Pigmente: ein anderer Ladungsursprung“).

*Bewertung: Der Mechanismus (Ionenstärke steigt, Doppelschicht wird komprimiert, Abstoßung sinkt) wird korrekt erklärt, der Hinweis auf mehrwertige Ionen zeigt vertieftes Verständnis, und die Eingrenzung im Labor verknüpft mindestens zwei Messgrößen zu einer Ursachenkette. Wer zusätzlich erkennt, dass der Mechanismus nicht auf oxidische Pigmente beschränkt ist, zeigt Verständnis über die Tafel hinaus.*

# L-51 · Sterische Stabilisierung

*Wie Polymerketten Pigmentteilchen auf Abstand halten*

**Prüfungsteil 1** · A 9

Ein Dispergiermittel braucht zwei Enden: eines, das am Pigment haftet, und eines, das sich im Dispersionsmittel — Lösemittel, Bindemittellösung, Bindemitteldispersion oder lösemittelfreies Bindemittel (siehe L-49) — löst und frei abstehen kann.

## Ein altes Prinzip

Seit über hundert Jahren ist bekannt, dass sich wässrige Dispersionen durch Zusatz wasserlöslicher Polymere — sogenannter Schutzkolloide wie Gelatine, Casein oder Polyvinylalkohol — sehr gut gegen Flockulation stabilisieren lassen. Anders als die elektrostatische Stabilisierung erwies sich diese Methode als weitgehend unempfindlich gegenüber zugesetzten Salzen.

In organischen Lösemitteln ist die sterische Stabilisierung durch geeignete Polymere ein wichtiger Stabilitätsmechanismus; je nach System können auch andere Wechselwirkungs- und Stabilisierungseffekte beitragen.

## Wie es wirkt

Die Polymere müssen auf der Oberfläche des dispergierten Teilchens adsorbiert sein — sie müssen dort bereits anhaftende Lösemittel- und Netzmittelmoleküle verdrängen, und stehen dabei durchaus auch mit dem Bindemittel selbst in Konkurrenz: Trägt das Bindemittelharz polare oder ionische Gruppen (etwa eine Acrylsäure-haltige Bindemittellösung), kann auch es an der Pigmentoberfläche adsorbieren und dem Dispergiermittel Adsorptionsplätze streitig machen (siehe L-53). Es handelt sich dabei um physikalisch-chemische Adsorption über Säure-Base-, Wasserstoffbrücken-, ionische oder koordinative Wechselwirkungen, nicht um eine kovalente Bindung.

Nähern sich zwei so belegte Pigmentteilchen einander, wirken zwei Beiträge zusammen: Die Beweglichkeit der Polymersegmente wird eingeschränkt, und die Segmente beider Teilchen drängen sich in ein kleineres Volumen — die örtliche Polymerkonzentration steigt, und Lösemittel strömt nach. Daraus entsteht eine rückstellende Kraft, die die Teilchen wieder auseinandertreibt. Weil die Stabilisierung auf der Einschränkung der Kettenbeweglichkeit und damit auf einem Entropieeffekt beruht, spricht man auch von entropischer Stabilisierung.

Wichtig: Die Barriere ist keine starre Wand, sondern eine bewegliche, vom Lösemittel durchdrungene Schicht. Genau deshalb steht und fällt sie damit, wie gut das Medium die Kettensegmente löst.

## Vier Voraussetzungen

- Ankergruppen: Das Polymer braucht geeignete funktionelle Gruppen, die pigmentaffin sind und es fest auf der Pigmentoberfläche halten.
- Barrieregruppen: Es braucht ausreichend lange Kettensegmente, die im Dispersionsmittel gut löslich sind — im Fachjargon serumaffin, weil man die flüssige Phase der Dispersion als Serum bezeichnet — und frei abstehen können.
- Passende Molmasse: mittlere Molmassen, besser noch Oligomere, sind in der Regel günstig. Die Molmasse allein entscheidet aber nicht über die Stabilität — Polymerarchitektur, Ankerdichte, Solvatation und die tatsächliche Oberflächenbelegung wirken mindestens ebenso stark.
- Mindestkonzentration: Wird sie unterschritten, kann es gerade bei höheren Molmassen zur Flockulation kommen.

**Merksatz**

Für dispergierte Teilchen mit Durchmessern bis zu 10 µm — das sind 10 000 nm — genügt als grobe Orientierung eine sterische Barriere in der Größenordnung von etwa 10 nm — die erforderliche Barrierehöhe ist aber von Polymer, Medium, Pigmentoberfläche und System abhängig. Ein Natriumstearat-Molekül misst gestreckt aber nur etwa 2,2 nm. Für eine tragfähige sterische Barriere reichen niedrigmolekulare Netzmittel deshalb in der Regel nicht aus; verwendet werden meist oligomere oder polymere Dispergiermittel.

## Warum die Molmasse eine Mitte braucht

- Zu niedrig: Die Kettenlänge reicht nicht aus, die Barriere wird zu dünn.
- Zu hoch: Es droht Überbrückungsflockulation (siehe L-54); außerdem können Unverträglichkeiten oder ein unerwünschter Viskositätsanstieg auftreten.

## Welche Polymere sich eignen

Zum Stabilisieren sind Block- und Pfropfcopolymere besser geeignet als statistische Copolymere oder Homopolymere. Kurz zum Aufbau (vgl. L-04): Ein Blockcopolymer ist eine Kette aus längeren, getrennten Abschnitten (A-A-A-B-B-B) — ein Ankerblock haftet am Pigment, ein löslicher Block ragt ins Lösemittel. Ein Pfropfcopolymer (Graft) besitzt eine Hauptkette, auf die Seitenketten eines anderen Bausteins aufgepfropft sind (kammartig) — mehrere Ankerpunkte sitzen auf dem Pigment, während die löslichen Seitenketten abstehen. Ihre Eignung kommt daher, dass sich Anker- und Barrieregruppen räumlich klar trennen lassen. Statistische Copolymere haben Anker- und Löslichkeitsgruppen dagegen zufällig über die Kette verteilt — das Molekül legt sich eher flach auf und bildet keine gut abstehende Barriere. Bei entsprechendem Polaritätsunterschied der Blöcke wirken solche Copolymere zugleich amphiphil — dann ist die Herstellerbezeichnung „Netz- und Dispergiermittel“ tatsächlich zutreffend.

## Oberflächenbelegung: nicht zu wenig, nicht zu viel

Für die Stabilität zählt nicht die zugegebene Menge, sondern wie gut die Pigmentoberfläche tatsächlich belegt ist. Daraus folgt eine Kurve mit Optimum, keine Gerade:

- Unterdosierung → Oberfläche unvollständig belegt → freie Stellen, an denen sich Teilchen direkt annähern können → Flockulationsneigung steigt. Bei höhermolekularen Typen kommt Überbrückungsflockulation hinzu, weil eine Kette dann leichter an zwei Teilchen zugleich adsorbiert.
- Optimale Dosierung → Oberfläche ausreichend belegt → stabile Dispersion.
- Überdosierung → nicht adsorbiertes, freies Additiv bleibt im System → mögliche Verträglichkeitsprobleme, unerwünschte Viskositätsänderungen, schlechtere Wasserbeständigkeit und Zwischenhaftung.

Wie viel nötig ist, hängt von der spezifischen Oberfläche des Pigments und der Additivchemie ab — ein pauschaler Prozentwert taugt nicht. Deshalb fährt man eine Dosierreihe und bewertet Mahlgutviskosität, Endfeinheit, Farbstärke, Glanz, Lagerstabilität und je nach System zusätzlich Wasserbeständigkeit und Überlackierbarkeit.

Und nicht vergessen: Auch Temperatur, Pigmentkonzentration, Scherhistorie und Lagerzeit beeinflussen, ob eine Dispersion stabil bleibt.

## Abgrenzung: sterisch, elektrostatisch, elektrosterisch

```
Elektrostatisch: gleichnamige Oberflächenladungen → elektrische Abstoßung (siehe L-50).
Sterisch: adsorbierte, solvatisierte Polymerbarriere → räumliche und solvatationsbedingte
   Abstoßung.
Elektrosterisch: beides zugleich – eine Polymerhülle, die zusätzlich geladene Gruppen trägt.

Elektrosterisch ist damit nicht dasselbe wie elektrostatisch. In wässrigen Systemen ist die
   Kombination der Regelfall: Polymere Dispergiermittel für Wasserlacke tragen häufig
   Carboxylat- oder Sulfonatgruppen, sodass Ladung und Polymerbarriere gemeinsam wirken.
   Das erklärt auch, warum solche Systeme salzempfindlicher sind als rein sterisch
   stabilisierte – der elektrostatische Anteil bricht bei hoher Ionenstärke weg, der
   sterische bleibt.
```

## Vorsicht beim Verdünnen

Verdünnt man eine sterisch stabilisierte Pigmentdispersion mit einem ungeeigneten Lösemittel, knäueln sich die abstehenden Kettensegmente zusammen. Die Barriere bricht zusammen und es kommt zur Flockulation. Das Verdünnungsmittel muss also nicht nur zum Bindemittel passen, sondern auch zum Dispergiermittel.

**Merksatz**

Sterische Stabilisierung braucht ein Dispergiermittel mit zwei Enden: pigmentaffine Ankergruppen, die fest adsorbieren, und gut solvatisierte Barrieregruppen, die frei abstehen — als grobe Orientierung rund 10 nm dick. Die rückstellende Kraft ist ein Entropieeffekt der eingeengten Kettensegmente. Block- und Pfropfcopolymere eignen sich am besten; Molmasse und Oberflächenbelegung haben ein Optimum, und das Verdünnungsmittel muss auch zum Dispergiermittel passen, sonst knäueln die Ketten und die Dispersion flockt.

**Stichwörter:** sterische Stabilisierung, Deflockulation, Schutzkolloid, Ankergruppe, pigmentaffin, Barrieregruppe, serumaffin, Blockcopolymer, Pfropfcopolymer, Überbrückungsflockulation, Molmasse, Mindestkonzentration, Knäuelung, Konkurrenzadsorption

*Quellen: Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur*

## Übungsblatt Ü-51 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Nennen Sie die Voraussetzungen für eine wirksame sterische Stabilisierung.

**Ankergruppen:** Das Polymer braucht geeignete funktionelle Gruppen, die pigmentaffin sind und es fest auf der Pigmentoberfläche adsorbieren lassen. Dabei muss es bereits anhaftende Lösemittel- und Netzmittelmoleküle verdrängen.

**Barrieregruppen:** Es braucht ausreichend lange Kettensegmente, die im jeweiligen Dispersionsmittel — organisches Lösemittel oder Wasser — gut löslich sind und frei abstehen können.

**Passende Molmasse:** Mittlere Molmassen, besser noch Oligomere, sind in der Regel günstig. Bei zu niedriger Molmasse ist die Kettenlänge nicht ausreichend; bei zu hoher droht Überbrückungsflockulation, Unverträglichkeit oder ein Viskositätsanstieg. Die Molmasse allein entscheidet aber nicht — Polymerarchitektur, Ankerdichte, Solvatation und Oberflächenbelegung wirken mindestens ebenso stark.

**Geeignete Oberflächenbelegung:** Zu wenig lässt Stellen ohne Barriere frei und begünstigt zusätzlich Überbrückungsflockulation; zu viel hinterlässt freies, nicht adsorbiertes Additiv im System und kann Verträglichkeit, Viskosität, Wasserbeständigkeit und Zwischenhaftung verschlechtern. Es gibt also ein systemabhängiges Optimum — „mehr Dispergiermittel“ ist nicht automatisch besser.

**Wirkprinzip:** Nähern sich zwei belegte Teilchen, wird die Beweglichkeit der Polymersegmente eingeschränkt und ihre örtliche Konzentration steigt, sodass Lösemittel nachströmt. Daraus entsteht eine rückstellende Kraft. Man spricht deshalb auch von entropischer Stabilisierung. Die Barriere ist dabei keine starre Wand, sondern eine solvatisierte, bewegliche Schicht.

**Abgrenzung:** Rein sterisch wirkt die Polymerbarriere; elektrosterisch trägt dieselbe Hülle zusätzlich geladene Gruppen und kombiniert beide Prinzipien. Elektrosterisch ist deshalb nicht dasselbe wie elektrostatisch.

*Bewertung: Die Voraussetzungen werden genannt und jeweils begründet. Für die volle Punktzahl darf die Molmasse nicht als alleiniges Kriterium dastehen. Die Oberflächenbelegung muss als Optimum mit beidseitigem Risiko erkannt werden — zu wenig wie zu viel schadet — und nicht nur als Mindestkonzentration.*

**Frage 2** **(Berechnung, 7 Punkte)**

Ein Natriumstearat-Molekül ist gestreckt etwa 2,2 nm lang. Für eine wirksame sterische Barriere wird in diesem Beispiel eine Mindestdicke von etwa 10 nm angenommen. Beurteilen Sie, ob Natriumstearat sterisch stabilisieren kann.

**Vergleich:** Erforderlich sind mindestens 10 nm; vorhanden sind 2,2 nm.

**Verhältnis:** 10 nm / 2,2 nm = 4,5 — die erforderliche Länge ist rund viereinhalbmal so groß wie die vorhandene.

**Urteil:** Natriumstearat kann Pigmentdispersionen nicht sterisch stabilisieren. Das gilt allgemein für niedrigmolekulare Netzmittel, also Tenside.

**Was es stattdessen tut:** Netzmittel senken die Grenzflächenspannung und erleichtern die Benetzung. Durch Adsorption können sie ein Pigment zudem elektrisch aufladen und damit elektrostatisch stabilisieren — aber eben nicht sterisch.

**Was nötig wäre:** Für eine wirksame sterische Stabilisierung werden meist oligomere oder polymere Dispergiermittel eingesetzt.

*Bewertung: Die einfache Verhältnisrechnung macht die Aussage überprüfbar. Wichtig ist die Unterscheidung, was Netzmittel stattdessen leisten — sonst wirkt die Antwort wie eine reine Absage.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**

Eine sterisch stabilisierte Pigmentdispersion wird mit einem anderen Lösemittel verdünnt und flockt aus. Erklären Sie die Ursache.

**Voraussetzung der Stabilisierung:** Die Barrieregruppen des Dispergiermittels müssen im Dispersionsmittel gut löslich sein, damit sie frei abstehen und eine mindestens 10 nm dicke Schicht bilden.

**Was beim Verdünnen geschieht:** Ist das zugegebene Lösemittel für diese Kettensegmente ein schlechtes Lösemittel, knäueln sie sich zusammen. Die sterische Barriere schrumpft unter die erforderliche Dicke.

**Folge:** Die anziehenden Kräfte zwischen den Pigmentteilchen überwiegen wieder und es kommt zur Flockulation.

**Praxisregel:** Ein Verdünnungsmittel muss nicht nur zum Bindemittel passen, sondern auch zum Dispergiermittel. Vor einem Lösemittelwechsel ist die Verträglichkeit im Labor zu prüfen.

*Bewertung: Die Kette von Löslichkeit über Knäuelung zur Flockulation wird lückenlos dargestellt. Die Praxisregel am Ende ist die eigentlich verwertbare Erkenntnis.*

# L-52 · Netz- und Dispergiermittel

*Zwei Aufgaben: benetzen und stabil halten*

**Prüfungsteil 1** · A 9 · A 10

Netzmittel senken die Grenzflächenspannung und erleichtern die Benetzung, Dispergiermittel halten die zerteilten Pigmentteilchen gegen Flockulation stabil — unterschieden wird nach dieser Aufgabe.

## Die Abgrenzung

Netz- und Dispergiermittel gehören zur Rohstoffgruppe der Additive — Stoffe, die Lacken in kleinen Mengen zugesetzt werden, um einzelne Eigenschaften gezielt zu verändern. Unterschieden werden die beiden nach ihrer Aufgabe: Netzmittel erleichtern die Benetzung, indem sie die Grenzflächenspannung senken und damit den Randwinkel verkleinern (siehe L-12). Dispergiermittel stabilisieren die beim Zerteilen entstandenen Pigmentoberflächen gegen Flockulation. Die Molmasse ist dazu nur eine Orientierung: Typische Netzmittel sind niedermolekulare, amphiphile Tenside, moderne Dispergiermittel meist oligomer oder polymer. Verlassen kann man sich darauf nicht — viele Handelsprodukte können beides, und die Hersteller verkaufen sie folgerichtig als „Netz- und Dispergiermittel“.

## Aufbau eines Netzmittels

Ein typisches Netzmittel besitzt eine hydrophile Kopfgruppe und einen hydrophoben Schwanz. Dieses gleichzeitige Vorhandensein beider Eigenschaften heißt amphiphil; das einfachste Beispiel dafür ist Natriumstearat, das Salz der Stearinsäure — chemisch anschaulich, in der Lackpraxis aber kaum gebräuchlich. Verbreiteter sind dort Fettalkoholethoxylate: nichtionische Tenside mit einem langen Kohlenwasserstoff-Schwanz und einer Polyethylenoxid-Kopfgruppe, breit eingesetzt als Netz- und Emulgiermittel in wässrigen Systemen.

An der Grenze Wasser zu Luft weisen die hydrophilen Köpfe ins Wasser, die hydrophoben Schwänze zur Luft. Die Oberfläche besteht dann nicht mehr aus Wassermolekülen mit hoher Oberflächenspannung, sondern aus Kohlenwasserstoffketten mit niedrigerer — die Benetzung wird leichter.

## Vier Klassen nach der Kopfgruppe

- anionisch — negativ geladener Kopf, etwa Sulfonate; günstig und wirksam, aber empfindlich gegen mehrwertige Kationen (Härtebildner) und praktisch nur in wässrigen Systemen einsetzbar
- kationisch — positiv geladener Kopf, etwa quartäre Ammoniumverbindungen; seltener, unverträglich mit anionischen Partnern im selben System, dafür nützlich auf negativ geladenen Untergründen und mit bakterizider Nebenwirkung
- amphoter oder zwitterionisch — beide Ladungen im Molekül, etwa Lecithin; verträgt sich sowohl mit anionischen als auch mit kationischen Systempartnern und wird gezielt dafür eingesetzt
- nichtionisch — ungeladen, meist Polyetherketten; unempfindlich gegen Elektrolyte und pH-Wert, deshalb die häufigste Wahl in modernen wässrigen Lacksystemen

Nach dem Schwanz unterscheidet man Kohlenwasserstoff-, Silicon- und Perfluortenside.

## Wie stark sie wirken

Erreichbare Größenordnungen, keine Stoffkonstanten — der Messwert hängt von Konzentration, Temperatur und Medium ab:

- Wasser rein — 73 mN/m
- mit Kohlenwasserstofftensid — 40 bis 25 mN/m
- mit Silicontensid — 30 bis 20 mN/m
- mit Perfluortensid — 25 bis 15 mN/m

Je hydrophober der Schwanz, desto tiefer lässt sich die Oberflächenspannung drücken. Die Grenze setzt die Löslichkeit: Ein Tensid, das sich im Medium nicht mehr verteilt, wirkt auch nicht.

## Der günstige Dosierbereich — und warum mehr nichts bringt

Wie viele Lackadditive haben Netz- und Dispergiermittel einen günstigen Dosierbereich: Zu wenig bleibt unwirksam, zu viel kann Nebenwirkungen verursachen. Die geeignete Einsatzmenge wird nicht abgelesen, sondern am konkreten Lack über eine Dosierreihe bestimmt (siehe L-47). Dass mehr irgendwann nichts mehr bewirkt, hat einen anschaulichen Grund: Sind Pigmentoberfläche und Phasengrenze einmal belegt, geht zusätzliches Netzmittel in die Flüssigphase. In Wasser lagert es sich dort oberhalb der kritischen Mizellbildungskonzentration zu Mizellen zusammen, und die Oberflächenspannung sinkt kaum noch. Übrig bleiben nur die Nebenwirkungen (siehe unten).

## Doppelfunktionen

Manche Additive erfüllen zwei Aufgaben zugleich. Calciumnaphthenat ist ein Netzsikkativ: Es verbessert die Pigmentbenetzung und wirkt über das Metallion zugleich auf die oxidative Trocknung. Acetylenglykole (chemisch Alkindiole, verwandt mit Butindiol) netzen ausgesprochen schaumarm und fördern zusätzlich den Verlauf — praktisch überall dort, wo ein Netzmittel nötig ist, aber kein Schaum entstehen darf.

## Dispergiermittel

- Polyanionische Typen unterstützen die elektrostatische Stabilisierung: Sie adsorbieren auf anorganischen Pigmentoberflächen und verändern deren Ladung. Zusätzlich komplexieren sie mehrwertige Kationen und halten damit Härtebildner aus dem Wasser fern, die sonst Flockulation auslösen können. Einsatzgebiet: wässrige Systeme mit anorganischen Pigmenten.
- Polycarboxylate — Salze von Polyacrylsäuren: polymer aufgebaut und deutlich hydrolysebeständiger als Polyphosphate, dafür teurer. Wie sie wirken, hängt von Molmasse, Neutralisationsgrad und Seitenketten ab. Einsatzgebiet: hochwertige wässrige Systeme, insbesondere wenn Hydrolysebeständigkeit über längere Standzeit gefragt ist.
- Polyphosphate wie Pyrophosphat oder Calgon: anorganische Salze aus mehreren, über Sauerstoff verknüpften Phosphat-Einheiten (Calgon = Natriumhexametaphosphat); günstiger, gute Komplexbildung, für diese Anwendung typisch 0,2 bis 0,5 %, bezogen auf den gesamten Lack (nicht auf das Pigment — siehe L-53). Nachteil ist die langsame Hydrolyse zu Monophosphat, das auf der Beschichtung auskristallisieren kann. Einsatzgebiet: preissensitive wässrige Systeme mit kurzer Standzeit.
- Polymere Dispergiermittel wirken sterisch: Ihre Ankergruppen adsorbieren auf der Pigmentoberfläche, während die solvatisierten Kettensegmente frei in die Flüssigphase ragen und die Teilchen rein räumlich auf Abstand halten (siehe L-51). Block- und Pfropfcopolymere eignen sich dafür am besten. Einsatzgebiet: lösemittelhaltige und lösemittelfreie Systeme, in denen elektrostatische Stabilisierung nicht funktioniert (siehe L-50 und L-51).

## In allen Systemen — und ihre Nachteile

Netz- und/oder Dispergiermittel werden in pigmentierten Systemen häufig eingesetzt — wässrig, lösemittelhaltig und lösemittelfrei (100%). Nur der Typ unterscheidet sich: In Wasser stabilisiert man elektrostatisch bzw. elektrosterisch (ionische Netzmittel, Polyelektrolyt-Dispergiermittel), in unpolaren lösemittelhaltigen und in 100%-Systemen sterisch — mit nichtionischen Netzmitteln und polymeren Dispergiermitteln (siehe L-50 und L-51). Die Benetzung des Pigments ist überall nötig.

Nachteile: Netzmittel erhöhen die Hydrophilie des Films — zu viel senkt Wasser- und Korrosionsbeständigkeit und begünstigt Schaum (dagegen Entschäumer). Dispergiermittel können teuer sein (Polycarboxylate), langsam hydrolysieren und auf der Beschichtung auskristallisieren (Polyphosphate) oder Verträglichkeit und Zwischenhaftung beeinträchtigen.

**Merksatz**

Netzen heißt, die Oberfläche zugänglich machen. Dispergieren heißt, die zerteilten Teilchen stabil halten. Welche Molmasse ein Additiv hat, ist zweitrangig — gefragt ist, welche der beiden Aufgaben es im konkreten System erfüllt.

**Stichwörter:** Additiv, Netzmittel, Tensid, amphiphil, hydrophil, hydrophob, Kopf-Schwanz-Struktur, anionisch, kationisch, amphoter, zwitterionisch, nichtionisch, Fettalkoholethoxylat, Dispergiermittel, Polycarboxylat,

## Übungsblatt Ü-52 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Grenzen Sie Netzmittel und Dispergiermittel voneinander ab und erläutern Sie den Aufbau eines typischen Netzmittels.

**Abgrenzung nach der Aufgabe:** Beide gehören zur Rohstoffgruppe der Additive und werden nach ihrer Funktion unterschieden: Netzmittel erniedrigen an Phasengrenzflächen die Oberflächen- oder Grenzflächenspannung, verkleinern damit den Randwinkel und erleichtern die Benetzung. Dispergiermittel stabilisieren die beim Zerteilen entstandenen Pigmentoberflächen gegen Flockulation.

**Die Molmasse als Orientierung:** Netzmittel bzw. Tenside sind meist niedermolekular und amphiphil, Dispergiermittel meist oligomer oder polymer. Das ist ein Anhaltspunkt, kein Kriterium: Es gibt niedermolekulare Additive mit Dispergierwirkung und polymere mit deutlicher Netzwirkung. Maßgeblich ist, welche Aufgabe das Produkt im konkreten System erfüllt.

**Aufbau eines Netzmittels:** Es besitzt eine hydrophile Kopfgruppe und einen hydrophoben Schwanz. Dieses gleichzeitige Vorhandensein beider Eigenschaften in einem Molekül heißt amphiphil. Klassisches Beispiel ist Natriumstearat, das Salz der Stearinsäure.

**Wirkungsweise:** An der Grenzfläche Wasser zu Luft weisen die hydrophilen Köpfe ins Wasser, die hydrophoben Schwänze zur Luft. Die Oberfläche besteht dann nicht mehr aus Wassermolekülen mit hoher Oberflächenspannung, sondern aus Kohlenwasserstoffketten mit niedrigerer.

**Hinweis:** Hersteller fassen beide Begriffe häufig zusammen, weil viele Handelsprodukte beide Aufgaben erfüllen — die Abgrenzung ist in der Praxis fließend.

*Bewertung: Die Aufgabe steht vor der Molmasse — genau in dieser Reihenfolge wird abgegrenzt. Der Schlusshinweis zeigt, dass die Grenze in der Praxis fließend ist.*

**Frage 2** **(Berechnung, 7 Punkte)**

Ein wässriger Lack von 500 kg soll 0,35 % eines Polyphosphat-Dispergiermittels enthalten. Berechnen Sie die Einwaage und beurteilen Sie, ob sie im üblichen Bereich liegt.

**Gegeben:** m(Lack) = 500 kg; Anteil = 0,35 %

**Ansatz:** m(Additiv) = m(Lack) · Anteil / 100

**Rechnung:** m(Additiv) = 500 kg · 0,35 / 100 = 1,75 kg

**Beurteilung:** Für Polyphosphate in wässrigen Systemen ist ein Bereich von 0,2 bis 0,5 % typisch. Mit 0,35 % liegt der Wert mittig darin — bestätigen muss ihn aber eine Dosierreihe am konkreten Pigment.

**Antwortsatz:** Es sind 1,75 kg Dispergiermittel einzuwiegen; die Konzentration liegt im üblichen Bereich.

*Bewertung: Die geforderte Beurteilung wird mit dem konkreten Anwendungsbereich belegt. Bei Additiven gehört die Plausibilitätsprüfung der Einsatzmenge immer dazu.*

**Frage 3** **(Anwendung, 7 Punkte)**

Ein Wasserlack schäumt beim Rühren stark und die fertige Beschichtung nimmt mehr Wasser auf als erwartet. Nennen Sie eine gemeinsame mögliche Ursache und Gegenmaßnahmen.

**Gemeinsame Ursache:** Eine Überdosierung des Netzmittels erklärt beide Beobachtungen.

**Schaumbildung:** Grenzflächenaktive Substanzen stabilisieren Schaumlamellen, die große Oberflächen besitzen. Je mehr Netzmittel vorhanden ist, desto beständiger der Schaum.

**Wasseraufnahme:** Netzmittel verbleiben nach der Trocknung im Film und erhöhen dessen Hydrophilie. Die Beschichtung nimmt dadurch mehr Wasser auf, was Quellung, Glanzverlust und im Korrosionsschutz Unterrostung begünstigen kann.

**Gegenmaßnahmen:** Erstens die Netzmittelmenge über eine Dosierreihe auf das Optimum zurücknehmen: Ist die Grenzfläche einmal belegt, senkt zusätzliches Netzmittel die Oberflächenspannung kaum noch — es bleiben nur die Nebenwirkungen. Zweitens einen Entschäumer einsetzen. Drittens ein schaumarmes Netzmittel wählen, etwa ein Alkindiol (Acetylenglykol).

**Grundsatz:** Viele Additive besitzen einen günstigen Dosierbereich: Zu wenig kann unwirksam sein, zu viel Nebenwirkungen verursachen — mehr Additiv bedeutet nicht automatisch mehr Wirkung. Die geeignete Einsatzmenge wird am konkreten Lack, z. B. durch eine Dosierreihe, bestimmt.

*Bewertung: Beide Symptome werden auf eine Ursache zurückgeführt — das ist der Kern der Aufgabe. Die Gegenmaßnahmen sind nach Eingriffstiefe geordnet.*

# L-53 · Der Dispergierprozess

*Benetzen, Zerteilen, Stabilisieren*

**Prüfungsteil 1** · A 9

Dispergieren ist mehr als Mahlen: Es umfasst Benetzen, Desagglomerieren und Stabilisieren — drei Schritte, die alle gelingen müssen, damit die Dispersion stabil bleibt.

## Drei Teilchenbegriffe nach DIN EN ISO 18451-1

- Primärteilchen sind die bei der Pigmentherstellung entstehenden kleinsten Teilchen — bei den meisten anorganischen und organischen Pigmenten Einzelkristalle, bei Ruß dagegen kleine, nicht-kristalline Kohlenstoffpartikel.
- Aggregate sind stärker gebundene bzw. flächig verwachsene Primärteilchen; ob und in welchem Umfang sie unter einem konkreten Dispergierprozess aufgeschlossen werden, hängt von der Beanspruchung ab.
- Agglomerate sind Zusammenlagerungen von Primärteilchen oder Aggregaten über Ecken und Kanten. Sie lassen sich im Dispergierprozess typischerweise aufschließen; der erreichbare Aufschlussgrad hängt von Struktur und mechanischer Beanspruchung ab.

## Zweck und Grenzen

Zweck des Dispergierprozesses ist es, die Agglomerate voneinander zu trennen. Im Idealfall erhält man eine Dispersion aus Primärteilchen und Aggregaten. In der Praxis kommt es häufig nur zum Zerteilen großer Agglomerate in kleinere.

## Die drei Schritte

- Benetzen der Pigmentagglomerate
- Zerteilen der Pigmentagglomerate
- Stabilisieren der erhaltenen Dispersion gegen Flockulation

## Benetzen läuft zweistufig ab

Zuerst breitet sich die flüssige Phase auf der Agglomeratoberfläche aus, dann dringt sie in die Poren und Hohlräume des Agglomerats ein und verdrängt dabei Luft. Thermodynamische Voraussetzung für ein spontanes, kapillares Eindringen ist ein Randwinkel unter 90 Grad, am besten null (Spreitung). Sie sagt aber nur, OB die Benetzung überhaupt freiwillig abläuft — ob der Filmbildner das Pigment benetzen „will“. Wie SCHNELL das geschieht, sagt die Thermodynamik nicht; das ist eine Frage der Kinetik. Und in der Praxis zählt gerade die Geschwindigkeit: Beim Dispergieren steht nur begrenzt Zeit zur Verfügung, das Eindringen in feine Kapillarporen kann aber langsam sein.

## Vier Folgerungen für die Praxis

- Grobteilige Pigmente werden meist schneller benetzt als feinteilige, weil ihre Kapillarporen weiter sind; entscheidend sind daneben Porenstruktur, Benetzbarkeit und Viskosität.
- Je niedriger die Viskosität der flüssigen Phase, desto schneller die Benetzung. Die Viskosität sinkt mit steigender Temperatur.
- Je größer die Agglomerate und damit je länger die Poren, desto langsamer die Benetzung.
- Triebkraft des Eindringens ist das Produkt $\gamma \cdot \cos \theta$: Entscheidend sind ein kleiner Randwinkel und eine günstige Grenzflächenspannung zwischen Flüssigkeit und Pigment — nicht eine möglichst hohe Oberflächenspannung allein.

Diese vier Aussagen beschreiben, wie rasch eine Flüssigkeit in die feinen Kapillaren zwischen den Pigmentteilchen eindringt. Für die Praxis heißt das: Eine mäßig erhöhte Ansatztemperatur senkt die Viskosität und beschleunigt die Benetzung; wo der Randwinkel trotzdem zu groß bleibt, wählt der Lacklaborant ein wirksameres oder zusätzliches Netzmittel, statt einfach länger zu rühren.

## Wie dicht die Agglomerate gepackt sind

Agglomerate unterscheiden sich nicht nur in der Größe, sondern auch darin, wie dicht die Primärteilchen gepackt sind — und damit, wie eng und klein die Poren dazwischen sind. Lockere, weiche Agglomerate mit weiten Poren werden schnell benetzt und lassen sich leicht zerteilen. Dichte, harte Agglomerate mit engen Poren nehmen die flüssige Phase nur langsam auf und brauchen zum Zerteilen deutlich mehr Scherenergie. Wie dicht ein Pigment agglomeriert vorliegt, hängt von Herstellung und Trocknung ab; Hersteller bieten deshalb „leicht dispergierbare“ Typen mit lockerer Struktur oder Oberflächenbehandlung an. Für den Prozess heißt das: Bei dichten, harten Agglomeraten sind längere Benetzungszeit (Einsumpfen) und höherer Energieeintrag nötig.

## Vier Beanspruchungsmechanismen

- Scherung im fluiden Medium — das Strömungsgefälle in der zähen Paste reißt die Agglomerate auseinander (Dissolver).
- Scherung und Reibung zwischen zwei Flächen — Zerreiben im engen Spalt (Dreiwalze; zwischen den Mahlperlen der Kugelmühle).
- Prallbeanspruchung — Mahlkörper und Teilchen stoßen zusammen (Perlmühle).
- Druck- und Quetschbeanspruchung — Zusammendrücken im engen Spalt (Kneter, Walze).

## Feinheit und Wärme

Je höher die im Medium erzeugte Scherbeanspruchung, desto feiner die erreichbare Verteilung. Ein großer Teil der zugeführten mechanischen Leistung wird in Wärme umgesetzt — deshalb muss meist gekühlt werden (beim Dissolver steigt die Paste sonst leicht über 60 °C). Das ist mehr als ein Komfortproblem: Lösemittel — bei wässrigen Systemen auch Wasser — verdunsten dann schneller und die Paste konzentriert sich unkontrolliert auf, hitzeempfindliche Additive wie manche Biozide oder Verlaufsmittel können sich zersetzen, und bei brennbaren lösemittelhaltigen Ansätzen rückt die Temperatur näher an den Flammpunkt heran.

## Die wichtigsten Dispergiergeräte

- Dissolver (Zahnscheibenrührer) — Scherung im fluiden Medium; Standardgerät für mittlere Feinheit und zum Vordispergieren.
- Rührwerks-Kugelmühle / Perlmühle — Scherung und Prall zwischen kleinen Mahlperlen; für hohe Feinheit bei eher niedriger Viskosität.
- Dreiwalze — Scherung zwischen drei unterschiedlich schnellen Walzen; für hochviskose Pasten (Druckfarben, Abtönpasten).
- Kneter und Extruder — Druck und Scherung bei sehr hoher Viskosität (u. a. Dispergieren der Pulverlack-Schmelze, siehe L-97).
- Rotor-Stator-Maschine — hohe Scherung im engen Spalt; für leicht dispergierbare Systeme.

## Der Dissolver — das Standardgerät

Am häufigsten dispergiert der Lacklaborant mit dem Dissolver: Eine gezahnte Scheibe läuft mit hoher Umfangsgeschwindigkeit (etwa 10 bis 25 m/s) in der Paste. Der Dissolver erreicht nicht die höchste Feinheit, ist aber schnell und robust; viele matte Innendispersionsfarben lassen sich allein damit herstellen, feinere Produkte laufen anschließend über die Perlmühle.

## Das Doughnut-Strömungsbild beim Dissolver — das Ziel, nicht der Fehler

Beim Dissolver stellt sich, wenn Geometrie und Viskosität stimmen, im Behälter ein torusförmiger Umlauf ein: Die Zahnscheibe schleudert das Mahlgut nach außen, an der Behälterwand steigt es hoch, in der Mitte fließt es wieder nach unten und läuft erneut in die Scherzone. Weil der umlaufende Ring dabei aussieht wie ein Krapfen mit Loch, heißt dieses Bild Doughnut-Effekt. Es ist das erwünschte Bild und gilt als Zeichen richtig eingestellter Dispergierbedingungen — nur so läuft die ganze Paste immer wieder durch die wirksame Zone. Als Anhalt für die Geometrie: Scheibendurchmesser rund ein Drittel des Behälterdurchmessers, Scheibe etwa einen Scheibendurchmesser über dem Boden, Füllhöhe ungefähr das Ein- bis Zweifache davon.

## Wenn der Doughnut ausbleibt

Auch das gilt speziell für den Dissolver — andere Dispergiergeräte ohne Zahnscheibe kennen dieses Strömungsbild nicht:

• Zu dünn eingestellt: Die Scheibe dreht fast frei durch, es bildet sich ein tiefer Trichter bis hinunter zur Scheibe, und über ihn wird Luft eingeschlagen. Die Scherkräfte kommen nicht ins Mahlgut.

• Zu dick eingestellt: Nur ein Bereich unmittelbar an der Scheibe bewegt sich, der Rest steht. Dort wird es örtlich heiß, und die stehende Masse wird nie dispergiert.

• Geometrie unpassend: zu kleine Scheibe, zu hohe Füllung, Scheibe zu dicht am Boden oder zu nah an der Oberfläche — dann kommt kein Umlauf zustande.

Daraus folgt die wichtigste Betriebsregel: Wird die Feinheit trotz hoher Drehzahl nicht besser, erst das Strömungsbild in Ordnung bringen — Viskosität, Füllhöhe, Scheibenhöhe und Scheibendurchmesser. Weiter Drehzahl geben bringt vor allem Wärme.

## Dispergiert wird die Mahlpaste, nicht der fertige Lack

Angesetzt wird zunächst eine konzentrierte Mahlpaste (auch Mahlgut oder Mahlansatz) aus Pigment, einem Teil des Bindemittels, Lösemittel bzw. Wasser und dem Netz- und Dispergiermittel. Dosiert wird das Dispergiermittel dabei bezogen auf die Pigmentmasse, nicht auf den Gesamtansatz — die Bedarfsangaben der Hersteller beziehen sich auf das Pigment. (Anders die Polyphosphat-Richtwerte in L-52: Dort sind 0,2 bis 0,5 % auf den gesamten Lack bezogen.) Das hat drei Gründe: Die höhere Viskosität überträgt die Scherkräfte besser, und pro Durchgang wird mehr Pigment aufgeschlossen — das ist wirtschaftlicher. Dazu kommt ein Adsorptionsgrund: Das Dispergiermittel soll die frisch entstandene Pigmentoberfläche zuerst und möglichst vollständig belegen, bevor zusätzliches Bindemittel — falls es selbst polare oder ionische Gruppen trägt — um dieselben Adsorptionsplätze konkurriert (siehe L-51). Die Grenze setzt die Zirkulation: Wird die Paste zu dick, bleibt das Strömungsbild aus. Die richtige Pigmentkonzentration lässt sich deshalb nicht an der Prozentzahl ablesen, sondern wird für Pigment, Bindemittel und Gerät im Versuch ermittelt. Erst nach dem Dispergieren wird mit dem restlichen Bindemittel und den übrigen Additiven aufgelackt (Let-down, siehe L-60).

## Passagen- oder Zirkulationsverfahren

Bei Mühlen unterscheidet man, wie das Mahlgut durchläuft. Im Passagenverfahren läuft es ein- oder mehrmals durch die Mühle; im Zirkulationsverfahren immer wieder aus einem Vorlagebehälter im Kreis. Die Zirkulation liefert eine engere Verweilzeitverteilung — jedes Teilchen wird ähnlich oft beansprucht — und damit eine gleichmäßigere Feinheit.

## Wie weit ist die Dispergierung? Der Grindometer

Der Fortschritt wird am Grindometer gemessen (Keilblock nach DIN EN ISO 1524): In eine keilförmig auslaufende Rille — üblich 0 bis 25, 0 bis 50 oder 0 bis 100 µm — wird Mahlgut gegeben und mit dem Schaber abgezogen. Abgelesen wird die Stelle, an der gehäuft Stippen erscheinen, nicht das erste Einzelkorn. Richtwerte: hochglänzende Decklacke und Automobil-Basislacke unter 10 µm, Füller und Grundierungen 20 bis 40 µm, matte Innendispersionsfarben auch 50 µm und mehr. Trägt man den Grindometerwert über der Dispergierzeit auf, flacht die Kurve ab — ab dort bringt weiteres Dispergieren vor allem Wärme. Als zweite Verlaufsgröße eignet sich zum Beispiel die Farbstärke: Sie steigt oft noch, wenn der Grindometerwert längst steht. Bei transparenten Pigmentsystemen lässt sich stattdessen oder zusätzlich die Transparenz verfolgen, die mit fortschreitender Zerteilung ebenfalls noch zunimmt.

## Was REM- und TEM-Aufnahmen zeigen

Der Grindometer findet nur die gröbsten Reste. Ob tatsächlich Primärteilchen und Aggregate vorliegen, zeigt erst die Elektronenmikroskopie: Das Rasterelektronenmikroskop (REM) bildet die Oberfläche ab und macht Agglomerate und ihre Struktur sichtbar, das Transmissionselektronenmikroskop (TEM) durchstrahlt die Probe und lässt einzelne Primärteilchen erkennen. Größenordnungen zum Vergleich: Titandioxid-Primärteilchen etwa 200 bis 300 nm, Ruß 10 bis 100 nm, pyrogene Kieselsäure 7 bis 40 nm — alles weit unterhalb dessen, was ein Grindometer auflöst.

## Organische Pigmente dispergieren — was anders ist

Organische Pigmente verhalten sich beim Dispergieren anders als anorganische, und zwar aus drei Gründen, die alle in derselben Richtung wirken.

Erstens die spezifische Oberfläche: Sie liegt deutlich höher als bei den meisten anorganischen Pigmenten. Damit steigen der Bedarf an Netz- und Dispergiermittel (siehe L-52) und die Viskosität der Mahlpaste — der mögliche Pigmentgehalt im Mahlgut ist entsprechend niedriger.

Zweitens die Dichte: Organische Pigmente sind deutlich leichter als etwa Titandioxid oder Eisenoxid. Bei gleicher Einwaage nehmen sie ein Vielfaches an Volumen ein. Weil die PVK eine Volumengröße ist (siehe L-39), verschiebt sich die Rezeptur schneller, als es die Prozentzahl der Masse vermuten lässt — gerechnet wird über die Dichte, nicht über die Waage allein.

Drittens der Energiebedarf: Feinteilige organische Pigmente bilden festere Agglomerate. Der Dissolver allein reicht meist nicht; für die geforderte Feinheit folgt die Perlmühle.

Der Endpunkt lässt sich am Grindometer nicht ablesen; bei organischen Pigmenten ist die Farbstärke die aussagekräftigere Verlaufsgröße, bei transparenten Typen zusätzlich die Transparenz (siehe oben).

Zugleich gibt es ein Zuviel. Zu langes Dispergieren bringt vor allem Wärme, und Wärme in Verbindung mit dem Lösemittel begünstigt Kristallwachstum und Umwandlung der Kristallmodifikation (siehe L-42). Farbton und Farbstärke können dadurch wieder abfallen. Temperaturführung und Kühlung gehören beim Dispergieren organischer Pigmente deshalb zur Rezeptur, nicht zum Komfort.

Und schließlich neigen organische Pigmente stärker zur Flockulation als oxidische, weil ihre Oberflächenladung schwächer ausgeprägt ist (siehe L-50). Stabilisiert wird überwiegend sterisch mit polymeren, pigmentaffinen Dispergiermitteln (siehe L-51). Ob es gelungen ist, zeigt in Mischtönen der Rub-out-Test: Wird die aufgezogene Fläche beim Verreiben mit dem Finger farbstärker oder farbtonverschieden, liegt Flockulation vor.

**Merksatz**

In einer feinen Kapillare ist der Kapillardruck höher ($p = 2\,\gamma \cos\theta / r$), der Strömungswiderstand steigt mit kleinerem Radius aber weit stärker an ($Q \propto r^4$). Beides zusammen ergibt nach Washburn eine Eindringtiefe $l \propto \sqrt{r}$: Bei gleicher Zeit dringt die flüssige Phase in feine Poren weniger tief ein als in weite. Feinteilige oder dicht agglomerierte Pigmente werden deshalb nicht schlechter benetzt — sie brauchen für dieselbe Eindringtiefe mehr Zeit. Netzmittel helfen, solange der Randwinkel noch deutlich über null liegt: Sie senken zwar die Oberflächenspannung, verkleinern aber zugleich den Randwinkel, sodass das Produkt $\gamma \cdot \cos\theta$ steigt. Ist der Randwinkel bereits nahe null, senkt weiteres Netzmittel nur noch $\gamma$ — und damit den Kapillardruck.

VERTIEFUNG — ÜBER DEM PRÜFUNGSSTOFF

## Warum das so ist — die Physik dahinter (Vertiefung)

Dass feinteilige Pigmente langsamer benetzt werden, folgt aus zwei Gesetzen, die gegenläufig wirken — und aus der Frage, welches von beiden überwiegt.

Kapillardruck (driving force): Der Saugdruck in einer Kapillare berechnet sich als $p = 2 \cdot \gamma \cdot \cos \theta / r$. Mit kleinerem Porenradius r steigt der Kapillardruck — feinere Pigmentagglomerate saugen die Benetzungsflüssigkeit also kräftiger an. Für sich genommen spricht dieser Term für ein rascheres Eindringen.

Hagen-Poiseuille (Strömungswiderstand): Der Volumenstrom durch eine Kapillare folgt $Q \propto r^4 / \eta$. Wird der Radius halbiert, fällt der Durchfluss auf ein Sechzehntel. Dieser $r^4$-Effekt überwiegt den ansteigenden Saugdruck bei weitem — deshalb dauert das Eindringen in feinteilige Strukturen trotz höherem Sog viel länger.

Washburn-Gleichung (Ergebnis): Kombiniert man Saugdruck und Strömungswiderstand, ergibt sich die Eindringtiefe als $l = \sqrt{(r \cdot \gamma \cdot \cos \theta \cdot t / 2\eta)}$. Die Eindringtiefe wächst also mit der Quadratwurzel von r: Bei sonst gleichen Bedingungen dringt die Flüssigkeit in eine feinere Pore in derselben Zeit weniger tief ein — der höhere Kapillardruck wird vom Strömungswiderstand mehr als aufgewogen. Feine Strukturen werden nicht schlechter benetzt, sie brauchen für dieselbe Eindringtiefe schlicht mehr Zeit. Praktisch heißt das: Für feinteilige Pigmente länger rühren oder einsumpfen lassen, damit der Benetzungsvorgang vollständig ablaufen kann. Die tatsächliche Benetzung hängt darüber hinaus von Porengeometrie, Kontaktwinkel, Viskosität und der Struktur des Agglomerats ab.

## Zwei Kniffe aus dem Labor

- Daniel'sche Regel (empirische Praxisregel): „Im schlechten Löser treiben und mit dem guten Löser aufziehen.“ In einem schlechteren Lösemittel sind die Bindemittelmoleküle stärker geknäult, die Lösungsviskosität ist niedriger — und das beschleunigt die Benetzung.
- Verlängerte Vormisch- und Benetzungszeit (ggf. Einsumpfen): Lässt man das Mahlgut länger — teils über Nacht — vormischen bzw. stehen, dringt die Bindemittellösung tiefer in die Hohlräume der Agglomerate ein.

**Stichwörter:** Dispergieren, Dispergierprozess, Desagglomeration, Primärteilchen, Aggregat, Agglomerat, DIN EN ISO 18451-1, Benetzen, Zerteilen, Stabilisieren, Randwinkel, Kapillare, Daniel'sche Regel, Einsumpfen, Mahlgut, Mahlpaste, Dissolver, Doughnut-Effekt, Umfangsgeschwindigkeit, Let-down, Grindometer, DIN EN ISO 1524, REM, TEM, Transparenz, Ölzahl, Konkurrenzadsorption

*Quellen: Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur; Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; DIN EN ISO 18451-1; DIN EN ISO 1524*

## Übungsblatt Ü-53 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 11 Punkte)**

Unterscheiden Sie Primärteilchen, Aggregate und Agglomerate, nennen Sie die drei Schritte des Dispergierprozesses und erklären Sie, warum grobteilige Pigmente schneller, feinteilige dagegen für dieselbe Eindringtiefe mehr Zeit brauchen.

**Primärteilchen:** Die bei der Pigmentherstellung entstehenden kleinsten Teilchen — bei den meisten Pigmenten Einzelkristalle, bei Ruß nicht-kristalline Kohlenstoffpartikel.

**Aggregate:** Flächig verwachsene Primärteilchen. Unter üblichen Dispergierbedingungen werden sie allenfalls teilweise aufgeschlossen.

**Agglomerate:** Zusammenlagerungen von Primärteilchen oder Aggregaten über Ecken und Kanten. Sie sind der eigentliche Angriffspunkt des Dispergierens und werden dabei aufgeschlossen; wie weit, hängt von Struktur und mechanischer Beanspruchung ab.

**Die drei Schritte:** Benetzen der Pigmentagglomerate, Zerteilen der Pigmentagglomerate, Stabilisieren der erhaltenen Dispersion gegen Flockulation.

**Realistische Erwartung:** Im Idealfall erhält man eine Dispersion aus Primärteilchen und Aggregaten. In der Praxis kommt es häufig nur zum Zerteilen großer Agglomerate in kleinere.

**Grobteilig oder feinteilig:** Grobteilige Pigmente haben weitere Kapillarporen und werden schneller benetzt; in feinteilige dringt die flüssige Phase langsamer und bei gleicher Zeit auch weniger tief ein (Washburn: $l \propto \sqrt{r}$). Für feinteilige Pigmente ist deshalb eine längere Benetzungszeit vorzusehen — im Labor etwa durch Einsumpfen des Mahlguts über Nacht.

*Bewertung: Die Begriffe folgen DIN EN ISO 18451-1 (früher DIN 53206). Der entscheidende Unterschied wird ausdrücklich benannt: Agglomerate werden beim Dispergieren aufgeschlossen, Aggregate dagegen nur begrenzt und beanspruchungsabhängig. Der letzte Punkt begründet den Zeitbedarf feinteiliger Pigmente über den Kapillartransport (Washburn, $l \propto \sqrt{r}$) und nicht über eine angeblich schlechtere Benetzbarkeit.*

**Frage 2** **(Berechnung, 10 Punkte)**

Für einen Weißlack wird eine Mahlpaste angesetzt: 400 g Titandioxid, 250 g Bindemittellösung mit 60 % Festkörper, 330 g Wasser und 20 g Dispergiermittel (100 % Wirkstoff). a) Wie hoch ist der Pigmentgehalt der Mahlpaste? b) Wie hoch ist die Dispergiermitteldosierung, bezogen auf das Pigment? c) Wie hoch ist der Festkörpergehalt der Mahlpaste? d) Die Paste wird auf 2000 g Fertiglack aufgelackt — wie hoch ist der Pigmentgehalt dann? e) Sagt der Pigmentgehalt der Mahlpaste, ob sie sich gut dispergieren lässt?

**Gesamtmasse:** 400 g + 250 g + 330 g + 20 g = 1000 g.

**a) Pigmentgehalt:** 400 g / 1000 g · 100 % = 40,0 %.

**b) Dispergiermittel auf Pigment:** 20 g / 400 g · 100 % = 5,0 %. Dispergiermittel werden auf die Pigmentmasse bezogen dosiert, nicht auf den Gesamtansatz — sonst hängt die Dosierung davon ab, wie stark die Paste verdünnt ist.

**c) Festkörpergehalt:** Bindemittelfestkörper = 250 g · 0,60 = 150 g. Festkörper gesamt = 400 g + 150 g + 20 g = 570 g, also 57,0 %. Flüssige Phase = 1000 g − 570 g = 430 g (330 g Wasser und 100 g Lösemittel aus der Bindemittellösung).

**d) Nach dem Auflacken:** 400 g / 2000 g · 100 % = 20,0 %. Die Pigmentmenge bleibt gleich, sie verteilt sich nur auf die doppelte Masse.

**e) Aussagekraft:** Nein. Ob eine Paste gut läuft, entscheiden Viskosität und Strömungsbild im Gerät, der Pigmenttyp und das Dispergiermittel. Zwei Pasten mit demselben Pigmentgehalt können sich völlig unterschiedlich verhalten.

*Bewertung: Die vier Rechnungen hängen an einem einzigen Ansatz und lassen sich gegeneinander prüfen. Teil b) trifft die häufigste Fehlerquelle: die falsche Bezugsgröße. Teil e) verhindert, dass aus einer Prozentzahl eine Prozessaussage gemacht wird.*

**Frage 3** **(Anwendung, 10 Punkte)**

Eine Mahlpaste wird im Dissolver dispergiert. Nach 20 Minuten ist die Grindometerfeinheit kaum besser als zu Beginn. Im Behälter läuft das Material nur außen um, in der Mitte steht ein tiefer Trichter bis fast zur Scheibe, und die Paste erwärmt sich stark. Beurteilen Sie das Strömungsbild, nennen Sie Ursache und Maßnahmen und ordnen Sie dabei die Daniel'sche Regel ein.

**Befund:** Das erwünschte Doughnut-Strömungsbild fehlt. Beim Doughnut wird das Mahlgut nach außen geschleudert, steigt an der Wand hoch, fließt in der Mitte nach unten und läuft erneut durch die Scherzone. Hier dreht sich nur der äußere Bereich; der tiefe Trichter zeigt, dass die Scheibe fast frei durchdreht.

**Ursache:** Die Mahlpaste ist zu dünn eingestellt. Bei zu niedriger Viskosität überträgt die Zahnscheibe kaum Scherkräfte — die Energie geht in Umwälzung und Wärme statt in das Zerteilen der Agglomerate. Über den Trichter wird zusätzlich Luft eingeschlagen.

**Maßnahmen:** Nicht die Drehzahl weiter erhöhen. Zuerst die Viskosität anheben: weniger Lösemittel bzw. Wasser, höherer Pigment- bzw. Bindemittelanteil in der Mahlpaste. Danach Füllhöhe und Scheibenhöhe über dem Boden prüfen und den Scheibendurchmesser gegen den Behälter kontrollieren (Anhalt: rund ein Drittel des Behälterdurchmessers).

**Daniel'sche Regel:** „Im schlechten Löser treiben und mit dem guten Löser aufziehen.“ Im schlechteren Lösemittel sind die Bindemittelmoleküle stärker geknäult, die Lösungsviskosität ist niedriger — das beschleunigt die Benetzung.

**Richtig eingeordnet:** Die Regel zielt auf das Benetzen. Für das Zerteilen darf die Viskosität aber nicht beliebig niedrig sein, sonst tritt genau der beobachtete Fall ein: Der Dissolver braucht eine gewisse Zähigkeit, um Kraft zu übertragen. Gesucht ist ein Optimum, kein Minimum.

**Grenze:** Das Lösevermögen darf zudem nicht so weit sinken, dass das Bindemittel ausfällt oder das Dispergiermittel seine Barrierewirkung verliert — dann käme es zur Flockulation.

**Nachweis:** Die Verbesserung wird nicht am Augenschein festgemacht, sondern am Grindometer: Werte über der Dispergierzeit aufnehmen und die Kurven vor und nach der Umstellung vergleichen. Flacht die Kurve früher und tiefer ab, hat die Maßnahme gewirkt. Zusätzlich Farbstärke und Temperatur mitschreiben.

*Bewertung: Aus der Beobachtung wird über das Strömungsbild eine Ursache abgeleitet und daraus eine Maßnahme — genau die Reihenfolge, die im Labor gefragt ist. Die Daniel'sche Regel wird nicht nur wiedergegeben, sondern gegen die Anforderung des Zerteilens abgegrenzt.*

# L-54 · Ausschwimmen und kontrollierte Flockulation

*Ein Fehlerbild und seine gezielte Gegenmaßnahme*

**Prüfungsteil 1** · A 8.4 · A 9

Verschiedene Pigmente sind im noch flüssigen Film unterschiedlich beweglich und entmischen sich — dagegen hilft ausgerechnet eine gewollte, kontrollierte Flockulation.

## Wie es entsteht

Lacke enthalten in der Regel mehr als eine Pigmentsorte. Entmischen können sie sich, weil die einzelnen Pigmente im frisch applizierten, noch fließfähigen Film unterschiedlich beweglich sind. Wie beweglich ein Pigment ist, entscheidet nicht die Dichte allein: Teilchengröße, Oberflächenchemie und vor allem der Stabilisierungsgrad wirken mit. Ein schlechter stabilisiertes Pigment flockt leichter und wandert dann anders als ein gut stabilisiertes. Während Verdunstung und Fließvorgänge den Film durchziehen, entstehen so örtliche Konzentrationsunterschiede — und die bleiben nach dem Trocknen erhalten.

## Zwei Erscheinungsformen

- Floating — fleckiges oder streifiges Ausschwimmen: In der Lackoberfläche selbst treten örtliche Konzentrationsunterschiede auf. Das äußert sich häufig als Bénard'sche Zellen oder als Streifen. Die Oberfläche hat keinen einheitlichen Farbton.
- Flooding — Aufschwimmen über die Filmdicke: In der Oberfläche selbst bestehen keine Unterschiede, wohl aber senkrecht dazu. Der Film zeigt einen einheitlichen Farbton — der Schaden wird erst sichtbar, wenn man den Rub-out-Test durchführt oder eine beschichtete Glasplatte von beiden Seiten betrachtet.

Die Zusätze „vertikal“ und „horizontal“ werden in der Literatur für beide Fehler unterschiedlich verwendet und deshalb hier nicht benutzt. Maßgeblich ist, was man sieht und was der Rub-out-Test zeigt.

## Bénard'sche Zellen

Bénard'sche Zellen entstehen im noch flüssigen Film durch Konvektionsströmungen: Verdunstendes Lösemittel kühlt die Oberfläche örtlich ab und reichert dort die nichtflüchtigen Bestandteile an — beides erhöht die Oberflächenspannung an dieser Stelle. Die entstehenden Spannungsunterschiede setzen Flüssigkeit in Bewegung (Marangoni-Strömung): Stoff fließt von der Stelle geringerer Oberflächenspannung zu der mit höherer. Diese Strömung ordnet sich zu regelmäßigen, wabenförmigen Konvektionszellen. Pigmente werden mitgerissen und häufen sich an den Zellgrenzen oder in den Zellzentren an — das sichtbare, fleckige Muster im Trockenfilm ist der Abdruck dieser Strömungsstruktur.

## Der Rub-out-Test

Beim Rub-out-Test reibt man eine Stelle des noch feuchten Films mit dem Finger auf. Zeigt sich dort ein anderer Farbton als daneben, ist die Pigmentverteilung gestört. Im Mehrpigmentsystem kann das zwei Ursachen haben: Flooding — das Reiben mischt die in der Tiefe angereicherten Pigmente wieder ein — oder Flockulation eines Pigments — das Reiben zerteilt die Flockulate (siehe L-53). Im Einpigmentsystem kommt nur Flockulation infrage. Welche Ursache vorliegt, zeigt erst die weitere Prüfung (Mikroskopie, Einzelpasten getrennt aufziehen). Trotz moderner Analysetechnik ist dieser einfache manuelle Test bis heute das übliche Verfahren in der Praxis — schnell, empfindlich und ohne Gerät.

## Die Gegenmaßnahme

Kontrollierte Flockulation — genauer kontrollierte Coflockulation — kann beide Typen in geeigneten Pigmentsystemen verhindern oder verringern; Wirkung und Ausmaß hängen von Pigmenten, Dispergiermitteln und Formulierung ab. Dabei werden die unterschiedlich beweglichen Pigmente durch schwache Nebenvalenzbindungen locker miteinander verbunden, sodass sie sich nicht mehr getrennt bewegen können. Erreicht wird das durch spezielle Dispergiermittel, die eine gewollte, aber reversible Überbrückungsflockulation bewirken.

Das Besondere an diesen Additiven liegt in ihrer Polymerarchitektur: Während ein Standarddispergiermittel darauf ausgelegt ist, starke Abstoßung zwischen den Teilchen aufzubauen (vollständige sterische Abschirmung), sind diese speziellen Typen bewusst so konstruiert, dass eine Polymerkette schwache, reversible Brücken zwischen zwei Pigmentteilchen bilden kann — gezielt, aber nicht zu fest. Oft handelt es sich um Salze ungesättigter Polyaminamide mit sauren Polyestern oder um niedermolekulare Polycarbonsäure-Polymere mit mehreren Ankergruppen. Das entstehende dreidimensionale Netzwerk bricht unter Scherkraft beim Applizieren auf und baut sich in Ruhe wieder auf.

## Vorteile der kontrollierten Flockulation

- Keine Entmischung unterschiedlich beweglicher Pigmente — damit kein oder wenig Aus- und Aufschwimmen und keine oder wenige Bénard'sche Zellen und Streifen.
- Rheologische Wirkung: Das nicht-newtonsche Fließverhalten wird verstärkt, es entsteht ein reversibles dreidimensionales Netzwerk. Ergebnis sind bessere Applikationseigenschaften, etwa eine verringerte Ablaufneigung.
- Geringeres Absetzen im Gebinde.
- Kein direkter Pigment-Pigment-Kontakt in den Flockulaten. Der Bodensatz bleibt weich und lässt sich in der Regel schon durch Rühren wieder aufrühren.

## Nicht zuerst am Additiv drehen

Flooding und Floating entstehen oft erst beim Zusammenmischen: Eine Pigmentpaste, die für sich stabil ist, kann im Basislack unverträglich sein, weil dort ein anderes Dispergiermittel oder ein anderes Bindemittel vorliegt. Die Fehlersuche beginnt deshalb nicht mit „mehr Dispergiermittel“, sondern der Reihe nach: Pigment und Mahlpaste prüfen, dann die Verträglichkeit von Paste und Basislack, dann das Mischungsverhältnis, dann Applikation und Schichtdicke standardisieren — und erst danach Dosierreihen fahren und jeweils den Rub-out beurteilen. Eine höhere Viskosität bremst die Pigmentwanderung zwar ebenfalls, löst aber kein Verträglichkeitsproblem und verschlechtert leicht den Verlauf.

**Merksatz**

Ungewollte und kontrollierte Überbrückungsflockulation beruhen auf demselben Mechanismus: Eine Polymerkette bildet eine Brücke zwischen zwei Pigmentteilchen. Der entscheidende Unterschied liegt im Grad der Kontrolle. Bei der ungewollten Variante entsteht die Brücke durch ein falsch gewähltes oder zu gering dosiertes Additiv — bleibt die Pigmentoberfläche unvollständig belegt, kann eine Kette an zwei Teilchen zugleich adsorbieren; die Verknüpfung ist fest und praktisch nicht reversibel, die Flocken grob und der Bodensatz hart. Bei der kontrollierten Variante ist das Additiv genau darauf ausgelegt: Die Brücken sind bewusst schwach und reversibel gehalten — das Netzwerk bricht unter Scherkraft beim Applizieren auf und baut sich danach wieder auf. Derselbe Mechanismus, aber mit dem richtigen Werkzeug und der richtigen Dosierung in eine nützliche Wirkung gelenkt.

**Stichwörter:** Ausschwimmen, Aufschwimmen, Floating, Flooding, Bénard'sche Zellen, Marangoni-Strömung, Konvektionszellen, Rub-out-Test, Entmischung, kontrollierte Flockulation, Coflockulation, Überbrückungsflockulation, Bodensatz, Absetzen, Ablaufneigung, Nebenvalenzbindung, Pigmentbeweglichkeit, Verträglichkeit, Biozidprodukteverordnung, BPR, biologische Wirkung, ΔE

*Quellen: Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur*

## Übungsblatt Ü-54 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Unterscheiden Sie Floating und Flooding und beschreiben Sie, wie man beide erkennt.

**Gemeinsame Ursache:** Verschiedene Pigmente entmischen sich im frisch applizierten, noch fließfähigen Lackfilm, weil sie unterschiedlich beweglich sind — bedingt durch Teilchengröße, Dichte, Oberflächenchemie und Stabilisierungsgrad.

**Floating — Ausschwimmen in der Fläche:** In der Lackoberfläche selbst treten örtliche Konzentrationsunterschiede auf. Erkennbar an Bénard'schen Zellen oder Streifen: Die Oberfläche wirkt fleckig oder streifig und hat keinen einheitlichen Farbton.

**Flooding — Aufschwimmen über die Filmdicke:** In der Oberfläche selbst bestehen keine Unterschiede, wohl aber senkrecht dazu. Der Film zeigt einen einheitlichen Farbton — der Fehler bleibt zunächst unsichtbar.

**Nachweis des Flooding:** Durch den Rub-out-Test: Reibt man eine Stelle des feuchten Films auf und zeigt sich dort ein anderer Farbton, war die Pigmentverteilung gestört — bei einheitlich gefärbter Fläche und mehreren Pigmenten durch Flooding oder durch Flockulation eines Pigments. Eine beschichtete Glasplatte, von beiden Seiten betrachtet, zeigt die Entmischung über die Filmdicke direkt.

*Bewertung: Die gemeinsame Ursache wird vorangestellt, dann sauber getrennt. Der Rub-out-Test wird nicht nur genannt, sondern in seiner Funktion erklärt. Die Bezeichnungen „vertikal“ und „horizontal“ werden weder verlangt noch als Fehler gewertet; sie sind in der Literatur nicht einheitlich belegt.*

**Frage 2** **(Berechnung, 9 Punkte)**

Beim Rub-out-Test einer roten Abmischung aus Weiß- und Rotpigment werden aufgeriebene und unbehandelte Stelle farbmetrisch verglichen: $\Delta L^* = 1{,}5$; $\Delta a^* = 2{,}0$; $\Delta b^* = 2{,}4$. Berechnen Sie $\Delta E^*ab$, beurteilen Sie das Ergebnis und nennen Sie die Gegenmaßnahme.

**Was verglichen wird:** Der Rub-out-Test vergleicht dieselbe Beschichtung an zwei Stellen: einmal im applizierten Zustand, einmal nach dem Aufreiben. Ein Farbunterschied zeigt, dass sich die Pigmente über die Filmdicke getrennt hatten.

**Ansatz:** $\Delta E^*ab = \sqrt{(\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2})}$ — der Gesamtabstand aus Helligkeit (L*), Rot-Grün (a*) und Gelb-Blau (b*) im CIELAB-System (siehe L-163).

**Rechnung:** $\Delta E^*ab = \sqrt{(1{,}5^2 + 2{,}0^2 + 2{,}4^2)} = \sqrt{(2{,}25 + 4{,}00 + 5{,}76)} = \sqrt{12{,}01} = 3{,}47$

**Einordnung:** Etwa ab $\Delta E \approx 1$ erkennt ein geübtes Auge einen Unterschied; 3,5 sieht auch ein ungeübtes Auge. Ein Produkt-Toleranzwert ist hier nicht anzuwenden: Verglichen wird derselbe Lack mit sich selbst — jeder deutliche Wert zeigt eine gestörte Pigmentverteilung an. Weil die Fläche einheitlich gefärbt ist und der Lack zwei Pigmente enthält, spricht der Befund für Flooding oder für Flockulation eines der beiden Pigmente; welche Ursache vorliegt, ist getrennt zu prüfen.

**Tragweite:** Am fertigen Objekt fällt der Fehler nicht als Fleckigkeit auf. Er wirkt sich aber bei Ausbesserungen, Zweischichtaufbauten und Chargenwechseln als Farbtonabweichung aus.

**Maßnahme:** Ein Dispergiermittel zur kontrollierten Coflockulation einsetzen, damit sich die Pigmente nicht mehr getrennt bewegen. Vorher prüfen, ob Pigmentpaste und Basislack überhaupt verträglich sind.

*Bewertung: Der Farbabstand wird berechnet und nicht nur bewertet. Wichtig ist die Einordnung: Beim Rub-out gibt es keine Produkttoleranz, weil dieselbe Beschichtung mit sich selbst verglichen wird.*

**Frage 3** **(Anwendung, 7 Punkte)**

Erläutern Sie den Unterschied zwischen ungewollter und kontrollierter Überbrückungsflockulation und nennen Sie drei Vorteile der kontrollierten Flockulation.

**Gleicher Mechanismus:** Beide beruhen darauf, dass Polymerketten an zwei Pigmentteilchen zugleich binden und diese dadurch zusammenziehen. Der Unterschied liegt nicht im Mechanismus, sondern in Additivwahl, Dosierung und Reversibilität.

**Ungewollte Überbrückungsflockulation:** Sie tritt auf, wenn das Additiv falsch gewählt oder zu gering dosiert ist. Bleibt die Pigmentoberfläche unvollständig belegt, kann eine Polymerkette an zwei Teilchen zugleich adsorbieren; die Verknüpfung ist fest und irreversibel, die Flocken sind grob und der Bodensatz hart.

**Kontrollierte Flockulation:** Sie wird durch spezielle Dispergiermittel gezielt eingestellt und bleibt reversibel. Die Pigmente werden über schwache Nebenvalenzbindungen locker verknüpft.

**Drei Vorteile:** Erstens keine Entmischung der unterschiedlich beweglichen Pigmente, also kein Aus- oder Aufschwimmen und keine Bénard'schen Zellen. Zweitens eine rheologische Wirkung durch Verstärkung des nicht-newtonschen Fließverhaltens, was etwa die Ablaufneigung verringert. Drittens ein geringeres Absetzen mit weichem, leicht aufrührbarem Bodensatz, da kein direkter Pigment-Pigment-Kontakt besteht.

*Bewertung: Der entscheidende Punkt — gleicher Mechanismus, Unterschied in Additivwahl, Dosierung und Reversibilität — steht am Anfang. Die drei Vorteile sind jeweils mit ihrer Wirkung begründet.*

# L-55 · Pigmentierungshöhe und kritische PVK

*Wie viel Pigment ein Film verträgt — und was oberhalb der Grenze passiert*

**Prüfungsteil 1** · A 10 · A 8.4

Unterhalb der kritischen PVK füllt das Bindemittel alle Hohlräume und schließt den Film dicht. Oberhalb bleibt Luft im Film — die Eigenschaften verändern sich grundlegend: Was für Decklacke ein Fehler ist, wird in matten Wandfarben und bestimmten Grundierungstypen gezielt genutzt.

## PVK und P/B als Maß der Pigmentierung

Die Pigmentierungshöhe beschreibt, wie viel Pigment und Füllstoff ein Film im Verhältnis zum Bindemittel enthält. Zwei Maße sind gebräuchlich: das Pigment-Bindemittel-Verhältnis P/B als Massenverhältnis und die Pigmentvolumenkonzentration PVK als Volumenanteil. Für das Filmverhalten ist die PVK aussagekräftiger, weil es auf das Volumen und nicht auf die Masse ankommt.

## P/B und PVK an einem Beispiel

Eine Rezeptur enthält 300 g deckendes Eisenoxidrot ($\rho$ = 5,0 g/cm³) und 200 g Bindemittel-Festkörper ($\rho$ = 1,1 g/cm³). Das P/B-Verhältnis ist schnell gebildet: 300 g / 200 g = 1,50 — auf einen Massenteil Bindemittel kommen anderthalb Massenteile Pigment. Für die PVK werden zuerst die Volumina gerechnet: V(Pigment) = 300 / 5,0 = 60,0 cm³ und V(Bindemittel) = 200 / 1,1 = 181,8 cm³. Damit ist PVK = 60,0 / (60,0 + 181,8) · 100 % = 24,8 %. Daran sieht man, warum die Masse allein in die Irre führt: Obwohl anderthalbmal so viel Pigment wie Bindemittel eingewogen wurde, nimmt es wegen seiner hohen Dichte nur knapp ein Viertel des Filmvolumens ein.

## Formel

```
PVK = V(Pig + Füll) / V(Pig + Füll + Bindemittel-FK) · 100 %

V = Volumen jeder Komponente (Masse durch Dichte)
```

## Die kritische PVK

Die kritische PVK (KPVK) ist diejenige Pigmentierung, bei der das Bindemittel gerade noch ausreicht, um die Hohlräume der dichtest gepackten Pigmentteilchen vollständig zu füllen. Unterhalb der KPVK ist genug Bindemittel da, um einen dichten, geschlossenen Film zu bilden. Das ist die Voraussetzung für Glanz — allein genügt es nicht, denn auch Verlauf, Oberflächenglätte und ein etwaiges Mattierungsmittel entscheiden mit. Oberhalb steigt die Wahrscheinlichkeit luftgefüllter Poren und Leerstellen deutlich; Glanz, Festigkeit und Barrierewirkung nehmen dann ab.

## Was die Packung bestimmt

Wo die KPVK eines Gemischs liegt, hängt davon ab, wie gut sich die Teilchen packen lassen. Gleich große Kugeln lassen viel Hohlraum zwischen sich. Sind kleinere Teilchen dabei, die in die Lücken passen, bleibt weniger Hohlraum — es wird weniger Bindemittel gebraucht, um ihn zu füllen, und die KPVK liegt höher. Auch die Form wirkt mit: Plättchen- und nadelförmige Teilchen packen schlechter als kompakte. Deshalb kombiniert man in Füllern und Grundierungen bewusst Füllstoffe verschiedener Korngrößen. Und deshalb ist eine KPVK, die aus der Ölzahl eines einzelnen Pigments gerechnet wurde, für ein Gemisch immer nur eine Näherung.

## Eigenschaften über die Pigmentierung

- Glanz fällt mit steigender PVK, weil die Oberfläche zunehmend rau wird.
- Die Härte durchläuft mit steigender Pigmentierung ein Optimum in der Nähe der KPVK — solange das Pigment härter ist als das Bindemittel, steigt sie zunächst an und fällt oberhalb der KPVK wieder ab, weil dann luftgefüllte Poren den Film schwächen. Die Tiefung als Maß der Verformbarkeit hat dagegen kein Optimum: Sie fällt schon weit unterhalb der KPVK mit jedem zusätzlichen Feststoffanteil, weil der Elastizitätsmodul steigt und die Bruchdehnung sinkt; oberhalb der KPVK fällt sie steil ab, weil die Poren zusätzlich als Rissauslöser wirken.
- Oberhalb der KPVK wird der Film matt und porös; Sperrwirkung und Nassabriebbeständigkeit fallen, Wasseraufnahme und Schleifbarkeit steigen.

## Überkritisch — mit Absicht

Manchmal fährt man die PVK bewusst über die KPVK. Vor allem matte Innendispersionsfarben (Wandfarben) sind meist überkritisch pigmentiert. Die luftgefüllten Poren im Film erhöhen das Deckvermögen — Trockendeckvermögen durch Lichtstreuung an den zusätzlichen Luft-Grenzflächen —, erzeugen einen tiefmatten Farbton und machen den Film wasserdampfdurchlässig (diffusionsoffen), bei zugleich niedrigen Kosten (weniger Bindemittel, mehr Füllstoff). Der Preis dafür ist geringe Nassabriebbeständigkeit und Kreidungsneigung; deshalb erreichen gerade preiswerte, hoch pigmentierte Wandfarben nach DIN EN 13300 nur die schlechteren Nassabriebklassen, typisch Klasse 3 oder schlechter (Klasse 3 bis 5). Achtung: Die Skala ist invers — Klasse 1 bezeichnet die höchste, Klasse 5 die geringste Beständigkeit. Geprüft wird der Abtrag nach DIN EN ISO 11998. Die Klasse ergibt sich dabei aus Abtrag und Zyklenzahl gemeinsam: Klasse 1 unter 5 µm, Klasse 2 von 5 µm bis unter 20 µm und Klasse 3 von 20 µm bis unter 70 µm, jeweils nach 200 Scheuerzyklen; Klasse 4 unter 70 µm und Klasse 5 ab 70 µm werden schon nach 40 Zyklen bewertet. Die Grenzen sind einseitig offen gesetzt, damit innerhalb derselben Zyklenzahl jeder Messwert genau einer Klasse zufällt — ein Abtragswert ohne Angabe der Zyklenzahl lässt sich nicht einstufen. Der alten Bezeichnung „scheuerbeständig“ entsprechen die Klassen 1 und 2, „waschbeständig“ der Klasse 3.

Füller, Haftgrundierungen und Spachtel werden oft überkritisch pigmentiert — die Mikroporosität verbessert die Haftung der Folgeschicht und erleichtert das Schleifen. Korrosionsschutz-Grundierungen, die über Barrierewirkung schützen sollen, werden dagegen bewusst unterhalb der KPVK formuliert: Dort ist der Film dicht und geschlossen, was den Durchtritt von Wasser, Sauerstoff und Ionen bremst. Eine Ausnahme bilden Zinkstaubfarben — zinkstaubreiche Grundierungen für den kathodischen Korrosionsschutz: Damit die Zinkteilchen den Stahl als Opferanode schützen können, müssen sie einander und den Untergrund elektrisch berühren. Das erfordert einen sehr hohen Zinkanteil (oft über 90 % im Trockenfilm) und entsprechend hohe, kritische bis überkritische Pigmentierung; zu viel Bindemittel würde die Zinkteilchen elektrisch isolieren und den kathodischen Schutz aufheben. Zu Arbeitsschutzaspekten beim Schweißen und thermischen Trennen zinkbeschichteter Teile — insbesondere zum Risiko des Zinkrauches — siehe L-101.

## KPVK aus der Ölzahl abschätzen

Die Ölzahl gibt an, wie viel Öl 100 g Pigment unter genormten Prüfbedingungen aufnehmen, bis eine zusammenhängende Paste entsteht. Sie ist ein empirischer Prüfkennwert für den Bindemittelbedarf — nicht dasselbe wie die BET-Oberfläche, auch wenn beide zusammenhängen. Aus der Ölzahl lässt sich die KPVK näherungsweise berechnen:

KPVK = 100 / (1 + ρP · OZ / (ρL · 100))
ρP = Pigmentdichte (g/cm³) · OZ = Ölzahl (g/100 g)
ρL = Dichte des Referenzöls (Leinöl: 0,93 g/cm³)

Beispiel Eisenoxidrot mit ρP = 5,0 g/cm³ und Ölzahl 24: KPVK = 100 / (1 + 5,0 · 24 / (0,93 · 100)) = 43,7 %. Der Wert ist eine Näherung; er ersetzt keine Messung an der fertigen Rezeptur.

### Hoch-BET-Rohstoffe: nach Wirkung dosieren

Manche Rohstoffe haben eine sehr große spezifische Oberfläche (BET-Oberfläche) — pyrogene Kieselsäure (rund 100–400 m²/g) oder Ruß (Pigmentruße bis rund 600, Leitfähigkeitsruße bis über 1000 m²/g). Ihr reines Teilchenvolumen (Masse durch Dichte) ist klein, ihr Beitrag zur PVK also gering. Trotzdem wirken sie stark: Die riesige Oberfläche bindet viel Bindemittel und bringt eine sehr hohe Ölzahl mit. Deshalb dosiert man diese Stoffe nach Wirkung in Gewichtsprozent — kleine Menge, große Wirkung: Kieselsäure für Thixotropie und Standfestigkeit (Schutz vor Ablaufen), Ruß für Farbtiefe und Deckung —, nicht über eine Ziel-PVK.

Für die KPVK-Abschätzung ist das wichtig: Die KPVK folgt aus der Ölzahl des gesamten Pigment-Füllstoff-Gemischs. Wer die hohe Ölzahl der Hoch-BET-Anteile nicht mitrechnet, erhält eine zu hohe KPVK und plant die Rezeptur „zu dicht“ — im fertigen Film fehlt dann Bindemittel (siehe L-59).

**Merksatz**

Glänzende Decklacke formuliert man deutlich unter der KPVK, damit jedes Pigmentkorn vollständig in Bindemittel eingebettet ist. Matte Füller und Grundierungen legt man nahe an oder über die KPVK — die Porosität liefert dort Mattigkeit, Schleifbarkeit und Haftung für die nächste Lage.

**Stichwörter:** Pigmentierungshöhe, PVK, kritische PVK, KPVK, P/B, Ölzahl, BET-Oberfläche, pyrogene Kieselsäure, Ruß, dichteste Packung, Teilchengrößenverteilung, Glanz, Porosität, Deckvermögen
*Quellen: Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur; DIN EN 13300; DIN EN ISO 11998*

## Übungsblatt Ü-55 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 7 Punkte)**
Was besagt die kritische PVK, und was geschieht unterhalb und oberhalb von ihr?

**Definition:** Die kritische PVK ist die Pigmentierung, bei der das Bindemittel gerade noch ausreicht, um die Hohlräume zwischen den dichtest gepackten Pigmentteilchen vollständig zu füllen.
**Unterhalb:** Es ist genug Bindemittel vorhanden. Der Film ist dicht und geschlossen — die Voraussetzung für Glanz; ob er tatsächlich glänzt, entscheiden zusätzlich Verlauf, Oberflächenglätte und ein etwaiges Mattierungsmittel.
**Oberhalb:** Das Bindemittel reicht nicht mehr aus. Zwischen den Teilchen bleiben mit Luft gefüllte Poren; der Film wird matt und porös.
**Folge:** Mit dem Überschreiten der KPVK fallen Glanz, Sperrwirkung und Nassabriebbeständigkeit, während Wasseraufnahme und Schleifbarkeit steigen.
*Bewertung: Die Antwort trennt sauber zwischen Definition und den beiden Bereichen. Der Bezug auf die Lufteinschlüsse oberhalb der KPVK ist der entscheidende Punkt.*

**Frage 2** **(Berechnung, 12 Punkte)**

Eine Rezeptur enthält 300 g deckendes Eisenoxidrot (ρP = 5,0 g/cm³, Ölzahl 24 g/100 g) und 200 g Bindemittel-Festkörper (ρ = 1,1 g/cm³). a) Berechnen Sie das P/B-Verhältnis. b) Berechnen Sie die PVK. c) Berechnen Sie die kritische PVK aus der Ölzahl (Bezugsöl Leinöl, ρL = 0,93 g/cm³). d) Wie viel Öl nehmen die 300 g Pigment rechnerisch auf? e) Beurteilen Sie die Rezeptur.

**a) P/B:** P/B = m(Pigment) / m(Bindemittel-FK) = 300 g / 200 g = 1,50. Auf einen Massenteil Bindemittel kommen anderthalb Massenteile Pigment.

**b) Volumina:** V = m / ρ. V(Pigment) = 300 / 5,0 = 60,0 cm³; V(Bindemittel) = 200 / 1,1 = 181,8 cm³; Gesamt = 241,8 cm³

**b) PVK:** PVK = 60,0 / 241,8 · 100 % = 24,8 %. Trotz P/B = 1,50 nimmt das Pigment nur knapp ein Viertel des Filmvolumens ein — die hohe Dichte macht den Unterschied.

**c) KPVK:** KPVK = 100 / (1 + ρP · OZ / (ρL · 100)). ρP · OZ = 5,0 · 24 = 120; ρL · 100 = 93; 120 / 93 = 1,290. KPVK = 100 / 2,290 = 43,7 %

**d) Ölbedarf:** m(Öl) = 300 g · 24 / 100 = 72 g. So viel Öl bräuchten die 300 g Pigment allein zur Benetzung — ein Anhalt dafür, wie viel Bindemittel die Rezeptur mindestens binden muss.

**e) Beurteilung:** Mit 24,8 % liegt die PVK deutlich unter der KPVK von 43,7 %. Der Film ist damit gut mit Bindemittel gefüllt — die Rezeptur passt zu einem glänzenden Decklack, nicht zu einem matten Füller.

**Hinweis:** Die KPVK aus der Ölzahl gilt für dieses eine Pigment. Kämen Füllstoffe oder ein Hoch-BET-Rohstoff dazu, müsste die Ölzahl des gesamten Gemischs zugrunde gelegt werden.

*Bewertung: Alle Teile hängen an einer Rezeptur und stützen sich gegenseitig: P/B zeigt die Masse, die PVK das Volumen, die KPVK die Grenze — und Teil e) verbindet die drei Zahlen zu einer Aussage über den Lacktyp. Der Nenner der KPVK wird schrittweise aufgebaut, das sichert Teilpunkte.*

**Frage 3** **(Anwendung, 8 Punkte)**

Für ein Pigment mit einer KPVK von rund 44 % (Beispielannahme; die KPVK ist systemspezifisch) sollen einmal ein glänzender Decklack und einmal ein matter Füller formuliert werden. Wo legen Sie jeweils die PVK, und warum?

**Glänzender Decklack:** Deutlich unter der KPVK, etwa im Bereich 10 bis 20 %. So ist jedes Pigmentkorn vollständig in Bindemittel eingebettet und die Oberfläche bleibt glatt.

**Begründung Glanz:** Eine glatte, geschlossene Oberfläche reflektiert gerichtet — das ergibt den Glanz. Poren würden das Licht streuen und den Glanz mindern.

**Matter Füller:** Nahe an oder knapp über der KPVK. Die dann entstehenden Poren machen die Oberfläche matt und zugleich gut schleifbar.

**Begründung Matt:** Oberhalb der KPVK streuen die Lufteinschlüsse das Licht diffus. Die Porosität liefert außerdem Saugfähigkeit und Haftung für die nächste Lage.

*Bewertung: Beide Fälle werden mit einer konkreten Lage der PVK relativ zur KPVK beantwortet und jeweils optisch begründet. Genau diese Verknüpfung von Kennzahl und Eigenschaft wird erwartet.*

# L-56 · Vom Kalkulations- zum Fertigungsrezept

*Wie eine Lackrezeptur entsteht und dokumentiert wird*

**Prüfungsteil 1** · A 9 · A 10

Das Kalkulationsrezept dokumentiert die vollständige Rohstoffzusammensetzung einer Beschichtung auf 100 Gewichtsteile. Das Fertigungsrezept überführt diese Zusammensetzung in eine verbindliche, chargenbezogene Herstellungsanweisung — es legt fest, in welcher Reihenfolge und unter welchen Bedingungen die Rohstoffe zusammengeführt werden.

## Anforderungsgerecht formulieren

Jede zu entwickelnde Beschichtungszusammensetzung muss anforderungsgerecht sein, sich also an den Forderungen des Kunden orientieren — an den Eigenschaften der Beschichtung, am Substrat, an der Applikationsart — und ebenso an den Anforderungen der Umwelt. Die eigentliche Arbeit besteht darin, aus der Vielzahl angebotener Lackrohstoffe die geeignetsten auszuwählen.

Wie stark der Einsatzfall die Rezeptur bestimmt, zeigt schon die Applikationsart: Ein Lack für Airless-Spritzen wird unverdünnt und hochviskos durch die Düse gedrückt, ein Lack für die Druckluftpistole muss deutlich dünner eingestellt sein, ein Tauchlack muss über Stunden im offenen Becken stabil bleiben und darf beim Abtropfen keine Nasen ziehen. Dieselbe stoffliche Zusammensetzung taugt deshalb nicht für jedes Verfahren.

## Der Lackentwicklungszyklus

- Problem- beziehungsweise Aufgabenstellung
- gedankliche Arbeit — daraus entsteht das Lackrezept
- Herstellung im Labor — daraus entsteht das Lackmuster
- Applikation auf das Substrat, Trocknung beziehungsweise Härtung, Prüfung der Beschichtung
- Vergleich der Prüfergebnisse mit den Anforderungen

Da die Ergebnisse meist noch nicht ganz übereinstimmen, folgen Optimierungsschritte am Rezept. Der Zyklus wird vielfach durchlaufen, wobei die Schritte von Durchgang zu Durchgang kleiner werden. Eingang ist die Problemstellung, Ausgang das fertige Lackrezept.

## Kalkulationsrezept

Das Kalkulationsrezept enthält alle Angaben über die stoffliche Zusammensetzung eines Lacks. Es wird auf 100 Gewichtsteile formuliert. Die Rohstoffe werden üblicherweise in dieser Reihenfolge angegeben: Bindemittel, Pigmente und Füllstoffe, Additive, Lösemittel.

## Fertigungsrezept

Das Fertigungsrezept wird für die jeweils herzustellende Menge formuliert und enthält zusätzlich Angaben zum Herstellungsverfahren. Hier stehen die Rohstoffe in der Reihenfolge ihrer Zugabe — nicht mehr nach Stoffgruppen sortiert.

In der betrieblichen Praxis schließen sich an das Rezept meist noch Angaben über die Eigenschaften von Lack und Beschichtung an, über die zugehörigen Prüfmethoden und über die zulässigen Toleranzen.

## Was im Fertigungsrezept sonst noch steht

Über die Einwaagen hinaus gehören in die Herstellungsanweisung typischerweise:

- die Ansatzmenge und die Chargenbezeichnung
- die Zugabereihenfolge und, wo es darauf ankommt, die Zugabegeschwindigkeit
- Rühr- und Dissolverbedingungen sowie die Dispergierzeit
- die Temperatur, soweit sie geführt oder begrenzt werden muss
- Mahlschritt, Auflacken, Einstellen von Viskosität und Farbton
- Filtration und Abfüllung
- Prüfwerte mit Sollwert, Toleranz und Messbedingung

Welche dieser Angaben tatsächlich nötig sind, hängt vom Produkt und von der Anlage ab. Wie die Schritte im Betrieb ablaufen, steht in L-60.

## Warum die Zugabereihenfolge zählt

Dieselben Rohstoffe in derselben Menge, aber in anderer Reihenfolge zusammengeführt, ergeben nicht zwangsläufig denselben Lack. Die Reihenfolge entscheidet darüber, was sich zuerst an welche Oberfläche setzt.

Drei Beispiele: Das Netz- und Dispergiermittel gehört ins Mahlmedium, bevor das Pigment kommt — nur dann steht es zur Verfügung, während die frischen Teilchenoberflächen entstehen (siehe L-53, L-60). Pigment, das erst in den fertigen Lack gerührt wird, dispergiert nicht mehr: Die Mahlpaste ist zu dünn, die Scherkräfte kommen nicht an (siehe L-53). Und ein Verdicker zu früh im Ansatz treibt die Viskosität hoch, bevor überhaupt dispergiert wurde.

Die Kette lautet also: andere Zugabe → andere Benetzung und Dispergierung → anderer Prozesszustand → womöglich andere Lackeigenschaften. Deshalb ist die Reihenfolge Bestandteil des Rezepts und keine Sache des Tagesablaufs.

## Gewichtsteil ist nicht automatisch Prozent

Ein Gewichtsteil entspricht nur dann einem Massenprozent, wenn die Rezeptur wirklich auf 100 Teile summiert. Fehlt eine Zeile oder wurde gerundet, stimmt die Gleichsetzung nicht mehr.

Zahlenbeispiel: Ein Rezept ergibt 45 + 18 + 6 + 2 + 28 = 99,0 Teile. Rechnet man die Anteile unverändert auf 400 kg um, kommen 99 · 400 / 100 = 396 kg heraus — 4 kg fehlen. Der Fehler gehört vor der Fertigung geklärt und nicht stillschweigend weggerechnet: Entweder fehlt ein Rohstoff, oder die Rezeptur muss auf 100 Teile normiert werden.

Zweite Stolperstelle sind kleine Additivmengen. 0,2 Teile in einem 5-kg-Laboransatz sind 10 g — bei 0,02 Teilen ist man bei 1 g. Dann entscheiden Waagenauflösung und Ablesegenauigkeit mit. Abhilfe: Stammlösung ansetzen und vorverdünnt dosieren, oder den Ansatz größer wählen. Das ändert die Rezepturchemie nicht, sondern nur die Art, wie sicher man sie trifft.

## Der Unterschied auf einen Blick

| | Kalkulationsrezept | Fertigungsrezept |
|---|---|---|
| Bezugsmenge | 100 Gewichtsteile | die tatsächliche Menge |
| Reihenfolge | nach Stoffgruppen | nach Zugabe |
| Zusatzangaben | keine | Herstellungsverfahren |
| Zweck | Zusammensetzung, Kalkulation | Anweisung für die Herstellung |

## Vom Laboransatz zum Produktionsansatz

Ein Fertigungsrezept ist keine vergrößerte Laborrezeptur: Die Rohstoffmengen lassen sich durch Dreisatz hochrechnen, die Prozessbedingungen hingegen nicht — sie müssen eigens auf den größeren Maßstab abgestimmt werden.

Beispiel Dissolver: Beim Scale-up ist die Umfangsgeschwindigkeit der Dissolverscheibe die maßgebliche Übertragungsgröße, nicht die Drehzahl. Es gilt $u = \pi \cdot d \cdot n$: Eine doppelt so große Scheibe erreicht bei identischer Drehzahl die doppelte Umfangsgeschwindigkeit und damit einen vollständig anderen Schereintrag. Wer die Laborumdrehungszahl unverändert in die Produktion übernimmt, dispergiert unter anderen Bedingungen, als das Labor vorgegeben hat (Kennwerte in L-53).

Ein weiterer Skalierungseffekt betrifft die Wärme: Mit wachsendem Ansatz sinkt das Oberflächen-Volumen-Verhältnis — bei einem Würfel gilt $A/V = 6/a$ (siehe L-44). Der große Ansatz gibt die beim Dispergieren entstehende Wärme deutlich schlechter ab und erwärmt sich stärker als der Laboransatz.

Die Konsequenz: Nicht die Prozesszeit entscheidet, wann ein Schritt abgeschlossen ist, sondern das analytisch ermittelte Ergebnis — Grindometerwert und Viskosität. Zehn Minuten im Labor sind keine zehn Minuten in der Produktion.

## Sollwert, Toleranz — und die Messbedingung

Zu einem Produkt gehören Sollwerte mit Toleranzen, damit sich Charge mit Charge vergleichen lässt — typischerweise für Viskosität, Dichte, Farbton, Glanz und Feinheit.

Beispiel: Sollviskosität 2,00 Pa·s, zulässig ± 0,10 Pa·s. Damit liegt das Toleranzband zwischen 1,90 und 2,10 Pa·s. Ein Messwert von 2,06 Pa·s ist in Ordnung, 2,15 Pa·s nicht.

Wichtig ist der Zusatz, der oft vergessen wird: Ohne Messbedingung ist die Zahl wenig wert. Zur Viskosität gehören Temperatur und Messverfahren beziehungsweise Schergefälle, weil Lacke in aller Regel nicht newtonsch sind (siehe L-178, L-142). Zwei Labore, die dieselbe Charge bei verschiedener Temperatur oder mit verschiedener Scherung messen, kommen sonst zu verschiedenen Urteilen über dieselbe gute Ware.

**Merksatz**

Die Umrechnung vom Kalkulations- auf das Fertigungsrezept ist reine Dreisatzarbeit: Jeder Anteil wird mit der Zielmenge multipliziert und durch 100 geteilt. Fehler entstehen fast immer dort, wo die Summe der Anteile nicht exakt 100 ergibt — deshalb gehört die Kontrollsumme zu jeder Rezeptur.

**Stichwörter:** Lackrezept, Kalkulationsrezept, Fertigungsrezept, Rezeptur, Lackentwicklungszyklus, Anforderungsprofil, Lackmuster, Optimierung, Toleranz, Prüfmethode, Gewichtsteile, Kontrollsumme, Zugabereihenfolge, Ansatzmenge, Scale-up, Umfangsgeschwindigkeit, Messbedingung, Charge
*Quellen: Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur*

## Übungsblatt Ü-56 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 9 Punkte)**

(a) Unterscheiden Sie Kalkulationsrezept und Fertigungsrezept. (b) Im Fertigungsrezept stehen die Rohstoffe in der Reihenfolge ihrer Zugabe. Begründen Sie, warum diese Reihenfolge festgeschrieben wird.

**Kalkulationsrezept:** Es enthält alle Angaben über die stoffliche Zusammensetzung eines Lacks und wird auf 100 Gewichtsteile formuliert. Die Rohstoffe stehen nach Stoffgruppen geordnet: Bindemittel, Pigmente und Füllstoffe, Additive, Lösemittel.

**Fertigungsrezept:** Es wird für die jeweils herzustellende Menge formuliert und enthält zusätzlich Angaben zum Herstellungsverfahren. Die Rohstoffe stehen in der Reihenfolge ihrer Zugabe.

**Zweck:** Das Kalkulationsrezept dient der Darstellung der Zusammensetzung und der Kostenrechnung, das Fertigungsrezept ist die Arbeitsanweisung für die Herstellung.

**Ergänzende Angaben:** In der betrieblichen Praxis schließen sich an das Rezept meist Angaben über die Eigenschaften von Lack und Beschichtung an, über die zugehörigen Prüfmethoden und über zulässige Toleranzen.

**(b) Grund:** Die Reihenfolge entscheidet, was sich zuerst an welche Oberfläche setzt, und beeinflusst damit Benetzung, Dispergierung, Schaumbildung und Viskosität. Gleiche Mengen in anderer Reihenfolge können zu einem anderen Prozesszustand und damit zu anderen Lackeigenschaften führen.

**(b) Beispiel:** Das Netz- und Dispergiermittel muss im Mahlmedium sein, bevor das Pigment zugegeben wird — nur dann steht es zur Verfügung, während die frischen Teilchenoberflächen entstehen. Pigment, das erst in den fertigen Lack gerührt wird, dispergiert nicht mehr, weil die Scherkräfte in der zu dünnen Flüssigkeit nicht ankommen.

*Bewertung: Teil (a): Bezugsmenge, Reihenfolge und Zweck werden für beide Rezeptarten getrennt angegeben — das sind genau die drei Unterscheidungsmerkmale. Teil (b): Die Reihenfolge wird als Prozessgröße erkannt und nicht als organisatorische Frage; ein konkretes Beispiel stützt die Begründung.*

**Frage 2** **(Berechnung, 12 Punkte)**

(a) Ein Kalkulationsrezept lautet: Bindemittel 45,0 / Titandioxid 18,0 / Füllstoff 6,0 / Additive 2,0 / Lösemittel 29,0 Gewichtsteile. Erstellen Sie das Fertigungsrezept für einen Ansatz von 400 kg. (b) In einer zweiten Rezeptur steht statt 29,0 nur 28,0 Teile Lösemittel. Welche Ansatzmenge käme heraus, wenn Sie die Anteile unverändert umrechnen, und wie gehen Sie damit um?

**Kontrollsumme prüfen:** 45,0 + 18,0 + 6,0 + 2,0 + 29,0 = 100,0 Teile — die Rezeptur ist vollständig.

**Ansatz:** Einwaage = Anteil · Zielmenge / 100

**Bindemittel:** 45,0 · 400 kg / 100 = 180,0 kg

**Titandioxid:** 18,0 · 400 kg / 100 = 72,0 kg

**Füllstoff:** 6,0 · 400 kg / 100 = 24,0 kg

**Additive:** 2,0 · 400 kg / 100 = 8,0 kg

**Lösemittel:** 29,0 · 400 kg / 100 = 116,0 kg

**Probe:** 180,0 + 72,0 + 24,0 + 8,0 + 116,0 = 400,0 kg — entspricht der Zielmenge.

**(b) Kontrollsumme:** 45,0 + 18,0 + 6,0 + 2,0 + 28,0 = 99,0 Teile — die Rezeptur summiert nicht auf 100.

**(b) Rechnung:** 99,0 · 400 kg / 100 = 396,0 kg. Es fehlen 4 kg auf die Zielmenge.

**(b) Vorgehen:** Nicht stillschweigend weiterrechnen. Entweder fehlt eine Rezepturzeile — dann ist die Rezeptur zu klären —, oder die Anteile werden auf 100 Teile normiert. Erst danach wird umgerechnet.

**(b) Hinweis:** Nur bei einer Summe von 100 Teilen entspricht ein Gewichtsteil einem Massenprozent.

*Bewertung: Die Kontrollsumme steht am Anfang und die Probe am Ende. Beides kostet wenig Zeit und schützt vor dem häufigsten Fehler bei Rezepturaufgaben. In Teil (b) zählt nicht nur die Zahl 396 kg, sondern die Entscheidung, den Fehler vor der Fertigung zu klären statt ihn wegzurechnen.*

**Frage 3** **(Anwendung, 9 Punkte)**

(a) Beschreiben Sie den Lackentwicklungszyklus und erläutern Sie, warum er mehrfach durchlaufen wird. (b) Ein im Labor abgesicherter Ansatz soll auf die Produktionsanlage übertragen werden. Warum lassen sich Drehzahl und Dispergierzeit nicht einfach übernehmen?

**Ablauf:** Am Anfang steht die Problem- beziehungsweise Aufgabenstellung. Daraus ergibt sich durch gedankliche Arbeit ein Lackrezept. Dieses wird im Labor hergestellt und führt zu einem Lackmuster. Das Muster wird auf das jeweilige Substrat appliziert, getrocknet oder gehärtet, und die erhaltene Beschichtung wird geprüft.

**Rückkopplung:** Die Prüfergebnisse werden mit den Anforderungen aus der Problemstellung verglichen. Sie stimmen in der Regel zunächst nicht vollständig überein.

**Warum mehrfach:** Deshalb folgen Optimierungsschritte am Lackrezept, und der Zyklus wird erneut durchlaufen — meist viele Male. Die Optimierungsschritte werden dabei von Durchgang zu Durchgang kleiner.

**Ein- und Ausgang:** Eingang in den Zyklus ist die Problemstellung, Ausgang das fertige Lackrezept.

**(b) Drehzahl:** Übertragbar ist die Umfangsgeschwindigkeit der Dissolverscheibe, nicht die Drehzahl: Wegen $u = \pi \cdot d \cdot n$ erreicht eine größere Scheibe bei gleicher Drehzahl eine höhere Umfangsgeschwindigkeit — der Energieeintrag wäre ein ganz anderer.

**(b) Wärme:** Mit wachsender Ansatzgröße sinkt die Oberfläche je Volumen; der große Ansatz gibt die Dispergierwärme schlechter ab und wird wärmer als der Laboransatz.

**(b) Zeit:** Deshalb ist die Dispergierzeit kein übertragbarer Wert. Wann fertig ist, entscheidet das Ergebnis — Grindometerwert und Viskosität —, nicht die Uhr.

*Bewertung: Teil (a): Der Zyklus wird vollständig und in der richtigen Reihenfolge wiedergegeben, und die Frage nach dem Warum wird mit der schrittweisen Annäherung beantwortet. Teil (b): Erkannt werden muss, dass sich Einwaagen hochrechnen lassen, Prozessbedingungen aber nicht — und dass das Prüfergebnis den Endpunkt bestimmt.*

# L-57 · Eine Rezeptur entwickeln — Beispiel Korrosionsschutz-Grundierung

*Vom Anwendungsfall zu Bindemittel, Pigmenten, Additiven und Proportionen*

**Prüfungsteil 1** · A 9 · A 10

Die Lackformulierung folgt einem systematischen Vorgehen: Aus dem definierten Anwendungsfall werden Anforderungen abgeleitet, die Rohstoffauswahl und Proportionierung strukturiert steuern — einschließlich etwaiger Kundenvorgaben und normativer Einschränkungen, die den Spielraum von Anfang an begrenzen. Die Mengenverhältnisse folgen aus PVK, Stöchiometrie und Laborprüfung. Demonstriert am Beispiel einer 2K-Epoxid-Grundierung für Stahl-Brückensegmente.

## Der Anwendungsfall

Wir formulieren die Erstbeschichtung von Stahl-Brückensegmenten, im Werk auf gestrahlten Stahl (Reinheitsgrad Sa 2½) aufgebracht. Die Beanspruchung ist hoch: dauerhaft im Freien, hohe Korrosivität (Kategorie C4 bis C5 nach DIN EN ISO 12944, siehe L-99), gefordert ist eine lange Schutzdauer. Die Grundierung ist die erste Lage: Sie muss auf dem Stahl haften, aktiv vor Korrosion schützen und die Basis für Zwischen- und Deckbeschichtung bilden. Appliziert wird meist im Airless-Spritzverfahren.

Praxishinweis — Kundenvorgaben und Lieferspezifikationen: In vielen industriellen Anwendungen ist der Ausgangspunkt keine leere Anforderungsliste, sondern ein Pflichtenheft oder eine verbindliche Technische Lieferbedingung des Auftraggebers. Für Ingenieurbauwerke im Bundesfernstraßenbau schreibt die ZTV-ING Teil 4 Abschnitt 3 „Korrosionsschutz von Stahlbauten“ zusammen mit den TL/TP-KOR-Stahlbauten zugelassene Beschichtungssysteme und Prüfverfahren vor; das frühere ZTV-KOR-Stahlbauten ist darin aufgegangen. Die Deutsche Bahn regelt Beschichtungsstoffe über DB-Standards mit Bahnfreigabe durch die DB Systemtechnik — für den Korrosionsschutz ihrer Stahlbrücken über die Richtlinie 804 und, für die Schottertrog- und Deckbrückenbeschichtung, über den DBS 918 084 (früher „Blatt 84“ der TL/TP-KOR-Stahlbauten); die Beschichtungsstoffe für Schienenfahrzeuge regelt der DBS 918 300. Beide sind Beschichtungsstoff-Standards, kein allgemeines Regelwerk für den gesamten Stahlbau der DB. Solche Spezifikationen bestimmen von vornherein, welche Rohstoffklassen, Prüfnormen und Qualifikationsnachweise gefordert sind — der Formulierungsspielraum ist damit bereits zu Beginn erheblich eingeschränkt, und die Systemzulassung durch Baumusterprüfung ist in der Regel Voraussetzung für den Einsatz.

## Schritt 1: Anforderungen ableiten

Aus dem Fall ergibt sich eine konkrete Anforderungsliste: sehr gute Haftung auf gestrahltem Stahl; aktiver und Barriere-Korrosionsschutz; Wasser- und Chemikalienbeständigkeit; ausreichende, standfeste Schichtdicke; Verträglichkeit mit den Folgeschichten; Verarbeitbarkeit per Airless. Diese Liste steuert jede weitere Entscheidung — man formuliert gegen Anforderungen, nicht gegen den Katalog.

## Schritt 2: Das Bindemittel

Für schweren Korrosionsschutz auf Stahl ist 2K-Epoxid die erste Wahl (siehe L-28, L-29): exzellente Haftung, dichte Barriere, wasser- und chemikalienbeständig. Ein Alkyd ist für diese hoch beanspruchte Anwendung meist weniger geeignet — Alkydharze können unter dauerhafter Feuchtebelastung hydrolytisch verseifen, wie beständig sie tatsächlich sind, hängt aber von Alkydtyp, Vernetzung und Einsatzbedingungen ab (siehe L-16); auch ein 1K-System ist hier meist ungeeignet, da es die für diese Schutzdauer geforderte Vernetzungsdichte und Beständigkeit in der Regel nicht erreicht. Als Härter passt ein Polyaminoamid: gute Haftung und feuchtigkeitstolerant.

### Schritt 3: Pigmente und Füllstoffe

Hier greifen die Rollen ineinander. Aktiven Korrosionsschutz liefert Zinkphosphat (passiviert, vergleichsweise umweltverträglich, siehe L-41) — für stärkeren Schutz kombiniert mit Zinkoxid (puffert Säuren und kann in fettsäurehaltigen Systemen Zinkseifen bilden) und einem organischen Inhibitor (Synergie), denn Zinkphosphat allein wirkt nur mäßig. Farbe und Deckung bringt Eisenoxidrot, die klassische, günstige und lichtechte Grundierungsfarbe. Die Barriere kommt aus dem dichten Bindemittelfilm und aus lamellaren Füllstoffen: Talkum (plättchenförmig, verlängert den Diffusionsweg) und Baryt (Dichte, Chemikalienbeständigkeit); sie stellen zugleich Volumen, Standfestigkeit und Schleifbarkeit ein. Das klassische Barriere-Pigment Eisenglimmer (MIO) bleibt hier außen vor — seine eigentliche Heimat ist die Zwischenbeschichtung (siehe L-41).

### Schritt 4: Additive

Additive lösen gezielt einzelne Probleme: Netz- und Dispergiermittel bringen Pigmente und Füllstoffe sauber in die Dispersion (siehe L-52); ein Rheologieadditiv (organophiles Bentonit oder pyrogene Kieselsäure) gibt Ablauf- und Absetzschutz bei dicker Schicht (siehe L-49, L-46); ein Entschäumer verhindert Blasen beim Dispergieren und Spritzen (siehe L-47). Lichtschutzmittel braucht die Grundierung kaum — sie liegt geschützt unter der Deckschicht.

### Schritt 5: Die Proportionen

Die Mengenverhältnisse folgen systematisch aus den technischen Anforderungen. Die Pigmentvolumenkonzentration (PVK) wird gezielt unterhalb der kritischen PVK eingestellt (siehe L-55): Ein dichter, bindemittelreicher Film ohne Luftporen ist die Voraussetzung für wirksamen Barriere-Korrosionsschutz — das Gegenteil der überkritisch pigmentierten, matten Wandfarbe. Das aktive Korrosionsschutzpigment wird in wirksamer Menge dosiert, ohne die Filmintegrität zu beeinträchtigen. Der Härter wird stöchiometrisch berechnet: Grundlage sind die Epoxid- und Amin-Äquivalente, nicht die Grammzahlen — es werden die Molmengen der reaktiven Gruppen aufeinander abgestimmt (Epoxidgruppen gegen aktive N-H-Gruppen, siehe L-28, L-29). Das Lösemittel stellt die für das Airless-Spritzverfahren erforderliche Applikationsviskosität ein (Auslaufbecher, siehe L-178). Die finalen Zahlenwerte werden im Laborversuch unter kontrollierten Bedingungen ermittelt und geprüft.

### Beispielhafte Zusammensetzung (Orientierung)

Keine geprüfte oder herstellergebundene Rezeptur, sondern typische Größenordnungen zum Verständnis der Proportionen (Massenanteile am Gesamtsystem aus Stammlack und Härter): Epoxidharz rund 30 bis 38 %, Polyaminoamid-Härter 8 bis 12 % (stöchiometrisch nach Äquivalent), Zinkphosphat 8 bis 12 %, Zinkoxid 2 bis 4 % (Synergie), Eisenoxidrot 3 bis 5 %, Talkum und Baryt zusammen 14 bis 24 %, Lösemittel 12 bis 20 %, Additive 1 bis 3 % (ein organischer Korrosionsinhibitor steigert die Schutzwirkung zusätzlich). So liegt die PVK unter der KPVK (siehe L-55). Die genauen Werte werden im Labor über Prüfung eingestellt; belastbare Richtrezepturen veröffentlichen die Rohstoff-Hersteller (Bindemittel-, Pigment- und Additivlieferanten).

### Schritt 6: Prüfen und absichern

Vom Kalkulationsrezept über das Labormuster zur Prüfung (siehe L-56): Haftung (Gitterschnitt, Abreißversuch), Salzsprühnebel (DIN EN ISO 9227), Schichtdicke — und das Ganze im kompletten System nach DIN EN ISO 12944-6 qualifiziert. Erst dann wird aus dem Labormuster ein Fertigungsrezept. Sicherheit: Der Aminhärter ist sensibilisierend (siehe L-29), dazu Lösemittel und Strahlstaub — Schutzausrüstung und Absaugung sind Pflicht.

**Merksatz**

Formulieren heißt: Anwendungsfall (einschließlich etwaiger Kundenvorgaben und Zulassungsanforderungen) → Anforderungsliste → Bindemittel (hier 2K-Epoxid) → Pigmente und Füllstoffe in ihren Rollen (Zinkphosphat plus Zinkoxid für den aktiven Schutz, Eisenoxidrot für Deckung und Farbe, Talkum und Baryt für Barriere und Standfestigkeit) → Additive → Proportionierung (PVK unterhalb der KPVK, Härter stöchiometrisch berechnet) → Labormuster und Qualifizierungsprüfung. Die Mengenwerte entstehen am Ende dieses Prozesses — durch systematische Berechnung und Laborprüfung.

**Stichwörter:** Rezepturentwicklung, Anforderungsprofil, 2K-Epoxid, Zinkphosphat, Eisenglimmer, Eisenoxidrot, PVK, KPVK, Stöchiometrie, Brückenbeschichtung, DIN EN ISO 12944, Kalkulationsrezept
*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur; DIN EN ISO 12944; DIN EN ISO 9227*

## Übungsblatt Ü-57 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 6 Punkte)**
Warum legt man die PVK einer Korrosionsschutz-Grundierung unter die KPVK?

**Dichter Film:** Unter der KPVK ist genug Bindemittel vorhanden, um alle Teilchen zu umhüllen — der Film ist dicht und bindemittelreich, ohne Lufteinschlüsse.
**Barriere:** Nur ein dichter Film wirkt als Barriere gegen Wasser und Ionen; Lufteinschlüsse oberhalb der KPVK würden die Korrosion begünstigen.
**Gegenteil:** Das ist das Gegenteil der bewusst überkritischen, matten Wandfarbe (siehe L-55).
*Bewertung: Der Zusammenhang dichter/bindemittelreicher Film unter KPVK und Barrierewirkung wird korrekt erklärt.*

**Frage 2** **(Anwendung, 8 Punkte)**
Für die Erstbeschichtung von Stahl-Brückensegmenten (Kategorie C5, lange Schutzdauer) sollen Sie das Bindemittel wählen. Wofür entscheiden Sie sich und warum nicht für ein Alkyd oder ein 1K-System?

**Wahl:** 2K-Epoxid — exzellente Haftung auf gestrahltem Stahl, dichte Barriere, wasser- und chemikalienbeständig (siehe L-28/L-29).
**Kein Alkyd:** Alkydharze können unter dauerhafter Feuchtebelastung hydrolytisch verseifen; die für C5 und lange Schutzdauer geforderte Wasser- und Chemikalienbeständigkeit erreichen sie meist nicht (siehe L-16).
**Kein 1K:** Ein 1K-System erreicht die für C5 und lange Schutzdauer nötige Vernetzungsdichte in der Regel nicht.
**Härter:** Ein Polyaminoamid ist gut haftend und feuchtigkeitstolerant.
*Bewertung: 2K-Epoxid mit Begründung sowie der Ausschluss von Alkyd (Verseifung) und 1K (Vernetzungsdichte) werden genannt.*

**Frage 3** **(Anwendung, 8 Punkte)**
Welche drei Rollen erfüllen Pigmente und Füllstoffe in dieser Grundierung, und nennen Sie je ein Beispiel?

**Aktiver Schutz:** Zinkphosphat, für stärkeren Schutz mit Zinkoxid und organischem Inhibitor kombiniert — passiviert die Stahloberfläche, chromatfrei und deutlich weniger problematisch als Blei-/Chromatpigmente (nicht pauschal ungiftig — siehe L-41).
**Farbe/Deckung:** Eisenoxidrot — deckend, lichtecht, günstig.
**Barriere und Füllung:** Der dichte Bindemittelfilm mit lamellarem Talkum verlängert den Diffusionsweg; Baryt gibt Dichte und Chemikalienbeständigkeit und stellt mit dem Volumen Standfestigkeit und PVK ein.
*Bewertung: Aktiver Schutz, Farbe/Deckung und Barriere/Füllung werden mit passenden Beispielen zugeordnet.*

# L-58 · Rechenbeispiel: Härtermenge im 2K-PUR-Lack

*Schritt für Schritt von der OH-Zahl zur Härtereinwaage*

**Prüfungsteil 1** · A 7.2 · A 10

Die Härtermenge eines 2K-PUR-Lacks folgt in drei Schritten aus OH-Zahl, NCO-Gehalt und Kennzahl — hier vollständig vorgerechnet.

## Die Aufgabe

Ein hydroxylhaltiges Bindemittel mit der OH-Zahl 112 mg KOH/g liegt mit 500 g Festkörper vor und soll mit einem Polyisocyanat (NCO-Gehalt 22 %) bei der Kennzahl 1,0 vernetzt werden. Gesucht ist die nötige Härtereinwaage. Genau dieses Schema trägt jede 2K-PUR-Berechnung (siehe L-27) — wir gehen es Schritt für Schritt durch.

## Schritt 1 — OH-Äquivalente

```
n(OH) = m · OH-Zahl / 56100 = 500 · 112 / 56100 = 0,9982 mol   (m = Einwaage in g; 56100 =
   Masse KOH in mg je mol)
```

## Schritt 2 — NCO-Äquivalentmasse

```
NCO-Äquivalentmasse = M(NCO) / (NCO-Gehalt/100) = 42,02 / 0,22 = 191,0 g/Äq.   (M(NCO) =
   42,02 g/mol)
```

## Schritt 3 — Härtermenge und Ansatz

```
m(Härter) = n(OH) · NCO-Äquivalentmasse · Kennzahl = 0,9982 · 191,0 · 1,0 = 190,7 g
   →   Gesamtansatz = 500 + 190,7 = 690,7 g   (Kennzahl = NCO:OH-Verhältnis)
```

## Kennzahl und häufige Fehler

Die Kennzahl ist das Verhältnis von NCO- zu OH-Gruppen. Bei 1,0 stehen genau gleich viele Isocyanat- wie Hydroxylgruppen zur Verfügung. Wird zu wenig Härter zugegeben (Kennzahl deutlich unter 1,0), bleiben OH-Gruppen unvernetzt: Die Netzwerkdichte sinkt, der Film bleibt weicher und klebriger, Chemikalien-, Lösemittel- und Kratzbeständigkeit fallen ab. In der Praxis wählt man oft 1,03 bis 1,05, um Nebenreaktionen des Isocyanats — vor allem mit Luftfeuchte — auszugleichen. Die Härtermenge ist der Kennzahl direkt proportional: Kennzahl 1,05 statt 1,00 bedeutet genau 5 % mehr Härter, im Beispiel also 200,2 g statt 190,7 g. Der häufigste Fehler ist, die OH-Zahl mit der falschen Bezugsmasse zu rechnen oder die NCO-Äquivalentmasse mit dem NCO-Gehalt selbst zu verwechseln.

**Merksatz**

Immer drei Schritte: OH-Äquivalente = Masse · OH-Zahl / 56100, NCO-Äquivalentmasse = 42,02 / (NCO%/100), dann Härter = OH-Äquivalente · NCO-Äquivalentmasse · Kennzahl.

**Stichwörter:** Rechenbeispiel, 2K-PUR, Härtermenge, OH-Zahl, NCO-Gehalt, Äquivalentmasse, Kennzahl, Stöchiometrie, 56100, Ansatz

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur*

## Übungsblatt Ü-58 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Erklären Sie, warum man die Kennzahl in der Praxis oft leicht über 1,0 wählt.

**Bedeutung:** Die Kennzahl ist das Verhältnis von NCO- zu OH-Gruppen; 1,0 heißt genau stöchiometrisch.

**Warum Überschuss:** Ein Teil des Isocyanats reagiert in Nebenreaktionen, vor allem mit Luftfeuchte, statt mit den OH-Gruppen.

**Folge:** Ein kleiner NCO-Überschuss (Kennzahl 1,03 bis 1,05) sichert die vollständige Vernetzung der OH-Gruppen.

*Bewertung: Die Antwort begründet den Überschuss über die Konkurrenzreaktion des Isocyanats mit Wasser.*

**Frage 2** **(Berechnung, 12 Punkte)**

Ein OH-Bindemittel (OH-Zahl 90 mg KOH/g) wird mit 300 g Festkörper vorgelegt und mit einem Polyisocyanat (NCO-Gehalt 24 %) bei der Kennzahl 1,0 vernetzt. Berechnen Sie die Härtermenge und den Gesamtansatz.

**OH-Äquivalente:** n(OH) = 300 · 90 / 56100 = 0,4813 mol
**NCO-Äquivalentmasse:** 42,02 / 0,24 = 175,1 g/Äq.
**Härtermenge:** m(Härter) = 0,4813 · 175,1 · 1,0 = 84,3 g
**Gesamtansatz:** 300 + 84,3 = 384,3 g

*Bewertung: Der Dreischritt wird sauber durchgezogen; das Ergebnis von rund 84 g Härter passt zur niedrigeren OH-Zahl und dem höheren NCO-Gehalt gegenüber dem Musterbeispiel.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**

Ein 2K-PUR-Ansatz wird versehentlich mit deutlich zu wenig Härter gemischt (Kennzahl etwa 0,8). Welche Folge hat das für den Film?

**Unvollständige Vernetzung:** Es fehlen NCO-Gruppen, viele OH-Gruppen bleiben unvernetzt.
**Filmfolge:** Der Film bleibt weicher und klebriger, die Netzwerkdichte ist zu gering.
**Beständigkeit:** Chemikalien-, Kratz- und Lösemittelbeständigkeit fallen deutlich schlechter aus.

*Bewertung: Die Antwort führt die Unterhärtung auf die fehlenden NCO-Gruppen zurück und leitet die schlechteren Filmeigenschaften korrekt ab.*

# L-59 · Rechenbeispiel: PVK und kritische PVK

*Von den Einwaagen über die Volumina zur PVK — und der Vergleich*

**Prüfungsteil 1** · A 10 · A 8.4

Die PVK folgt aus den Volumina von Pigment und Bindemittel, die kritische PVK aus der Ölzahl — liegt die PVK deutlich darunter, wird der Film tendenziell dicht und beständig.

## Die Aufgabe

Eine Rezeptur enthält 25 g Titandioxid (Dichte 4,1 g/cm³), 15 g Talkum (Dichte 2,8 g/cm³) und 40 g Bindemittel-Festkörper (Dichte 1,1 g/cm³). Gesucht sind die Pigment-Volumen-Konzentration (PVK) und der Vergleich mit der kritischen PVK (siehe L-55). Weil Pigmente und Bindemittel sehr unterschiedliche Dichten haben, wird über Volumina gerechnet, nicht über Massen.

## Schritt 1 — Volumina

```
V = m / ρ   →   TiO2: 25/4,1 = 6,10 cm³;   Talkum: 15/2,8 = 5,36 cm³;   Pigment gesamt =
   11,46 cm³;   Bindemittel: 40/1,1 = 36,36 cm³
```

## Schritt 2 — PVK

```
PVK = V(Pigment + Füllstoff) / (V(Pigment + Füllstoff) + V(Bindemittel-Festkörper)) · 100 %
   = 11,46 / (11,46 + 36,36) · 100 % = 24,0 %
(Die 11,46 cm³ enthalten Titandioxid und Talkum – der Füllstoff zählt mit.)
```

## Schritt 3 — kritische PVK

```
TiO2 (Ölzahl 18, ρP 4,1; Leinöl ρL 0,93):   KPVK = 100 / (1 + ρP · ÖZ / (ρL · 100)) = 100 /
   (1 + 4,1·18/93) = 55,8 %
```

## Der Vergleich

Die Rezeptur-PVK von 24 % liegt deutlich unter der kritischen PVK von rund 56 %. Das Bindemittel füllt also im Modell alle Hohlräume zwischen den Teilchen — der Film ist tendenziell dicht, glänzend und gut beständig; feste Grenzwerte sind das nicht, denn Verlauf, Oberflächenglätte und ein etwaiges Mattierungsmittel entscheiden mit (siehe L-55). Läge die PVK oberhalb der kritischen PVK, bliebe Luft im Film, und Glanz, Beständigkeit und Festigkeit nähmen typischerweise ab. Hinweis: Streng genommen bestimmt man die kritische PVK aus der Ölzahl des gesamten Pigment-Füllstoff-Gemischs; hier wird vereinfachend nur die von Titandioxid benutzt. Das Talkum würde die kritische PVK etwas senken — am klaren Abstand zur PVK ändert das nichts. Genau darum plant man Rezepturen mit bewusstem Abstand zur kritischen PVK.

**Merksatz**

PVK aus den Volumina (Masse durch Dichte), kritische PVK aus der Ölzahl. PVK deutlich unter der kritischen PVK heißt im Modell: Das Bindemittel füllt die Hohlräume — der Film wird tendenziell dicht und beständig. Ein Richtwert, keine feste Grenze.

**Stichwörter:** Rechenbeispiel, PVK, kritische PVK, Pigmentvolumenkonzentration, Ölzahl, Volumen, Dichte, Titandioxid, Rezeptur, Deckvermögen

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur*

## Übungsblatt Ü-59 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 12 Punkte)**

(a) Berechnen Sie für das Ausgangsbeispiel aus L-59 (Titandioxid mit Ölzahl 18 g/100 g, ρP = 4,1 g/cm³, ρL = 0,93 g/cm³) die kritische PVK und vergleichen Sie sie mit der gegebenen PVK von 24,0 %. (b) Was passiert mit Glanz und Beständigkeit einer Beschichtung allgemein, wenn die PVK die kritische PVK überschreitet?

**KPVK berechnen:** KPVK = 100 / (1 + ρP · ÖZ / (ρL · 100)) = 100 / (1 + 4,1 · 18 / (0,93 · 100)) = 55,8 %

**Vergleich:** 24,0 % liegt deutlich unter 55,8 % — im Modell reicht das Bindemittel aus, um die Pigmentpackung zu füllen.

**Unterhalb KPVK:** Das Bindemittel füllt alle Hohlräume; der Film ist tendenziell dicht, glänzend und beständig.

**Oberhalb KPVK:** Das Bindemittel reicht nicht mehr aus, es bleiben Lufteinschlüsse im Film: Der Glanz fällt deutlich ab, der Film wird matter und poröser, Beständigkeit und Festigkeit nehmen ab.

**Kipppunkt:** In der Umgebung der kritischen PVK ändern sich Glanz, Deckvermögen und Beständigkeit über einen engen PVK-Bereich hinweg besonders stark — daher der Name.

*Bewertung: Die KPVK-Rechnung wird korrekt durchgeführt und richtig mit der gegebenen PVK verglichen; oberhalb der kritischen PVK werden sinkender Glanz und sinkende Beständigkeit genannt und mit den verbleibenden Lufteinschlüssen begründet.*

**Frage 2** **(Berechnung, 12 Punkte)**

Eine Rezeptur enthält 30 g Titandioxid (Dichte 4,1 g/cm³), 20 g Kaolin (Dichte 2,7 g/cm³) und 35 g Bindemittel-Festkörper (Dichte 1,15 g/cm³). Berechnen Sie die Pigment-Volumen-Konzentration und ordnen Sie das Ergebnis gegenüber einer typischen kritischen PVK ein (siehe L-55).

**Pigmentvolumina:** TiO2: 30/4,1 = 7,32 cm³; Kaolin: 20/2,7 = 7,41 cm³; Pigment gesamt = 14,73 cm³

**Bindemittelvolumen:** 35/1,15 = 30,43 cm³

**PVK:** PVK = 14,73 / (14,73 + 30,43) · 100 % = 32,6 %

**Einordnung:** Mit rund 33 % liegt die PVK im Bereich einer seidenglänzenden bis matten Einstellung, klar unterhalb einer typischen kritischen PVK.

*Bewertung: Alle Feststoffe werden korrekt über Masse durch Dichte in Volumen umgerechnet; das Ergebnis wird sinnvoll eingeordnet.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**

Warum berechnet man die PVK über Volumina und nicht über Massen?

**Grund:** Ob das Bindemittel die Hohlräume zwischen den Pigmentteilchen füllt, hängt vom Raum ab, den beide einnehmen — also vom Volumen.

**Dichteproblem:** Pigmente und Bindemittel haben sehr unterschiedliche Dichten; ein Massenverhältnis würde die Raumverhältnisse verzerren.

**Konsequenz:** Nur das Volumenverhältnis beschreibt die Raumerfüllung korrekt.

*Bewertung: Die Antwort begründet die Volumenrechnung über die Raumerfüllung und die unterschiedlichen Dichten.*

Kapitel 5

# Herstellung und Betrieb

# L-60 · Herstellung von Flüssiglacken im Betrieb

*Vom Ansatz über das Dispergieren bis zur Abfüllung*

**Prüfungsteil 1** · A 9

Ein Flüssiglack entsteht in einer festen Reihenfolge: Ansetzen nach Rezept, Dispergieren des Mahlguts, Auflacken (Let-down), Einstellen von Viskosität und Farbton, Filtrieren und Abfüllen — begleitet von laufender Qualitätskontrolle.

## Vom Rezept zum Ansatz

Grundlage ist das Fertigungsrezept (siehe L-56). Die Komponenten werden nach Rezept eingewogen bzw. dosiert; Reihenfolge und Mengen sind festgelegt. Ein sauberer, dokumentierter Ansatz ist die Basis für einen reproduzierbaren Lack von Charge zu Charge.

## Mahlgutansatz und Dispergieren

Zunächst wird ein Teil des Bindemittels bzw. Lösemittels mit den Pigmenten und Füllstoffen sowie dem Netz- und Dispergiermittel zum Mahlgut (Millbase) angesetzt und im Dissolver vordispergiert. Anschließend wird in Perlmühle, Rührwerksmühle oder Dreiwalzwerk feindispergiert, bis die Zielkörnigkeit erreicht ist — kontrolliert mit dem Grindometer (siehe L-53, L-149). Die richtige Mahlgutkonzentration ist kein fester Prozentwert, sondern systemspezifisch: Ein höherer Feststoffanteil überträgt die Scherkräfte besser und schließt pro Durchgang mehr Pigment auf; ein zu dickes Mahlgut erschwert dagegen Umwälzung, Wärmeabfuhr und Benetzung. Das Optimum wird für Pigment, Bindemittel und Gerät im Versuch ermittelt (siehe L-53).

## Erst Zielkörnigkeit, dann auflacken

Die geforderte Feinheit wird im konzentrierten Mahlgut erreicht — dort stimmen Scherwirkung und Energieeintrag. Beim Auflacken ändern sich Feststoffgehalt, Bindemittel- und Lösemittelanteil und damit die Viskosität; ein Nachdispergieren ist danach meist deutlich schwieriger. Deshalb gilt als Laboranten-Grundregel: erst die geforderte Dispergierfeinheit erreichen, dann Let-down.

Der Grindometerwert ist dabei die Produktionsentscheidung — liegt er über dem Sollwert, wird weiterdispergiert statt aufgelackt. Er ist eine schnelle Betriebsprüfung auf grobe Agglomerate und Stippen: kein Maß für die Primärteilchengröße und kein universeller Wert, sondern immer produkt- und systemspezifisch spezifiziert. Reicht die Routineprüfung zur Ursachenklärung nicht aus, folgt die mikroskopische Analytik — REM und TEM zeigen Agglomeratstruktur und Primärteilchen hochauflösend (siehe L-53). Sie sind Werkzeuge für Entwicklung, Rohstoffcharakterisierung und Fehleranalyse, keine Routine-Freigabeprüfung jeder Charge.

## Auflacken und Einstellen

Nach dem Dispergieren wird mit dem restlichen Bindemittel, Lösemitteln und Additiven „aufgelackt“ (Let-down/Komplettierung). Danach wird eingestellt: die Viskosität durch Verdünnen, der Festkörpergehalt und der Farbton durch Nuancieren gegen einen Standard. Beim Verdünnen bleibt die Festkörpermasse konstant, nur die Gesamtmasse steigt: Aus Festkörpermasse geteilt durch Zielfestkörper ergibt sich die Ziel-Gesamtmasse, die Differenz zur Ausgangsmasse ist die Lösemittelzugabe. Wann ein Additiv zugegeben wird, richtet sich nach seiner Funktion und nicht nach einer pauschalen Regel: Netz- und Dispergiermittel müssen bereits im Mahlgut wirken; Entschäumer und Rheologieadditive werden je nach System anteilig auf Mahlgut und Let-down verteilt; verlaufs-, licht- und oberflächenaktive Additive würden die Mahlung stören oder in ihr geschädigt werden und kommen deshalb erst beim Auflacken hinzu.

## Filtrieren, Abfüllen und Freigabe

- Filtrieren — Grobteile, Stippen und Verunreinigungen entfernen.
- Produktionsbegleitende Prüfung — Körnigkeit, Viskosität, Farbton/Deckvermögen, Dichte und Festkörper, bei Wasserlacken auch pH und Leitfähigkeit.
- Freigabe nach Spezifikation, dann Abfüllen und Kennzeichnen (Charge, Sicherheitsdatenblatt).
- Rückstellmuster ziehen — für spätere Reklamations- und Schadensklärung.

### Umwelt und Sicherheit

Lösemitteldämpfe absaugen; in explosionsgefährdeten Bereichen Ex-Schutz, Erdung und Zündquellenverbot beachten. Pigment- und Füllstoffstäube beim Einwiegen meiden (Absaugung). Reinigungslösemittel möglichst im Kreislauf führen; nicht wiederverwendbare Reste entsprechend ihrer Einstufung und den betrieblichen bzw. rechtlichen Vorgaben entsorgen. Geschlossene Systeme senken Emissionen und Gefährdung.

### Filtertypen beim Klarfiltrieren

- Tiefenfilter (Filterbeutel, Filterschichten) — die Partikel bleiben im Inneren des Filtermaterials hängen; hohe Schmutzaufnahme, typisch für die Vorfiltration — z. B. nach der Dispergierung pigmentierter Lacke.
- Oberflächenfilter (Siebe, Membranen) — halten Teilchen ab einer definierten Größe an der Oberfläche zurück — z. B. Endfiltration von Klarlacken und Tinten mit definierter Reinheitsanforderung.
- Anschwemmfilter — eine Hilfsschicht (z. B. Kieselgur) wird aufgeschwemmt und hält feinste Trübstoffe zurück; für hohe Klarheit — z. B. bei lösemittelhaltigen Lacken und Druckfarben mit sehr hoher Transparenzanforderung.

### Schonend filtrieren

Filtriert wird mit möglichst geringem Druck: Zu hoher Druck presst Partikel durch den Filter oder reißt bereits abgeschiedene wieder mit. Der Filter muss zum Produkt passen — eine zu feine Trenngrenze setzt sich zu, eine zu grobe lässt Stippen durch.

**Merksatz**

Reihenfolge: Ansetzen → Mahlgut dispergieren (Grindometer) → Auflacken (Let-down) → Einstellen (Viskosität/Festkörper/Farbton) → Filtrieren → prüfen/freigeben → Abfüllen. Rückstellmuster nicht vergessen; Ex-Schutz und Absaugung beachten.

**Stichwörter:** Lackherstellung, Mahlgut, Millbase, Dissolver, Perlmühle, Auflacken, Let-down, Einstellen, Nuancieren, Filtrieren, Abfüllen, Rückstellmuster, Grindometer, Dispergierfeinheit
*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie*

---

## Übungsblatt Ü-60 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 10 Punkte)**

Beschreiben Sie die Herstellung eines Flüssiglacks im Betrieb in der richtigen Reihenfolge und erklären Sie, warum das Dispergieren vor dem Auflacken erfolgt.

**Ansetzen:** Komponenten nach Fertigungsrezept einwiegen/dosieren.
**Dispergieren:** Mahlgut (Pigmente, Füllstoffe, Teil des Bindemittels/Lösemittels, Netz- und Dispergiermittel) im Dissolver vordispergieren, dann in der Mühle bis zur Zielkörnigkeit feindispergieren (Grindometer).
**Auflacken und Einstellen:** Mit Restbindemittel, Lösemitteln und Additiven auflacken (Let-down), dann Viskosität, Festkörper und Farbton einstellen.
**Filtrieren, prüfen, abfüllen:** Filtrieren, produktionsbegleitend prüfen und nach Freigabe abfüllen; Rückstellmuster ziehen.
**Warum in dieser Reihenfolge:** Die Zielkörnigkeit wird im konzentrierten Mahlgut erreicht, weil dort Scherwirkung und Energieeintrag stimmen. Beim Auflacken ändern sich Feststoffgehalt und Viskosität — ein Nachdispergieren ist danach meist deutlich schwieriger.
*Bewertung: Die Reihenfolge Ansetzen → Dispergieren → Auflacken/Einstellen → Filtrieren/Abfüllen ist vollständig und korrekt. Für die volle Punktzahl wird die Reihenfolge nicht nur genannt, sondern über die Bedingungen im Mahlgut begründet.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**

Ein Ansatz von 200 kg hat einen Festkörpergehalt von 60 %. Er soll durch Zugabe von Lösemittel auf 50 % Festkörper eingestellt werden. Wie viel Lösemittel müssen Sie zugeben?

**Festkörpermasse:** 200 kg · 60 % = 120 kg (bleibt konstant)

**Ziel-Gesamtmasse:** 120 kg / 50 % = 240 kg

**Lösemittelzugabe:** 240 kg − 200 kg = 40 kg

**Antwortsatz:** Es sind 40 kg Lösemittel zuzugeben, um von 60 % auf 50 % Festkörper zu kommen.

*Bewertung: Die konstante Festkörpermasse wird als Ansatz erkannt und die Verdünnung korrekt darüber berechnet.*

**Frage 3** **(Anwendung, 10 Punkte)**

Bei der produktionsbegleitenden Prüfung zeigt das Grindometer nach dem Dispergieren noch zu grobe Körnung. Was tun Sie, bevor Sie auflacken? Welche Ursachen prüfen Sie — und welche Rolle können REM und TEM bei einer weitergehenden Untersuchung spielen?

**Nicht auflacken:** Erst weiterdispergieren — nach dem Auflacken sinken Feststoffanteil und Viskosität und damit der Scherenergieeintrag; ein Nachdispergieren ist dann deutlich schwieriger und oft unwirtschaftlich.

**Ursache prüfen:** Mahldauer und Mahlbedingungen, Mahlkörper und Mühleneinstellung, Mahlgutviskosität und Feststoffanteil sowie Netz- und Dispergiermittel kontrollieren.

**Kontrolle:** Erneut Grindometer messen; erst bei erreichter Zielkörnigkeit auflacken und einstellen.

**Wann REM und TEM:** Bleibt die Ursache unklar, folgt die mikroskopische Analytik: REM bildet Oberfläche und Agglomeratstruktur ab, TEM löst Aggregate und einzelne Primärteilchen auf (siehe L-53). Beide sind Spezialmethoden für Entwicklung und Fehleranalyse — keine Routineprüfung jeder Charge.

*Bewertung: Es wird erkannt, dass die Feinung im Mahlgut abgeschlossen sein muss, bevor aufgelackt wird, und die Ursachen werden sinnvoll eingegrenzt. Für die volle Punktzahl wird die mikroskopische Analytik als Eskalationsstufe eingeordnet und nicht als Routineprüfung dargestellt.*

# L-61 · Vom Labor zur Produktion: Applikation und Fertigungsübertragung

*Eine Rezeptur reproduzierbar applizieren und in den Serienmaßstab übertragen*

**Wahlqualifikation** · B 15 · B 16

Eine Labormuster-Rezeptur muss reproduzierbar unter Prozessbedingungen applizierbar und im großen Maßstab herstellbar sein. Applikation unter Prozessbedingungen und Fertigungsübertragung (Scale-up) sind der Weg vom Muster zum Serienprodukt.

## Vom Muster zum Serienprodukt

Eine im Labor entwickelte Rezeptur ist noch kein Serienprodukt. Sie muss sich reproduzierbar in großem Maßstab herstellen und unter realen Bedingungen applizieren lassen. Der Weg dorthin ist ein eigenes Arbeitsgebiet mit zwei Seiten: die Applikation unter Prozessbedingungen und die Übertragung der Fertigung in den Produktionsmaßstab.

## Applikation unter Prozessbedingungen

Gemeint ist nicht die Herstellung des Lackes selbst, sondern seine Verarbeitung in der Beschichtungsanlage — z. B. in der Automobil-, Möbel- oder Kunststoffproduktion. In der Produktion wird nicht mit dem Pinsel gearbeitet, sondern mit realen Verfahren wie Spritzen, Walzen oder Tauchen (siehe L-66 und L-67). Entscheidend ist, die Prozessparameter — Verarbeitungsviskosität, Temperatur, Schichtdicke und Bandgeschwindigkeit — so einzustellen und laufend zu überwachen, dass das Ergebnis gleichbleibend reproduzierbar ist.

## Fertigungsübertragung (Scale-up)

Beim Übertragen einer Rezeptur in den Produktionsmaßstab ändern sich die Randbedingungen: Dispergierenergie, Wärmeübergang, Misch- und Standzeiten und Chargeneffekte sind im großen Ansatz anders als im Becherglas. Deshalb prüft man den Übergang über Pilot- oder Vorserienansätze, bevor die Serie startet, und rechnet die Gewichtsteile der Laborrezeptur auf die Ansatzgröße hoch.

## Rohstoffprüfung vor dem Ansatz

Reproduzierbare Produktion setzt geprüfte Rohstoffe voraus. Jede angelieferte Charge wird vor der Verwendung gegen die eigene Rohstoffspezifikation freigegeben — der Prüfumfang steht im Prüfplan, je nach Rohstoff etwa Säurezahl, Epoxidwert oder NCO-Gehalt (siehe L-08), Dichte, Viskosität oder Farbzahl (siehe L-151). Das Lieferantenzeugnis (Certificate of Analysis, CoA) dokumentiert die vom Hersteller für diese Charge bestimmten Kennwerte und wird mit der eigenen Spezifikation verglichen — es ersetzt aber nicht automatisch die eigene Prüfung. Ob zusätzlich eine Eingangskontrolle erfolgt, hängt vom Rohstoff, der Lieferantenfreigabe und dem betrieblichen Qualitätssystem ab. Auch Chargen innerhalb der Spezifikation können sich geringfügig unterscheiden und Dispergierverhalten, Viskosität oder Lagerstabilität beeinflussen: Rohstoffcharge → Kennwerte → Verarbeitung → Lackeigenschaften.

## Reproduzierbarkeit und Dokumentation

Jeder Ansatz muss die vereinbarten Kennzahlen treffen — welche das im Einzelfall sind, etwa nicht flüchtiger Anteil, Viskosität, Farbton, Glanz, Trockenzeit, Härte oder Beständigkeit, legen Produktspezifikation und Prüfplan fest. Nach wichtigen Herstellungsschritten können Zwischenprüfungen nötig sein, vor der Freigabe stehen die für das Produkt festgelegten Endprüfungen. Eine sorgfältige Dokumentation von Rezeptur, Prozessparametern und Prüfergebnissen sichert die Reproduzierbarkeit und ist die Grundlage für Freigabe und Reklamationsbearbeitung.

### Typische Stolpersteine

Wegen der veränderten Randbedingungen im Produktionsmaßstab plant man Toleranzen ein und legt kritische Größen — etwa Dispergiergrad oder Auslaufzeit — als Freigabekriterien fest. Weicht eine Charge von einem Sollwert ab, wird nicht unmittelbar korrigiert: Zuerst wird die Ursache systematisch eingegrenzt, typischerweise über Messmethode, Temperatur, Rohstoffcharge, Prozessparameter und Misch-/Dispergierzeit — erst danach folgt eine zulässige Korrektur mit erneuter Prüfung und Dokumentation.

**Merksatz**

Vom Labor zur Serie: unter Prozessbedingungen reproduzierbar applizieren und die Rezeptur maßstabsgerecht übertragen. Geprüfte Rohstoffe, Pilotansatz, überwachte Prozessparameter und lückenlose Dokumentation machen aus dem Muster ein sicheres Serienprodukt.

**Stichwörter:** Fertigungsübertragung, Scale-up, Applikation, Prozessbedingungen, Reproduzierbarkeit, Pilotansatz, Prozessparameter, Dokumentation, Freigabe, Chargeneffekt, Bandgeschwindigkeit, Verarbeitungsviskosität, Lieferantenzeugnis, Eingangskontrolle, Zwischenprüfung, Endprüfung

*Quellen: Ausbildungsrahmenplan Lacklaborant (Anlage 3); Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie*

## Übungsblatt Ü-61 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Warum lässt sich eine im Labor bewährte Rezeptur nicht einfach unverändert in die Serienproduktion übernehmen? Nennen Sie drei Randbedingungen, die sich beim Scale-up ändern.

**Grundproblem:** Im großen Ansatz gelten andere physikalische Bedingungen als im Becherglas, sodass sich Verarbeitung und Ergebnis verschieben können.
**Randbedingung 1:** Dispergierenergie und Rührwerkstyp unterscheiden sich.
**Randbedingung 2:** Wärmeübergang sowie Misch- und Standzeiten sind anders.
**Randbedingung 3:** Chargeneffekte der Rohstoffe wirken sich stärker aus; deshalb prüft man den Übergang über Pilotansätze.
*Bewertung: Die Antwort erklärt das Scale-up-Problem und nennt drei zutreffende, sich ändernde Randbedingungen.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**

Eine Laborrezeptur ist in Gewichtsteilen mit einer Summe von 100 GT angegeben. Für einen Produktionsansatz von 750 kg: Wie viel wird von einer Komponente mit 18 GT eingewogen?

**Ansatz:** Der Anteil bleibt gleich; die absolute Menge skaliert mit der Ansatzgröße.
**Rechnung:** m(Komponente) = 750 kg · 18/100 = 135 kg
**Kontrolle:** Zur Probe: 18 % von 750 kg = 135 kg.
**Antwortsatz:** Es werden 135 kg der Komponente eingewogen.
*Bewertung: Die anteilige Hochrechnung ist korrekt und wird durch die Prozentkontrolle bestätigt.*

**Frage 3** **(Anwendung, 12 Punkte)**

Ein Bindemittel ist mit einer Säurezahl von 25–35 mg KOH/g spezifiziert. Das Lieferantenzeugnis (CoA) nennt 29 mg KOH/g, die eigene Kontrollprüfung ergibt 30 mg KOH/g — die Charge wird freigegeben. Der damit hergestellte Produktionsansatz erreicht später jedoch nicht die im Labor festgelegte Auslaufzeit. (a) Wie bewerten Sie die Rohstoffcharge anhand der Prüfwerte, und welche Bedeutung hat dabei das Lieferantenzeugnis? (b) Wie gehen Sie mit der abweichenden Auslaufzeit um, und warum ist sie als Freigabekriterium sinnvoll?

**CoA bewerten:** Beide Werte, 29 und 30 mg KOH/g, liegen innerhalb der Spezifikation von 25–35 mg KOH/g und stimmen gut überein.

**Bedeutung des Lieferantenzeugnisses:** Das CoA dokumentiert die vom Lieferanten für die Charge bestimmten Kennwerte und wird mit der eigenen Spezifikation verglichen; es ersetzt nicht automatisch die eigene Prüfung — ob zusätzlich eine Eingangskontrolle erfolgt, hängt vom Rohstoff und Qualitätssystem ab.

**Vorgehen bei Abweichung:** Die Ursache im Prozess systematisch eingrenzen (Temperatur, Dispergiergrad, Rohstoffcharge, Prozessparameter, Misch-/Dispergierzeit) und den Ansatz erst nach Korrektur und erneuter Messung freigeben.

**Warum Freigabekriterium:** Die Auslaufzeit ist ein schnell messbarer, reproduzierbarer Kennwert der Verarbeitungsviskosität und zeigt Abweichungen früh an.

**Konsequenz:** Nur ein Ansatz innerhalb der Toleranz wird zur Applikation freigegeben.

*Bewertung: Teil (a) erkennt, dass ein CoA innerhalb der Spezifikation liegende Werte dokumentiert, die eigene Prüfung aber nicht automatisch ersetzt. Teil (b) verknüpft die systematische Ursachensuche mit der Rolle der Auslaufzeit als schnelles Freigabekriterium.*

# L-62 · Digitalisierung und vernetzte Systeme im Labor

*Daten, statistische Versuchsplanung und automatisierte Prozesse*

**Wahlqualifikation** · B 17 · B 18

Digitale Werkzeuge erfassen und werten Labor- und Produktionsdaten aus, statistische Versuchsplanung spart Versuche, und vernetzte, automatisierte Systeme steuern Prozesse inline — die Grundidee der digitalen Laborberufe.

## Warum Digitalisierung

Moderne Lackentwicklung und -produktion erzeugen große Datenmengen. Digitale Werkzeuge helfen, sie strukturiert zu erfassen, auszuwerten und Prozesse damit zu steuern. Genau das ist der Kern der beiden neuen, auf digitale Kompetenzen ausgerichteten Wahlqualifikationen.

## Digitale Werkzeuge im Labor

Elektronische Laborbücher und Labor-Informations-Management-Systeme (LIMS) erfassen Rezepturen, Messwerte und Prüfungen strukturiert und nachvollziehbar. Vereinfacht gesagt ist das LIMS die digitale Schaltzentrale des Labors: Es verwaltet Proben, Prüfaufträge und Freigaben, ordnet jede Prüfung eindeutig einer Probe bzw. Charge zu — es weiß, welche Probe von wem, wann und mit welchem Ergebnis geprüft wurde — und gibt erst frei, wenn alle erforderlichen Prüfungen abgeschlossen sind. Rezeptur- und Rohstoffdatenbanken beschleunigen das Wiederfinden geeigneter Rohstoffe oder früherer Entwicklungsansätze — ersetzen aber nicht die fachliche Beurteilung: Ein früher verwendeter Rohstoff kann inzwischen eine andere Spezifikation, Charge oder Verfügbarkeit haben und muss auf den aktuellen Anwendungsfall geprüft werden. Simulation und Modellierung können helfen, Zusammenhänge zu untersuchen und Vorversuche zu reduzieren, ersetzen aber nicht die experimentelle Prüfung.

## Statistische Versuchsplanung (DoE)

Statt jeden Faktor einzeln zu variieren (z. B. nur die Pigmentmenge, bei sonst konstanten Bedingungen), prüft die statistische Versuchsplanung (Design of Experiments) mehrere Faktoren systematisch zugleich. Dadurch werden auch Wechselwirkungen zwischen Faktoren sichtbar: Bei einem Lack kann eine längere Dispergierzeit bei niedrigem Pigmentgehalt kaum etwas verändern, bei hohem Pigmentgehalt aber einen deutlichen Effekt haben — genau solche Zusammenhänge deckt die Einzelvariation nicht auf. Ein vollfaktorieller Plan mit k Faktoren auf zwei Stufen umfasst 2^k Versuche (siehe Modellrechnung unten).

## Modellrechnung: 2^k-Versuchsplan

```
Bei einem vollfaktoriellen Versuchsplan mit k Faktoren und je zwei Stufen gilt für die Zahl
   der Versuche:
N = 2^k

Einfaches Beispiel mit k = 2: Zwei Faktoren – Pigmentgehalt (niedrig / hoch) und
   Dispergierzeit (kurz / lang) – ergeben 2² = 4 Versuche: PG niedrig + kurz, PG niedrig +
   lang, PG hoch + kurz, PG hoch + lang. Alle Kombinationen werden geprüft, und die
   Wechselwirkung zwischen Pigmentgehalt und Dispergierzeit wird sichtbar.

Bei 4 Faktoren: N = 2⁴ = 16 Versuche.
Bei 5 Faktoren: N = 2⁵ = 32 Versuche.

Jeder zusätzliche Faktor verdoppelt die Zahl der Versuche – ein Grund, warum bei vielen
   Faktoren schnell sehr viele Versuche entstehen. Teilfaktorielle Pläne können den Aufwand
   reduzieren, sind aber methodisch anspruchsvoller und müssen passend geplant werden
   (Vertiefung, über den Kernstoff hinaus).
```

## Vernetzte und automatisierte Systeme

In der Produktion übernehmen automatisierte Dosier-, Misch- und Applikationsanlagen die Ausführung; Sensoren erfassen Prozessgrößen inline, etwa Viskosität oder Temperatur. Der Weg dabei: Sensor → Messwert → Prozessentscheidung → Prozessanpassung. Beispiel Inline-Viskositätsmessung: Erkennt die Anlage eine definierte Abweichung, kann sie — sofern entsprechend ausgelegt und freigegeben — einen Prozessschritt anpassen oder eine Warnung ausgeben; das beschleunigt die Fehlererkennung und kann die Reproduzierbarkeit verbessern. In Beschichtungsanlagen wird zusätzlich die Nassschichtdicke inline gemessen — weicht sie vom Sollwert ab, passt die Anlage Auftragsmenge oder Bandgeschwindigkeit an. Voraussetzung dafür sind geeignete, kalibrierte bzw. verifizierte Messsysteme und korrekt definierte Regelgrenzen. Ein Prozessleitsystem vernetzt die Daten und regelt den Ablauf — die Grundidee von Industrie 4.0.

## Chancen und Sorgfalt

Vernetzung bringt Reproduzierbarkeit, schnelle Fehlererkennung und lückenlose Rückverfolgbarkeit. Zugleich verlangt sie saubere, verlässliche Daten und ein Verständnis der zugrunde liegenden Prozesse: Messmethoden, Einheiten, die Zuordnung von Proben bzw. Chargen und die Datenübertragung müssen eindeutig sein — ein digital gespeicherter falscher Messwert wird durch die Digitalisierung nicht richtig, sondern führt nur schneller zu einer falschen Prozessentscheidung. Die Zahl ersetzt das Fachwissen nicht, sie stützt es.

## Datenintegrität und Audit-Trail

Damit digitale Daten belastbar sind, müssen sie vollständig, unverändert und nachvollziehbar bleiben — das ist die Datenintegrität. Ein Audit-Trail ist ein lückenlos geführtes elektronisches Protokoll, das festhält: wer — wann — was — und warum geändert hat. Er ist das digitale Äquivalent zum signierten Eintrag im Laborbuch, nur fälschungssicher. Der Audit-Trail hält jede Änderung an Rezepturen, Prüfergebnissen und Abweichungen fest; Rezepturen werden versioniert, sodass jeder Stand rückverfolgbar bleibt, und Freigaben laufen über eine elektronische Signatur; reine Papierprotokolle genügen dafür in auditierten Betrieben oft nicht mehr. Zusätzlich prüfen die Systeme Eingaben automatisch auf Plausibilität — etwa unmögliche Viskositäts- oder pH-Werte an den Schnittstellen zu Produktions- und ERP-Systemen. Solche automatischen Prüfungen fangen aber nur offensichtlich unmögliche Werte ab — einen plausibel aussehenden, aber falschen Wert erkennt nur die fachliche Beurteilung.

**Merksatz**

Digitalisierung heißt: Daten strukturiert erfassen (LIMS), klug planen (DoE mit 2^k Versuchen), Prozesse vernetzt und automatisiert steuern, jede Änderung über den Audit-Trail nachvollziehbar halten. Die Technik stützt das Fachwissen — sie ersetzt es nicht.

**Stichwörter:** Digitalisierung, LIMS, elektronisches Laborbuch, Rohstoffdatenbank, Design of Experiments, statistische Versuchsplanung, Wechselwirkung, Simulation, vernetzte Systeme, Automatisierung, Sensoren, Regelgrenzen, Prozessleitsystem, Industrie 4.0, Rückverfolgbarkeit, Audit-Trail, Datenintegrität, Plausibilitätsprüfung, elektronische Signatur, Versionsverwaltung
*Quellen: Ausbildungsrahmenplan Lacklaborant (Anlage 3); Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie*

## Übungsblatt Ü-62 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**
Erklären Sie den Nutzen der statistischen Versuchsplanung (DoE) gegenüber der Variation einzelner Faktoren und nennen Sie ein digitales Werkzeug zur Datenerfassung im Labor.

**DoE-Prinzip:** Mehrere Faktoren werden systematisch zugleich variiert statt jeder einzeln.
**Vorteil:** Das deckt auch Wechselwirkungen zwischen Faktoren auf und liefert je Versuch mehr Information; für dieselbe Aussagekraft sind weniger Versuche nötig als bei der Einzelvariation.
**Digitales Werkzeug:** Ein Labor-Informations-Management-System (LIMS) oder ein elektronisches Laborbuch erfasst Rezepturen und Messwerte strukturiert und nachvollziehbar.
**Ergänzung:** Simulation und Modellierung können zusätzlich Vorversuche reduzieren — sie ersetzen die experimentelle Prüfung jedoch nicht.
*Bewertung: Die Antwort erklärt den DoE-Vorteil (Wechselwirkungen, mehr Information je Versuch) und nennt ein passendes digitales Werkzeug.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**
Ein vollfaktorieller Versuchsplan untersucht Faktoren auf je zwei Stufen. Wie viele Einzelversuche umfasst er bei 4 Faktoren, und wie viele bei 5 Faktoren?

**Formel:** Vollfaktoriell auf zwei Stufen: Zahl der Versuche = 2^k (k = Zahl der Faktoren)
**4 Faktoren:** 2^4 = 16 Versuche
**5 Faktoren:** 2^5 = 32 Versuche
**Deutung:** Jeder zusätzliche Faktor verdoppelt den Versuchsaufwand — ein Grund für reduzierte (teilfaktorielle) Pläne.
*Bewertung: Die Formel 2^k wird korrekt angewendet und die Verdopplung je Faktor richtig gedeutet.*

**Frage 3** **(Anwendung, 10 Punkte)**
In einem auditierten Betrieb misst eine vernetzte Anlage die Viskosität inline und regelt automatisch nach; zusätzlich wird eine Rezeptur geändert. Nennen Sie zwei Vorteile der Inline-Regelung und eine Voraussetzung dafür. Was muss der Audit-Trail der Rezepturänderung festhalten, und warum genügt ein Papierprotokoll allein oft nicht?

**Vorteil 1:** Reproduzierbarkeit und schnelle Fehlererkennung, weil Abweichungen sofort auffallen und korrigiert werden.
**Vorteil 2:** Lückenlose Rückverfolgbarkeit der Prozessdaten.
**Voraussetzung:** Saubere, verlässliche Sensordaten und ein Prozessverständnis — fehlerhafte Daten führen sonst zu falscher Regelung.
**Audit-Trail — vier W-Fragen:** Er hält fest, wer wann was und warum geändert hat.
**Datenintegrität:** Die Daten bleiben vollständig, unverändert und nachvollziehbar.
**Freigabe:** Die Änderung wird versioniert und über eine elektronische Signatur freigegeben, sodass jeder Stand rückverfolgbar bleibt.
**Grenze Papier:** Ein Papierprotokoll lässt sich schwerer lückenlos und fälschungssicher führen und durchsuchen; in auditierten Betrieben genügt es allein oft nicht mehr.
**Zusammenhang:** Beides gehört zusammen: Die Inline-Regelung erzeugt die Daten, der Audit-Trail macht sie belastbar. Ohne Datenintegrität ist auch die beste Regelung im Audit wertlos.
*Bewertung: Zwei zutreffende Vorteile der Inline-Vernetzung und die Datenqualität als Voraussetzung werden genannt; beim Audit-Trail zählen die vier W-Fragen mit Bezug zur Datenintegrität sowie die Begründung, warum ein Papierprotokoll allein oft nicht genügt.*

# L-63 · Prozess- und Umweltarbeitstechniken

*Sicher und geregelt arbeiten — Emissionen, Abfall und Ressourcen im Blick*

**Wahlqualifikation** · B 19 · B 20

Zwei Arbeitstechniken durchziehen jede Lacktätigkeit: prozessbezogenes Arbeiten (geregelt, überwacht, dokumentiert) und umweltbezogenes Arbeiten (Emissionen senken, Abfall und Gefahrstoffe richtig handhaben, Ressourcen schonen).

## Prozess und Umwelt im Arbeitsalltag

Zwei Arbeitstechniken durchziehen jede Tätigkeit in der Lacktechnik: das prozessbezogene Arbeiten — sicher, geregelt und dokumentiert — und das umweltbezogene Arbeiten mit Blick auf Emissionen, Abfall und Ressourcen. Beide sind eigene Wahlqualifikationen, greifen im Alltag aber ineinander.

## Prozessbezogenes Arbeiten

Wer im Prozess arbeitet, hält festgelegte Abläufe ein, überwacht kritische Parameter, prüft nach Vorgabe und dokumentiert lückenlos. Standardarbeitsanweisungen, Qualitätssicherung und Rückverfolgbarkeit sichern gleichbleibende Ergebnisse und erlauben es, Abweichungen früh zu erkennen und zu korrigieren.

## Umweltschutz in der Lacktechnik

Mit den 2021 modernisierten Standardberufsbildpositionen ist „Umweltschutz und Nachhaltigkeit“ fester Bestandteil aller neu geordneten Ausbildungsberufe; die für Lacklaboranten geltende Verordnung (Neufassung 2020) führt die Position „Umweltschutz“ — der Anspruch ist derselbe: Bei jeder Rezeptur- und Verfahrensentscheidung sind die drei Dimensionen Ökologie, Ökonomie und Soziales mitzudenken — von der Rohstoffherkunft über den Energieverbrauch bis zur Recyclingfähigkeit. Lacke enthalten Lösemittel, Härter und Pigmente, die Umwelt und Gesundheit belasten können. Umweltbezogenes Arbeiten heißt: Emissionen senken (VOC, siehe L-168), Abfälle richtig trennen und entsorgen, Gefahrstoffe sicher handhaben und Wasser wie Energie sparsam einsetzen.

## Emissionen und Abfall

Organische Lösemittel werden über Abluftreinigung oder durch die Umstellung auf wässrige, festkörperreiche oder Pulversysteme reduziert (siehe L-168). Lackschlamm, Reinigungslösemittel und Restlacke sind fachgerecht zu entsorgen oder zurückzugewinnen; Overspray-Recycling und Kreislaufführung sparen Material und Kosten.

## Nachhaltigkeit und Recht

Umweltarbeit folgt gesetzlichen Vorgaben — etwa dem Gefahrstoffrecht (siehe L-171, L-172), dem Abfallrecht (siehe L-175) und dem Immissionsschutzrecht (siehe L-168, L-176) — und zunehmend Nachhaltigkeitszielen: weniger Ressourcenverbrauch, längere Lebensdauer der Beschichtung, recyclingfähige Systeme. Wirtschaftlichkeit und Umweltschutz gehen dabei oft Hand in Hand.

**Merksatz**

Prozessbezogen heißt geregelt, überwacht, dokumentiert; umweltbezogen heißt Emissionen senken, Abfall und Gefahrstoffe richtig handhaben, Ressourcen schonen. Beide Arbeitstechniken sichern Qualität und Zukunftsfähigkeit.

**Stichwörter:** Prozessarbeitstechnik, Umweltarbeitstechnik, Qualitätssicherung, Dokumentation, Standardarbeitsanweisung, Emission, VOC, Abfall, Gefahrstoff, Recycling, Nachhaltigkeit, Rückverfolgbarkeit, Standardberufsbildposition, Life-Cycle-Thinking

*Quellen: Ausbildungsrahmenplan Lacklaborant (Anlage 3); Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie*

## Übungsblatt Ü-63 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**
Grenzen Sie prozessbezogenes und umweltbezogenes Arbeiten voneinander ab und nennen Sie je zwei typische Tätigkeiten.

**Prozessbezogen:** Geregeltes, überwachtes und dokumentiertes Arbeiten im Prozess.
**Tätigkeiten prozessbezogen:** Kritische Parameter überwachen und nach Vorgabe prüfen; lückenlos dokumentieren (Standardarbeitsanweisungen, Rückverfolgbarkeit).
**Umweltbezogen:** Arbeiten mit Blick auf Emissionen, Abfall und Ressourcen.
**Tätigkeiten umweltbezogen:** Emissionen senken (VOC) und Abfälle/Gefahrstoffe fachgerecht trennen, entsorgen oder zurückgewinnen.
*Bewertung: Die Antwort trennt beide Arbeitstechniken sauber und nennt je zwei zutreffende Tätigkeiten.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**
Ein Betrieb setzt 200 kg Lösemittel pro Tag ein; 85 % werden durch Rückgewinnung im Kreislauf gehalten. Wie viel wird täglich emittiert bzw. muss ersetzt werden?

**Zurückgewonnen:** 200 kg · 0,85 = 170 kg bleiben im Kreislauf
**Verlust/Emission:** 200 kg − 170 kg = 30 kg (das sind 15 %)
**Deutung:** Die Rückgewinnung senkt Emission und Kosten deutlich.
**Antwortsatz:** Täglich gehen rund 30 kg Lösemittel verloren und müssen als frisches Lösemittel ersetzt werden. Dieser Verlust verteilt sich auf diffuse und gefasste Emissionen sowie auf lösemittelhaltige Abfälle (Lackschlamm, Filter, Altlösemittel) — als Emission zählt nur der in die Luft abgegebene Anteil; die Lösemittelbilanz nach der 31. BImSchV erfasst dagegen alle Ein- und Austräge, also auch das Lösemittel in Abfällen (siehe L-176).
*Bewertung: Rückgewinnung und Verlust werden korrekt getrennt; das Ergebnis zeigt anschaulich den Nutzen der Kreislaufführung.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**
Ein Lackierbetrieb will Lösemittelemission und Abfall senken. Nennen Sie zwei rezeptur- oder verfahrensseitige Maßnahmen.

**Maßnahme 1:** Umstellung auf wässrige, festkörperreiche oder Pulversysteme senkt den VOC-Ausstoß (siehe L-168).
**Maßnahme 2:** Overspray-Recycling und Kreislaufführung der Reinigungslösemittel reduzieren Abfall und Materialverbrauch.
**Ergänzung:** Fachgerechte Trennung und Entsorgung von Lackschlamm und Restlacken gehört ebenfalls dazu.
*Bewertung: Die Antwort nennt zwei zutreffende Maßnahmen und ordnet sie dem Ziel Emissions- und Abfallsenkung zu.*

Kapitel 6

# Applikation

# L-64 · Untergründe und ihre Vorbehandlung

*Reinigen, mechanisch und chemisch vorbehandeln — Metall, Kunststoff, Holz, mineralisch*

**Prüfungsteil 1** · A 8.1

Ein Beschichtungsstoff ist nur so gut wie der Untergrund, auf dem er haftet. Jeder Untergrund — Metall, Kunststoff, Holz oder mineralisch — muss erst von Verunreinigungen befreit und dann passend vorbehandelt werden: Reinigen entfernt Störstoffe, die mechanische und chemische Vorbehandlung schafft eine haftfähige, oft konversionsbehandelte Oberfläche.

## Warum vorbehandeln?

In der Beschichtungstechnik (Normen und Betrieb) heißt der Gegenstand, auf den lackiert wird, Untergrund; der in der Werkstofftechnik gebräuchliche Begriff Werkstoffoberfläche beschreibt dieselbe Sache aus materialwissenschaftlicher Perspektive. Ein Beschichtungsstoff ist ein Zwischenprodukt: Erst der Verbund aus Beschichtung und Untergrund erfüllt seinen Zweck. Die Haftfestigkeit hängt nicht vom Lack allein ab, sondern ebenso von den Eigenschaften und der Vorbehandlung des Untergrunds. Reste von Öl, Rost, Zunder, Trennmittel oder Altbeschichtungen verhindern Benetzung und Haftung (Grundlagen dazu in L-12). Deshalb steht vor jeder Lackierung das Reinigen und, je nach Untergrund, eine gezielte Vorbehandlung.

## Die vier Untergrundklassen und ihre Störstoffe

- Metall: Metallspäne, Öl und Fette, Zunder, Rost und Flugrost, Oxide, Silicone, Läppaste (feines, loses Schleifkorn in einem Trägermittel, das beim Läppen — einem Feinbearbeitungsverfahren für Metallteile — eingesetzt wird; Rückstände blockieren die Haftung), Lack- und Altbeschichtungsreste.
- Kunststoff: Fette und Öle, Trennmittel, Staub, Handschweiß.
- Holz: Schleifreste, Staub, Feuchtigkeit, Holzinhaltsstoffe, Lackreste.
- Mineralische Untergründe: Staub, Salze, Fette, Reifenabrieb, Altanstriche.

## Reinigen und mechanische Vorbehandlung

- Metall: mechanisch wischen, schleifen, polieren, bürsten, strahlen; chemisch entfetten (Lösemittel oder wässrige Reiniger) und beizen.
- Kunststoff: abreiben, abblasen, abspülen; entfetten mit Lösemittel oder wässrigem Reiniger.
- Holz: schleifen, bürsten; bei öl- und harzreichen Hölzern (z. B. Teak) zusätzlich entfetten, und wasserlösliche Holzinhaltsstoffe mit einer Isoliergrundierung absperren — also nicht rein mechanisch.
- Mineralisch: strahlen; reinigen mit Lösemittel oder wässrigem Reiniger.

## Metall: Strahlen und Konversionsschichten

Für dauerhaften Korrosionsschutz wird Stahl meist gestrahlt — das entfernt Zunder und Rost und schafft eine definierte Rauheit. Reinheitsgrade (Entrostungsgrade, z. B. Sa 2½) regelt DIN EN ISO 8501-1, die Rauheitsgrade (fein/mittel/grob) dagegen DIN EN ISO 8503 — zwei verschiedene Normen für zwei verschiedene Kenngrößen. Anschließend erzeugt eine Konversionsbehandlung eine fest haftende, korrosionshemmende Zwischenschicht:

- Eisenphosphatierung — dünne, amorphe Schicht; einfach und günstig, für mildere Anforderungen.
- Zinkphosphatierung — kristalline Zinkphosphatschicht; besserer Korrosionsschutz und Haftgrund, Standard vor der KTL in der Automobilserie.
- Chromatierung/Passivierung — Passivschicht auf Zink und Aluminium; wegen der Giftigkeit und krebserzeugenden Wirkung von Chrom(VI) zunehmend durch chromatfreie Verfahren (auf Titan-/Zirkon- oder Silanbasis) ersetzt. Bei Silanverfahren hydrolysiert das Silan (z. B. Aminopropyltriethoxysilan) und bildet mit der Metalloxidschicht kovalente Si-O-Metall-Bindungen; gleichzeitig verankert eine organische Endgruppe den Lack — ohne Schwermetalle.

### Kunststoff: Oberflächenenergie erhöhen

Viele Kunststoffe — besonders unpolare wie PP und PE — haben eine so niedrige Oberflächenenergie, dass Lacke nicht benetzen. Vor dem Lackieren wird die Oberfläche daher aktiviert: durch Beflammen, Corona-Entladung oder Plasma. Dabei entstehen polare Gruppen (C=O, C-OH) an der Oberfläche, die Oberflächenenergie steigt, und der Lack benetzt und haftet (siehe L-126 und L-127).

### Holz und mineralische Untergründe

Holz wird geschliffen und je nach System imprägniert, grundiert oder versiegelt; dabei sind Feuchte und Holzinhaltsstoffe zu beachten. Mineralische Untergründe wie Beton und Putz werden gereinigt, oft gestrahlt und dann imprägniert, grundiert oder hydrophobiert; hier spielen Alkalität, Restfeuchte und Porigkeit eine Rolle: Stark saugende Untergründe ziehen das Bindemittel in die Poren, der Film bleibt bindemittelarm und haftet schlecht — eine Tiefengrundierung oder Imprägnierung gleicht dies aus (siehe L-81 und L-108).

**Merksatz**

Kein Beschichtungserfolg ohne Untergrundvorbehandlung: erst reinigen (Öl, Rost, Trennmittel, Staub entfernen), dann untergrundgerecht vorbehandeln — Metall strahlen und phosphatieren bzw. passivieren, Kunststoff aktivieren (Beflammen/Corona/Plasma), Holz und mineralische Untergründe schleifen/reinigen und grundieren. Die Haftung entscheidet sich am Untergrund, nicht am Lack allein.

**Stichwörter:** Untergrund, Vorbehandlung, Reinigen, Entfetten, Beizen, Strahlen, Konversionsschicht, Phosphatierung, Zinkphosphatierung, Eisenphosphatierung, Chromatierung, Passivierung, chromatfrei, Beflammen, Corona, Plasma, Haftung, Oberflächenenergie

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; DIN EN ISO 8501; DIN EN ISO 8503*

## Übungsblatt Ü-64 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 6 Punkte)**

Warum ist die Untergrundvorbehandlung für die Haftung oft wichtiger als der Lack selbst? Nennen Sie je ein Beispiel für einen Störstoff und eine Vorbehandlung bei Metall.

**Verbund:** Die Haftung entsteht im Verbund Lack–Untergrund; Reste wie Öl, Rost oder Trennmittel verhindern Benetzung und Haftung, egal wie gut der Lack ist.
**Störstoff (Metall):** z. B. Öl/Fett, Zunder oder Rost.
**Vorbehandlung (Metall):** Entfetten und Strahlen, dann Phosphatieren oder Passivieren als haftfähige Konversionsschicht.
*Bewertung: Der Verbundgedanke wird erkannt; je ein passender Störstoff und eine sinnvolle Vorbehandlung werden genannt.*

**Frage 2** **(Verständnis, 6 Punkte)**

Worin unterscheiden sich Eisen- und Zinkphosphatierung, und warum werden Chromatierungen zunehmend durch chromatfreie Verfahren ersetzt?

**Eisenphosphatierung:** dünne, amorphe Schicht; einfach und günstig, für mildere Anforderungen.
**Zinkphosphatierung:** kristalline Zinkphosphatschicht; besserer Korrosionsschutz und Haftgrund, Standard vor der KTL im Automobilbau.
**Chromatfrei:** Chrom(VI) ist giftig und krebserzeugend; Ersatz durch Titan-/Zirkon- oder Silan-basierte Verfahren.
*Bewertung: Der Unterschied amorph/gering gegenüber kristallin/hochwertig wird erfasst; der Grund für den Chromatersatz (Cr(VI)-Toxizität) wird genannt.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**

Ein Bauteil aus Polypropylen (PP) soll lackiert werden, der Lack perlt jedoch ab. Erklären Sie die Ursache und nennen Sie zwei geeignete Vorbehandlungen.

**Ursache:** PP ist unpolar und hat eine sehr niedrige Oberflächenenergie — der Lack benetzt nicht und haftet nicht.

**Abhilfe:** Die Oberfläche aktivieren, um polare Gruppen und eine höhere Oberflächenenergie zu erzeugen.

**Verfahren:** z. B. Beflammen, Corona-Entladung oder Plasma.

*Bewertung: Die niedrige Oberflächenenergie unpolarer Kunststoffe wird als Ursache erkannt; zwei Aktivierungsverfahren werden genannt.*

# L-65 · Anstrichaufbau

*Grundierung, Füller, Decklack — und der Schichtaufbau der Autolackierung*

**Prüfungsteil 1** · A 8.2 · A 10

Ein Beschichtungssystem verteilt die Aufgaben auf mehrere Lagen — jede übernimmt, was eine einzelne Schicht nicht leisten kann.

## Warum mehrere Schichten

Ein Anstrich muss zugleich haften, vor Korrosion schützen, Steinschlag aushalten und Farbe und Glanz liefern. Das gelingt nicht mit einer einzigen Lage. Die Aufgaben werden daher auf mehrere, aufeinander abgestimmte Schichten verteilt — jede mit eigener Funktion und eigener Rezeptur. Man spricht vom Anstrichaufbau.

## Die drei Grundfunktionen

- Grundanstrich (Grundierung) — das „Fundament“: Haftung auf dem Substrat, Sperrwirkung und, bei Metall, Korrosionsschutz.
- Zwischenanstrich (Füller) — Abdecken und Egalisieren des Untergrunds, Schleifbarkeit, Steinschlagschutz.
- Deckanstrich (Decklack) — Schutz vor Bewitterung, Chemikalien und Lösemitteln sowie Farbe und Glanz.

## Pigmentierungshöhe je Lage

Die Pigmentierung nimmt von unten nach oben ab; die Lagen werden „fetter“. Richtwerte für das Pigment-Bindemittel-Verhältnis P/B:

- Grundanstrich (2 bis 4) : 1
- Zwischenanstrich (1,5 bis 2,5) : 1
- Deckanstrich (0,1 bis 1) : 1

## Schichtaufbau der Autolackierung

Beispiel 1 — Automobillackierung (Stahlblech):

- Phosphatierung ~1 µm — Haftung und Korrosionsschutz
- Kathodische Elektrotauchlackierung (KTL) 18 bis 25 µm — Korrosionsschutz
- Füller 20 bis 40 µm — Abdecken, Steinschlagschutz
- Decklack: entweder Uni-Decklack 35 bis 40 µm oder Basislack (Metallic 10 bis 15 µm, Uni-Ton 15 bis 25 µm) plus Klarlack rund 30 bis 50 µm, Schwerpunkt um 40 µm (siehe L-115)

Gesamtaufbau rund 75 bis 140 µm auf 0,7 mm Blech, je nach Decklackvariante und Lage innerhalb der genannten Bereiche.

Beispiel 2 — Schwerer Korrosionsschutz (Stahlbrücke, ISO 12944 Kategorie C5, hohe Schutzdauer):

- Strahlen auf Sa 2½ — definierte Rauheit und Sauberkeit
- Zinkstaubreiche Epoxid-Grundierung 60–80 µm — kathodischer Schutz
- Epoxid-Zwischenschicht 120–160 µm — Sperrschicht gegen eindringende Feuchtigkeit
- PUR-Decklack 60–80 µm — UV- und Bewitterungsschutz

Gesamtaufbau ca. 240–320 µm; für sehr hohe Schutzdauer (über 25 Jahre) 320 µm (siehe L-99).

**Merksatz**

Jede Lage muss zur darunterliegenden passen. Ein harter, spröder Decklack auf einem flexibleren Grund reißt beim Verformen — der Grund gibt nach, der Deck kann nicht folgen. Deshalb nach oben abnehmende Pigmentierung und zunehmende Flexibilität: mager, also stark pigmentiert, unten und fett, also bindemittelreich, oben.

### Zwischenhaftung zwischen den Lagen

So wichtig wie die Haftung auf dem Untergrund ist die Zwischenhaftung — die Haftung einer Lage auf der darunterliegenden. Versagt sie, blättern die Schichten voneinander ab (Delamination).

Ein häufiges Problem sind wandernde Additive: Oberflächenwachse (für Mattierung oder Gleiteffekt), Silicon-Additive (Verlauf, Slip) und auch Wachse, die als Rheologiehilfsmittel eingesetzt werden (z. B. mikronisierte Wachse zur Ablaufhemmung), wandern beim Trocknen an die Oberfläche der unteren Lage und bilden dort eine niederenergetische, schlecht benetzbare Schicht. Bei höheren Verarbeitungstemperaturen — Sommerlackierung oder Heißspritzen — schmelzen diese Wachse teilweise und reichern sich noch stärker an der Grenzfläche an. Der nächste Lack benetzt sie schlecht und haftet nur mangelhaft — die Folge sind Krater oder abblätternde Schichten. Grundsatz: Was an der Grenzfläche nicht hingehört, führt dort regelmäßig zu Haftungsproblemen. Weitere Ursachen: eine vollständig durchgehärtete, glatt-glänzende untere Lage ohne mechanischen Halt, Verunreinigungen (Fett, Staub, Schleifstaub, Handschweiß) sowie chemisch unverträgliche oder zu spät überlackierte Systeme.

Gegenmaßnahmen: Zwischenschliff (raut auf und entfernt die wandernde Deckschicht), sauberes Arbeiten, Einhalten des Überlackierfensters, verträgliche Systeme und die bewusste Wahl überlackierbarer Additive — Silicon etwa knapp dosieren.

### KTL als Applikation nach A 8.2

Die kathodische Elektrotauchlackierung ist zugleich eine Applikationsart: Das Werkstück wird in ein wässriges Lackbad getaucht und als Kathode geschaltet. Der Lack scheidet sich elektrisch gleichmäßig ab und erreicht auch Hohlräume, Kanten und Falze. Genau diese vollständige, gleichmäßige Bedeckung macht die KTL zur zuverlässigen untersten Lacklage im Korrosionsschutz.

**Stichwörter:** Anstrichaufbau, Grundierung, Grundanstrich, Füller, Zwischenanstrich, Decklack, Klarlack, Basislack, Uni-Decklack, Phosphatierung, KTL, Elektrotauchlackierung, Steinschlagschutz, Pigmentierungshöhe, P/B, mager nach fett, Korrosionsschutz

*Quellen: Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur; ISO 12944*

---

## Übungsblatt Ü-65 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Nennen Sie die drei Grundfunktionen im Anstrichaufbau und geben Sie zu jeder eine typische Aufgabe an.

**Grundanstrich:** Das „Fundament“ des Aufbaus. Aufgaben: Haftung auf dem Substrat, Sperrwirkung und — bei metallischen Untergründen — Korrosionsschutz.
**Zwischenanstrich:** Der Füller. Aufgaben: Abdecken und Egalisieren des Untergrunds, gute Schleifbarkeit, Steinschlagschutz.
**Deckanstrich:** Der Decklack. Aufgaben: Schutz vor Bewitterung, Chemikalien und Lösemitteln sowie Farbe und Glanz.
**Ergänzung:** Die drei Lagen sind aufeinander abgestimmt; nach oben nimmt die Pigmentierung ab und die Flexibilität zu.

*Bewertung: Zu jeder Lage werden Name und Aufgabe getrennt genannt. Die Ergänzung zur abnehmenden Pigmentierung zeigt, dass der Aufbau als System und nicht als Aufzählung verstanden wurde.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**

Eine Zweischicht-Metalliclackierung besteht aus Phosphatierung 1 µm, KTL 22 µm, Füller 30 µm, Basislack 12 µm und Klarlack 38 µm. Berechnen Sie die Gesamttrockenschichtdicke und den Anteil des Decklacksystems aus Basislack und Klarlack.

**Gegeben:** 1 µm + 22 µm + 30 µm + 12 µm + 38 µm

**Gesamtdicke:** 1 + 22 + 30 + 12 + 38 = 103 µm

**Decklacksystem:** Basislack + Klarlack = 12 + 38 = 50 µm

**Anteil:** 50 µm / 103 µm · 100 % = 48,5 %

**Antwortsatz:** Der Aufbau ist rund 103 µm dick; das Decklacksystem macht mit 50 µm etwa 48,5 % der Gesamtdicke aus.

*Bewertung: Beide Teilfragen werden beantwortet, nicht nur die Summe. Einheiten werden durchgängig mitgeführt und der Anteil ausdrücklich als Prozentwert angegeben.*

**Frage 3** **(Anwendung, 7 Punkte)**

Erläutern Sie die Faustregel „mager nach fett“ und beurteilen Sie einen harten, spröden Decklack auf einem flexiblen Grundanstrich.

**Bedeutung der Regel:** „Mager“ heißt stark pigmentiert und bindemittelarm, „fett“ bindemittelreich. Die Pigmentierung nimmt von unten nach oben ab, die Flexibilität zu.

**Beurteilung des Falls:** Der flexible Grund verformt sich unter Belastung stärker als der harte, spröde Deck. Der Deck kann der Bewegung nicht folgen.

**Folge:** Im Deck entstehen Zugspannungen, die zu Rissen führen. Die Schichten sind nicht aufeinander abgestimmt.

**Abhilfe:** Deck flexibler einstellen oder Grund härter wählen, sodass die Flexibilität nach oben zunimmt statt abzunehmen.

*Bewertung: Die Regel wird nicht nur zitiert, sondern auf den konkreten Fall angewendet und mit der Spannungsentstehung begründet. Die Abhilfe zeigt, dass der Zusammenhang verstanden ist.*

# L-66 · Applikationsverfahren I — Hand- und Fließverfahren

*Streichen, Rollen, Rakeln, Tauchen, Walzen und Gießen*

**Prüfungsteil 1** · A 8.2

Handverfahren sind universell und verlustarm, aber langsam — Fließverfahren beschichten ebene Serienteile schnell und nahezu ohne Overspray.

## Handgeräte und ihre Aufgabe

- Pinsel — für kleine Flächen, Ecken, Kanten und Ausbesserungen. Der Auftrag hängt stark von der Handführung ab.
- Rolle — für große ebene Flächen wie Wände. Schneller als der Pinsel, hinterlässt aber eine feine Struktur.
- Rakel (Ziehklinge, Kastenrakel) — zieht auf einer ebenen Unterlage eine gut reproduzierbare Nassschicht aus; im Labor das Standardgerät für vergleichbare Prüfbeschichtungen.

## Streichen und Rollen

Streichen und Rollen kommen mit einfachster Ausrüstung aus und tragen den Lack nahezu vollständig auf — es entsteht kaum Overspray. Dafür sind sie langsam, die Schichtdicke schwankt mit der Handführung, und es bleiben leicht Pinselstriche oder Strukturen zurück. Der Lack muss lange genug „offen“ bleiben, damit er verläuft und die Spuren sich schließen; ein strukturviskoses, gut verlaufendes Fließverhalten ist hier erwünscht (siehe L-10). Praxisbeispiele: Streichen von Holzfenstern, Türen und Fassadenflächen im Maler- und Bautenschutzbetrieb; Rollen von Innen- und Außenwänden auf der Baustelle sowie großflächigen Industrieböden.

## Rakeln für definierte Schichten

Beim Rakeln zieht eine Klinge mit festem Spalt eine Nassschicht aus, deren Dicke sich über den Volumenfestkörper in eine berechenbare Trockenschichtdicke umrechnen lässt. Der Nassfilm entspricht allerdings nicht exakt dem Spalt: Durch die Scherung des Films unter der Klinge fällt er regelmäßig dünner aus als das Spaltmaß — praktisch nur etwa 60 bis 70 % davon; wie viel genau, hängt von Fließverhalten, Ziehgeschwindigkeit, Benetzung und Klingengeometrie ab. Die Nassschichtdicke wird deshalb gemessen und nicht aus dem Spaltmaß angenommen. Gerade deshalb verlangt eine reproduzierbare Prüfbeschichtung standardisierte Bedingungen: konstante Ziehgeschwindigkeit, Temperatur und damit Viskosität. Praxisbeispiele: vergleichbare Prüfbeschichtungen nach A 8.4 im Lacklabor (Prüftafeln nach ISO 1514, Schichtdicke gemessen nach DIN EN ISO 2808), industriell beim Beschichten von Stahlband, Verpackungsfolien und Druckplatten.

## Tauchen (Tauchlackieren)

Beim Tauchen wird das Werkstück in ein Lackbad getaucht und langsam wieder herausgezogen; überschüssiger Lack läuft ins Bad zurück und geht nicht verloren. Das Verfahren ist einfach, schnell und materialsparend und eignet sich für viele kleine, geometrisch komplexe Teile. Praxisbeispiele: Schrauben, Muttern, Federn, Ketten, Drahtkörbe, Werkzeuggriffe, Elektromotorwicklungen. Nachteilig ist die ungleichmäßige Schicht — oben dünn, unten dick, mit Tropfen- und Zapfenbildung an der tiefsten Kante. Die kathodische Elektrotauchlackierung (KTL) behebt das durch elektrische Abscheidung und ist in L-65 beschrieben.

### Fließbeschichten: Walzen und Gießen

• Walzenauftrag (Coil Coating) — rotierende Walzen übertragen den Lack auf ebenes Band- oder Plattenmaterial. Sehr schnell und verlustarm. Typisch: Stahlband für Dachprofile, Fassadenverkleidungen und Haushaltsgeräte (Kühlschränke, Waschmaschinen).
• Gießen (Vorhanggießen, Curtain Coating) — das Werkstück durchfährt einen frei fallenden Lackvorhang. Der Überschuss wird aufgefangen und umgewälzt; der Auftrag ist sehr gleichmäßig und nahezu verlustfrei. Typisch: MDF-Möbelplatten, Fußbodendielen, Türoberflächen in der Holzindustrie.
• Beide verlangen ebene, seriengleiche Teile — dafür ist ihr Auftragswirkungsgrad sehr hoch.

**Merksatz**

Die Methode folgt dem Teil: ebene Serienware verlangt nach Walzen oder Gießen, komplexe Einzelstücke nach Streichen oder Tauchen, eine reproduzierbare Prüfschicht nach dem Rakel. Kein Verfahren ist für alles das beste.

**Stichwörter:** Streichen, Rollen, Pinsel, Rolle, Rakel, Ziehklinge, Kastenrakel, Tauchlackieren, Tauchen, Zapfenbildung, Walzenauftrag, Coil Coating, Gießen, Vorhanggießen, Curtain Coating, Prüfbeschichtung, Auftragswirkungsgrad, Nassschichtdicke
*Quellen: Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur; DIN EN ISO 2808; ISO 1514*

## Übungsblatt Ü-66 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**
Unterscheiden Sie Streichen, Tauchen und Gießen nach Eignung, Schichtbild und Auftragswirkungsgrad.

**Streichen:** Einfachste Ausrüstung, geeignet für kleine Flächen, Kanten, Ausbesserungen und Einzelstücke. Der Auftrag ist verlustarm, also mit hohem Wirkungsgrad, aber langsam und mit sichtbarer Struktur beziehungsweise Pinselstrichen.
**Tauchen:** Geeignet für viele kleine, komplex geformte Teile. Schnell und materialsparend, da der Überschuss ins Bad zurückläuft. Das Schichtbild ist ungleichmäßig: oben dünn, unten dick, mit Zapfenbildung an der tiefsten Kante.
**Gießen:** Nur für ebene, durchlaufende Serienteile geeignet. Sehr gleichmäßige Schicht und sehr hoher Wirkungsgrad, weil der Überschuss aufgefangen und umgewälzt wird.
**Einordnung:** Die Wahl des Verfahrens richtet sich nach Teilgeometrie und Stückzahl, nicht nach einer allgemein „besten“ Methode.
*Bewertung: Zu jedem Verfahren werden alle drei geforderten Kriterien beantwortet, und die Einordnung erfolgt nach Teilgeometrie statt als bloße Aufzählung.*

**Frage 2** **(Berechnung, 9 Punkte)**
Mit einem Rakel wird eine Nassschicht von 150 µm aufgezogen. Der Lack hat einen Volumenfestkörper von 45 %. Berechnen Sie die Trockenschichtdicke und den prozentualen Schwund.

**Gegeben:** NSD = 150 µm; VFK = 45 %
**Ansatz:** TSD = NSD · VFK / 100
**Rechnung:** TSD = 150 µm · 45 / 100 = 67,5 µm
**Schwund:** Schwund = (150 µm − 67,5 µm) / 150 µm · 100 % = 55,0 %
**Antwortsatz:** Die Trockenschichtdicke beträgt 67,5 µm; die Schicht schrumpft um 55,0 % ihrer Nassdicke.
*Bewertung: Trockenschichtdicke über TSD = NSD · VFK/100 und Schwund als Anteil der Nassdicke werden beide korrekt berechnet; Einheiten werden durchgängig mitgeführt und ein Antwortsatz formuliert.*

**Frage 3** **(Anwendung, 7 Punkte)**

Ein tief profiliertes Gussteil in kleiner Serie soll grundiert werden. Begründen Sie, warum Tauchen hier dem Gießen vorzuziehen ist, und nennen Sie den Hauptnachteil des Tauchens samt Gegenmaßnahme.

**Eignung:** Beim Tauchen wird das Teil vollständig ins Bad eingetaucht; dadurch werden auch Hohlräume, Kanten und Hinterschneidungen erreicht. Gießen setzt ebene, durchlaufende Teile voraus und würde die Profilierung nicht gleichmäßig bedecken.

**Wirtschaftlichkeit:** Der Überschuss läuft ins Bad zurück, der Wirkungsgrad ist hoch — auch bei kleiner Serie sinnvoll.

**Hauptnachteil:** Ungleichmäßige Schichtdicke, oben dünn und unten dick, mit Tropfen- und Zapfenbildung an der tiefsten Kante.

**Gegenmaßnahme:** Definierte, langsame Ziehgeschwindigkeit und ausreichende Abtropfzeit; grundsätzlich die kathodische Elektrotauchlackierung, die elektrisch eine gleichmäßige Schicht abscheidet (siehe L-65).

*Bewertung: Die Begründung stützt sich auf die Teilgeometrie, und die Gegenmaßnahme reicht bis zur KTL — das zeigt Verständnis für das gesamte Tauchverfahren.*

# L-67 · Applikationsverfahren II — Spritzverfahren

*Druckluft, Niederdruck, Airless, Heißspritzen und elektrostatisch*

**Prüfungsteil 1** · A 8.2

Spritzen liefert glatte, schnelle Aufträge auf beliebig geformte Teile — der Preis ist Overspray, den jedes Verfahren anders begrenzt.

## Warum gespritzt wird

Spritzverfahren zerstäuben den Lack in feine Tröpfchen und tragen ihn berührungslos auf. Sie erreichen glatte, streifenfreie Oberflächen auch auf gewölbten oder profilierten Teilen und sind schnell. Ihr grundsätzliches Problem ist der Overspray: Ein Teil des zerstäubten Lacks erreicht das Werkstück nicht. Wie groß dieser Verlust ist, beschreibt der Auftragswirkungsgrad — der Anteil des eingesetzten Lacks, der tatsächlich auf dem Teil landet. Die Verfahren unterscheiden sich vor allem darin, wie sie diesen Verlust klein halten. Für den Materialbedarf gilt: Ergiebigkeit A = 10 · VFK / TSD in m²/l; der theoretische Bedarf wird durch den Auftragswirkungsgrad (als Dezimalzahl) geteilt — die Formeln stehen gesammelt in L-68.

## Druckluft- und Niederdruckspritzen

Beim konventionellen Druckluftspritzen zerstäubt Druckluft den Lack an der Düse. Das ergibt eine sehr feine Zerstäubung und ein hervorragendes Lackbild, aber viel Sprühnebel — der Auftragswirkungsgrad ist niedrig, als Richtwert um 30 %. Das Niederdruckspritzen (HVLP, „high volume low pressure“) arbeitet mit viel Luft bei geringem Druck; die Tröpfchen treffen langsamer auf und prallen weniger ab. Der Auftragswirkungsgrad steigt dadurch deutlich, als Richtwert über 60 % — deshalb ist HVLP heute Standard. Typische Kenngrößen — Druckluftspritzen: Düse 1,2–1,8 mm, 2–4 bar, Viskosität ~14–22 s (DIN 4 mm); Einsatz z. B. Reparaturlackierung, Kunststoffteile. HVLP: gleiche Düsengröße, ≤ 0,7 bar Luftdruck an der Luftkappe; Einsatz z. B. KFZ-Reparatur, Möbel, Holzhandwerk.

## Airless und luftunterstützt

Beim Airless-Spritzen presst eine Pumpe den Lack unter hohem Druck durch eine feine Düse; er zerstäubt allein durch die Entspannung, ganz ohne Luft. Das ergibt dicke Schichten in einem Gang und wenig Sprühnebel, aber ein gröberes Lackbild. Das luftunterstützte Airless (Airmix) gibt an der Düse zusätzlich etwas Luft zu und verbindet den hohen Durchsatz des Airless mit einem feineren Bild. Typische Kenngrößen — Airless: Düse 0,3–0,6 mm, 100–250 bar, Viskosität bis 60 s (DIN 4 mm); Einsatz z. B. Stahlbau, Brücken, Tanks. Airmix: Düse 0,3–0,5 mm, 50–150 bar + 1–3 bar Luft; Einsatz z. B. Fahrzeugrahmen, Stahlkonstruktionen. Alle Zahlen sind typische Ausgangswerte — Düse und Druck werden am Material und an der Anlage eingestellt.

## Heißspritzen

Beim Heißspritzen wird der Lack vor der Düse erwärmt. Da die Viskosität einer Lacklösung stark mit der Temperatur fällt (siehe L-10), lässt sich ein festkörperreicher Lack ohne zusätzliches Lösemittel verspritzen. Das senkt die Lösemittelemission bei gleichbleibender Verarbeitbarkeit. Voraussetzung sind eine beheizbare Anlage und ein Lösemittelgemisch, das nicht schon in der Pistole antrocknet; bei 2K-Lacken ist außerdem zu beachten, dass die Topfzeit mit steigender Temperatur deutlich sinkt. Typische Kenngrößen: Düse 1,5–2,5 mm, Materialtemperatur 40–80 °C, Viskosität kalt 80–150 mPas → nach Erwärmung 20–50 mPas; Einsatz z. B. Holz- und Metallindustrie (HS-Lacke).

### Elektrostatisches Spritzen

Hier werden die Lacktröpfchen elektrisch aufgeladen, das geerdete Werkstück zieht sie an. Die Tröpfchen folgen den Feldlinien und schlagen sich auch auf der Rückseite nieder — der sogenannte Umgriff. Dadurch sinkt der Overspray stark und der Auftragswirkungsgrad wird sehr hoch, als Richtwert bis über 90 %. Grenzen: Tiefe Vertiefungen und Hohlräume werden wegen des Faradaykäfig-Effekts schlecht erreicht; an scharfen Kanten ist es umgekehrt — dort verdichtet sich das Feld, und es wird eher zu viel aufgetragen (Kanteneffekt), und der Lack muss elektrisch geeignet eingestellt sein. Typische Kenngrößen: Spannung 30–100 kV, Viskosität rund 15–22 s im DIN-4-Becher (20 °C). Für die elektrische Einstellung gilt: Bei lösemittelhaltigen Lacken wird in der Praxis überwiegend der spezifische Widerstand in MΩ·cm betrachtet, nicht eine Leitfähigkeit in µS/cm; der geeignete Bereich ist an Lack und Anlage anzupassen und den Hersteller- bzw. Anlagenunterlagen zu entnehmen. DIN EN ISO 15091 unterscheidet dabei ausdrücklich zwischen Leitfähigkeits- und Widerstandsmessung. Lernbar ist dabei die Richtung, nicht die Zahl: Ist der Lack zu leitfähig, fließt die Ladung über Schlauch und Materialzuführung ab, die Aufladung bricht zusammen und der Umgriff geht verloren — zugleich steigt bei lösemittelhaltigen Systemen die Gefahr des Rückschlags zur geerdeten Anlage. Ist er zu hochohmig, nimmt er zu wenig Ladung auf und wird nicht ausreichend zum Werkstück geführt. Einsatz z. B. Automobil-OEM-Fertigung, Haushaltsgeräte.

### Auftragswirkungsgrad im Vergleich

- Druckluftspritzen — feinstes Bild, aber niedrigster Wirkungsgrad (~30 %).
- Niederdruck/HVLP — feines Bild, deutlich höherer Wirkungsgrad (> 60 %).
- Airless/Airmix — hoher Durchsatz, mittlerer Wirkungsgrad.
- Elektrostatisch — höchster Wirkungsgrad durch Umgriff (bis > 90 %).
- Alle Werte sind Richtwerte; sie hängen von Teilgeometrie, Einstellung und Lack ab.

**Merksatz**

Jedes Spritzverfahren tauscht Zerstäubungsfeinheit gegen Auftragswirkungsgrad. Druckluftspritzen zerstäubt am feinsten und verliert am meisten; Airless zerstäubt allein über den Materialdruck; HVLP senkt den Overspray über den niedrigen Luftdruck an der Luftkappe. Die Elektrostatik holt Overspray zurück, versagt aber im Faradaykäfig und trägt an Kanten zu dick auf. Über Materialkosten und Emissionen entscheidet der Auftragswirkungsgrad, nicht der Düsendurchmesser.

**Stichwörter:** Spritzen, Zerstäubung, Overspray, Auftragswirkungsgrad, Umgriff, Druckluftspritzen, Niederdruckspritzen, HVLP, Airless, Airmix, luftunterstützt, Heißspritzen, elektrostatisches Spritzen, Sprühnebel, Faradaykäfig

*Quellen: Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur; DIN EN ISO 15091*

## Übungsblatt Ü-67 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Erläutern Sie, warum das konventionelle Druckluftspritzen einen niedrigen, das elektrostatische Spritzen einen hohen Auftragswirkungsgrad hat.

**Begriff:** Der Auftragswirkungsgrad ist der Anteil des eingesetzten Lacks, der tatsächlich auf dem Werkstück landet.

**Druckluftspritzen:** Druckluft zerstäubt sehr fein, erzeugt aber viel Sprühnebel. Ein großer Teil der Tröpfchen fliegt am Teil vorbei oder prallt ab. Der Wirkungsgrad ist niedrig, als Richtwert um 30 %.

**Elektrostatisch:** Die Tröpfchen sind elektrisch geladen und werden vom geerdeten Werkstück angezogen. Sie folgen den Feldlinien und erreichen auch die Rückseite — der Umgriff. Dadurch entsteht wenig Overspray, der Wirkungsgrad ist sehr hoch, als Richtwert bis über 90 %.

**Folgerung:** Der Unterschied liegt nicht an der Zerstäubung, sondern daran, wohin die Tröpfchen fliegen.

*Bewertung: Der Unterschied wird auf den Umgriff zurückgeführt statt auf die Zerstäubung, und die Zahlen werden ausdrücklich als Richtwerte gekennzeichnet.*

**Frage 2** **(Berechnung, 10 Punkte)**

Eine Fläche von 180 m² wird mit 50 µm Trockenschichtdicke beschichtet. Der Lack hat 55 % Volumenfestkörper. Vergleichen Sie den Materialbedarf bei Druckluftspritzen (Wirkungsgrad 30 %) und HVLP (Wirkungsgrad 65 %).

**Schritt 1 — Ergiebigkeit:** A = 10 · VFK / TSD = 10 · 55 / 50 = 11,0 m²/l

**Schritt 2 — theoretischer Bedarf:** V = 180 m² / 11,0 m²/l = 16,36 l

**Schritt 3 — Druckluft (30 %):** V = 16,36 l / 0,30 = 54,5 l

**Schritt 4 — HVLP (65 %):** V = 16,36 l / 0,65 = 25,2 l

**Antwortsatz:** Druckluftspritzen braucht rund 54,5 l, HVLP nur rund 25,2 l — eine Ersparnis von etwa 29 l, also mehr als die Hälfte.

*Bewertung: Der theoretische Bedarf wird einmal berechnet und dann durch beide Wirkungsgrade dividiert — nicht multipliziert. Die Ersparnis wird beziffert statt nur behauptet.*

**Frage 3** **(Anwendung, 7 Punkte)**

Ein festkörperreicher 2K-Lack ist bei Raumtemperatur zu zäh zum Spritzen. Der Betrieb möchte kein zusätzliches Lösemittel zugeben. Nennen und begründen Sie ein geeignetes Verfahren und eine Voraussetzung.

**Verfahren:** Heißspritzen.

**Begründung:** Die Viskosität einer Lacklösung fällt stark mit steigender Temperatur (siehe L-10). Der vorgewärmte Lack lässt sich verspritzen, ohne dass Lösemittel zugegeben wird; der Festkörper bleibt erhalten und die Emission steigt nicht.

**Voraussetzung:** Eine beheizbare Anlage und ein Lösemittelgemisch, das in der beheizten Pistole nicht antrocknet. Bei 2K ist zusätzlich die Topfzeit zu beachten, die mit steigender Temperatur sinkt.

*Bewertung: Die Antwort verknüpft den Viskositäts-Temperatur-Zusammenhang mit der Emissionsvorgabe. Der Hinweis auf die sinkende Topfzeit bei 2K zeigt Praxisdenken.*

# L-68 · Applikation III — Sicherheit, Wirkungsgrad und Qualität

*Sicheres Verarbeiten, Auftragswirkungsgrad und Beurteilung der Beschichtung*

**Prüfungsteil 1** · A 8.2 · A 8.4

Die Applikation entscheidet über Emission, Sicherheit und Beschichtungsqualität — und all das hängt von Untergrund und Verfahren zusammen.

## Sicherheitsregeln beim Verarbeiten

- Lösemitteldämpfe sind gesundheitsschädlich und bilden mit Luft explosionsfähige Gemische — für ausreichende Absaugung und Belüftung sorgen und die untere Explosionsgrenze nicht erreichen (siehe L-170).
- Zündquellen fernhalten; beim elektrostatischen Spritzen und beim Umfüllen erden, um Funken durch statische Aufladung zu vermeiden.
- Persönliche Schutzausrüstung tragen: Atemschutz, Handschuhe, Schutzbrille. Sicherheitsdatenblatt und Gefahrensymbole beachten.
- Spritznebel und Lackschlämme fachgerecht als Gefahrstoff entsorgen.

## Auftragswirkungsgrad

Der Auftragswirkungsgrad ist der Anteil des eingesetzten Lacks, der tatsächlich als Film auf dem Werkstück landet. Er geht direkt in den Materialbedarf ein: Bei 60 % Wirkungsgrad muss rund das 1,7-Fache der theoretisch nötigen Menge bereitgestellt werden. Ein hoher Wirkungsgrad spart Material und senkt zugleich Emission und Abfall — er ist damit zugleich Umweltschutz (siehe L-168).

## Ergiebigkeit und Materialbedarf

```
Ergiebigkeit    A = 10 · VFK / TSD    [m²/l]
Materialbedarf  V = Fläche / A / (Wirkungsgrad/100)   [l]
VFK Volumenfestkörper in %, TSD Trockenschichtdicke in µm
```

## Genormte Beurteilung

Zur objektiven Beurteilung dienen genormte Prüfungen statt bloßer Sichtkontrolle. Die Trockenschichtdicke misst man zerstörungsfrei magnetinduktiv oder per Wirbelstrom nach DIN EN ISO 2808 — sie bestimmt Schutzwirkung und Materialbedarf. Die Haftung prüft der Gitterschnitt nach DIN EN ISO 2409: Ein Gittermuster wird bis zum Untergrund eingeschnitten und in Kennwerte von 0 (kein Ausbruch, beste Haftung) bis 5 (großflächiges Abplatzen) eingestuft. Der Glanz wird per Reflektometer eingeordnet (siehe L-80); weitere genormte Prüfungen betreffen Härte, Elastizität und Schlagfestigkeit. Wichtig bleibt der Untergrundbezug: Auf rauem oder saugendem Untergrund bindet mehr Material und die Schicht wirkt matter, Fett- oder Trennmittelreste erzeugen Krater (siehe L-12) — deshalb gehört zu jedem Prüfwert die Angabe von Untergrund und Verfahren.

## Typische Oberflächenstörungen

- Läufer und Gardinen — zu dick aufgetragen oder zu niedrige Viskosität.
- Orangenhaut — zu grobe Zerstäubung oder zu früher Verlaufstillstand.
- Krater — Benetzungsstörung durch Verunreinigung oder Silicon.
- Trockenspritzer (Overspray-Anflug) — zu großer Spritzabstand, der Lack trocknet in der Luft an.
- Kocher und Nadelstiche — eingeschlossenes Lösemittel oder Luft entweicht beim Trocknen.

**Merksatz**

Beurteilen heißt dokumentieren: Verfahren, Einstellung, Untergrund, Schichtdicke und Fehlerbild gehören zusammen erfasst. Erst dieser Zusammenhang macht ein Ergebnis wiederholbar — und einen Fehler abstellbar.

**Stichwörter:** Sicherheit, Explosionsgrenze, Absaugung, Erdung, persönliche Schutzausrüstung, Sicherheitsdatenblatt, Auftragswirkungsgrad, Ergiebigkeit, Materialbedarf, Oberflächenbeschaffenheit, Oberflächenstörung, Läufer, Orangenhaut, Krater, Dokumentation, Gitterschnitt, Schichtdickenmessung, genormte Prüfung
*Quellen: Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur; DIN EN ISO 2409; DIN EN ISO 2808*

## Übungsblatt Ü-68 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 7 Punkte)**
Nennen Sie vier Sicherheitsregeln beim Verarbeiten lösemittelhaltiger Beschichtungsstoffe und begründen Sie jeweils kurz.

**Absaugung und Belüftung:** Lösemitteldämpfe sind gesundheitsschädlich und bilden explosionsfähige Gemische. Ausreichende Luftführung hält die Konzentration unter der unteren Explosionsgrenze.
**Zündquellen und Erdung:** Funken können das Gemisch entzünden. Beim Spritzen und Umfüllen ist zu erden, um statische Aufladung abzuleiten.
**Persönliche Schutzausrüstung:** Atemschutz, Handschuhe und Schutzbrille schützen vor Einatmen und Hautkontakt. Das Sicherheitsdatenblatt gibt die konkreten Gefahren und Schutzmaßnahmen vor.
**Entsorgung:** Spritznebel und Lackschlämme sind Gefahrstoffe und fachgerecht zu entsorgen, nicht über den Hausmüll oder das Abwasser.
*Bewertung: Jede Regel wird begründet. Der Bezug auf die untere Explosionsgrenze und das Sicherheitsdatenblatt zeigt, dass die Grundlagen bekannt sind — die Ausbildungsordnung führt Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Arbeit als übergreifende, in allen Bereichen zu vermittelnde Position.*

**Frage 2** **(Berechnung, 10 Punkte)**
Ein Objekt von 320 m² soll mit 40 µm Trockenschichtdicke beschichtet werden. Der Lack hat 50 % Volumenfestkörper, der Auftragswirkungsgrad beträgt 55 %. Berechnen Sie Ergiebigkeit sowie theoretischen und tatsächlichen Materialbedarf.

**Schritt 1 — Ergiebigkeit:** $A = 10 \cdot VFK / TSD = 10 \cdot 50 / 40 = 12{,}5$ m²/l
**Schritt 2 — theoretischer Bedarf:** $V = 320$ m² / 12,5 m²/l = 25,6 l
**Schritt 3 — tatsächlicher Bedarf:** Bei 55 % Wirkungsgrad: $V = 25{,}6$ l / 0,55 = 46,5 l
**Antwortsatz:** Die Ergiebigkeit beträgt 12,5 m²/l, der theoretische Bedarf 25,6 l und der tatsächliche rund 46,5 l.
**Hinweis:** Ohne Einrechnen des Wirkungsgrades wäre der Bedarf um rund 45 % zu niedrig angesetzt.
*Bewertung: Der Wirkungsgrad wird korrekt als Division angesetzt. Der Hinweis beziffert die Folge eines Weglassens — genau der häufigste Fehler bei dieser Aufgabenart.*

**Frage 3** **(Anwendung, 8 Punkte)**
Auf einem entfetteten, leicht angeschliffenen Stahlblech zeigt eine gespritzte Grundierung stellenweise Krater, an anderer Stelle Läufer. Ordnen Sie beide Fehler ihren Ursachen zu und nennen Sie je eine Gegenmaßnahme.

**Krater:** Ursache ist eine örtliche Benetzungsstörung, meist ein Fett-, Silicon- oder Trennmittelrest. Dessen niedrige Oberflächenenergie lässt den Lack zurückweichen (siehe L-12). Gegenmaßnahme: rückstandsfrei reinigen, siliconhaltige Quellen fernhalten, gegebenenfalls ein Verlaufadditiv einsetzen.
**Läufer:** Ursache ist ein zu dicker Auftrag oder eine zu niedrige Verarbeitungsviskosität, häufig an Kanten und in Vertiefungen. Gegenmaßnahme: dünner spritzen (Abstand und Menge anpassen), die Viskosität anheben oder ein stärker strukturviskoses Material verwenden.
**Bezug zum Untergrund:** Das Anschleifen erhöht Rauheit und Oberflächenenergie und verbessert die Benetzung. Die Krater stammen daher nicht vom Untergrund selbst, sondern von einer Restverunreinigung.
**Dokumentation:** Verfahren, Einstellung, Untergrundzustand und Fehlerbild sind gemeinsam festzuhalten, damit der Fehler gezielt abgestellt werden kann.
*Bewertung: Die beiden Fehler werden sauber nach Ursache getrennt. Dass das Anschleifen die Benetzung eher verbessert und die Krater damit auf eine Verunreinigung zurückgehen, ist die geforderte Verknüpfung von Untergrund und Applikation.*

# L-69 · Trocknungsverfahren und -anlagen

*Ablüften, Umluft- und Strahlungstrockner, Objekttemperatur und Trockengrad*

**Prüfungsteil 1** · A 8.3 · A 8.2

Nach dem Applizieren wird der Nassfilm getrocknet oder eingebrannt. Vorher muss er ablüften; für das Einbrennen zählt nicht die Ofenlufttemperatur, sondern die Objekttemperatur über der Zeit. Getrocknet wird durch Konvektion (Umluft) oder Strahlung (IR/NIR), und der Fortschritt wird in Trockengradstufen beschrieben.

## Ablüften vor dem Trocknen

Zwischen Applikation und Trocknung steht das Ablüften: Der frisch aufgetragene Nassfilm bleibt bei Raumtemperatur oder nur leicht erhöhter Temperatur eine definierte Zeit stehen, bevor er eingebrannt oder forciert getrocknet wird. In dieser Ablüftzone entweicht der größte Teil der leichtflüchtigen Löse- beziehungsweise Dispersionsmittel kontrolliert über die Oberfläche. Heizt man zu früh und zu schnell auf, verschließt sich die Filmoberfläche, während im Inneren noch Lösemittel oder Wasser sitzt — beim Durchbrechen entstehen Kocher, Nadelstiche und Blasen (siehe L-68). Bei Wasserlacken ist das Ablüften besonders wichtig, weil Wasser langsam verdunstet und eine hohe Verdunstungswärme besitzt; hier hilft bewegte, temperierte Luft in einer eigenen Zwischenzone.

## Trocknungsanlagen: Konvektion und Strahlung

Getrocknet wird auf zwei physikalischen Wegen. Bei der Konvektionstrocknung umströmt erwärmte Luft das Werkstück und überträgt die Wärme über die Oberfläche; der Umlufttrockner ist der Standard der Serienlackierung — gleichmäßig und für beliebige, auch verdeckte Geometrien geeignet, aber träge und energieintensiv, weil erst Ofen und Luft aufgeheizt werden. Bei der Strahlungstrocknung heizen Infrarotstrahler den Film berührungslos und sehr schnell direkt auf; kurzwellige NIR-Strahlung dringt tiefer ein und wirkt rascher, mittel- und langwellige eher oberflächennah. Grenzen der Strahlung sind Abschattung und komplexe Geometrie — nur die bestrahlten Flächen werden warm, Kanten können überhitzen; deshalb kombiniert man oft IR-Vorwärmung mit anschließender Umluft. Die forcierte Trocknung beschleunigt physikalisch oder oxidativ trocknende sowie niedrig einbrennende Lacke bei mäßiger Temperatur (etwa 40 bis 80 °C), ohne echtes Hochtemperatur-Einbrennen — typisch in der Autoreparaturlackierung (siehe L-116). Die Strahlungshärtung mit UV oder Elektronenstrahl trocknet dagegen in Sekunden und ist keine thermische Trocknung (siehe L-24).

## Objekttemperatur statt Ofentemperatur

Für die Vernetzung von Einbrennlacken zählt nicht die eingestellte Ofenlufttemperatur, sondern die Temperatur, die das Werkstück selbst erreicht — die Objekttemperatur — und die Zeit, die sie gehalten wird. Die Einbrennbedingung wird deshalb als Objekttemperatur und Haltezeit angegeben, zum Beispiel 20 Minuten bei 160 °C Objekttemperatur. Dünnwandige Teile erreichen diese Temperatur rasch, massige oder dickwandige langsam; sie brauchen eine längere Ofenzeit, um dieselbe Objekttemperatur und Haltezeit zu erreichen. Gemessen wird mit mitlaufenden Temperaturfühlern und Datenloggern — der sogenannten Ofenreise (Temperaturprofil). Der Durchlauf gliedert sich in Aufheizphase (das Objekt erreicht die Solltemperatur), Halte- oder Vernetzungsphase (die Objekttemperatur wird die geforderte Zeit gehalten) und Abkühlphase.

### Ofenzeit — Aufheizen plus Halten

```
t(Ofen) = t(Aufheiz) + t(Halte)

Beispiel (Objekttemperatur 160 °C):
  geforderte Haltezeit t(Halte)   = 20 min
  Aufheizzeit t(Aufheiz)          =  8 min
  t(Ofen) = 8 min + 20 min        = 28 min

t(Ofen)     Mindest-Verweilzeit im Ofen
t(Aufheiz)  Zeit bis zur Objekt-Solltemperatur
t(Halte)    geforderte Haltezeit bei Objekttemperatur
```

### Trockengradstufen

Der Trocknungsfortschritt wird in Stufen beschrieben:
• staubtrocken — aufgewirbelter Staub bleibt nicht mehr haften; die Oberfläche klebt aber noch und darf nicht berührt werden.
• klebfrei (oberflächentrocken) — die Oberfläche klebt nicht mehr.
• grifffest (handhabungsfest) — das Teil lässt sich anfassen, wenden und stapeln, ohne Abdrücke.
• durchgetrocknet — auch in der Tiefe fest; erst dann volle mechanische und chemische Beständigkeit.
Die Prüfung dieser Stufen ist in der Normenreihe DIN EN ISO 9117 geregelt (unter anderem ein Oberflächentrockentest mit Glasperlen, Ballotini, und ein mechanischer Recorder-Test). Einzelheiten in L-153.

**Merksatz**

Erst ablüften, dann trocknen. Für das Einbrennen zählen Objekttemperatur und Haltezeit, nicht die Ofenlufttemperatur — Ofenzeit = Aufheizen + Halten. Umluft trocknet gleichmäßig, IR/NIR schnell, aber sichtliniengebunden. Der Fortschritt läuft von staubtrocken über grifffest bis durchgetrocknet.

**Stichwörter:** Ablüften, Ablüftzone, Umlufttrockner, Konvektionstrocknung, Infrarot, NIR-Strahlung, Strahlungstrocknung, forcierte Trocknung, Objekttemperatur, Haltezeit, Ofenreise, Trockengrad, staubtrocken, grifffest, durchgetrocknet, DIN EN ISO 9117
*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; DIN EN ISO 9117*

---

## Übungsblatt Ü-69 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**
Erklären Sie den Zweck des Ablüftens vor dem Einbrennen und beschreiben Sie, welcher Lackfehler bei zu schnellem Aufheizen entsteht.

**Zweck des Ablüftens:** Der frisch aufgetragene Nassfilm gibt in der Ablüftzone bei Raumtemperatur oder nur leicht erhöhter Temperatur den größten Teil der leichtflüchtigen Löse- beziehungsweise Dispersionsmittel kontrolliert über die Oberfläche ab, bevor er eingebrannt wird.
**Fehler bei zu schnellem Aufheizen:** Verschließt sich die Filmoberfläche durch zu frühes, zu schnelles Aufheizen, während innen noch Lösemittel oder Wasser sitzt, so bricht dieses beim Trocknen durch die Haut — es entstehen Kocher, Nadelstiche und Blasen.
**Besonderheit Wasserlack:** Bei Wasserlacken ist das Ablüften besonders wichtig, weil Wasser langsam verdunstet und eine hohe Verdunstungswärme besitzt; oft wird eine eigene temperierte Zwischenzone mit bewegter Luft eingesetzt.
*Bewertung: Die Antwort verknüpft den Zweck (kontrollierte Lösemittelabgabe) mit der Folge des Weglassens (Kocher/Nadelstiche) und erkennt die Sonderrolle des Wasserlacks. Genau dieser Ursache-Wirkung-Zusammenhang wird erwartet.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**

Ein Einbrennlack fordert 20 Minuten bei 160 °C Objekttemperatur. Ein massives Werkstück erreicht diese Objekttemperatur erst nach 8 Minuten Aufheizzeit. Bestimmen Sie die Mindest-Verweilzeit im Ofen und begründen Sie, warum die Ofenlufttemperatur allein nicht ausreicht.

**Gegeben:** Haltezeit t(Halte) = 20 min bei 160 °C Objekttemperatur; Aufheizzeit t(Aufheiz) = 8 min.
**Ansatz:** t(Ofen) = t(Aufheiz) + t(Halte)
**Rechnung:** t(Ofen) = 8 min + 20 min = 28 min
**Begründung:** Die Vernetzung läuft erst ab, wenn das Objekt selbst 160 °C erreicht hat. Die Ofenluft kann längst 160 °C haben, während das massige Teil noch kälter ist; maßgeblich sind Objekttemperatur und Haltezeit, nicht die Lufttemperatur.
**Antwortsatz:** Das Teil muss mindestens 28 Minuten im Ofen bleiben.

*Bewertung: Die Antwort trennt Aufheiz- und Haltezeit sauber und erklärt, warum die Objekttemperatur die maßgebliche Größe ist — der Punkt, der in der Praxis über die vollständige Aushärtung entscheidet.*

**Frage 3** **(Anwendung, 8 Punkte)**

Vergleichen Sie Umluft- und Infrarottrocknung hinsichtlich Wärmeübertragung, Geschwindigkeit und Grenzen und nennen Sie je einen typischen Einsatzfall.

**Umluft (Konvektion):** Erwärmte Luft überträgt die Wärme über die Oberfläche des Teils. Gleichmäßig und für beliebige, auch verdeckte Geometrien geeignet, aber träge und energieintensiv, weil Ofen und Luft mit aufgeheizt werden. Einsatz: Standard der Serien-Einbrennlackierung.
**Infrarot/NIR (Strahlung):** Infrarotstrahler heizen den Film berührungslos und sehr schnell direkt auf; NIR dringt tiefer ein. Grenzen: nur bestrahlte Flächen werden warm (Abschattung, komplexe Geometrie), Kanten können überhitzen. Einsatz: schnelle Vorwärmung oder Trocknung flächiger Teile.
**Kombination:** In der Praxis werden IR-Vorwärmung und Umluft häufig kombiniert, um Geschwindigkeit und Gleichmäßigkeit zu verbinden.

*Bewertung: Beide Verfahren werden über den Wärmeübertragungsweg (Konvektion gegen Strahlung) unterschieden, ihre Grenzen benannt und mit einem Einsatzfall belegt. Der Hinweis auf die Kombination zeigt Praxisverständnis.*

Kapitel 7

# Wasserlacke und Elektrotauchlackierung

# L-70 · Wässrige Systeme

*Hydrosole, Dispersionen und der Wasserberg*

**Prüfungsteil 2** · A 10

In Wasser können Polymere echt gelöst oder in unterschiedlich groben dispersen Zuständen vorliegen — Art und Größe der Teilchen bestimmen die Eigenschaften.

## Voraussetzung für Wasserlöslichkeit

Um in Wasser löslich zu sein, müssen Polymermoleküle ionische Gruppen wie Carboxylat- oder Ammoniumgruppen besitzen oder eine beträchtliche Zahl nichtionischer, hydrophiler Gruppen wie Hydroxy-, Carbonyl-, Amino- und Amidgruppen oder Polyetherketten. Bei den ionischen Polymeren unterscheidet man anionische, kationische und zwitterionische Typen: Anionische sind meist Polycarbonsäuren und werden mit Aminen neutralisiert, kationische in der Regel Polyamine und werden mit einfachen Säuren versetzt. Zwitterionische Typen tragen beide Ladungsarten zugleich — eine saure (z. B. Carboxyl-) und eine basische (z. B. Amino-)Gruppe im selben Molekül; im Zwitterion liegen sie dann als Carboxylat- beziehungsweise Ammoniumgruppe vor; nach außen sind sie insgesamt neutral.

## Die dispersen Zustände nach Teilchengröße

- Lösung (Hydrosol) — klar, Molmasse unter 20 000 g/mol, Teilchen unter 0,01 µm, ionische Moleküle, Hilfsstoff Neutralisationsmittel.
- Kolloidale Sekundärdispersion (Hydrogel) — fast klar bis opaleszierend, unter 100 000 g/mol, unter 0,1 µm, Knäuel aus zahlreichen Molekülen, wenig Neutralisationsmittel.
- Emulsion beziehungsweise Suspension — trüb bis milchig, über 0,1 µm, Tröpfchen oder Körnchen, Hilfsstoff Emulgator.
- Primärdispersion (Kunststoffdispersion) — mäßig trüb bis milchig, über 100 000 g/mol, 0,05 bis 5 µm, nahezu kugelförmige Polymerisatteilchen, Emulgator und gegebenenfalls Schutzkolloid.

Die genannten Größen- und Molmassenbereiche sind Orientierungswerte, keine scharfen Definitionsgrenzen; unterschieden werden die Begriffe in erster Linie über Dispersionszustand, Teilchenart und Herstellungsweg. In dieser Einteilung bezeichnet Hydrogel nicht ein wassergequollenes Polymernetzwerk, sondern den kolloidalen Dispersionszustand zwischen molekulardisperser Lösung und gröberer Dispersion.

## Primärdispersionen sind etwas anderes

Primärdispersionen entstehen nicht durch Dispergierung eines fertigen Polymers, sondern grundsätzlich durch Emulsionspolymerisation. Dabei werden die Monomeren mit einem Emulgator in Wasser fein verteilt und mit einem wasserlöslichen Initiator gestartet; die Polymerisation läuft in den monomergequollenen Micellen und den wachsenden Latexteilchen ab — es entstehen sofort feste Polymerteilchen. Diese in Wasser dispergierten Polymerteilchen heißen Latex (ursprünglich der Milchsaft des Kautschukbaums, heute auch die synthetische Kunststoffdispersion). Die kompakten Latexteilchen haben eine hohe molare Masse; zur Stabilisierung gegen Koagulation enthalten sie Tenside und eventuell Schutzkolloide.

**Merksatz**

Weil die Makromoleküle innerhalb der kompakten Latexteilchen und nicht frei in der Wasserphase sitzen, hat ihre molare Masse praktisch keinen Einfluss auf die Viskosität. Das erlaubt hochmolekulare Filmbildner, die in echt gelöster Form zu unzulässig hohen Viskositäten führen würden.

### Der Wasserberg

Als Wasserberg bezeichnet man das Durchlaufen eines Viskositätsmaximums beim Verdünnen einer konzentrierten Polyelektrolytlösung mit Wasser. Diese unerwünschte Anomalie zeigen mehr oder weniger alle stark ionischen, echten Polymerlösungen; beim Maximum existieren aufgeweitete Knäuel und Molekülassoziate. Abflachen oder beseitigen lässt sie sich durch Reduzierung der Anzahl ionischer Gruppen bei gleichzeitiger Erhöhung der Hydrophilie, durch Wechsel vom Hydrosol zum kolloidalen Hydrogel oder durch Zusatz wassermischbarer Cosolventien wie Butylglykol. Letzteres gilt als Notlösung, da der Gehalt an organischen Lösemitteln möglichst niedrig bleiben soll.

### Verdünnen auf Ziel-Festkörper

```
Beim Verdünnen bleibt die Festkörpermasse erhalten: m(FK) = m(Lack) · FK/100. Daraus folgt
   die neue Gesamtmasse m(gesamt) = m(FK) / (FK(neu)/100) und die zuzugebende Wassermenge
   m(Wasser) = m(gesamt) − m(Lack).
```

**Stichwörter:** Wasserlack, wasserverdünnbar, Hydrosol, Hydrogel, Sekundärdispersion, Primärdispersion, Kunststoffdispersion, Latexteilchen, Emulsionspolymerisation, Schutzkolloid, Cosolvens, Wasserberg, Polyelektrolyt, Neutralisationsmittel

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie*

---

## Übungsblatt Ü-70 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Unterscheiden Sie Hydrosol, Hydrogel und Primärdispersion nach Teilchengröße, molarer Masse und Aussehen.

**Hydrosol:** Echte, molekulardisperse Lösung. Teilchen unter 0,01 µm, molare Masse unter 20 000 g/mol, klares Aussehen. Hilfsstoff ist ein Neutralisationsmittel, also Amin oder Säure.

**Hydrogel:** Kolloidale Sekundärdispersion aus Knäueln zahlreicher assoziierter Moleküle. Teilchen unter 0,1 µm, molare Masse unter 100 000 g/mol, fast klares, opaleszierendes Aussehen. Wenig Neutralisationsmittel.

**Primärdispersion:** Kunststoffdispersion aus der Emulsionspolymerisation. Nahezu kugelförmige Polymerisatteilchen von 0,05 bis 5 µm, molare Masse über 100 000 g/mol, mäßig trübes bis milchiges Aussehen. Hilfsstoffe sind Emulgator und gegebenenfalls Schutzkolloid.

**Wesentlicher Unterschied:** Hydrosol und Hydrogel entstehen durch Auflösen beziehungsweise Dispergieren eines fertigen Polymers. Primärdispersionen entstehen dagegen grundsätzlich durch das Verfahren der Emulsionspolymerisation.

*Bewertung: Alle drei geforderten Kriterien werden für jedes System angegeben. Der Hinweis auf die unterschiedliche Entstehung ist der entscheidende systematische Unterschied.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**

Ein wasserverdünnbarer Lack mit 45 % Festkörper soll auf 38 % eingestellt werden. Berechnen Sie die benötigte Wassermenge für 2,5 kg Lack.

**Überlegung:** Die Masse des Festkörpers bleibt beim Verdünnen konstant. Nur die Gesamtmasse ändert sich.

**Schritt 1 — Festkörpermasse:** m(FK) = 2500 g · 0,45 = 1125 g

**Schritt 2 — Zielgesamtmasse:** m(gesamt) = m(FK) / 0,38 = 1125 g / 0,38 = 2960,5 g

**Schritt 3 — Wassermenge:** m(Wasser) = 2960,5 g − 2500 g = 460,5 g

**Antwortsatz:** Es sind rund 461 g Wasser zuzugeben.

**Probe:** 1125 g / 2960,5 g = 0,380 — die Zielvorgabe ist erfüllt.

*Bewertung: Der Erhaltungssatz für die Festkörpermasse wird als Ansatz vorangestellt. Die abschließende Probe kostet wenig Zeit und sichert das Ergebnis ab.*

**Frage 3** **(Anwendung, 7 Punkte)**

Beim Verdünnen eines wasserverdünnbaren Bindemittels steigt die Viskosität zunächst an, statt zu fallen. Benennen und erklären Sie das Phänomen und nennen Sie zwei Gegenmaßnahmen.

**Bezeichnung:** Das Phänomen heißt Wasserberg: das Durchlaufen eines Viskositätsmaximums beim Verdünnen einer konzentrierten Polyelektrolytlösung mit Wasser.

**Auftreten:** Es zeigen mehr oder weniger alle stark ionischen, echten Polymerlösungen. Beim Viskositätsmaximum liegen aufgeweitete Knäuel und Molekülassoziate vor.

**Bewertung:** Lacktechnologisch ist die Anomalie unerwünscht, weil das Einstellen der Verarbeitungsviskosität unkontrollierbar wird.

**Erste Gegenmaßnahme:** Reduzierung der Anzahl ionischer Gruppen im Molekül bei gleichzeitiger Erhöhung der Hydrophilie, etwa durch Einbau von Polyethylenoxid-Ketten.

**Zweite Gegenmaßnahme:** Wechsel vom molekulardispersen Hydrosol zum kolloidalen Hydrogel. Als dritte Möglichkeit käme der Zusatz wassermischbarer Cosolventien wie Butylglykol infrage — dies gilt jedoch als Notlösung, da der Gehalt an organischen Lösemitteln aus ökologischen Gründen niedrig bleiben soll.

*Bewertung: Das Phänomen wird als Wasserberg benannt, über das Viskositätsmaximum beim Verdünnen einer Polyelektrolytlösung erklärt, und es werden zwei Gegenmaßnahmen aus dem Blatt genannt. Wird zusätzlich das Cosolvens angeführt, muss es als Notlösung eingeordnet sein — diese ökologische Einordnung ist ein ausdrückliches Prüfungskriterium.*

# L-71 · Wasser als Lacklösemittel

*Warum wässrige Lacke — und warum Wasser ein schwieriges Lösemittel ist*

**Prüfungsteil 2** · A 10 · B 12

Wasser ist billig und emissionsarm, aber ein besonderes Lösemittel: hohe Verdunstungsenthalpie und Oberflächenspannung erschweren Trocknung und Benetzung.

## Warum wässrige Lacke

Der Antrieb ist zweifach: Ökologie und Ökonomie. Wässrige Lacke ersetzen organische Lösemittel weitgehend durch Wasser und senken so die Lösemittelemission (siehe L-168). Und Wasser ist billig und überall verfügbar. Deshalb verdrängen sie in vielen Bereichen die lösemittelhaltigen Systeme; gesetzliche Grenzwerte für Lösemittel treiben die Umstellung zusätzlich; das schont Umwelt und Arbeitsplatz.

## Ein besonderes Lösemittel

Wasser verhält sich anders als organische Lösemittel. Die Verdunstungsenthalpie ist die Energie, die man zuführen muss, um eine bestimmte Menge Flüssigkeit bei gleicher Temperatur zu verdampfen — sie steckt im Aufbrechen der Anziehung zwischen den Molekülen. Bei Wasser ist diese Anziehung wegen der Wasserstoffbrücken besonders stark, deshalb ist die Verdunstungsenthalpie sehr hoch: rund 2258 kJ/kg, etwa sechsmal so viel wie bei einem organischen Lösemittel. Praktisch heißt das: Das Verdunsten braucht viel Energie, läuft langsam, kühlt den Film ab und hängt stark von Temperatur und Luftfeuchte ab — bei hoher Luftfeuchte trocknet der Lack kaum. Deshalb braucht das Einbrennen wässriger Lacke oft mehr Energie.

## Hohe Oberflächenspannung

Wasser hat mit rund 72 mN/m eine viel höhere Oberflächenspannung als organische Lösemittel (etwa 25–30 mN/m). Dadurch benetzt es unpolare Untergründe schlecht — man braucht Netzmittel, damit der Lack gleichmäßig verläuft und nicht abperlt. Die Faustregel dahinter: Benetzung wird begünstigt, wenn die Oberflächenspannung des Lacks niedriger ist als die Oberflächenenergie des Untergrunds — unpolare Untergründe liegen weit unter den 72 mN/m des Wassers. Maßgeblich ist aber der Randwinkel, in den zusätzlich die Grenzflächenspannung zwischen Lack und Untergrund eingeht (Young-Gleichung, siehe L-12). Das gilt besonders für glatte, fettige oder unpolare Oberflächen.

## Weitere Folgen

Die starken Wasserstoffbrücken bedingen diese Eigenschaften. Hinzu kommen die Korrosionsgefahr an Stahlanlagen und ein enges Verarbeitungsfenster, weil die Trocknung stark vom Raumklima abhängt. Auch Schaum und Konservierung sind bei wässrigen Systemen ein Thema.

**Merksatz**

Die meisten Lackbindemittel sind unpolar und hydrophob — in Wasser also nicht ohne Weiteres verträglich. Sie müssen erst gezielt wasserverdünnbar gemacht werden (siehe L-72). Genau darum dreht sich die Technik der wässrigen Lacke.

**Merksatz**

Wasser ist billig und emissionsarm, aber schwierig: hohe Verdunstungsenthalpie (langsame, klimaabhängige Trocknung) und hohe Oberflächenspannung (schlechte Benetzung). Bindemittel müssen erst wasserverträglich gemacht werden.

**Stichwörter:** wässrige Lacke, wasserverdünnbar, Wasser, Lösemittel, Verdunstungsenthalpie, Oberflächenspannung, Benetzung, Netzmittel, Wasserstoffbrücken, Emission, Ökologie, hydrophob, Trocknung

*Quellen: Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur; Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie*

## Übungsblatt Ü-71 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**
Was treibt die Entwicklung wässriger Lacke, und welche zwei Eigenschaften machen Wasser als Lösemittel schwierig?

**Antrieb:** Ökologie (weniger Lösemittelemission, siehe L-168) und Ökonomie (Wasser ist billig und überall verfügbar).
**Schwierigkeit 1:** Sehr hohe Verdunstungsenthalpie (~2258 kJ/kg): Wasser verdunstet langsam und energieintensiv; die Trocknung hängt stark von Temperatur und Luftfeuchte ab.
**Schwierigkeit 2:** Hohe Oberflächenspannung (~72 mN/m): schlechte Benetzung unpolarer Untergründe.
**Zusatz:** Außerdem: Korrosionsgefahr an Stahlanlagen und ein enges Verarbeitungsfenster.
*Bewertung: Der doppelte Antrieb (Ökologie und Ökonomie) und die zwei physikalischen Schwierigkeiten (Verdunstungsenthalpie, Oberflächenspannung) werden mit ihren Folgen genannt.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**
Wasser hat eine Verdunstungsenthalpie von 2258 kJ/kg, Xylol etwa 344 kJ/kg. Um welchen Faktor mehr Energie braucht das Verdunsten von Wasser, und was folgt daraus für die Trocknung?

**Ansatz:** Faktor = Verdunstungsenthalpie Wasser / Xylol
**Rechnung:** 2258 / 344 = 6,6
**Antwortsatz:** Das Verdunsten von Wasser braucht rund 6,6-mal so viel Energie.
**Folge:** Deshalb trocknet der wässrige Film langsamer und stark abhängig von Temperatur und Luftfeuchte — bei feuchtem, kühlem Wetter kann die Trocknung problematisch werden.
*Bewertung: Der Faktor wird korrekt gebildet und praktisch gedeutet: die hohe Verdunstungsenthalpie erklärt die langsame, klimaabhängige Trocknung wässriger Lacke.*

**Frage 3** **(Anwendung, 7 Punkte)**
Ein wässriger Lack perlt auf einem unpolaren Untergrund ab und verläuft ungleichmäßig. Erklären Sie die Ursache und die Gegenmaßnahme.

**Ursache:** Die hohe Oberflächenspannung des Wassers (~72 mN/m) ist deutlich höher als die des Untergrunds; der Lack benetzt ihn deshalb schlecht und zieht sich zusammen.
**Gegenmaßnahme:** Netzmittel (oberflächenaktive Substanzen) senken die Oberflächenspannung des Lacks, sodass er den Untergrund benetzt und gleichmäßig verläuft.
**Ergänzung:** Auch eine Reinigung/Vorbehandlung des Untergrunds kann die Benetzung verbessern.
**Kernpunkt:** Als Faustregel wird Benetzung begünstigt, wenn die Oberflächenspannung des Lacks unter der Oberflächenenergie des Untergrunds liegt; maßgeblich ist aber der Randwinkel nach Young (siehe L-12).
*Bewertung: Das Abperlen wird auf die hohe Oberflächenspannung zurückgeführt und das Netzmittel als Gegenmaßnahme erklärt — mit dem richtigen Prinzip (Lack-Oberflächenspannung senken).*

# L-72 · Bindemittel im Wasser — die drei Wege

*Primärdispersion, Sekundärdispersion oder wässrige Lösung*

**Prüfungsteil 2** · A 10 · B 12

Hydrophobe Bindemittel kommen auf drei Wegen ins Wasser: als Primärdispersion, als Sekundärdispersion oder als neutralisierte wässrige Lösung.

## Das Grundproblem

Lackbindemittel sind meist hydrophob und lassen sich nicht einfach in Wasser lösen (siehe L-71). Damit sie trotzdem als wässriges System vorliegen, gibt es drei grundsätzliche Wege — sie unterscheiden sich darin, wie das Bindemittel ins Wasser gebracht wird (siehe auch L-70). Alle drei haben eigene Vor- und Nachteile und Einsatzgebiete.

## Weg 1: Primärdispersion

Das Bindemittel wird direkt im Wasser hergestellt — durch Emulsionspolymerisation (siehe L-73). Es entstehen feine, dispergierte Polymerteilchen (Latex). So sind sehr hohe Molmassen möglich, ohne dass die Dispersion zäh wird (siehe L-73). Primärdispersionen sind die Grundlage der Dispersionsfarben. Die Latexteilchen sind rund 0,05 bis 5 µm groß (typisch 0,1 bis 1 µm) — die Dispersion ist milchig.

## Weg 2: Sekundärdispersion

Das fertige Bindemittel wird zuerst getrennt hergestellt (in Lösung oder Schmelze) und dann nachträglich in Wasser dispergiert. Diesen Weg nutzt man vor allem für Polyurethan- und Acrylat-Bindemittel höherer Wertigkeit. Der Umweg über die getrennte Herstellung erlaubt ein maßgeschneidertes Bindemittel. Die Teilchen sind häufig feiner — typische Werte liegen im kolloidalen Bereich (etwa 0,01 bis 0,1 µm), sodass die Dispersion fast klar bis opaleszierend wirkt. Das ist allerdings eine Tendenz und kein Definitionsmerkmal; entscheidend ist der Herstellweg (siehe L-74).

## Weg 3: Wässrige Lösung

Bindemittel mit eingebauten Carboxylgruppen werden mit einem Amin neutralisiert und dadurch wasserlöslich (siehe L-75). Solche Bindemittel sind meist niedermolekular und werden vor allem für Einbrennlacke eingesetzt, wo sie mit einem Aminoharz vernetzen (siehe L-31). Hier liegen die Moleküle einzeln gelöst vor (molekulardispers, unter etwa 0,01 µm) — die Lösung ist klar.

## Wann welcher Weg

Primärdispersionen liefern hohe Molmasse und physikalisch trocknende Filme ohne Einbrennen — typische Anwendungen: Fassadenfarbe (Styrol-Acrylat), Innenfarbe (Polyvinylacetat), Holzlasur (Reinacrylat). Sekundärdispersionen erlauben maßgeschneiderte Chemie für hochwertige Systeme: PU-Parkettlack, 2K-PU-Wasserbasislack für Möbel, PU-Decklack im Korrosionsschutz. Wässrige Lösungen sind niedermolekular und werden überwiegend eingebrannt: wasserverdünnbarer Alkyd-Einbrennlack (Automobil), wasserbasierter Klarlack im Coil Coating; daneben gibt es oxidativ lufttrocknende wasserverdünnbare Alkyde (siehe L-82, L-17). Oft kombiniert man mehrere Bindemittelarten; die Wahl richtet sich nach Anwendung und Trocknungsart.

**Merksatz**

Drei Wege ins Wasser: im Wasser hergestellt (Primärdispersion), nachträglich dispergiert (Sekundärdispersion) oder durch Neutralisation gelöst (wässrige Lösung). Der Weg bestimmt Molmasse und Einsatzgebiet.

**Stichwörter:** Primärdispersion, Sekundärdispersion, wässrige Lösung, Bindemitteldispersion, Emulsionspolymerisation, Neutralisation, Carboxylgruppe, Latex, Molmasse, wasserverdünnbar, Polyurethandispersion, Einbrennlack

*Quellen: Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur; Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie*

## Übungsblatt Ü-72 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**
Nennen Sie die drei Wege, ein hydrophobes Bindemittel ins Wasser zu bringen, und je ein Merkmal.

**Primärdispersion:** Das Bindemittel wird direkt im Wasser durch Emulsionspolymerisation hergestellt; sehr hohe Molmasse möglich (siehe L-73).
**Sekundärdispersion:** Das fertige Bindemittel wird getrennt hergestellt und dann nachträglich in Wasser dispergiert; für hochwertige PUR- und Acrylatsysteme.
**Wässrige Lösung:** Bindemittel mit Carboxylgruppen werden mit Amin neutralisiert und dadurch wasserlöslich; meist niedermolekular, für Einbrennlacke.
**Kernidee:** Die Wege unterscheiden sich darin, wie und wann das Bindemittel ins Wasser gelangt.
*Bewertung: Alle drei Wege werden mit einem treffenden Merkmal (Herstellort bzw. Neutralisation, Molmasse, Einsatzgebiet) genannt und klar voneinander abgegrenzt.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**
Eine Primärdispersion hat 50 % Festkörper. Wie viel Dispersion wird für einen Trockenfilm von 4,0 kg benötigt, und wie viel Wasser enthält diese Menge?

**Gegeben:** Festkörper = 50 %; Trockenfilm = 4,0 kg
**Ansatz:** Dispersionsmenge = Trockenfilm / Festkörpergehalt
**Rechnung:** 4,0 kg / 0,50 = 8,0 kg
**Antwortsatz:** Es werden 8,0 kg Dispersion benötigt; davon sind 4,0 kg Wasser.
*Bewertung: Aus Trockenfilm und Festkörpergehalt wird die Dispersionsmenge korrekt bestimmt und der Wasseranteil richtig erkannt.*

**Frage 3** **(Anwendung, 7 Punkte)**
Für einen physikalisch trocknenden Dispersionsanstrich mit möglichst hoher Molmasse: Welchen der drei Wege wählen Sie und warum?

**Wahl:** Die Primärdispersion (Emulsionspolymerisation).
**Begründung Molmasse:** Nur hier wird das Polymer im Wasser aufgebaut; sehr hohe Molmassen sind möglich, ohne dass die Dispersion zäh wird.
**Begründung Trocknung:** Hochmolekulare Dispersionsteilchen bilden beim Verdunsten des Wassers einen festen, physikalisch trocknenden Film.
**Warum nicht Lösung:** Die wässrige Lösung wäre niedermolekular (eher für Einbrennlacke) und käme für einen hochmolekularen, lufttrocknenden Anstrich nicht infrage.
*Bewertung: Die Primärdispersion wird mit der erreichbaren hohen Molmasse begründet und die wässrige Lösung folgerichtig ausgeschlossen — die geforderte Zuordnung nach Anforderung.*

# L-73 · Primärdispersionen und Emulsionspolymerisation

*Im Wasser polymerisiert — hohe Molmasse bei niedriger Viskosität*

**Prüfungsteil 2** · B 12 · A 10

Bei der Emulsionspolymerisation entstehen feine Polymerteilchen direkt im Wasser; die Dispersion bleibt dünnflüssig, obwohl die Molmasse sehr hoch ist.

## Die Emulsionspolymerisation

Zutaten sind Monomere, ein Emulgator, ein Initiator und Wasser. Die Monomeren polymerisieren im Wasser zu feinen Polymerteilchen — es entsteht eine Primärdispersion (auch Latex genannt, siehe L-72). Der Festkörper solcher Dispersionen liegt oft bei etwa 40 bis 55 %. Primärdispersionen brauchen keine Neutralisation von Carboxylgruppen — die Stabilisierung erfolgt über adsorbierte Emulgatoren, nicht über eingebaute Säuregruppen. Viele Dispersionen enthalten dennoch etwas einpolymerisierte Acryl- oder Methacrylsäure; deren Carboxylgruppen an der Teilchenoberfläche werden mit Ammoniak auf pH 8–9 neutralisiert, was die Stabilität zusätzlich erhöht — daher der typische Ammoniakgeruch, zu dem auch Reste des häufig eingesetzten Initiators Ammoniumperoxodisulfat beitragen.

## Emulgatoren und Schutzkolloide

Die feinen Teilchen müssen stabilisiert werden, sonst koagulieren sie. Das geschieht elektrostatisch durch anionische Emulgatoren (Tenside) und sterisch durch Schutzkolloide wie Polyvinylalkohol oder Celluloseether (siehe L-50, L-51). Emulgatorreste können später die Wasserfestigkeit des Films mindern; man hält ihren Anteil deshalb möglichst niedrig.

## Ein- oder mehrstufig, Kern-Schale

Einstufig entstehen homogene Teilchen. Stufenweise lässt sich eine Kern-Schale-Morphologie aufbauen — etwa ein harter Kern mit weicher Schale. So verbindet man scheinbar gegensätzliche Eigenschaften wie Härte und gute Filmbildung in einem Teilchen. Die Morphologie steuert man über die Reihenfolge der Monomerzugabe.

## Metastabil und koagulierbar

Primärdispersionen sind nur metastabil. Starke Scherung, Frost, mehrwertige Kationen (Salze) oder eine pH-Änderung können die Teilchen zur Koagulation bringen — dann fällt das Bindemittel unwiederbringlich aus. Deshalb sollten Dispersionen möglichst frostfrei gelagert werden; wie empfindlich eine Dispersion auf Frost reagiert, hängt vom konkreten System und von der Zahl der Frost-/Auftauzyklen ab.

## Der große Vorteil

Die Viskosität einer Dispersion hängt nicht an der Molmasse des Polymers, sondern an Teilchengröße und -verteilung. Deshalb lassen sich sehr hohe Molmassen bei niedriger Viskosität erreichen — das ergibt harte, beständige Filme aus einem dünnflüssigen Lack. Das ist der Kernvorteil wässriger Primärdispersionen. Ein Styrol-Acrylat für Fassadenfarbe hat eine Molmasse von mehreren Millionen g/mol — dieselbe Polymermenge echt gelöst wäre ein unverarbeitbares Gel; als Dispersion bleibt sie spritzbar und gut verarbeitbar.

**Merksatz**

Emulsionspolymerisation baut das Polymer im Wasser auf. Emulgator und Schutzkolloid stabilisieren die metastabilen Teilchen. Hohe Molmasse trotz niedriger Viskosität ist der entscheidende Vorteil.

**Stichwörter:** Primärdispersion, Emulsionspolymerisation, Latex, Emulgator, Schutzkolloid, Polyvinylalkohol, Kern-Schale-Morphologie, metastabil, Koagulation, mehrwertige Kationen, Molmasse, Viskosität, Tensid

*Quellen: Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur; Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie*

## Übungsblatt Ü-73 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**
Was passiert bei der Emulsionspolymerisation, und wie werden die entstehenden Teilchen stabilisiert?

**Ablauf:** Aus Monomeren, Emulgator, Initiator und Wasser entstehen durch Polymerisation im Wasser feine Polymerteilchen — eine Primärdispersion (Latex).
**Stabilisierung elektrostatisch:** Anionische Emulgatoren (Tenside) laden die Teilchen auf, sodass sie sich abstoßen (siehe L-50).
**Stabilisierung sterisch:** Schutzkolloide wie Polyvinylalkohol oder Celluloseether bilden eine Schutzhülle (siehe L-51).
**Zweck:** Ohne Stabilisierung würden die Teilchen koagulieren.
*Bewertung: Der Ablauf (Polymer im Wasser aufgebaut) und beide Stabilisierungsarten (elektrostatisch, sterisch) werden benannt — mit dem richtigen Zweck (Koagulation verhindern).*

**Frage 2** **(Berechnung, 9 Punkte)**
20,0 kg einer Dispersion mit 45 % Festkörper sollen durch Zugabe von Wasser auf 40 % Festkörper verdünnt werden. Wie viel Wasser wird zugegeben?

**Schritt 1 — Festkörpermasse:** 20,0 kg · 0,45 = 9,0 kg (der Festkörper bleibt beim Verdünnen gleich)
**Schritt 2 — neue Gesamtmasse:** 9,0 kg / 0,40 = 22,5 kg
**Schritt 3 — Wasserzugabe:** 22,5 kg − 20,0 kg = 2,5 kg
**Antwortsatz:** Es werden 2,5 kg Wasser zugegeben.
**Kontrolle:** 9,0 kg / 22,5 kg = 0,40 = 40 % — die Zielvorgabe ist erfüllt.
*Bewertung: Der Festkörper wird als konstant erkannt, die neue Gesamtmasse daraus bestimmt und die Wasserzugabe als Differenz berechnet. Die Gegenprobe bestätigt das Ergebnis.*

**Frage 3** **(Anwendung, 7 Punkte)**
Warum kann eine Dispersion sehr hohe Molmasse bei niedriger Viskosität haben, und was bedeutet „metastabil“ praktisch für die Lagerung?

**Molmasse und Viskosität:** Die Viskosität einer Dispersion hängt an Teilchengröße und -verteilung, nicht an der Molmasse des Polymers im Teilchen. Deshalb bleibt sie dünnflüssig, obwohl die Molmasse sehr hoch ist.
**Vorteil:** So erhält man harte, beständige Filme aus einem gut verarbeitbaren, niedrigviskosen Lack.
**Metastabil praktisch:** Die Dispersion ist nur vorübergehend stabil: Frost, starke Scherung, mehrwertige Salze oder pH-Änderung können sie koagulieren lassen.
**Konsequenz:** Deshalb frostfrei lagern, nicht überscheren und den pH-Wert im richtigen Bereich halten.
*Bewertung: Der Zusammenhang (Viskosität an Teilchen, nicht an Molmasse) wird richtig erklärt und „metastabil“ in konkrete Lagerregeln (frostfrei, kein Überscheren) übersetzt.*

# L-74 · Sekundärdispersionen

*Erst das Bindemittel bauen, dann ins Wasser bringen*

**Prüfungsteil 2** · B 12 · A 10

Bei der Sekundärdispersion wird das fertige Bindemittel getrennt hergestellt und dann in Wasser dispergiert — über eingebaute ionische Gruppen selbstdispergierend.

## Was eine Sekundärdispersion ist

Anders als bei der Primärdispersion (im Wasser polymerisiert, siehe L-73) wird das Bindemittel hier zuerst getrennt hergestellt — in Lösung oder Schmelze — und erst danach in Wasser dispergiert (siehe L-72). Sekundärdispersionen können feine Teilchen aufweisen; ein genereller Größenvergleich mit Primärdispersionen ist jedoch nicht als Definitionsmerkmal geeignet.

## Warum dieser Umweg

Der Umweg erlaubt ein maßgeschneidertes Bindemittel mit definierter Struktur und Molmasse, das sich nicht direkt im Wasser aufbauen lässt — allen voran Polyurethane. Auch Epoxid- und Alkydharze lassen sich so ins Wasser bringen; man verbindet definierte Chemie mit einem wässrigen System.

## Selbstdispergierend durch eingebaute Gruppen

Damit das Bindemittel im Wasser stabil bleibt, baut man ionische Gruppen ein — meist Carboxylgruppen, die neutralisiert werden (siehe L-75). Dadurch wird es selbstdispergierend und braucht wenig oder keinen Emulgator. Die neutralisierten Gruppen sitzen an der Teilchenoberfläche und stabilisieren elektrostatisch.

## Polyurethandispersionen (PUD)

Der wichtigste Fall: Ein NCO-terminiertes Präpolymer mit eingebauten Carboxylgruppen wird neutralisiert, in Wasser dispergiert und mit einem Amin oder Hydrazin kettenverlängert (Präpolymer-Ionomer-Verfahren). So entsteht ein hochmolekulares Polyurethan im Wasser (siehe L-25) — die Molmassen-Obergrenze, die L-70 für kolloidale Sekundärdispersionen nennt, gilt für diese kettenverlängerten Systeme nicht. Die Kettenverlängerung treibt die Molmasse hoch, ohne dass die Dispersion zäh wird.

## Eigenschaften und Anwendung

Sekundärdispersionen haben meist feine Teilchen und hohe Molmasse; sie ergeben hochwertige, elastische und beständige Filme. Polyurethandispersionen finden sich in Automobil-, Industrie- und Holzlacken. Sie sind emulgatorarm und daher wasserfester als viele Primärdispersionen, was ihren höheren Preis rechtfertigt.

**Merksatz**

Sekundärdispersion: erst das Bindemittel bauen, dann dispergieren. Eingebaute, neutralisierte Carboxylgruppen machen es selbstdispergierend — Standard für hochwertige Polyurethandispersionen — emulgatorarm und beständig.

**Stichwörter:** Sekundärdispersion, Polyurethandispersion, PUD, Präpolymer, Präpolymer-Ionomer-Verfahren, Kettenverlängerung, Carboxylgruppe, selbstdispergierend, Neutralisation, Isocyanat, hochmolekular, Acrylatdispersion

*Quellen: Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur; Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie*

## Übungsblatt Ü-74 — Musterlösungen

**Frage 1** (Verständnis, 8 Punkte)

Was ist eine Sekundärdispersion, und wie bleibt das Bindemittel im Wasser stabil?

**Definition:** Das Bindemittel wird zuerst getrennt hergestellt (in Lösung oder Schmelze) und erst danach in Wasser dispergiert — anders als die im Wasser polymerisierte Primärdispersion (siehe L-73).

**Warum:** So lässt sich ein maßgeschneidertes Bindemittel mit definierter Struktur bauen, z. B. ein Polyurethan.

**Stabilität:** Man baut ionische Gruppen ein — meist Carboxylgruppen, die neutralisiert werden; das Bindemittel wird selbstdispergierend und braucht wenig Emulgator.

**Vorteil:** Wenig Emulgator bedeutet bessere Wasserfestigkeit des Films.

*Bewertung: Die Sekundärdispersion wird gegen die Primärdispersion abgegrenzt und die Selbstdispergierung über eingebaute, neutralisierte Carboxylgruppen richtig erklärt.*

**Frage 2** (Berechnung, 8 Punkte)

Eine Polyurethandispersion hat 35 % Festkörper. Wie viel Dispersion wird für einen Trockenfilm von 3,5 kg benötigt, und wie viel Wasser enthält diese Menge?

**Gegeben:** Festkörper = 35 %; Trockenfilm = 3,5 kg

**Ansatz:** Dispersionsmenge = Trockenfilm / Festkörpergehalt

**Rechnung:** 3,5 kg / 0,35 = 10,0 kg

**Antwortsatz:** Es werden 10,0 kg Dispersion benötigt; davon sind 6,5 kg Wasser.

*Bewertung: Aus Trockenfilm und Festkörpergehalt wird die Dispersionsmenge korrekt bestimmt und der Wasseranteil richtig erkannt.*

**Frage 3** (Anwendung, 7 Punkte)

Beschreiben Sie in Stichworten den Weg von einem Präpolymer zur fertigen Polyurethandispersion (Präpolymer-Ionomer-Verfahren).

**Präpolymer:** Ein NCO-terminiertes Präpolymer mit eingebauten Carboxylgruppen wird hergestellt (siehe L-25).

**Neutralisieren:** Die Carboxylgruppen werden mit einem Amin neutralisiert — das Präpolymer wird selbstdispergierend.

**Dispergieren:** Das neutralisierte Präpolymer wird in Wasser dispergiert.

**Kettenverlängern:** Mit einem Amin oder Hydrazin wird kettenverlängert; es entsteht ein hochmolekulares Polyurethan im Wasser.

*Bewertung: Die vier Schritte (Präpolymer, Neutralisieren, Dispergieren, Kettenverlängern) werden in richtiger Reihenfolge genannt — das Kernprinzip der PUR-Dispersion.*

# L-75 · Wässrige Bindemittellösungen und Neutralisation

*Carboxylgruppen mit Amin neutralisieren macht wasserlöslich*

**Prüfungsteil 2** · A 10 · B 12

Bindemittel mit Carboxylgruppen werden mit einem Amin neutralisiert; das gebildete Salz macht sie wasserlöslich — meist niedermolekular, für Einbrennlacke.

## Wie ein Bindemittel wasserlöslich wird

Bindemittel mit Carboxylgruppen (–COOH) werden mit einem Amin neutralisiert. Es bildet sich ein Salz (–$COO^-$), das hydrophil ist und das Bindemittel in Wasser löslich macht (siehe L-70, L-72). Weil die Säuregruppen dabei neutralisiert werden, ist die fertige Lösung nicht sauer, sondern leicht alkalisch (typisch pH 7,5 bis 9) — „Säure“ meint hier die eingebauten Säuregruppen, nicht den pH-Wert der Lösung. Auch Sulfonsäure- oder Phosphonsäuregruppen können diese Rolle übernehmen. Sulfonatgruppen sind permanent ionisiert und benötigen kein Neutralisationsmittel — sie stabilisieren pH-unabhängig; Einsatz z. B. in sulfonatmodifizierten PU-Dispersionen für UV-härtbare wässrige Systeme. Phosphonatgruppen haften chemisch an Metalloberflächen und werden deshalb in haftungsverbessernden Grundierungen auf Stahl ohne aufwändige Vorbehandlung eingesetzt. Beim Trocknen kann ein ausreichend flüchtiges Neutralisationsmittel teilweise oder weitgehend entweichen; zusammen mit Filmbildung und ggf. Vernetzung kann dadurch die Wasserbeständigkeit steigen.

## Warum niedermolekular

Für eine echte molekulare Lösung in Wasser sind ausreichend wasserverträgliche bzw. ionisierbare Strukturen erforderlich; in der Praxis sind solche Bindemittel häufig relativ niedermolekular, denn höhermolekulare ließen sich nicht mehr lösen, sondern nur noch dispergieren. Deshalb sind es meist Einbrennlacke: Erst beim Einbrennen vernetzen sie mit einem Aminoharz (siehe L-31) zum hochmolekularen, beständigen Film.

## Die Rolle der Säurezahl

Die Zahl der Carboxylgruppen — gemessen als Säurezahl (siehe L-08) — bestimmt, wie viel Amin für die Neutralisation nötig ist und wie gut sich das Bindemittel löst. Sie ist die Grundlage für die Berechnung der Aminmenge: Für die vollständige Neutralisation gilt m(Amin) = M(Amin) · Säurezahl · m(Bindemittel) / 56 100 (56 100 mg/mol ist die Molmasse von KOH in Milligramm). Je höher die Säurezahl, desto wasserlöslicher — aber desto wasserempfindlicher der Film.

## Neutralisationsmittel: Amine

Eingesetzt werden Ammoniak, primäre Amine (z. B. AMP, 2-Amino-2-methyl-1-propanol), sekundäre (Morpholin, Diethanolamin) und tertiäre (Triethylamin/TEA, Dimethylethanolamin/DMEA). DMEA gehört neben AMP zu den am häufigsten eingesetzten Neutralisationsmitteln für wässrige Bindemittel. Die Wahl beeinflusst pH-Wert, Geruch und Filmeigenschaften. Ammoniak ist am flüchtigsten, Aminoalkohole bleiben etwas länger. Physiologisch sind alle eingesetzten Amine bei Hautkontakt oder Inhalation reizend bis schleimhautschädigend. Ammoniak verursacht starken Schleimhautreiz und ist geruchlich unangenehm. TEA (Triethylamin) kann bei Exposition ein Hornhautödem auslösen. DMEA und AMP (2-Amino-2-methyl-1-propanol) sind weniger flüchtig und haben ein günstigeres Arbeitsschutzprofil; verbindliche Grenzwerte stehen in der TRGS 900 und im Sicherheitsdatenblatt des konkreten Produkts — die früher gebräuchlichen MAK-Werte sind durch den Arbeitsplatzgrenzwert abgelöst (siehe L-172); AMP gilt als bevorzugtes Neutralisationsmittel in modernen Formulierungen. Morpholin und Diethanolamin stehen unter regulatorischem Druck wegen Nitrosaminpotenzials und werden zunehmend durch unbedenklichere Alternativen ersetzt. Schutzmaßnahmen: Absaugung, Chemikalienschutzhandschuhe, Schutzbrille.

### Flüchtigkeit und Colösemittel

Das Amin soll flüchtig sein, damit es beim Trocknen oder Einbrennen entweicht und die Wasserfestigkeit nicht mindert. Colösemittel wie Butylglykol oder N-Methyl-2-pyrrolidon (NMP) verbessern Löslichkeit, Lagerstabilität und Filmbildung. NMP ist allerdings reproduktionstoxisch eingestuft und REACH-beschränkt (mit DNEL- und Risikomanagementanforderungen); es wird deshalb in modernen Formulierungen zunehmend durch weniger problematische Alternativen ersetzt.

**Merksatz**

Carboxylgruppe plus Amin ergibt ein wasserlösliches Salz — reversibel: Beim Trocknen bzw. Einbrennen entweicht das flüchtige Amin weitgehend — zusammen mit der Vernetzung wird der Film wasserfest. Die Säurezahl bestimmt die Aminmenge.

**Stichwörter:** wässrige Bindemittellösung, Neutralisation, Carboxylgruppe, Amin, Salzbildung, Säurezahl, DMEA, Dimethylethanolamin, Triethylamin, AMP, Morpholin, Ammoniak, flüchtig, Colösemittel, Butylglykol, NMP
*Quellen: Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur; Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie*

## Übungsblatt Ü-75 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**
Wie macht die Neutralisation ein Bindemittel wasserlöslich, und warum wird der Film beim Trocknen trotzdem wasserfest?

**Löslich machen:** Die Carboxylgruppen (–COOH) des Bindemittels werden mit einem Amin neutralisiert; es entsteht ein hydrophiles Salz (–$COO^-$), das das Bindemittel in Wasser löst.
**Reversibel:** Die Salzbildung ist umkehrbar.
**Beim Trocknen:** Das flüchtige Amin entweicht; die Carboxylgruppen liegen wieder unneutralisiert vor, und der Film verliert seine Wasserlöslichkeit.
**Ergebnis:** Der getrocknete bzw. eingebrannte Film ist wasserfest — andernfalls würde ihn Regen wieder anlösen.
*Bewertung: Die Salzbildung als Löslichkeitsprinzip und ihre Umkehr beim Verdunsten des Amins werden erklärt — mit der richtigen Schlussfolgerung zur Wasserfestigkeit des Films.*

**Frage 2** **(Berechnung, 9 Punkte)**
Ein wasserverdünnbares Bindemittel hat eine Säurezahl von 50 mg KOH/g. 1000 g davon sollen vollständig mit Triethylamin (M ≈ 101 g/mol) neutralisiert werden. Wie viel Amin wird benötigt? (M(KOH) = 56,1 g/mol)

**Formel:** m(Amin) = M(Amin) · Säurezahl · m(Bindemittel) / 56 100
**Einsetzen:** m(Amin) = 101 · 50 · 1000 / 56 100
**Rechnung:** = 5 050 000 / 56 100 = 90,0 g
**Antwortsatz:** Für die vollständige Neutralisation werden rund 90 g Triethylamin benötigt.
**Hinweis:** In der Praxis neutralisiert man oft nur zu 70–90 %, nicht vollständig.
*Bewertung: Die Neutralisationsformel wird korrekt mit Säurezahl und Aminmolmasse angewandt; der Praxishinweis auf die Teilneutralisation zeigt das Verständnis über das Rechnen hinaus.*

**Frage 3** **(Anwendung, 7 Punkte)**
Warum wählt man als Neutralisationsmittel ein flüchtiges Amin, und wozu setzt man zusätzlich ein Colösemittel wie Butylglykol ein?

**Flüchtiges Amin:** Es soll beim Trocknen oder Einbrennen entweichen; bliebe es im Film, würde es die Wasserfestigkeit mindern (der Film bliebe wasserempfindlich).
**Beispiele:** DMEA, Triethylamin, Ammoniak — für raumtemperaturtrocknende Systeme eher die flüchtigeren.
**Colösemittel:** Butylglykol oder NMP verbessern die Löslichkeit des Bindemittels, die Lagerstabilität und die Filmbildung.
**Zusammenspiel:** Amin und Colösemittel sorgen gemeinsam für ein stabiles, gut verarbeitbares wässriges System.
*Bewertung: Die Flüchtigkeit des Amins wird über die Wasserfestigkeit begründet und die Rolle des Colösemittels (Löslichkeit, Stabilität, Filmbildung) korrekt ergänzt.*

# L-76 · Filmbildung von Dispersionen

*Koaleszenz, Mindestfilmbildetemperatur und Filmbildehilfsmittel*

**Prüfungsteil 1** · A 8.3 · B 12

Ein Dispersionsfilm entsteht durch Zusammenrücken und Verschmelzen der Teilchen (Koaleszenz); die MFT bezeichnet die niedrigste Temperatur, bei der unter definierten Prüfbedingungen ein zusammenhängender Film gebildet wird.

## Wie ein Dispersionsfilm entsteht

Anders als bei gelösten Bindemitteln bildet sich der Film nicht durch bloßes Verdunsten. Beim Verdunsten des Wassers rücken die Teilchen zusammen, verformen sich unter Kapillarkräften und verschmelzen zu einem geschlossenen Film. Diesen Vorgang nennt man Koaleszenz. Erst dadurch wird der Film klar und zusammenhängend, statt aus einzelnen sichtbaren Körnern zu bestehen. Der Koaleszenzmechanismus gilt für Primär- und Sekundärdispersionen gleichermaßen. PU-Dispersionen (Sekundär) haben allerdings oft eine sehr niedrige MFT und benötigen selten ein Filmbildehilfsmittel. Bei wässrigen Bindemittellösungen (Weg 3, L-75) hingegen filmt das Polymer wie ein lösemittelhaltiger Lack — durch Viskositätsanstieg beim Verdunsten, nicht durch Teilchenverschmelzung.

## Die Mindestfilmbildetemperatur (MFT)

Unterhalb der Mindestfilmbildetemperatur (MFT) verschmelzen die Teilchen nicht — der Auftrag bleibt pulvrig und rissig. Erst oberhalb der MFT koaleszieren sie zu einem klaren Film. Die MFT wird wesentlich von der Glasübergangstemperatur und der Polymer-/Partikelmorphologie beeinflusst; sie ist jedoch nicht mit der Tg identisch und wird experimentell bestimmt (siehe L-09). Gemessen wird sie auf einer Temperaturbank als die Temperatur, ab der ein klarer Film entsteht.

## Der Zielkonflikt

Ein hartes Polymer (hohe Glastemperatur, gute Beständigkeit) hat eine hohe MFT und filmt bei Raumtemperatur schlecht. Ein weiches filmt gut, ist aber wenig beständig, klebrig und schmutzanfällig. Beides zugleich ist mit dem reinen Polymer nicht zu haben — ein Grunddilemma der Dispersionschemie.

## Filmbildehilfsmittel (Koaleszenzmittel)

Die Lösung ist ein Filmbildehilfsmittel: ein temporärer Weichmacher (z. B. Texanol), der die MFT während der Filmbildung senkt, danach aber verdunstet. Zurück bleibt der harte, beständige Film — man umgeht den Zielkonflikt. Texanol (2,2,4-Trimethyl-1,3-pentandiolmonoisobutyrat, Eastman) ist der meistverwendete Vertreter: ein langsam verdunstender Glykolester, der in die Teilchen eindringt und innerhalb von Stunden bis Tagen wieder aus dem Film entweicht. Weitere Filmbildehilfsmittel: Dowanol DPnB (schneller verdunstend), Butyldiglykol (preiswerter), Optifilm 400 (VOC-reduziert). Da Texanol selbst ein VOC ist, verfolgen moderne Ansätze polymerisierbare Koaleszenzmittel, die chemisch in den Film eingebaut werden und nicht entweichen.

## Anforderungen

Ein gutes Filmbildehilfsmittel senkt die MFT wirksam, verdunstet danach vollständig, ist geruchsarm und umweltverträglich. Menge und Typ steuern, bis zu welcher Temperatur der Lack noch sicher verfilmt. Moderne Systeme kommen mit möglichst wenig oder ohne Filmbildehilfsmittel aus.

**Merksatz**

Dispersionsfilme entstehen durch Koaleszenz oberhalb der MFT. Ein Filmbildehilfsmittel senkt die MFT vorübergehend und verdunstet dann — so wird aus harten Teilchen ein beständiger Film.

**Stichwörter:** Filmbildung, Dispersion, Koaleszenz, Mindestfilmbildetemperatur, MFT, Glasübergangstemperatur, Filmbildehilfsmittel, Koaleszenzmittel, Texanol, Weichmacher, Kapillarkräfte, Verfilmung

*Quellen: Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur; Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie*

## Übungsblatt Ü-76 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Wie bildet eine Dispersion einen Film, und was bedeutet die Mindestfilmbildetemperatur (MFT)?

**Filmbildung:** Beim Verdunsten des Wassers rücken die Teilchen zusammen, verformen sich unter Kapillarkräften und verschmelzen zu einem geschlossenen Film (Koaleszenz).

**MFT:** Die Mindestfilmbildetemperatur ist die Temperatur, unterhalb derer die Teilchen nicht verschmelzen — der Auftrag bleibt pulvrig und rissig.

**Oberhalb der MFT:** Erst oberhalb der MFT koalesziert die Dispersion zu einem klaren, geschlossenen Film.

**Zusammenhang:** Die MFT wird wesentlich von der Glasübergangstemperatur beeinflusst, ist aber nicht mit der Tg identisch und wird experimentell bestimmt (siehe L-09).

*Bewertung: Koaleszenz und MFT werden korrekt beschrieben und der Zusammenhang zur Glasübergangstemperatur hergestellt — der Kern der Dispersionsfilmbildung.*

**Frage 2** **(Berechnung, 9 Punkte)**

Ein Dispersionspolymer ist ein Copolymer aus 50 % Butylacrylat (Tg = 219 K) und 50 % Methylmethacrylat (Tg = 378 K). Berechnen Sie die Glasübergangstemperatur nach der Fox-Gleichung ($1/Tg = w_1/Tg_1 + w_2/Tg_2$) und ordnen Sie sie der Filmbildung zu.

**Fox-Gleichung:** $1/Tg = w_1/Tg_1 + w_2/Tg_2$

**Einsetzen:** $1/Tg = 0{,}50/219 + 0{,}50/378 = 0{,}002283 + 0{,}001323 = 0{,}003606$ 1/K

**Tg:** $Tg = 1 / 0{,}003606 = 277{,}3$ K ≈ 4 °C

**Antwortsatz:** Die Glasübergangstemperatur liegt bei rund 4 °C.

**Zuordnung:** Die MFT liegt in ähnlicher Höhe: Bei Raumtemperatur filmt der Lack, bei Kälte braucht er ein Filmbildehilfsmittel.

*Bewertung: Die Fox-Gleichung wird korrekt mit den Massenanteilen und Kelvin-Werten angewandt, und das Ergebnis wird sinnvoll auf die Filmbildung (MFT nahe Tg) bezogen.*

**Frage 3** **(Anwendung, 7 Punkte)**

Ein harter, beständiger Dispersionslack filmt bei Raumtemperatur nicht sauber. Wie löst ein Filmbildehilfsmittel den Zielkonflikt zwischen Härte und Filmbildung?

**Zielkonflikt:** Ein hartes Polymer (hohe Glastemperatur, hohe MFT) filmt bei Raumtemperatur schlecht; ein weiches filmt gut, ist aber wenig beständig.

**Wirkung:** Das Filmbildehilfsmittel (z. B. Texanol) wirkt als temporärer Weichmacher: Es senkt die MFT während der Filmbildung, sodass die harten Teilchen koaleszieren.

**Danach:** Nach der Verfilmung verdunstet es und lässt den harten, beständigen Film zurück.

**Ergebnis:** So bekommt man gute Filmbildung bei Raumtemperatur und trotzdem einen harten Film — der Zielkonflikt ist umgangen.

*Bewertung: Der Zielkonflikt wird sauber benannt und die temporäre MFT-Senkung mit anschließendem Verdunsten als Lösung erklärt — genau die Funktion des Filmbildehilfsmittels.*

# L-77 · Dispersionsfarben — Rezeptur und Rheologie

*Bindemitteldispersion, Pigment und die richtigen Additive*

**Prüfungsteil 2** · A 10 · B 12

Eine Dispersionsfarbe besteht aus Bindemitteldispersion, Pigment/Füllstoff, Wasser und Additiven — Rheologieadditive stellen Verlauf, Spritzbarkeit und Standvermögen ein.

## Aufbau einer Dispersionsfarbe

Der Begriff Dispersionsfarbe (DIN 55945) bezeichnet alle Beschichtungsstoffe auf Basis einer wässrigen Polymerdispersion — also nicht nur Wand- und Fassadenfarben, sondern auch Holz-, Boden- und Dachfarben. Im alltäglichen Sprachgebrauch wird er jedoch auf Innenwandfarben verkürzt; in der Industrie spricht man allgemeiner von wasserbasierten Beschichtungsstoffen. Eine Dispersionsfarbe ist dabei in aller Regel ein Einkomponentensystem, das physikalisch durch Koaleszenz trocknet; daneben gibt es selbstvernetzende 1K-Dispersionen, die nach der Filmbildung zusätzlich chemisch vernetzen (siehe L-124). Von beiden zu unterscheiden sind die chemisch härtenden 2K-Wassersysteme (siehe L-83, L-84). Eine Dispersionsfarbe besteht aus der Bindemitteldispersion (siehe L-73), Pigmenten und Füllstoffen, Wasser als Dispersionsmedium und einer Reihe Additive: Dispergier-, Netz-, Entschäumungs-, Konservierungs- und Rheologiemittel. Jedes Additiv löst ein eigenes praktisches Problem der wässrigen Formulierung — zusammen ergeben sie ein stabiles, gut verarbeitbares System.

## Pigmentierungshöhe

Wie bei lösemittelhaltigen Systemen bestimmt die PVK das Verhalten des Films (siehe L-55): Typische PVK-Bereiche unterscheiden sich je nach Anwendung: Matte Innenwandfarben sind hoch pigmentiert und häufig überkritisch eingestellt — Trockendeckvermögen und Kosten stehen im Vordergrund (siehe L-55). Dispersions-Fassadenfarben werden dagegen meist unterkritisch formuliert, damit Wasseraufnahme und Kreidung gering bleiben. Diffusionsoffenheit entsteht außen nicht in erster Linie über die Pigmentierungshöhe, sondern über den Bindemitteltyp: bewusst überkritisch und dadurch besonders diffusionsoffen sind Siliconharz- und Silicatfarben (siehe L-78, L-79). Ein allgemeingültiger PVK-Bereich für Fassaden lässt sich daraus nicht ableiten — entscheidend ist die Lage der PVK relativ zur KPVK des jeweiligen Systems (siehe L-55, L-80). Bindemittelmenge, Porosität und Wasseraufnahme müssen jeweils dazu passen. Die Wahl der PVK ist damit eine der wichtigsten Rezepturentscheidungen.

## Rheologieadditive

HEUR (assoziativ verdickende Polyurethane) und HASE (assoziativ verdickende Acrylate) bauen ein strukturviskoses Netzwerk auf: dickflüssig in Ruhe (kein Ablaufen), dünnflüssig unter Scherung (gute Verarbeitung beim Streichen/Rollen). Ohne sie würde die Farbe entweder ablaufen oder sich schwer verstreichen lassen.

## Weitere wichtige Additive

- Dispergiermittel — verteilen Pigment und Füllstoff, verhindern Reflockung.
- Entschäumer — verhindern Schaum bei der Herstellung und Applikation.
- Konservierungsmittel — schützen die wässrige Farbe vor mikrobiellem Befall.
- Filmbildehilfsmittel — sichern die Verfilmung (siehe L-76).

## Innen- und Außenanwendung

Innendispersionsfarben sind auf Deckvermögen, geringen Geruch und Wischfestigkeit optimiert. Fassadenfarben brauchen zusätzlich Wetter-, Algen- und Pilzbeständigkeit sowie eine ausreichende Wasserdampfdurchlässigkeit, damit der Untergrund atmen kann. Sonst kann sich Feuchte hinter der Beschichtung stauen und Schäden verursachen.

**Merksatz**

Dispersionsfarbe = Bindemitteldispersion + Pigment/Füllstoff + Wasser + Additive. Rheologieadditive (HEUR, HASE) machen den Lack scherverdünnend — dick in Ruhe, dünn beim Verarbeiten.

**Stichwörter:** Dispersionsfarbe, PVK, Rheologieadditiv, HEUR, HASE, assoziativ verdickend, strukturviskos, Dispergiermittel, Entschäumer, Konservierungsmittel, Innenfarbe, Fassadenfarbe, Wasserdampfdurchlässigkeit
*Quellen: Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur; Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; DIN 55945*

## Übungsblatt Ü-77 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**
Woraus besteht eine Dispersionsfarbe, und wie wirken HEUR- und HASE-Rheologieadditive?
**Aufbau:** Bindemitteldispersion + Pigment/Füllstoff + Wasser + Additive (Dispergier-, Netz-, Entschäumungs-, Konservierungs- und Rheologiemittel).
**HEUR/HASE:** Assoziativ verdickende Rheologieadditive (Polyurethan bzw. Acrylat), die ein strukturviskoses Netzwerk aufbauen.
**In Ruhe:** Dickflüssig — verhindert Ablaufen und Absetzen.
**Unter Scherung:** Dünnflüssig — gute Verarbeitung beim Streichen, Rollen oder Spritzen.
*Bewertung: Der Aufbau wird vollständig genannt, und die Scherverdünnung durch HEUR/HASE wird mit dem Ruhe-/Scher-Gegensatz korrekt erklärt.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**
Eine Dispersionsfarbe enthält 6,0 cm³ Pigment/Füllstoff und 9,0 cm³ Bindemittel-Festkörper (bezogen auf 100 g Rezeptur). Berechnen Sie die PVK (PVK = V(Pigment + Füllstoff) / (V(Pigment + Füllstoff) + V(Bindemittel)) · 100 %).
**Formel:** PVK = Volumen Pigment/Füllstoff / (Volumen Pigment/Füllstoff + Volumen Bindemittel) · 100 %
**Einsetzen:** PVK = 6,0 / (6,0 + 9,0) · 100 %
**Rechnung:** = 6,0 / 15,0 · 100 % = 40,0 %
**Antwortsatz:** Die PVK beträgt 40,0 %.
**Einordnung:** Das liegt für viele Systeme nahe der KPVK — je nach Bindemittel eine Innenfarbe mit gutem Deckvermögen (siehe L-55).
*Bewertung: Die PVK-Formel wird korrekt mit Volumenanteilen angewandt, und das Ergebnis wird sinnvoll gegen die KPVK eingeordnet.*

**Frage 3** **(Anwendung, 7 Punkte)**
Für eine Fassadenfarbe wird zusätzlich Wasserdampfdurchlässigkeit gefordert. Welche zwei Stellschrauben in der Rezeptur beeinflussen das, und wie?
**Stellschraube 1 — PVK:** Eine PVK nahe oder über der KPVK schafft ein poriges Gefüge, das Wasserdampf besser durchlässt (siehe L-55).
**Stellschraube 2 — Bindemitteltyp:** Ein diffusionsoffeneres Bindemittel (z. B. siliconmodifiziert) lässt mehr Dampf durch als ein dichter Acrylatfilm (siehe L-79).
**Zielkonflikt:** Höhere PVK verbessert die Diffusion, senkt aber Glanz und Wasserfestigkeit — ein Kompromiss ist nötig.
*Bewertung: Beide Stellschrauben (PVK, Bindemitteltyp) werden richtig genannt und der Zielkonflikt mit Glanz/Wasserfestigkeit erkannt — die geforderte Abwägung.*

# L-78 · Silicatfarben (2K)

*Kaliwasserglas trifft Untergrund — mineralische Verkieselung*

**Prüfungsteil 2** · B 4 · A 10

Silicatfarben härten überwiegend durch mineralische Verkieselungs-/Kondensationsreaktionen mit dem Untergrund — stark anorganisch geprägt, unbrennbar und diffusionsoffen, aber begrenzt verarbeitbar.

## Das Bindemittel: Kaliwasserglas

Bindemittel ist eine wässrige Kaliumsilicat-Lösung (Kaliwasserglas). Ihr Molverhältnis $SiO_2$ : $K_2O$ (der „Modul“) bestimmt Viskosität und Stabilität: je mehr $SiO_2$, desto viskoser und desto reaktionsfreudiger — und desto weniger lagerstabil ist die Lösung. Der Modul wird auf das jeweilige Anwendungsziel abgestimmt.

## Zweikomponenten-System

Silicatfarben werden als 2K-System geliefert: die Pigmentpaste getrennt vom Kaliwasserglas-Bindemittel. Erst kurz vor der Verarbeitung mischt man beide — danach ist die Topfzeit begrenzt, weil die Härtung sofort einsetzt. Angebrochene Mischung lässt sich später nicht mehr verwenden.

## Verkieselung

Die Härtung von Silicatfarben ist mehr als eine einfache Reaktion: Carbonatisierung durch Luft-$CO_2$, Ansäuerung/Polykondensation der Silicatspezies und Reaktionen mit den mineralischen Bestandteilen des Untergrunds (Kalk, Silicate) wirken zusammen und führen zu unlöslichem Kieselgel — die sogenannte Verkieselung. Der Anstrich verwächst dadurch fest mit dem Untergrund, statt nur auf ihm zu haften. Dadurch ist die Haftung besonders dauerhaft.

## Eigenschaften

Silicatfarben sind stark anorganisch geprägt, unbrennbar, hoch alkalibeständig, UV- und wetterbeständig und stark diffusionsoffen (wasserdampfdurchlässig); Formulierung und Bindemitteltyp bestimmen die genaue Zusammensetzung und Eigenschaften. Nachteilig sind begrenzte Topfzeit, Ätzgefahr für Haut und Augen sowie eine eingeschränkte Farbpalette (nur silicatbeständige, alkalifeste Pigmente). Persönliche Schutzausrüstung ist bei der Verarbeitung daher Pflicht.

## Anwendung

Klassisch für mineralische Untergründe: Putz, Beton, Naturstein — besonders bei der Denkmalpflege und Fassadensanierung, wo Diffusionsoffenheit und Unbrennbarkeit gefragt sind. Auf organischen oder nicht saugfähigen Untergründen haftet Silicatfarbe nicht. Der Untergrund muss also sorgfältig geprüft werden, bevor man sich für eine Silicatfarbe entscheidet.

## Verwandt: Zinksilicat auf Stahl

Dasselbe Silicat-Bindeprinzip nutzt man im Korrosionsschutz: Zinksilicat-Grundierungen sind anorganische, zinkreiche Grundierungen aus einem Silicat-Bindemittel (Ethylsilicat, lösemittelhaltig, oder Alkalisilicat, wässrig) und viel Zinkstaub. Warum sie auf blankem Stahl haften: Das Silicat härtet zu einem Kieselgel-Netzwerk (Si-O), das sich chemisch mit der Metalloberfläche und den Zinkteilchen verbindet — dieselbe Verkieselung wie mit dem Untergrund, nur auf Metall statt Mineral. Warum es diesen Typ gibt: Das Zink schützt kathodisch (Opferanode, siehe L-101; zum nötigen hohen Zinkanteil und der daraus folgenden hohen PVK siehe L-55), und das anorganische Bindemittel macht den Film außergewöhnlich hitzebeständig (bis etwa 400 °C, teils höher), lösemittel- und abriebfest sowie sehr langlebig — für den schweren Korrosionsschutz (Tanks, Offshore, Stahlbau). Organische zinkreiche Grundierungen erreichen diese Temperatur- und Lösemittelbeständigkeit nicht.

### Reaktionstyp und Ätzgefahr

Chemisch ist die Verkieselung eine Polykondensation (verwandt mit dem Sol-Gel-Prozess): Das Silicat hydrolysiert und kondensiert unter Abspaltung von Wasser — beim Ethylsilicat des Zinksilicats zusätzlich Alkohol — zu einem vernetzten Si-O-Si-Kieselgel; das Kaliwasserglas reagiert dabei außerdem mit dem $CO_2$ der Luft. Die Ätzgefahr rührt daher, dass Wasserglas stark alkalisch ist (hoher pH): Es reizt bzw. verätzt Haut und Augen — deshalb Schutzbrille und Handschuhe tragen und angrenzende Flächen (Glas, Naturstein, Lack) abdecken.

**Merksatz**

Silicatfarbe härtet nicht durch Verdunsten allein, sondern durch chemische Verkieselung mit dem mineralischen Untergrund. Das macht sie unbrennbar und diffusionsoffen, aber nur auf mineralischen Flächen einsetzbar.

**Stichwörter:** Silicatfarbe, Kaliwasserglas, Kaliumsilicat, Modul, Verkieselung, Kieselgel, 2K-System, Topfzeit, diffusionsoffen, wasserdampfdurchlässig, unbrennbar, alkalibeständig, Denkmalpflege, mineralischer Untergrund
*Quellen: Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur; Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie*

## Übungsblatt Ü-78 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Wie härtet eine Silicatfarbe, und warum ist sie ein 2K-System mit begrenzter Topfzeit?

**Härtung:** Das Kaliwasserglas-Bindemittel reagiert mit $CO_2$ der Luft und mit den mineralischen Bestandteilen des Untergrunds (Kalk, Silicate) zu unlöslichem Kieselgel — der Verkieselung.
**Folge:** Der Anstrich verwächst chemisch mit dem Untergrund, statt nur physikalisch auf ihm zu haften.
**2K-Grund:** Pigmentpaste und Kaliwasserglas werden getrennt geliefert, weil die Reaktion nach dem Mischen sofort beginnt.
**Topfzeit:** Deshalb ist die gemischte Farbe nur begrenzt lange verarbeitbar.
*Bewertung: Die Verkieselung wird korrekt als chemische Reaktion mit dem Untergrund beschrieben, und der 2K-Aufbau wird logisch aus der sofort einsetzenden Reaktion abgeleitet.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**

Ein Kaliwasserglas hat den Modul (Molverhältnis) $SiO_2 : K_2O = 3{,}5 : 1$. Berechnen Sie das Masseverhältnis $K_2O : SiO_2$. ($M(K_2O) = 94{,}2$ g/mol, $M(SiO_2) = 60{,}1$ g/mol)

**Gegeben:** Molverhältnis $SiO_2 : K_2O = 3{,}5 : 1$, also $n(SiO_2) = 3{,}5 \cdot n(K_2O)$
**Massen:** $m(K_2O) = 1 \cdot 94{,}2 = 94{,}2$; $m(SiO_2) = 3{,}5 \cdot 60{,}1 = 210{,}4$
**Masseverhältnis:** $K_2O : SiO_2 = 94{,}2 : 210{,}4 \approx 0{,}45 : 1$
**Antwortsatz:** Das Masseverhältnis $K_2O : SiO_2$ beträgt rund 0,45 : 1.
**Einordnung:** Ein hoher Modul (viel $SiO_2$ je $K_2O$) bedeutet eine viskosere, reaktivere und weniger lagerstabile Lösung.
*Bewertung: Das Molverhältnis wird korrekt über die Molmassen in ein Masseverhältnis umgerechnet, und die Bedeutung des Moduls für Viskosität und Reaktivität wird richtig eingeordnet.*

**Frage 3** **(Anwendung, 7 Punkte)**

Eine Fassade aus mineralischem Putz soll mit Silicatfarbe gestrichen werden, an einer Stelle ist aber eine Holzverkleidung eingelassen. Was ist zu beachten?

**Putz:** Silicatfarbe verkieselt mit dem mineralischen Putz und haftet dort dauerhaft und diffusionsoffen.
**Holz:** Auf organischen, nicht mineralischen Untergründen wie Holz findet keine Verkieselung statt — die Silicatfarbe haftet dort nicht sicher.
**Konsequenz:** Die Holzverkleidung muss mit einem anderen, für Holz geeigneten Beschichtungssystem behandelt werden.
**Praxis:** Übergänge zwischen Untergründen erfordern also unterschiedliche Beschichtungssysteme, nicht ein durchgehendes.
*Bewertung: Die Grenze der Silicatfarbe (nur mineralische Untergründe) wird richtig erkannt und die praktische Konsequenz für den Materialwechsel korrekt gezogen.*

# L-79 · Siliconharz- und Dispersionssilicatfarben

*Zwei Kompromisse zwischen Silicatfarbe und Dispersionsfarbe*

**Prüfungsteil 2** · B 4 · A 10

Siliconharz- und Dispersionssilicatfarben verbinden die einfache 1K-Verarbeitung der Dispersionsfarbe mit besserer Wetterbeständigkeit und höherer Diffusionsoffenheit als eine reine Dispersionsfarbe.

## Warum es diese Zwischenstufen gibt

Reine Silicatfarbe (siehe L-78) ist diffusionsoffen und beständig, aber als 2K-System mit begrenzter Topfzeit umständlich zu verarbeiten. Reine Dispersionsfarbe (siehe L-77) ist einfach zu verarbeiten, aber weniger diffusionsoffen. Zwei Bindemitteltypen überbrücken diese Lücke.

## Siliconharzfarben

Sie kombinieren eine Kunststoffdispersion (meist Styrol-Acrylat) mit einer Siliconharzemulsion. Die Siliconharzemulsion senkt die Wasseraufnahme und verbessert die Wasserdampfdurchlässigkeit gegenüber der reinen Dispersionsfarbe — ein höherer Siliconanteil verbessert diese Balance in vielen Systemen, macht die Farbe aber teurer (Genaueres ist formulierungsabhängig). Für stark bewitterte Fassaden lohnt sich der höhere Siliconanteil trotzdem.

## Dispersionssilicatfarben (1K)

Hier wird stabilisiertes Kaliwasserglas mit einer geringen Menge Kunststoffdispersion kombiniert (organischer Anteil meist unter 5 %). Anders als die 2K-Silicatfarbe ist sie gebrauchsfertig als Einkomponentensystem und steht nicht ab dem Anmischen unter Zeitdruck. Das macht sie für die Baustellenpraxis deutlich unkomplizierter als die 2K-Silicatfarbe.

## Deutscher Denkmalschutz-Sonderfall

Für den Denkmalschutz wird häufig die reine 2K-Silicatfarbe verlangt; wo eine 1K-Verarbeitung möglich sein soll, wird allenfalls eine Dispersionssilicatfarbe mit sehr geringem organischem Anteil (höchstens 5 Prozent) zugelassen — hier zählt die möglichst reine mineralische Wirkung. Für normale Fassadensanierungen reichen Siliconharz- oder Dispersionssilicatfarben meist aus. Auflagen des Denkmalschutzes sind vorab zu klären.

## Auswahl in der Praxis

Für Standardfassaden genügt oft die günstigere reine Dispersionsfarbe; bei hoher Beanspruchung oder Denkmalauflagen wählt man die mineralischeren Systeme.

**Merksatz**

Siliconharzfarbe = Dispersion + Siliconemulsion (bessere Diffusion, einfache 1K-Verarbeitung). Dispersionssilicatfarbe = Wasserglas + wenig Dispersion (mineralischer, aber trotzdem 1K). Beide sind Kompromisse zwischen Silicat- und Dispersionsfarbe.

**Stichwörter:** Siliconharzfarbe, Dispersionssilicatfarbe, Siliconharzemulsion, Kaliwasserglas, 1K-System, Diffusionsoffenheit, Wasseraufnahme, Denkmalschutz, Fassadenfarbe, Styrol-Acrylat

*Quellen: Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur; Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie*

## Übungsblatt Ü-79 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**
Worin unterscheiden sich Siliconharzfarben und Dispersionssilicatfarben in ihrem Aufbau?
**Siliconharzfarbe:** Kunststoffdispersion (meist Styrol-Acrylat) kombiniert mit einer Siliconharzemulsion, die Wasseraufnahme senkt und Diffusion verbessert.
**Dispersionssilicatfarbe:** Stabilisiertes Kaliwasserglas kombiniert mit wenig (meist < 5 %) Kunststoffdispersion.
**Gemeinsamkeit:** Beide sind gebrauchsfertige 1K-Systeme, anders als die reine 2K-Silicatfarbe (siehe L-78).
**Unterschied im Charakter:** Die Siliconharzfarbe ist überwiegend organisch mit Silicon-Anteil, die Dispersionssilicatfarbe überwiegend mineralisch mit organischem Restanteil.
*Bewertung: Beide Farbtypen werden nach Hauptbestandteil und Mischungsverhältnis korrekt unterschieden und klar von der reinen Silicatfarbe abgegrenzt.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**
Eine Siliconharzfarbe enthält im Bindemittel-Festkörper 20 % Siliconharz und 80 % Kunststoffdispersion. Für 3,0 kg Bindemittel-Festkörper: Wie viel Siliconharz-Festkörper wird gebraucht?
**Gegeben:** Bindemittel-Festkörper = 3,0 kg; Siliconanteil = 20 %
**Rechnung:** 3,0 kg · 0,20 = 0,6 kg
**Rest:** Die übrigen 80 % = 2,4 kg sind die Kunststoffdispersion.
**Antwortsatz:** Es werden 0,6 kg Siliconharz-Festkörper gebraucht.
*Bewertung: Der Siliconanteil wird korrekt aus dem Bindemittel-Festkörper berechnet und der Dispersionsanteil richtig ergänzt.*

**Frage 3** **(Anwendung, 7 Punkte)**
Ein Bauherr möchte eine preisgünstige, aber diffusionsoffene Fassadenfarbe ohne die Verarbeitungshürden einer 2K-Silicatfarbe. Welchen Farbtyp empfehlen Sie und warum?
**Empfehlung:** Eine Siliconharzfarbe oder Dispersionssilicatfarbe.
**Begründung Verarbeitung:** Beide sind 1K-Systeme, gebrauchsfertig und ohne die begrenzte Topfzeit der 2K-Silicatfarbe (siehe L-78).
**Begründung Diffusion:** Beide sind diffusionsoffener als eine reine Dispersionsfarbe (siehe L-77), wenn auch nicht ganz so mineralisch wie reine Silicatfarbe.
**Preis:** Von den beiden 1K-Alternativen ist die Dispersionssilicatfarbe wegen des Verzichts auf teurere Siliconharzemulsion meist die preisgünstigere Wahl — sie erfüllt damit beide Anforderungen des Bauherrn am besten.
**Kompromiss:** Man tauscht etwas mineralische Reinheit gegen einfachere Verarbeitung — für die meisten Fassaden ein guter Kompromiss.
*Bewertung: Die Empfehlung wird korrekt getroffen, der Kompromiss (Verarbeitung gegen mineralische Reinheit) klar benannt und der Preisaspekt einbezogen — die geforderte Abwägung zwischen den drei Systemen.*

# L-80 · Glanzgradklassifizierung physikalisch trocknender wässriger Lacke

*Vom Hochglanzlack zur matten Dispersionsfarbe — alles eine Frage der PVK*

**Prüfungsteil 2** · A 10 · B 12

Glanzgrad und Bindemittelgehalt hängen eng zusammen: niedrige PVK ergibt Hochglanz, hohe PVK ergibt matte Dispersionsfarbe.

## Eine Reihe vom Lack zur Farbe

Physikalisch trocknende wässrige Systeme (siehe L-73) bilden eine durchgehende Reihe: Hochglanzlack, Halbglanzlack, seidenmatter Lack und matte Dispersionsfarbe. Der Glanzgrad wird wesentlich durch die Pigmentierungshöhe (PVK) und die dadurch entstehende Oberflächenstruktur beeinflusst; zusätzlich wirken Bindemittel, Pigment-/Füllstoffart, Teilchengröße, Mattierungsmittel und Filmbildung auf den Glanz. Alle vier basieren auf demselben Bindemittelprinzip, mit unterschiedlichem Pigmentanteil.

## PVK bestimmt den Glanz

Je niedriger die PVK, desto glänzender der Film — bei sehr wenig Pigment bildet das Bindemittel eine geschlossene, glatte Oberfläche. Steigt die PVK, wird die Oberfläche zunehmend uneben und streut das Licht diffus: Der Glanz sinkt (siehe L-55). Unterhalb der KPVK ist der Film im Allgemeinen dichter und ausreichend mit Bindemittel gefüllt; in Richtung bzw. oberhalb der KPVK verändern sich Filmstruktur und Filmeigenschaften deutlich, und Poren-/Hohlraumanteil sowie Glanz können sich entsprechend ändern.

## Die Reihe im Überblick

Die folgenden Zahlen sind Orientierungswerte für gängige Dispersionssysteme, keine Normbereiche: Hochglanzlacke liegen bei PVK etwa 10–15 % und hohem Bindemittelgehalt (65–70 Gew.-%). Halbglanz folgt bei 15–30 %, seidenmatt bei 30–40 %, matte Innenfarben bei 40–60 %; hoch gefüllte, preiswerte Wandfarben liegen darüber und sind dann überkritisch (siehe L-55).

Fassadenfarben sind in der Regel deutlich höher pigmentiert als hochwertige Glanzlacke; Dispersions-Fassadenfarben liegen dabei meist unterkritisch, Werte von 60 % PVK und darüber sind außen die Domäne der Siliconharz- und Silicatfarben — einen allgemeingültigen Fassadenbereich gibt es nicht. Wo eine konkrete Rezeptur liegt, hängt von Bindemittel, Pigment- und Füllstoffsystem, der zugehörigen KPVK und den geforderten Eigenschaften ab — dieselbe PVK bedeutet bei unterschiedlicher KPVK ein völlig anderes Filmgefüge. Zwischen den Glanzstufen liegen fließende Übergänge, keine scharfen Grenzen.

Eine hohe Pigmentierung hat zwei Gründe: erstens Wirtschaftlichkeit — Füllstoffe sind günstiger als Bindemittel (matte Wandfarben); zweitens Diffusionsoffenheit — viele Poren senken den sd-Wert und lassen Wasserdampf aus dem Untergrund entweichen (Siliconharz- und Silicatfarben außen, siehe L-78, L-79). Der Preis wird oberhalb der KPVK fällig: Dort reicht das Bindemittel nicht mehr aus, um alle Pigment- und Füllstoffteilchen zu benetzen und einzubinden. Der Film wird porös, nimmt mehr Wasser auf, und die Beständigkeit lässt nach — und an der Oberfläche sitzen die Pigment- und Füllstoffkörner nur noch lose in einer zu dünnen Bindemittelbrücke. UV baut das organische Bindemittel an der Oberfläche ab, und die freigelegten Pigmentkörner bilden eine pulvrige Schicht — die Kreidung. Kontrollierte Kreidung ist dabei kein Fehler: Regen wäscht den Kreidestaub samt Schmutz ab — selbstreinigend. Problematisch wird es erst, wenn die Kreidung so stark ist, dass Farbe verloren geht oder die Schutzwirkung nachlässt.

### Messung und Normeinteilung

Objektiv wird der Glanz mit einem Reflektometer gemessen: Ein definierter Lichtstrahl trifft die Fläche, erfasst wird der spiegelnd reflektierte Anteil. Nach DIN EN ISO 2813 richtet sich der Messwinkel nach der Glanzhöhe — 20° für Hochglanz, 60° als Standard, 85° für matte Flächen. Für Innenfarben ordnet DIN EN 13300 vier Stufen zu: glänzend (Reflektometerwert ≥ 60 bei 60°), mittlerer Glanz (< 60 bei 60° und ≥ 10 bei 85°), matt (< 10 bei 85°) und stumpfmatt (< 5 bei 85°); die früheren Bezeichnungen seidenglänzend und seidenmatt zählen zum mittleren Glanz. Dieselbe Norm stuft zusätzlich Nassabriebbeständigkeit, Deckvermögen und Korngröße in Klassen ein und löste damit die alte DIN 53778 ab.

### Kosten und Praxisfolge

Hoher Glanz braucht viel Bindemittel, und das Bindemittel ist oft ein wesentlicher Kostenfaktor — matte Farben sind deshalb häufig preiswerter als glänzende (in stark pigmentierten Systemen kann dagegen der Pigment-/Füllstoffanteil die Kosten dominieren). Umgekehrt lässt sich aus dem gewünschten Glanzgrad direkt die ungefähre PVK und der nötige Bindemittelanteil ableiten. Das ist eine wichtige erste Orientierung, bevor Deckvermögen und Wischfestigkeit fein abgestimmt werden, und verkürzt die erste Formulierungsrunde spürbar.

**Merksatz**

Glanzgrad und PVK hängen direkt zusammen: niedrige PVK/viel Bindemittel = Hochglanz, hohe PVK/wenig Bindemittel = matte Dispersionsfarbe. Fassadenfarben sind häufig höher pigmentiert als Glanzlacke — eine hohe PVK fördert Mattierung und Diffusionsoffenheit, oberhalb der KPVK aber auch Porosität, Wasseraufnahme und Kreidung. Maßgeblich ist immer die PVK im Verhältnis zur KPVK des Systems, nicht die PVK-Zahl allein. Objektiv wird der Glanz per Reflektometer gemessen und nach DIN EN 13300 in vier Stufen eingeteilt.

**Stichwörter:** Glanzgrad, Hochglanzlack, Halbglanzlack, seidenmatt, matte Dispersionsfarbe, PVK, Bindemittelgehalt, physikalisch trocknend, Rezepturentwicklung, Pigmentierungshöhe, KPVK, Diffusionsoffenheit, Kreidung, Reflektometer, DIN EN 13300, Glanzmessung

*Quellen: Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur; Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; DIN EN 13300; DIN EN ISO 2813*

---

## Übungsblatt Ü-80 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Warum sinkt der Glanz eines physikalisch trocknenden Films mit steigender PVK?

**Niedrige PVK:** Wenig Pigment: Das Bindemittel bildet eine geschlossene, glatte Oberfläche, die Licht gerichtet reflektiert — hoher Glanz.

**Steigende PVK:** Mehr Pigment: Die Oberfläche wird zunehmend uneben; Pigmentkörner ragen an die Oberfläche.

**Folge:** Das Licht wird diffus gestreut statt gerichtet reflektiert — der Glanz sinkt.

**Bezug:** Dieser Zusammenhang gilt zusätzlich zur KPVK-Betrachtung aus L-55 und erklärt die ganze Reihe von Hochglanz bis matt.

*Bewertung: Der Mechanismus (glatte vs. uneben werdende Oberfläche, gerichtete vs. diffuse Reflexion) wird korrekt erklärt und mit dem PVK-Konzept verknüpft.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**

Ordnen Sie zu: Ein Lack mit PVK 12 % und ein Anstrich mit PVK 75 %. Welcher Glanzklasse und welchem ungefähren Bindemittelgehalt entsprechen sie?

**PVK 12 %:** Liegt im Bereich 10–15 % → Hochglanzlack, Bindemittelgehalt etwa 65–70 Gew.-%.

**PVK 75 %:** Liegt weit im oberen Pigmentierungsbereich → hoch pigmentierte, überkritische matte Wandfarbe (innen). Der Bindemittelgehalt ist entsprechend niedrig — mit typischen Dichten grob 10–15 Gew.-% des Trockenfilms; exakt lässt er sich nur mit den Dichten von Pigment, Füllstoff und Bindemittel berechnen (siehe L-55).

**Trend:** Je höher die PVK, desto niedriger der Bindemittelgehalt und desto matter der Film.

**Antwortsatz:** PVK 12 % → Hochglanz; PVK 75 % → hoch pigmentierte, überkritische matte Wandfarbe (innen).

**Einschränkung:** Die Zuordnung ist eine Orientierung. Ob 75 % in der konkreten Rezeptur sinnvoll sind, entscheidet die Lage zur KPVK — oberhalb der KPVK werden Film und Beständigkeit deutlich schlechter.

*Bewertung: Beide PVK-Werte werden korrekt der Glanzklasse und dem passenden Bindemittelgehaltsbereich zugeordnet; der gegenläufige Trend wird richtig erkannt.*

**Frage 3** **(Anwendung, 7 Punkte)**

Ein Kunde möchte einen möglichst günstigen, aber noch gut deckenden Innenanstrich. Wie wählen Sie die PVK, und welchen Zielkonflikt müssen Sie beachten?

**Wahl:** Eine PVK im mittleren bis oberen Bereich (z. B. 40–60 %, matte Innendispersionsfarbe) — sie kommt mit relativ wenig, günstigem Bindemittel aus.

**Zielkonflikt:** Zu hohe PVK (nahe oder über der KPVK) senkt zwar die Kosten weiter, aber Wischfestigkeit und Filmfestigkeit leiden (siehe L-55); das Deckvermögen steigt oberhalb der KPVK durch Luftporen sogar an (Dry-Hiding) — auf Kosten der Beständigkeit.

**Kompromiss:** Man wählt die PVK so hoch wie für die Kostenersparnis nötig, aber unterhalb der Stelle, wo Wischfestigkeit und Filmfestigkeit spürbar leiden.

**Kontrolle:** Vor der Freigabe wird die Rezeptur auf Deckvermögen und Wischfestigkeit geprüft.

*Bewertung: Die PVK-Wahl wird richtig im mittleren bis hohen Bereich verortet, und der Zielkonflikt Kosten gegen Wischfestigkeit/Filmfestigkeit wird klar benannt — die geforderte Abwägung.*

# L-81 · Anforderungen an Fassadenbeschichtungen

*Wasser draußen halten, aber Dampf durchlassen — der Fassaden-Balanceakt*

**Prüfungsteil 2** · B 4 · A 10

Eine Fassadenbeschichtung muss Wasser und Salze abhalten, aber Wasserdampf von innen durchlassen — dieser Balanceakt bestimmt die Rezeptur.

## Die Hauptaufgabe

Eine Fassadenbeschichtung schützt den Untergrund vor Witterung sowie — je nach System — vor Feuchtigkeit, mechanischen und biologischen Belastungen. Sie muss Wasser und Salze am Eindringen hindern, ohne selbst Feuchtigkeit im Untergrund einzuschließen. Diese doppelte Aufgabe unterscheidet sie von einer reinen Dekorbeschichtung. Sie steht dabei ständig zwischen Witterung und Bausubstanz — Sonne, Frost, Regen und Wind wechseln sich ab.

## Wasserhaushalt und Salze

Flüssiges Wasser (Schlagregen) soll die Beschichtung nicht durchdringen — sonst schädigt es den Untergrund und transportiert Salze, die beim Austrocknen als Ausblühungen kristallisieren und die Beschichtung sprengen können. Das schädigt nicht nur die Optik, sondern auch die Haftung.

## Die zwei Kennwerte: sd-Wert und w-Wert

Zwei Messgrößen fassen den Balanceakt in Zahlen. Der w-Wert (Wasseraufnahmekoeffizient) sagt, wie viel flüssiges Wasser die Fläche kapillar aufnimmt, in kg/(m²·√h); DIN EN 1062-1 teilt ihn ein (bestimmt wird w nach DIN EN 1062-3, der s(d)-Wert nach DIN EN ISO 7783) — von W1 (hoch, w > 0,5) bis W3 (niedrig, w ≤ 0,1). Der sd-Wert ist die diffusionsäquivalente Luftschichtdicke in Metern und beschreibt den Widerstand gegen Wasserdampf — er errechnet sich aus der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ des Materials und der Schichtdicke s: sd = μ · s (eine 100 µm dicke Schicht mit μ = 1400 wirkt wie 0,14 m ruhende Luft); die Klassen reichen von V1 (hoch durchlässig, sd < 0,14 m) bis V3 (niedrig, sd > 1,4 m). Für eine gute Fassade gelten die drei Künzel-Kriterien, und zwar alle drei gleichzeitig: der w-Wert ≤ 0,5 kg/(m²·√h) (hält Schlagregen ab), der sd-Wert ≤ 2,0 m (lässt Dampf entweichen) und zusätzlich das Produkt sd · w ≤ 0,2 kg/(m·√h). Das Produktkriterium allein genügt nicht: Eine Beschichtung mit w = 0,02 und sd = 8 m käme rechnerisch auf 0,16 und wäre trotzdem eine Dampfsperre — deshalb steht die Obergrenze von 2,0 m für den sd-Wert daneben. Innerhalb dieser Grenzen gilt: Ein niedriger w-Wert erlaubt einen etwas höheren sd-Wert und umgekehrt. Staut sich Feuchte hinter einer zu dichten Schicht, drohen Blasen und Abplatzungen. Konkrete Beispiele: Siliconharzfarbe — w ≈ 0,05 kg/(m²·√h), sd ≈ 0,03 m → Produkt 0,0015 (weit unter 0,2 — ideal). Standard-Dispersionsfarbe — w ≈ 0,3, sd ≈ 0,15 → Produkt 0,045 (gut). Versiegelndes System — sd = 2,0, w = 0,05 → Produkt 0,10 (bestanden, aber der sd-Wert liegt genau an der Grenze — Dampf kommt kaum noch heraus).

## Rissüberbrückung und mechanische Belastung

Fassaden sind Temperaturwechseln, Wind und Bewegungen des Untergrunds ausgesetzt. Die Beschichtung muss elastisch genug sein, um feine Risse zu überbrücken, ohne selbst zu reißen — und zugleich mechanisch und chemisch beständig bleiben. Sprödigkeit ist hier der größte Feind der Haltbarkeit.

## Wie sich das in der Rezeptur zeigt

Wasserabweisung erreicht man über hydrophobierende Additive oder Bindemittel (siehe L-79); Diffusionsoffenheit über PVK und Bindemitteltyp (siehe L-80); Rissüberbrückung über ein flexibles, gut filmbildendes Bindemittel (siehe L-76). Alle drei Ziele müssen in einer einzigen Formulierung zusammenkommen — das macht Fassadenrezepturen zu einer der anspruchsvollsten Formulierungsaufgaben.

### Welche Bindemittelchemie

Für Fassaden kommen je nach Untergrund und Anforderung mehrere Bindemittelchemien infrage. Styrol-Acrylat: günstigster Kompromiss — Styrol gibt Härte, Acrylat gibt Flexibilität; Standard für preisbewusste Fassadenfarben; Nachteil: bei hohem Styrolanteil leichte Vergilbung und eingeschränkte UV-Beständigkeit. Reinacrylat: besser UV- und wetterbeständig, keine Vergilbung, flexibler — für hochwertige Außenlacke und elastische Fassadensysteme. Siliconharzfarbe: sehr niedriger w-Wert (< 0,05), sehr niedriger sd-Wert, beste UV-Beständigkeit — für exponierte Lagen und Schlagregengebiete; teuerste Option. Siliconverstärkte Dispersion: Acrylat mit Siliconharzanteil — bessere Hydrophobierung als reines Acrylat bei moderatem Preis. Silicatfarbe (Kaliwasserglas, siehe L-78): keine organische Polymerkette, keine UV-Degradation, keine Kreidung, unbrennbar, sehr hoch diffusionsoffen — ausschließlich auf mineralischen Untergründen (Putz, Beton, Naturstein), nicht auf organisch vorbeschichteten Flächen.

**Merksatz**

Eine gute Fassadenbeschichtung hält flüssiges Wasser draußen, lässt Wasserdampf durch, überbrückt Risse und widersteht Wetter — mehrere Anforderungen, die die Rezeptur gegeneinander abwägen muss.

**Stichwörter:** Fassadenbeschichtung, Wasserhaushalt, Schlagregen, Ausblühung, Salze, Wasserdampfdurchlässigkeit, diffusionsoffen, Rissüberbrückung, Hydrophobierung, Bewitterung, Feuchtigkeitsaufnahme, sd-Wert, w-Wert, DIN EN 1062, Künzel-Werte
*Quellen: Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur; Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; DIN EN 1062; DIN EN ISO 7783*

## Übungsblatt Ü-81 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Warum muss eine Fassadenbeschichtung gleichzeitig wasserabweisend UND wasserdampfdurchlässig sein — ist das kein Widerspruch?

**Wasserabweisend:** Flüssiges Wasser (Schlagregen) soll draußen bleiben, damit es den Untergrund nicht schädigt und keine Salze einträgt.
**Wasserdampfdurchlässig:** Wasserdampf, der von innen kommt (z. B. aus Wohnräumen), muss entweichen können, sonst staut sich Feuchte und verursacht Blasen oder Schimmel.
**Kein Widerspruch:** Flüssigwasser und Wasserdampf werden im Beschichtungsfilm durch unterschiedliche Transportmechanismen beeinflusst: Hydrophobie begrenzt die kapillare Wasseraufnahme, während die Wasserdampfdurchlässigkeit von Filmstruktur, Bindemittel und Porosität abhängt.
**Praxis:** Genau das leisten diffusionsoffene, hydrophobierte Fassadenfarben (siehe L-79).
*Bewertung: Der scheinbare Widerspruch wird korrekt aufgelöst: Es sind unterschiedliche Transportmechanismen — kapillare Aufnahme von Flüssigwasser gegen Diffusion von Wasserdampf —, deshalb ist beides gleichzeitig möglich.*

**Frage 2** **(Berechnung, 9 Punkte)**

Eine Fassadenbeschichtung ist 100 µm dick und hat einen Wasserdampfdiffusionswiderstand µ = 500. Berechnen Sie den sd-Wert (diffusionsäquivalente Luftschichtdicke).

**Formel:** sd = µ · Schichtdicke
**Einheiten umrechnen:** Schichtdicke = 100 µm = 100 · $10^{-6}$ m = 0,0001 m
**Rechnung:** sd = 500 · 0,0001 m = 0,05 m = 5,0 cm
**Antwortsatz:** Der sd-Wert beträgt 5,0 cm.
**Einordnung:** Die Bewertung eines sd-Wertes erfolgt nach dem jeweils verwendeten Norm- und Anwendungszusammenhang; 2 m kann als grober Orientierungswert dienen, ist aber keine universelle Grenze für jede Fassadenkonstruktion. Gemessen an diesem Orientierungswert ist 5 cm sehr durchlässig.
*Bewertung: Die sd-Wert-Formel wird mit korrekter Einheitenumrechnung angewandt, und das Ergebnis wird sinnvoll als „diffusionsoffen“ eingeordnet.*

**Frage 3** **(Anwendung, 7 Punkte)**

An einer sanierten Fassade zeigen sich nach dem ersten Winter Risse in der Beschichtung, obwohl der Untergrund intakt blieb. Welche Anforderung wurde wahrscheinlich nicht erfüllt, und was ist die Konsequenz für die nächste Rezeptur?

**Ursache:** Die Beschichtung war vermutlich nicht ausreichend elastisch, um die feinen Bewegungen des Untergrunds durch Temperaturwechsel zu überbrücken (Rissüberbrückung).

**Diagnose:** Ein zu sprödes Bindemittelsystem oder eine zu hohe Pigmentierung/PVK kann die Elastizität des Beschichtungsfilms vermindern und dadurch die Rissüberbrückung verschlechtern.

**Konsequenz:** Für die Neubeschichtung ein flexibleres Bindemittel mit besserer Filmbildung bei tiefen Temperaturen wählen (siehe L-76).

**Zusatz:** Die PVK überprüfen und gegebenenfalls senken.

*Bewertung: Die Risse werden korrekt auf fehlende Rissüberbrückung/Elastizität zurückgeführt, und die praktische Konsequenz (flexibleres Bindemittel, PVK prüfen) wird sinnvoll abgeleitet.*

# L-82 · Wasserverdünnbare, oxidativ härtende Alkydharze

*Maleinsäureanhydrid schafft die Carboxylgruppen fürs Wasser*

**Prüfungsteil 2** · A 10 · B 12

Ein mit Maleinsäureanhydrid modifiziertes Alkydharz trägt freie Carboxylgruppen, die neutralisiert werden — die oxidative Trocknung bleibt dabei erhalten.

## Das Grundproblem

Ein normales Alkydharz (siehe L-16) ist unpolar und nicht wasserlöslich. Um es wasserverdünnbar zu machen, braucht man freie Carboxylgruppen (–COOH) im Molekül, die mit einem Amin neutralisiert werden können. Der häufigste Weg: nachträgliche Reaktion mit Maleinsäureanhydrid (MAH).

Maleinsäureanhydrid ($C_4H_2O_3$) hat die Struktur –CO–CH=CH–CO–, wobei beide C=O-Gruppen über ein gemeinsames Sauerstoffatom zu einem 5-gliedrigen Anhydridring geschlossen sind. Dieses Molekül hat eine eigene C=C-Doppelbindung — damit reagiert es mit einer Doppelbindung in der Fettsäurekette des Alkydharzes und hängt sich dort an. Beim anschließenden Kontakt mit Wasser öffnet sich der Anhydridring: aus einem Ring entstehen zwei freie –COOH-Gruppen. Schritt für Schritt: Fettsäure–CH=CH– + MAH → Addukt (Anhydridring noch geschlossen) → + $H_2O$ → –COOH + –COOH → + Amin → $–COO^- \cdot H^+Amin$ (wasserlösliches Salz).

MAH ist nicht die einzige Möglichkeit: Trimellithsäureanhydrid (TMA, $C_9H_4O_5$) wird direkt in der Synthese eingebaut und liefert von Haus aus eine freie COOH-Gruppe pro TMA-Einheit — typisch für Einbrenn-Alkydharze. Acrylsäure-Pfropfung setzt COOH radikalisch auf die Kette. Und PEG-Segmente (Polyethylenglykol-Einheiten) im Rückgrat machen das Harz ohne Neutralisation selbstemulgierend — kein Amin nötig, aber PEG bleibt im Film und mindert die Wasserfestigkeit.

## Neutralisation wie gewohnt

Die entstandenen Carboxylgruppen werden wie bei anderen wässrigen Bindemitteln mit einem Amin neutralisiert (siehe L-75); die nötige Aminmenge folgt aus der Säurezahl: m(Amin) = M(Amin) · SZ · m(Harz) / 56 100 (SZ in mg KOH/g). Wichtiger Unterschied: Die Löslichkeit hängt zusätzlich von der Verteilung der Carboxylgruppen im Molekül ab — gleichmäßig verteilte Gruppen lösen sich besser als geballte. Der Hersteller stimmt Reaktionsführung und Molmasse darauf ab.

## Die oxidative Trocknung bleibt

Trotz der Modifizierung härtet das Harz weiterhin oxidativ über die verbleibenden Doppelbindungen seiner Fettsäuren (siehe L-14). Sikkative bleiben also notwendig; sie werden meist als wasserlösliche oder emulgierte Salze zugegeben, da die üblichen Sikkativlösungen selbst unpolar sind.

## Colösemittel und Verarbeitung

Butylglykol (2-Butoxyethanol, $C_6H_{14}O_2$) hat die Struktur $CH_3–CH_2–CH_2–CH_2–O–CH_2–CH_2–OH$: ein unpolares Butylende (löst das Harzmolekül) und eine polare OH-Gruppe (vollständig mit Wasser mischbar). Es wirkt als Brücke — ohne Butylglykol würde das Harz beim Verdünnen mit Wasser ausfallen; mit Butylglykol bleibt die Lösung klar und stabil. Siedepunkt 171 °C: Butylglykol verdunstet langsam und verbessert den Verlauf des Films. Wasserverdünnbare Alkydharze sind meist ein Kompromiss: etwas geringere Beständigkeit als lösemittelhaltige Alkydharze, dafür deutlich weniger Lösemittelemission (siehe L-168).

## Anwendung

Eingesetzt werden sie für Bautenlacke, Heimwerkerlacke und emissionsarme Industrielacke — überall dort, wo die einfache Verarbeitung und oxidative Trocknung eines Alkydharzes gefragt sind, aber Lösemittel vermieden werden sollen. Sie ersetzen dort zunehmend rein lösemittelhaltige Alkydharzsysteme.

**Merksatz**

Wichtig für die Praxis: Maleinsäureanhydrid liefert die Carboxylgruppen, die Neutralisation macht das Alkydharz wasserlöslich — die oxidative Trocknung mit Sikkativ bleibt unverändert — nur der Weg zur Löslichkeit ändert sich.

**Stichwörter:** wasserverdünnbares Alkydharz, Maleinsäureanhydrid, Carboxylgruppe, Neutralisation, oxidative Trocknung, Sikkativ, Colösemittel, Butylglykol, Bautenlack, Emission
*Quellen: Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur; Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie*

## Übungsblatt Ü-82 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**
Wie wird ein normales Alkydharz für die Anwendung in Wasser umgebaut, und was bleibt dabei unverändert?

**Umbau:** Man baut durch Reaktion mit Maleinsäureanhydrid zusätzliche Carboxylgruppen an die Fettsäurekette ein.
**Neutralisation:** Diese Carboxylgruppen werden mit einem Amin neutralisiert und machen das Harz dadurch wasserlöslich (siehe L-75).
**Unverändert:** Die oxidative Trocknung über die Doppelbindungen der Fettsäuren bleibt erhalten — Sikkative sind weiterhin nötig.
**Kernpunkt:** Nur der Löslichkeitsmechanismus ändert sich, der Härtungsmechanismus bleibt derselbe wie beim lösemittelhaltigen Alkydharz.
*Bewertung: Der Umbau (Maleinsäureanhydrid, Neutralisation) wird korrekt beschrieben und klar von der unverändert bleibenden oxidativen Trocknung abgegrenzt.*

**Frage 2** **(Berechnung, 9 Punkte)**
Ein wasserverdünnbares Alkydharz hat eine Säurezahl von 45 mg KOH/g. 800 g davon sollen mit Triethylamin (M ≈ 101 g/mol) vollständig neutralisiert werden. Wie viel Amin wird benötigt? (M(KOH) = 56,1 g/mol)

**Formel:** m(Amin) = M(Amin) · Säurezahl · m(Harz) / 56 100
**Einsetzen:** m(Amin) = 101 · 45 · 800 / 56 100
**Rechnung:** = 3 636 000 / 56 100 ≈ 64,8 g
**Antwortsatz:** Für die vollständige Neutralisation werden rund 64,8 g Triethylamin benötigt.
*Bewertung: Die Neutralisationsformel wird korrekt mit Säurezahl und Aminmolmasse angewandt — dasselbe Verfahren wie bei anderen wässrigen Bindemitteln (siehe L-75).*

**Frage 3** **(Anwendung, 7 Punkte)**
Für einen emissionsarmen Heimwerkerlack wird ein wasserverdünnbares Alkydharz gewählt. Welchen Nachteil gegenüber dem klassischen, lösemittelhaltigen Alkydharz nehmen Sie dafür in Kauf, und warum ist das vertretbar?

**Nachteil:** Etwas geringere Beständigkeit als beim lösemittelhaltigen Alkydharz, bedingt durch die eingebauten Carboxylgruppen und den geringeren Vernetzungsgrad.
**Warum vertretbar:** Für einen Heimwerkerlack stehen geringe Emission, Geruchsarmut und einfache Reinigung der Werkzeuge mit Wasser im Vordergrund, nicht Höchstbeständigkeit.
**Kompromiss:** Der Beständigkeitsverlust ist für diesen Einsatzzweck akzeptabel, für einen hochbeanspruchten Industrielack wäre er das nicht.
**Fazit:** Die Wahl richtet sich nach der Anwendung, nicht nach der maximal erreichbaren Beständigkeit.
*Bewertung: Der Nachteil wird korrekt benannt und die Abwägung anwendungsbezogen begründet — die geforderte Verbindung von Chemie und Praxis.*

# L-83 · Wässrige 2K-Polyurethan-Systeme

*Isocyanat trifft nicht nur OH, sondern auch Wasser*

**Prüfungsteil 1** · A 8.3 · B 12

In wässrigen 2K-PUR-Systemen konkurriert die Isocyanatreaktion mit Wasser um das Isocyanat — deshalb braucht es einen NCO-Überschuss und speziell modifizierte Härter.

## Zwei Reaktionspartner für das Isocyanat

Mischt man ein hydroxyfunktionelles wässriges Bindemittel mit einem Polyisocyanat-Härter (siehe L-25, L-26), reagiert das Isocyanat nicht nur mit den OH-Gruppen, sondern auch mit dem Wasser der Rezeptur — unter Bildung von $CO_2$ und Harnstoff (siehe L-25). Ein Teil des Härters geht so für die Vernetzung verloren; außerdem entsteht $CO_2$, das im Film Blasen verursachen kann. Drei Ansätze haben sich in der Praxis durchgesetzt: hydrophil modifizierte, selbstemulgierende Polyisocyanate, das Auftragen dünner Schichten mit ausreichend Ablüftzeit, damit entstehendes $CO_2$ den Film verlassen kann, bevor er zu viskos wird, sowie der NCO-Überschuss, der den Verlust durch die Wasserreaktion kompensiert.

## Deshalb: NCO-Überschuss

Um trotzdem eine vollständige Vernetzung zu erreichen, setzt man mehr Isocyanat ein, als rein rechnerisch für die OH-Gruppen nötig wäre. Ein NCO:OH-Verhältnis von etwa 1,2 bis 1,5 zu 1 ist ein gängiger Richtwert (statt der sonst üblichen 1:1) — der tatsächlich nötige Überschuss wird empirisch festgelegt und hängt vom jeweiligen Härter und den Applikationsbedingungen ab.

## Hydrophile und hydrophobe Härter

Unmodifizierte, hydrophobe Polyisocyanate mischen sich schlecht ins wässrige Bindemittel und reagieren langsamer mit den OH-Gruppen — reagieren aber auch deutlich weniger mit Wasser, weshalb weniger $CO_2$ entsteht und der Film blasenärmer bleibt. Hydrophil modifizierte Polyisocyanate mischen sich schneller und gleichmäßiger, sind aber reaktiver gegenüber Wasser — mehr $CO_2$-Risiko. Die Praxislösung ist das hydrophil modifizierte, selbstemulgierende Polyisocyanat: Eingebaute hydrophile Segmente sorgen für eine feine, schnelle Emulgierung, sodass die NCO-Gruppen bevorzugt die OH-Gruppen erreichen.

**Merksatz**

Weil die Wasserreaktion sofort einsetzt, ist die Verarbeitungszeit (Topfzeit) wässriger 2K-PUR-Lacke oft kürzer als bei lösemittelhaltigen — je nach System deutlich kürzer; der konkrete Wert steht im technischen Merkblatt, was die Zeitplanung auf der Baustelle beeinflusst.

## Warum trotzdem eingesetzt

Trotz dieser Herausforderungen sind wässrige 2K-PUR-Lacke wichtig, weil sie die hohe Beständigkeit von Polyurethan (siehe L-25) mit stark reduzierter Lösemittelemission verbinden — vor allem für hochwertige Industrie-, Holz- und Schienenfahrzeuglacke, wo Beständigkeit und Umweltverträglichkeit gleichermaßen zählen. In der Fahrzeugreparatur werden wässrige Systeme dagegen vor allem als Basislack eingesetzt; der Klarlack ist dort überwiegend lösemittelhaltiger 2K-PUR. Wässrige Refinish-Klarlacke gibt es, sie bleiben aber eine Nische (siehe L-115, L-116).

### Gesundheitliche Bewertung

Gängige Härter sind z. B. HDI-Trimer oder IPDI-Trimer. Für Diisocyanate gilt heute kein stoffbezogener MAK-Wert mehr, sondern ein Arbeitsplatzgrenzwert auf Basis der gesamten reaktiven Isocyanatgruppen (TRIG), angegeben als NCO. Festgelegt wird dieser Arbeitsplatzgrenzwert in der TRGS 900: Bis zum 31.12.2028 gilt ein Übergangswert von 0,010 mg NCO/m³ (10 µg/m³), danach 0,006 mg NCO/m³ (6 µg/m³), jeweils als Schichtmittelwert; für den 15-Minuten-Kurzzeitwert gilt über den Überschreitungsfaktor 2 der doppelte Wert. Wie zu ermitteln, zu überwachen und zu schützen ist, regelt für Isocyanate die TRGS 430 (Fassung vom 19.12.2025). Maßgeblich ist stets die aktuelle Fassung beider Regelwerke. Das sind mit die niedrigsten Grenzwerte der Lacktechnik — der frühere stoffbezogene Wert lag deutlich höher, die Anforderungen sind also verschärft worden (TRGS 900, TRGS 430). Isocyanate können die Atemwege sensibilisieren: Wer einmal sensibilisiert ist, kann dauerhaft schon auf kleinste Mengen mit asthmatischen Beschwerden reagieren. Zusätzlich reizen sie Haut und Augen. Schutzausrüstung ist auch bei wässrigen Systemen zwingend: Beim Spritzen entstehen Lackaerosole — der erforderliche Atemschutz wird nach Gefährdungsbeurteilung und Expositionssituation ausgewählt, bei Isocyanaten nach den Vorgaben der TRGS 430; bei längeren oder großflächigen Isocyanat-Spritzarbeiten heißt das fremdbelüfteter Atemschutz, also gebläseunterstützte Hauben- bzw. Helmgeräte oder umluftunabhängige Druckluftgeräte (zum Spritzlackieren allgemein: DGUV Regel 109-013, DGUV Information 209-014) —, Nitrilhandschuhe, Schutzbrille. Rechtsgrundlage: GefStoffV und TRGS 430.

**Merksatz**

Isocyanat reagiert in Wasser mit zwei Partnern zugleich: OH-Gruppen und Wasser selbst. Ein NCO-Überschuss und speziell modifizierte Härter gleichen den Verlust an das Wasser aus.

**Stichwörter:** wässriges 2K-PUR, NCO-Überschuss, hydrophiles Polyisocyanat, hydrophobes Polyisocyanat, Topfzeit, Verarbeitungszeit, Wasserreaktion, Automobilreparaturlack, Isocyanatreaktion

*Quellen: Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur; Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; TRGS 430; TRGS 900*

## Übungsblatt Ü-83 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Warum braucht ein wässriges 2K-PUR-System einen NCO-Überschuss, während ein lösemittelhaltiges System möglichst genau 1:1 gemischt wird?

**Lösemittelhaltig:** Dort reagiert das Isocyanat praktisch nur mit den OH-Gruppen des Bindemittels — 1:1 reicht für vollständige Vernetzung (siehe L-27).

**Wässrig:** Hier konkurriert zusätzlich das Wasser der Rezeptur mit den OH-Gruppen um das Isocyanat — ein Teil des Härters reagiert mit Wasser statt mit dem Bindemittel.

**Folge:** Ohne Ausgleich stünde zu wenig Isocyanat für die eigentliche Vernetzung zur Verfügung.

**Lösung:** Ein NCO-Überschuss (typisch 1,2 bis 1,5 zu 1) gleicht den Verlust an das Wasser aus.

*Bewertung: Der Unterschied wird korrekt auf die zusätzliche Wasserreaktion zurückgeführt, und der NCO-Überschuss wird als logische Konsequenz daraus abgeleitet.*

**Frage 2** **(Berechnung, 9 Punkte)**

Ein wässriges Bindemittel hat eine OH-Zahl von 60 mg KOH/g. Wegen der Wasserreaktion soll mit 30 % NCO-Überschuss gearbeitet werden. Berechnen Sie die benötigte NCO-Masse je 100 g Bindemittel. (M(NCO) = 42,02 g/mol, M(KOH) = 56,1 g/mol; Umrechnung der OH-Zahl in eine Stoffmenge siehe L-58)

**Schritt 1 — Stoffmenge OH:** n(OH) = 60 · 100 / 56 100 = 0,107 mol je 100 g Bindemittel

**Schritt 2 — NCO mit Überschuss:** n(NCO) = 0,107 mol · 1,30 = 0,139 mol

**Schritt 3 — Masse NCO:** m(NCO) = 0,139 mol · 42,02 g/mol ≈ 5,84 g

**Antwortsatz:** Je 100 g Bindemittel werden rund 5,84 g NCO benötigt — statt 4,49 g bei stöchiometrischem 1:1-Ansatz.

*Bewertung: Die OH-Zahl wird korrekt in eine Stoffmenge umgerechnet, der Überschuss richtig aufgeschlagen und in eine NCO-Masse überführt. Der Vergleich zum stöchiometrischen Wert zeigt den Überschuss konkret.*

**Frage 3** **(Anwendung, 7 Punkte)**

Für eine Automobil-Reparaturlackierung mit begrenztem Zeitfenster wird ein wässriger 2K-PUR-Klarlack verwendet. Welche Eigenschaft des Härters sollte der Lackierer beachten, und warum?

**Eigenschaft:** Die Verarbeitungszeit (Topfzeit) — sie ist bei wässrigen 2K-PUR-Systemen oft kürzer als bei lösemittelhaltigen, weil die Wasserreaktion sofort nach dem Mischen einsetzt.

**Grund:** Ein Teil des Isocyanats reagiert laufend mit dem Wasser der Rezeptur, wodurch die Reaktivität und Viskosität sich schneller ändern.

**Praxisfolge:** Nur so viel anmischen, wie sich innerhalb der Topfzeit verarbeiten lässt; die Herstellerangabe zur Topfzeit genau beachten.

**Zusatz:** Hydrophil modifizierte Härter mischen sich zwar besser ein, ändern aber nichts an der grundsätzlich begrenzten Zeit.

**Einordnung:** Der wässrige 2K-PUR-Klarlack ist im Refinish eine Nische; Standard bleibt dort der lösemittelhaltige 2K-PUR-Klarlack (siehe L-115, L-116).

*Bewertung: Die Topfzeit wird als kritische Größe erkannt und korrekt auf die Wasserreaktion zurückgeführt — mit einer konkreten Praxisfolge für den Lackierer.*

# L-84 · Wässrige 2K-Epoxidharzlacke

*EP-Harz als Emulsion, drei Härtertypen, begrenzte Topfzeit*

**Prüfungsteil 2** · B 12 · A 10

Wässrige 2K-EP-Systeme können als Emulsion bzw. Dispersion formuliert sein; die Topfzeit hängt unter anderem von Teilchengröße, Diffusion, Reaktivität, Grenzflächen und Temperatur ab.

## Das EP-Harz als Emulsion

Epoxidharz (siehe L-28) ist unpolar und wird für wässrige 2K-EP-Lacke mit einem Emulgator zu feinen Tröpfchen in Wasser emulgiert (Öl-in-Wasser-Emulsion). Diese EP-Harz-Emulsion bildet die Komponente A. Die Tröpfchengröße wird beim Emulgieren gezielt eingestellt.

## Drei Härtertypen

- Wasserlösliche Härter: z. B. DETA ($H_2N–CH_2CH_2–NH–CH_2CH_2–NH_2$) — niedrigviskos, kurze Topfzeit, gut löslich; wegen freiem primären Amin ätzend (H314) und hautsensibilisierend (H317); heute oft durch Addukte ersetzt.
- Wasserdispergierbare Härter: z. B. Polyamidoamine auf Basis von z. B. Versamid-Derivaten als Dispersion — mittlere Reaktivität, weniger freies Amin, bessere Beständigkeit.
- Epoxidharz-modifizierte Addukt-Härter: Reaktionsprodukt aus EP-Harz und Amin, z. B. Aradur 3986 (Huntsman) oder Casamid-Typen — geringstes freies Amin, beste Filmeigenschaften, Standard im Industriekorrosionsschutz.
- Die Wahl richtet sich nach Anwendung: schnelle Trocknung oder maximale Beständigkeit.

## Warum die Topfzeit begrenzt ist

Härter und Harz liegen zunächst in getrennten Tröpfchen bzw. gelöst im Wasser vor. Damit sie reagieren können, muss der Härter erst in die EP-Harz-Tröpfchen eindiffundieren. Je kleiner die Tröpfchen, desto schneller die Diffusion — und desto kürzer die Topfzeit. Auch die Rührintensität beim Ansetzen beeinflusst das Ergebnis. Tückisch: Das Topfzeitende ist bei wässrigen 2K-EP-Lacken oft nicht an einem Viskositätsanstieg erkennbar — die Mischung bleibt scheinbar verarbeitbar, ergibt aber matte, wenig beständige Filme. Deshalb gilt die Herstellerangabe zur Topfzeit, nicht der Augenschein.

## Netzmittel für die Härtung

Epoxyreaktive Netzmittel — kleine epoxidhaltige Moleküle mit einer polaren und einer unpolaren Seite — setzen die Grenzflächenspannung zwischen EP-Harz-Tröpfchen und Wasser herab und werden am Ende fest ins Netzwerk eingebaut. Sie sind nicht bei jeder Formulierung zwingend, aber in der Praxis weit verbreitet — besonders wenn kritische Untergründe wie Stahl oder Beton einwandfrei benetzt werden müssen. Entscheidender Vorteil gegenüber klassischen Tensiden: Durch den Einbau ins Netzwerk wandern sie nicht aus, erzeugen keinen Schaum und schwächen die Barrierewirkung des Films nicht.

## Anwendung

Wässrige 2K-EP-Lacke verbinden die für Epoxidharz typische Haftung und Chemikalienbeständigkeit (siehe L-28) mit geringer Lösemittelemission. Praxisanwendungen: Betonbodenbeschichtung in Parkhäusern und Produktionshallen, Korrosionsschutz-Grundierung nach ISO 12944 (Kategorie C3/C4), Stahlbau- und Brückenbeschichtung sowie Behälterinnenauskleidung (z. B. trinkwassergeeignete Systeme nach KTW-BWGL des Umweltbundesamtes und DVGW W 270).

### Stöchiometrie und Beständigkeit

Chemisch ist es dieselbe Vernetzung wie beim lösemittelhaltigen 2K-Epoxid: Epoxidgruppen plus Amin-Wasserstoffe. Deshalb gilt dieselbe Stöchiometrie — Epoxidäquivalent des Harzes und Amin-Wasserstoff-Äquivalent des Härters müssen zueinander passen (siehe L-28 und L-29); ein grober Über- oder Unterschuss schwächt Härte und Beständigkeit. Zur Beständigkeit: Moderne wässrige 2K-EP-Systeme erreichen fast das Niveau der lösemittelhaltigen und ersetzen sie zunehmend; im sehr anspruchsvollen Korrosionsschutz können lösemittelhaltige oder High-Solid-Systeme aber noch leicht überlegen sein, weil das Wasser während der Härtung Vernetzung und Barrierewirkung etwas stören kann. Der gewählte Härtertyp entscheidet dabei mit.

### Gesundheitliche Bewertung

EP-Harz enthält BADGE (Bisphenol A diglycidyl ether), einen bekannten Hautsensibilisator — auch kleine Mengen können Kontaktallergie auslösen. Primäre Amine wie z. B. DETA oder TEPA wirken ätzend auf Haut und Augen (H314) und können wie das EP-Harz Kontaktallergien auslösen (H317). Addukt-Härter sind deutlich besser verträglich, weil das freie Amin gebunden ist — ein guter Grund, im Korrosionsschutz bevorzugt Addukt-Härter einzusetzen. In wässrigen Systemen sind Lösemitteldämpfe reduziert, aber Amingeruch und Sprühnebel bei Spritzapplikation bleiben gesundheitsrelevant. Schutz: Chemikalienschutzhandschuhe (Nitril oder Butylkautschuk), Schutzbrille, bei Spritzapplikation Atemschutz.

**Merksatz**

Das EP-Harz liegt als Emulsion vor, der Härter muss erst eindiffundieren — kleinere Tröpfchen bedeuten schnellere Reaktion und kürzere Topfzeit. Drei Härtertypen stehen für unterschiedliche Ansprüche zur Wahl — von schnell bis besonders beständig.

**Stichwörter:** wässriges 2K-EP, EP-Harz-Emulsion, Emulgator, wasserlöslicher Härter, wasserdispergierbarer Härter, EP-modifizierter Härter, Diffusion, Topfzeit, epoxyreaktives Netzmittel, Korrosionsschutz

*Quellen: Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur; Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; ISO 12944*

## Übungsblatt Ü-84 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Warum ist die Topfzeit eines wässrigen 2K-EP-Lacks von der Tröpfchengröße der EP-Harz-Emulsion abhängig?

**Ausgangslage:** Das EP-Harz liegt als Emulsion in feinen Tröpfchen vor; der Härter ist im Wasser gelöst oder ebenfalls dispergiert.

**Reaktionsbedingung:** Damit Harz und Härter reagieren können, muss der Härter erst in die EP-Harz-Tröpfchen eindiffundieren.

**Tröpfchengröße:** Kleinere Tröpfchen haben eine größere Oberfläche im Verhältnis zu ihrem Volumen — der Härter diffundiert schneller vollständig hinein.

**Folge:** Kleinere Tröpfchen bedeuten schnellere Reaktion und damit kürzere Topfzeit; größere Tröpfchen verlängern sie.

*Bewertung: Der Zusammenhang zwischen Tröpfchengröße, Diffusionsweg und Reaktionsgeschwindigkeit wird korrekt und in der richtigen Wirkrichtung erklärt.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**

Eine wässrige 2K-EP-Grundierung enthält 8,0 cm³ Pigment/Füllstoff und 12,0 cm³ Bindemittel-Festkörper (bezogen auf 100 g Rezeptur). Berechnen Sie die PVK (Wiederholung aus L-55: PVK = V(Pigment + Füllstoff) / (V(Pigment + Füllstoff) + V(Bindemittel)) · 100 %).

**Formel:** PVK = Volumen Pigment/Füllstoff / (Volumen Pigment/Füllstoff + Volumen Bindemittel) · 100 %

**Einsetzen:** PVK = 8,0 / (8,0 + 12,0) · 100 %

**Rechnung:** = 8,0 / 20,0 · 100 % = 40,0 %

**Antwortsatz:** Die PVK beträgt 40,0 %.

*Bewertung: Die PVK-Formel wird korrekt mit den gegebenen Volumenanteilen angewandt (siehe L-55).*

**Frage 3** **(Anwendung, 7 Punkte)**

Für einen Betonboden mit hoher chemischer Beanspruchung soll ein wässriger 2K-EP-Lack formuliert werden, bei dem Beständigkeit wichtiger ist als schnelle Durchtrocknung. Welchen Härtertyp wählen Sie und warum?

**Wahl:** Einen Epoxidharz-modifizierten Härter.

**Begründung:** Dieser Typ reagiert zwar langsamer, ergibt aber die beste Filmqualität und Beständigkeit unter den drei Härtertypen — genau das ist hier gefordert.

**Warum nicht die Alternativen:** Ein wasserlöslicher Härter wäre zwar schnell, aber weniger beständig; ein wasserdispergierbarer liegt dazwischen.

**Konsequenz:** Die längere Durchtrocknungszeit muss in der Bauplanung berücksichtigt werden.

*Bewertung: Der Härtertyp wird korrekt nach dem Kriterium Beständigkeit vor Geschwindigkeit gewählt, und die Alternativen werden folgerichtig ausgeschlossen — die geforderte Abwägung.*

# L-85 · Wässrige Einbrennlacke auf Aminoharzbasis

*Melaminharze hydrolysieren im Wasser — die Rezeptur muss das ausgleichen*

**Prüfungsteil 2** · A 10 · B 12

Melaminharze reagieren im wässrigen Milieu langsamer als in Lösemittel und können hydrolysieren; Neutralisationsmittelwahl und Kombinationsbindemittel gleichen das aus.

## Warum es schwieriger ist als lösemittelhaltig

Melaminharze (siehe L-32) wurden ursprünglich für lösemittelhaltige Systeme entwickelt. In Wasser vernetzen sie langsamer, weil Wasser als Reaktionspartner mit den OH-Gruppen des Bindemittels um die Methylolethergruppen des Melaminharzes konkurriert.

## Hydrolyseempfindlichkeit

Vollveretherte Melaminharze (HMMM, siehe L-32) tragen an jedem Stickstoff nur noch –N(CH₂–O–CH₃)₂-Gruppen — keine –NH– mehr. Teilveretherte, iminogruppenhaltige Typen behalten mindestens eine –N(H)(CH₂–O–CH₃)-Gruppe: Diese –NH– macht sie reaktiver (Vernetzung auch ohne Säurekatalysator), aber auch hydrolyseempfindlicher: Ihre Methylolethergruppen werden von Wasser leichter gespalten als die der vollveretherten Typen. Reaktionsgleichungen auf LL-Niveau: Vernetzung: –N–CH₂–OCH₃ + HO–Polyester → –N–CH₂–O–Polyester + CH₃OH. Hydrolyse (Rückreaktion): –N–CH₂–OCH₃ + H₂O → –NH– + CH₂O + CH₃OH. Das CH₂O ist Formaldehyd — nach der obigen Gleichung entsteht es bei der Hydrolyse; bei der Vernetzung wird Methanol frei (bei methylolgruppenhaltigen Typen zusätzlich Formaldehyd). Formaldehyd ist als krebserzeugend eingestuft (Carc. 1B, H350) und reizt Schleimhäute; in gut ausgehärteten Filmen ist die freigesetzte Menge gering, bei fehlerhafter Formulierung kann es aber zur messbaren Freisetzung kommen. Die Formulierung muss den Kompromiss aus Reaktivität und Stabilität berücksichtigen.

## Kombinationsbindemittel

Als OH-Partner dienen wasserlösliche gesättigte Polyester oder wasserverdünnbare Alkydharze (siehe L-19, L-82), die niedrigmolekular genug sind, um sich zu lösen, aber ausreichend viele OH-Gruppen tragen, um mit dem Melaminharz gut zu vernetzen.

## Neutralisationsmittel und Colösemittel

AMP (2-Amino-2-methylpropanol, Formel: (CH₃)₂C(NH₂)–CH₂–OH) ist ausschließlich Neutralisationsmittel, kein Colösemittel: Es neutralisiert die COOH-Gruppen am Polyester oder Alkydharz zum wasserlöslichen Ammoniumcarboxylat. Die OH-Gruppe im Molekül macht AMP weniger flüchtig als rein tertiäre Amine — bessere Lagerstabilität und gleichmäßigerer Verlauf. Alternativen: TEA (Triethylamin) — klassisch, verdampft schnell; DMEA (Dimethylethanolamin) — Kompromiss; Morpholin (Formel: O(CH₂CH₂)₂NH, sechsgliedriger Ring mit Sauerstoff und NH) — früher verbreitet, kann aber als sekundäres Amin krebserzeugende N-Nitrosamine bilden und ist deshalb in modernen Formulierungen weitgehend ausgemustert (selbst ist es ätzend, aber nicht CMR-eingestuft). Gesundheitliche Bewertung AMP: haut- und augenreizend (H315/H319), kein CMR-Potenzial — deshalb heute Standardwahl. Den maßgeblichen Arbeitsplatzgrenzwert nennt die TRGS 900 beziehungsweise das Sicherheitsdatenblatt (siehe L-172); MAK-Werte sind abgelöst. Colösemittel wie Butylglykol oder Butyldiglykol (siehe L-75 und L-82) verbessern Löslichkeit und Filmbildung.

## Hybridsysteme

Kombiniert man wässrige Aminoharz-Einbrennlacke mit einer Dispersion, entstehen Hybridsysteme: Sie trocknen zunächst physikalisch (Koaleszenz, siehe L-76) und vernetzen erst beim Einbrennen zusätzlich chemisch — das ergibt eine schnellere Filmbildung als reine Lösungssysteme und mehr Prozesssicherheit auf der Linie.

**Merksatz**

In Wasser konkurriert die Melaminharz-Vernetzung mit der Hydrolyse. Passende Kombinationsbindemittel, ein langsam verdunstendes Neutralisationsmittel wie AMP und Colösemittel gleichen das aus — ein typisches Beispiel dafür, wie Rezeptur Chemie kompensiert.

**Stichwörter:** wässriger Einbrennlack, Aminoharz, Melaminharz, HMMM, Hydrolyse, Kombinationsbindemittel, AMP, Aminomethylpropanol, Colösemittel, Hybridsystem, Koaleszenz
*Quellen: Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur; Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie*

## Übungsblatt Ü-85 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**
Warum reagieren Melaminharze in wässrigen Einbrennlacken langsamer und wie wird das in der Rezeptur ausgeglichen?

**Ursache:** Wasser konkurriert als Reaktionspartner mit den OH-Gruppen des Bindemittels um die Methylolethergruppen des Melaminharzes; besonders die teilveretherten, iminogruppenhaltigen Typen mit freien –NH–-Gruppen können im sauren Milieu hydrolysieren, statt zu vernetzen; vollveretherte HMMM-Typen sind hydrolytisch stabiler.
**Kombinationsbindemittel:** Wasserlösliche gesättigte Polyester oder Alkydharze mit ausreichend OH-Gruppen liefern gute Vernetzungspartner.
**Neutralisationsmittel:** AMP wird oft bevorzugt, weil es langsamer verdunstet als Triethylamin und dadurch Verlauf und Lagerstabilität verbessert.
**Colösemittel:** Sie unterstützen zusätzlich Löslichkeit und Filmbildung.
*Bewertung: Die Ursache (Konkurrenzreaktion mit Wasser, Hydrolyseneigung) und alle drei Ausgleichsmaßnahmen (Bindemittel, Neutralisationsmittel, Colösemittel) werden korrekt genannt.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**
Ein wässriger Einbrennklarlack soll im Bindemittel 28 % Melaminharz (Festkörper) enthalten. Vorhanden sind 4,0 kg Polyester-Festkörper. Wie viel Melamin-Festkörper wird gebraucht?

**Ansatz:** Der Polyester ist der Rest: 100 % − 28 % = 72 %. 4,0 kg entsprechen also dem 72 %-Anteil.
**Bindemittel gesamt:** 4,0 kg / 0,72 ≈ 5,56 kg
**Melamin-Festkörper:** 5,56 kg − 4,0 kg = 1,56 kg
**Antwortsatz:** Es werden rund 1,56 kg Melamin-Festkörper gebraucht.
*Bewertung: Der Polyesteranteil wird korrekt als 72 %-Rest erkannt und daraus Bindemittelgesamtmasse und Melaminanteil bestimmt — dasselbe Rechenmuster wie bei lösemittelhaltigen Systemen (siehe L-32).*

**Frage 3** **(Anwendung, 7 Punkte)**
Ein Hybridsystem aus wässrigem Aminoharz-Einbrennlack und einer Dispersion soll formuliert werden. Erklären Sie, warum ein solches System schneller einen stabilen Film aufbaut als ein reines Lösungssystem.

**Reines Lösungssystem:** Muss vollständig auf die chemische Vernetzung beim Einbrennen warten, um einen festen Film zu bilden.
**Hybridsystem:** Die Dispersionsteilchen bilden schon beim Verdunsten des Wassers durch Koaleszenz einen ersten, physikalisch getrockneten Film (siehe L-76).
**Beim Einbrennen:** Zusätzlich vernetzt das Aminoharz chemisch mit dem Bindemittel und macht den Film erst richtig beständig.
**Vorteil:** Das Hybridsystem hat also schon vor dem Einbrennen einen stabileren, weniger empfindlichen Film als das reine Lösungssystem.
*Bewertung: Der Vorteil wird korrekt auf die zusätzliche physikalische Filmbildung der Dispersion zurückgeführt, die dem reinen Lösungssystem fehlt — mit klarem Bezug zur Koaleszenz aus L-76.*

# L-86 · Elektrotauchlackierung — Prinzip

*Geladene Lackteilchen wandern im elektrischen Feld zum Werkstück*

**Prüfungsteil 1** · B 10 · A 8.3

Beim Elektrotauchlackieren wandern geladene Lackteilchen im elektrischen Feld zum Werkstück und scheiden sich dort als geschlossener Film ab — auch in Hohlräumen und an Kanten.

## Das Grundprinzip

Das Werkstück hängt als Elektrode in einem Tauchbecken mit dem Elektrotauchlack-Bad. Legt man eine Gleichspannung an, wandern die geladenen Lackteilchen (Bindemittel mit eingebetteten Pigmenten) zum Werkstück (Elektrophorese) und scheiden sich dort ab — die Schicht wächst, bis sie isolierend genug ist, um den Stromfluss zu stoppen. So begrenzt sich die Schichtdicke von selbst.

## Zwei Grundtypen

Bei ATL (anodische Tauchlackierung) ist das Bindemittel negativ geladen und wandert zur Anode — dem Werkstück. Bei KTL (kathodische Tauchlackierung) ist es positiv geladen und wandert zur Kathode. KTL ist aus zwei Gründen korrosionsschutzstärker: Erstens wird das Werkstück als Kathode nicht anodisch angegriffen — kein Metallabtrag während der Beschichtung. Zweitens ergibt das Epoxid-Isocyanat-Netzwerk eine dichtere, barrierestärkere Schicht als das carboxylgruppenhaltige ATL-Netzwerk (siehe L-87, L-88). Beide nutzen dasselbe Grundprinzip, nur mit umgekehrter Polung.

## Warum das Verfahren so gut deckt

Anders als beim Spritzen erreicht die Elektrophorese auch abgeschattete Flächen, Hohlräume und Kanten, weil das elektrische Feld dorthin folgt, wo noch kein Film ist. Das macht ETL besonders geeignet für komplex geformte Teile wie Automobilkarosserien, wo sich sonst kaum jeder Winkel erreichen ließe.

## Vorteile in der Serienfertigung

Elektrotauchlacke sind wässrig und damit emissionsarm, lassen sich vollautomatisch verarbeiten und liefern eine sehr gleichmäßige Schichtdicke. Der Materialeinsatz ist effizient, weil überschüssiges Material aus dem Bad zurückgewonnen werden kann (siehe L-89). Das senkt Kosten und Materialverlust deutlich.

## Anwendung

Elektrotauchlackierung ist Standard für die Grundierung von Automobilkarosserien sowie für viele Industrieprodukte, wo eine gleichmäßige Grundierschicht mit gutem Korrosionsschutz auch an Kanten und in schwer zugänglichen Bereichen gefragt ist — die tatsächliche Deckung hängt von Bauteilgeometrie, Vorbehandlung und Prozessführung ab, eine buchstäblich lückenlose Beschichtung garantiert das Verfahren nicht. Nachfolgende Schichten wie Füller und Decklack bauen auf dieser Basis auf.

## Warum das Wasser reagiert

Das Wasser im Bad wird durch den Strom aufgespalten: An der Kathode entstehen Hydroxidionen ($OH^-$) und Wasserstoffgas, an der Anode entstehen Protonen ($H^+$) und Sauerstoff. Diese Ionen bilden sich direkt am Werkstück und ändern dort schlagartig den pH-Wert. Genau das löst die Abscheidung aus: Die $OH^-$ entladen bei KTL die positiven Amingruppen des Bindemittels, die $H^+$ entladen bei ATL die negativen Carboxylatgruppen. Das Bindemittel verliert dadurch seine Ladung und wird unlöslich — es schlägt sich als Film nieder. Das Wasser ist also nicht nur Lösemittel, sondern der eigentliche Auslöser der Filmbildung (siehe L-87, L-88).

**Merksatz**

ETL nutzt die Elektrophorese: geladene Bindemittelteilchen wandern im Feld zum Werkstück. ATL (anodisch) und KTL (kathodisch) unterscheiden sich in Ladung und Zielelektrode — KTL ist heute Standard im Automobilbau.

**Stichwörter:** Elektrotauchlackierung, ETL, ATL, KTL, Elektrophorese, Tauchbecken, Anode, Kathode, Automobilkarosserie, Korrosionsschutz, Serienfertigung
*Quellen: Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur; Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie*

## Übungsblatt Ü-86 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**
Erklären Sie das Grundprinzip der Elektrotauchlackierung und den Unterschied zwischen ATL und KTL.

**Grundprinzip:** Das Werkstück hängt als Elektrode in einem Tauchbecken mit wässriger Bindemitteldispersion; unter Gleichspannung wandern geladene Bindemittelteilchen zum Werkstück und scheiden sich als Film ab.
**ATL:** Das Bindemittel ist negativ geladen und wandert zur Anode.
**KTL:** Das Bindemittel ist positiv geladen und wandert zur Kathode.
**Praxisrelevanz:** KTL ist heute der Standard, weil es besseren Korrosionsschutz bietet (siehe L-88).
*Bewertung: Das Grundprinzip (Elektrophorese, Werkstück als Elektrode) wird korrekt beschrieben und ATL/KTL klar über Ladung und Zielelektrode unterschieden.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**
Der Festkörper eines Elektrotauchlack-Bades besteht aus 6,0 kg Pigment und 44,0 kg Bindemittel-Festkörper. Berechnen Sie den Pigment-Massenanteil am Gesamtfestkörper.

**Formel:** Massenanteil = m(Pigment) / (m(Pigment) + m(Bindemittel)) · 100 %
**Einsetzen:** = 6,0 / (6,0 + 44,0) · 100 %
**Rechnung:** = 6,0 / 50,0 · 100 % = 12,0 %
**Antwortsatz:** Der Pigment-Massenanteil beträgt 12,0 %.
*Bewertung: Der Massenanteil wird korrekt aus den gegebenen Massen berechnet.*

**Frage 3** **(Anwendung, 7 Punkte)**
Warum eignet sich die Elektrotauchlackierung besonders gut für komplex geformte Automobilkarosserien mit vielen Hohlräumen, während Spritzverfahren dort an Grenzen stoßen?

**Spritzverfahren:** Der Sprühnebel kann Hohlräume, abgeschattete Flächen und enge Kanten nicht oder nur unvollständig erreichen (siehe L-67).
**Elektrotauchlackierung:** Das elektrische Feld folgt dorthin, wo noch kein isolierender Film liegt — auch in Hohlräume und an schwer zugängliche Stellen.
**Selbstbegrenzung:** Sobald sich an einer Stelle genug Film gebildet hat, sinkt dort der Stromfluss, und die Abscheidung verlagert sich auf noch unbeschichtete Bereiche.
**Ergebnis:** So entsteht eine gleichmäßige Grundierung auch an schwer zugänglichen Stellen — wie weit der Umgriff reicht, hängt von Prozessführung und Bauteilgeometrie ab.
*Bewertung: Der Unterschied wird korrekt auf die Feldführung zurückgeführt, und der Selbstbegrenzungsmechanismus wird als Grund für die Gleichmäßigkeit erkannt.*

# L-87 · Anodische Elektrotauchlacke (ATL)

*Carboxylgruppen wandern zur Anode und werden dort unlöslich*

**Wahlqualifikation** · B 10 · B 12

ATL-Bindemittel sind anionisch stabilisiert; an der Anode entladen sich die Carboxylatgruppen, das Bindemittel wird unlöslich und schlägt sich als Film nieder.

## Das Bindemittel

ATL-Bindemittel tragen Carboxylgruppen, die neutralisiert und dadurch anionisch (negativ geladen) wasserlöslich gemacht wurden (siehe L-75) — häufig maleinisierte Öle, Alkydharze (siehe L-82) oder Phenolharze (siehe L-35). Das Maleinsäureanhydrid liefert dabei zusätzliche Carboxylgruppen. Eine ausreichende Zahl neutralisierbarer Carboxylgruppen verbessert in einem geeigneten Bereich die Wasserdispergierbarkeit bzw. Wasserlöslichkeit; die optimale Menge hängt jedoch auch von Neutralisation, Polymerstruktur und Molmasse ab. Die nötige Aminmenge folgt aus der Säurezahl (SZ, in mg KOH/g): m(Amin) = M(Amin) · SZ · m(Bindemittel) / 56 100 — analog zur Neutralisation wasserverdünnbarer Bindemittel (siehe L-75).

## Die Anodenreaktion

An der Anode (dem Werkstück) wird Wasser zu Sauerstoff und Protonen oxidiert. Die entstehenden Protonen neutralisieren die Carboxylatgruppen des Bindemittels — es verliert seine Ladung und damit seine Wasserlöslichkeit und koaguliert als Film auf dem Werkstück. Die eigentliche Filmbildung setzt also erst am Werkstück selbst ein, nicht schon im Bad.

## Warum das Werkstück die Anode ist

Das ATL-Bindemittel ist anionisch — negativ geladen, weil die Carboxylatgruppen –$COO^-$ die Ladung tragen. Im elektrischen Feld wandern negative Ionen immer zur positiven Elektrode, der Anode. Damit das Bindemittel also ans Werkstück kommt, muss das Werkstück die Anode sein — es wird an den Pluspol der Gleichspannungsquelle angeschlossen.

## Eigenschaften

ATL-Filme sind seit Jahrzehnten bewährt, zeigen aber geringeren Korrosionsschutz als KTL — aus zwei Gründen: Erstens wird das Werkstück als Anode während der Beschichtung leicht anodisch angegriffen (Metallabtrag). Zweitens bleiben die Carboxylgruppen im abgeschiedenen Film bestehen — sie sind hydrophil und können Wasser ins Netzwerk ziehen, was den Korrosionsschutz schwächt. Beim Einbrennen reagieren manche COOH-Gruppen mit dem Vernetzer (z. B. Melaminharz) und werden eingebunden, was den Effekt teilweise reduziert — aber nicht vollständig beseitigt.

## Vernetzer

Als Vernetzer für anodische Bindemittel dienen unter anderem Melaminharze (siehe L-32) oder Phenolharze — beim Einbrennen entsteht daraus ein chemisch vernetzter, beständiger Film. Die Wahl beeinflusst Härte und Flexibilität des fertigen Films spürbar.

## Anwendung heute

ATL wird heute seltener eingesetzt als KTL, findet sich aber noch bei einfacheren Industrieanwendungen, wo der geringere Korrosionsschutz ausreicht und die Kosten eine Rolle spielen. Für Automobilkarosserien ist es weitgehend von KTL abgelöst worden, bleibt aber für Nischenanwendungen relevant.

## Reaktionsgleichung: anodische Abscheidung (ATL)

Am Werkstück (Anode) wird Wasser oxidiert:

$$2\ H_2O \rightarrow O_2\uparrow + 4\ H^+ + 4\ e^-$$

Die $H^+$ neutralisieren die –$COO^-$-Gruppen des Bindemittels:

$$-COO^- + H^+ \rightarrow -COOH \rightarrow \text{wasserunlöslich} \rightarrow \text{Abscheidung am Werkstück.}$$

**Merksatz**

ATL: negativ geladenes, carboxylhaltiges Bindemittel wandert zur Anode; dort entladen es Protonen aus der Wasseroxidation, es koaguliert als Film. Geringerer Korrosionsschutz als KTL, dafür oft günstiger in der Anlage.

**Stichwörter:** ATL, anodische Elektrotauchlackierung, Carboxylgruppe, Anodenreaktion, Wasseroxidation, Koagulation, maleinisiertes Öl, Phenolharz, Melaminharz, Korrosionsschutz
*Quellen: Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur; Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie*

## Übungsblatt Ü-87 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**
Wie wird ein ATL-Bindemittel an der Anode entladen und unlöslich?

**Ausgangszustand:** Das Bindemittel trägt neutralisierte, negativ geladene Carboxylatgruppen und ist dadurch wasserlöslich.
**Anodenreaktion:** An der Anode wird Wasser zu Sauerstoff und Protonen oxidiert.
**Entladung:** Die entstehenden Protonen neutralisieren die Carboxylatgruppen — sie werden wieder zu neutralen Carboxylgruppen.
**Folge:** Das Bindemittel verliert seine Ladung und damit seine Wasserlöslichkeit; es koaguliert als Film auf dem Werkstück.
*Bewertung: Der Mechanismus wird vollständig und in der richtigen Reihenfolge (Oxidation, Protonen, Entladung, Koagulation) beschrieben.*

**Frage 2** **(Berechnung, 9 Punkte)**
Ein ATL-Bindemittel hat eine Säurezahl von 60 mg KOH/g. 1000 g davon sollen mit DMEA (M ≈ 89 g/mol) vollständig neutralisiert werden. Wie viel DMEA wird benötigt? (M(KOH) = 56,1 g/mol)

**Formel:** m(Amin) = M(Amin) · Säurezahl · m(Bindemittel) / 56 100
**Einsetzen:** m(DMEA) = 89 · 60 · 1000 / 56 100
**Rechnung:** = 5 340 000 / 56 100 ≈ 95,2 g
**Antwortsatz:** Für die vollständige Neutralisation werden rund 95,2 g DMEA benötigt.
*Bewertung: Die Neutralisationsformel wird korrekt mit Säurezahl und Aminmolmasse angewandt — dasselbe Verfahren wie bei anderen wässrigen, carboxylhaltigen Bindemitteln (siehe L-75).*

**Frage 3** **(Anwendung, 7 Punkte)**
Ein Hersteller möchte von ATL auf KTL umstellen, um den Korrosionsschutz seiner Stahlteile zu verbessern. Erklären Sie den grundlegenden Unterschied, der dafür verantwortlich ist.

**Bei ATL:** Das Werkstück ist die Anode; an der Anode können unter bestimmten Bedingungen auch Metallionen aus dem Werkstück selbst in Lösung gehen (anodische Auflösung), was dem Korrosionsschutz entgegenwirken kann.
**Bei KTL:** Das Werkstück ist die Kathode; hier findet keine anodische Metallauflösung statt, stattdessen wirkt die Kathode elektrochemisch geschützt.
**Zusatzfaktor:** Im ATL-Film verbleiben hydrophile Carboxylgruppen, die Wasser ins Netzwerk ziehen können — das schwächt den Korrosionsschutz zusätzlich; KTL-Filme haben diese Schwachstelle nicht.
**Fazit:** Beide Effekte zusammen erklären, warum KTL den besseren Korrosionsschutz bietet.
*Bewertung: Der elektrochemische Grundunterschied (Werkstück als Anode vs. Kathode) wird korrekt benannt und um den Bindemittelunterschied ergänzt — eine vollständige Erklärung.*

# L-88 · Kathodische Elektrotauchlacke (KTL)

*Amin-Epoxid-Bindemittel und verkappte Isocyanate — der Automobil-Standard*

**Wahlqualifikation** · B 10 · B 12

KTL-Bindemittel sind kationisch stabilisierte Amin-Epoxidharze, die an der Kathode entladen werden; ein verkapptes Polyisocyanat vernetzt beim Einbrennen — der Standard-Korrosionsschutz im Automobilbau.

## Das Bindemittel

KTL-Bindemittel bestehen aus Amin und Epoxid in einem Molekül: Ein Epoxidharz (z. B. Bisphenol-A-Epoxid, siehe L-28) wird mit einem Amin umgesetzt — die Epoxidgruppe öffnet sich, das Amin addiert sich an. So entstehen sekundäre OH-Gruppen und tertiäre Amingruppen im selben Molekülgerüst. Mit Säure (z. B. Essigsäure) werden die Amingruppen protoniert: $R_3N + H^+ \rightarrow R_3NH^+$ — das gibt dem Bindemittel seine positive Ladung und macht es kationisch wasserdispergierbar. Die OH-Gruppen aus der Epoxidöffnung dienen später der Vernetzung mit dem verkappten Isocyanat-Härter beim Einbrennen.

## Die Kathodenreaktion

An der Kathode (dem Werkstück) wird Wasser reduziert; es entstehen Hydroxidionen und Wasserstoff. Die Hydroxidionen deprotonieren die Aminogruppen des Bindemittels — es verliert seine Ladung und koaguliert als Film auf dem Werkstück. Der entstehende Wasserstoff entweicht als Gas aus dem Bad.

## Verkappte Isocyanat-Vernetzer

Als Vernetzer dient meist ein verkapptes Polyisocyanat (siehe L-33), das im Bindemittelfilm mit eingebaut wird. Beim Einbrennen entkappt es und vernetzt mit den OH-Gruppen des Epoxidharzes — es entsteht ein sehr dichtes, beständiges Netzwerk. Genau dieses Netzwerk trägt wesentlich zur Chemikalienbeständigkeit bei.

## Warum besserer Korrosionsschutz

Weil das Werkstück als Kathode geschaltet ist, wird seine anodische Auflösung während der Abscheidung verhindert; der dauerhafte Korrosionsschutz entsteht vor allem durch das anschließend vernetzte, dichte Epoxid-Netzwerk (Barrierefilm). Deshalb hat sich KTL insbesondere im Automobilbau als Standard etabliert.

## Anwendung

KTL ist heute Standard für die Grundierung von Automobilkarosserien weltweit — praktisch jedes moderne Auto trägt eine KTL-Schicht als erste, korrosionsschützende Lackschicht unter Füller und Decklack. Dazu kommen die Verfahrensvorteile der Elektrotauchlackierung: Die Abscheidung im elektrischen Feld erreicht auch Hohlräume und Kanten (siehe L-86), und durch die Rückgewinnung aus dem Bad ist der Materialeinsatz nahezu verlustfrei (siehe L-89). Auch viele Industrieprodukte mit hohen Korrosionsschutzanforderungen nutzen KTL.

## Reaktionsgleichung: kathodische Abscheidung (KTL)

Am Werkstück (Kathode) wird Wasser reduziert:

$$2\ H_2O + 2\ e^- \rightarrow H_2\uparrow + 2\ OH^-$$

Die $OH^-$ deprotonieren die Amingruppen des Bindemittels:

$$R_3NH^+ + OH^- \rightarrow R_3N + H_2O$$

Das deprotonierte Amin $R_3N$ ist neutral → wasserunlöslich → koaguliert als Film am Werkstück.

**Merksatz**

KTL: positiv geladenes Amin-Epoxidharz wandert zur Kathode, wo Hydroxidionen es entladen; verkapptes Isocyanat vernetzt beim Einbrennen. Sehr hoher Korrosionsschutz unter den Elektrotauchlacken — im Automobilbau als Standard etabliert.

**Stichwörter:** KTL, kathodische Elektrotauchlackierung, Amin-Epoxidharz, Kathodenreaktion, verkapptes Polyisocyanat, kathodischer Korrosionsschutz, Automobilkarosserie, Grundierung, Deprotonierung
*Quellen: Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur; Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie*

## Übungsblatt Ü-88 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**
Beschreiben Sie den Ablauf vom flüssigen KTL-Bad bis zum vernetzten Film auf dem Werkstück.

**Ausgangszustand:** Ein kationisch stabilisiertes Amin-Epoxidharz mit verkapptem Polyisocyanat liegt dispergiert im wässrigen Bad vor.
**Wanderung:** Unter Gleichspannung wandert das positiv geladene Bindemittel zur Kathode, dem Werkstück.
**Entladung:** An der Kathode entstehen durch Wasserreduktion Hydroxidionen, die die Amingruppen des Bindemittels deprotonieren; es verliert seine Ladung und koaguliert als Film.
**Einbrennen:** Beim Einbrennen entkappt der Isocyanat-Vernetzer und reagiert mit den OH-Gruppen des Epoxidharzes zu einem dichten, beständigen Netzwerk.
*Bewertung: Alle vier Schritte (Wanderung, Entladung, Koagulation, chemische Vernetzung beim Einbrennen) werden vollständig und in richtiger Reihenfolge beschrieben.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**
Ein KTL-Bindemittel-Festkörper (8,0 kg) soll zu 25 % aus verkapptem Polyisocyanat-Vernetzer bestehen. Wie viel Vernetzer und wie viel Amin-Epoxidharz enthält er?

**Vernetzer:** 8,0 kg · 0,25 = 2,0 kg
**Epoxidharz:** 8,0 kg − 2,0 kg = 6,0 kg (bzw. 8,0 kg · 0,75 = 6,0 kg)
**Antwortsatz:** Der Bindemittel-Festkörper enthält 2,0 kg Vernetzer und 6,0 kg Amin-Epoxidharz.
*Bewertung: Der Prozentanteil wird korrekt auf die Gesamtmasse angewandt und der Rest richtig ergänzt.*

**Frage 3** **(Anwendung, 7 Punkte)**
Warum ist KTL heute der Standard für die Erstbeschichtung von Automobilkarosserien, obwohl das Verfahren aufwendiger ist als einfaches Spritzen?

**Korrosionsschutz:** KTL bietet einen sehr hohen Korrosionsschutz unter den Elektrotauchlacken — wichtig für die Langlebigkeit einer Karosserie (siehe L-87).
**Lückenlose Deckung:** Elektrophorese erreicht auch Hohlräume und Kanten, wo Rost meist zuerst entsteht (siehe L-86).
**Wirtschaftlichkeit:** Trotz höherer Anlagenkosten ist der Materialeinsatz durch Rückgewinnung sehr effizient (siehe L-89) und der Prozess vollautomatisierbar.
**Fazit:** Der höhere Aufwand zahlt sich durch geringere Garantiekosten und längere Fahrzeuglebensdauer aus.
*Bewertung: Die Vorteile (Korrosionsschutz, Deckung, Wirtschaftlichkeit) werden vollständig genannt und gegen den höheren Aufwand abgewogen — die geforderte Gesamtbetrachtung.*

# L-89 · Elektrotauchlack — Verfahrenstechnik

*Badmanagement, Ultrafiltration und die Rückgewinnung von Material*

**Prüfungsteil 1** · B 10 · A 8.4

Ein Elektrotauchlackbad muss laufend nachdosiert, filtriert und mit Ultrafiltration gespült werden, damit Konzentration und Reinheit konstant bleiben.

## Das Bad im Gleichgewicht

Ein Elektrotauchlackbad ist ein dauerhaft betriebenes System: Bindemittel, Pigmentpaste und Wasser werden entnommen (auf dem Werkstück) und müssen ständig nachdosiert werden, damit Festkörper und Pigmentierungshöhe konstant bleiben. Ohne diese Nachdosierung würde sich die Rezeptur im Bad langsam verschieben. Regelmäßige Analysen sichern die konstante Zusammensetzung ab.

## Ultrafiltration

Ultrafiltration (UF) ist eine Membranfiltration mit sehr kleinen Poren (ca. 1–100 nm). Was die Membran passiert (Permeat): Wasser, Salze, Neutralisationsmittel — kleine Moleküle ohne Lackfunktion. Was zurückbleibt (Retentat): Bindemittelmoleküle und Pigmentteilchen — alles mit hohem Molekulargewicht. Das Permeat enthält also keine filmbildenden Bestandteile und wird zum Spülen der Werkstücke genutzt — kostengünstig, weil aus dem eigenen Bad gewonnen, kein Frischwasser nötig. Den Gehalt an Neutralisationsmittel und Salzen im Bad muss man dabei überwachen und nachstellen. Abgrenzung: Mikrofiltration hat größere Poren (lässt auch Bindemittel durch), Umkehrosmose hat kleinere Poren (lässt fast nur reines Wasser durch) — UF ist der Kompromiss dazwischen. Die UF läuft kontinuierlich mit dem Beschichtungsprozess mit.

## Spülkreislauf und Rückgewinnung

Was am Werkstück hängt, wenn es aus dem Bad kommt, ist kein reines Bindemittel, sondern vollständiger Lack — Bindemittel, Pigmente und Wasser. Das Spülen mit UF-Permeat wäscht diesen Lack ab; der Spülrücklauf wird ins Bad zurückgeführt — nichts geht verloren. Verloren geht nur der Film, der sich auf dem Werkstück abgeschieden hat. Materialeffizienz nahe 100 % ist daher ein zentraler wirtschaftlicher und ökologischer Vorteil der ETL.

## Temperatur und Stromführung

Badtemperatur, Spannung und Verweilzeit werden genau kontrolliert, weil sie Schichtdicke und Filmqualität bestimmen. Zu hohe Spannung kann zu porösen, gasblasenreichen Filmen führen; zu niedrige liefert eine zu dünne Schicht.

## Warum das wichtig ist

Nur ein sauber geführtes Bad liefert über lange Zeit gleichbleibende Schichtdicken und Filmqualität. Abweichungen in Konzentration, Temperatur oder Verunreinigungen zeigen sich sofort als Fehlstellen oder ungleichmäßige Beschichtung.

**Merksatz**

Ultrafiltration reinigt und recycelt: Sie trennt niedermolekulare Stoffe ab und führt den abgespülten Lack (Bindemittel und Pigmente) über den Spülkreislauf zurück ins Bad. Konstante Bad-Parameter sind die Voraussetzung für gleichbleibende Qualität — sie machen den Unterschied zwischen einer zuverlässigen Serienfertigung und häufigen Nacharbeiten.

**Stichwörter:** Elektrotauchlackbad, Ultrafiltration, Ultrafiltrat, Spülkreislauf, Rückgewinnung, Nachdosierung, Badmanagement, Schichtdicke, Materialeinsatz, Prozesskontrolle

*Quellen: Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur; Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie*

## Übungsblatt Ü-89 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**
Welche Aufgabe hat die Ultrafiltration im Elektrotauchlackprozess, und warum ist der Spülkreislauf wirtschaftlich wichtig?

**Ultrafiltration:** Sie trennt niedermolekulare, nicht filmbildende Bestandteile (Salze, Neutralisationsmittel) vom Bindemittel im Bad ab.
**Verwendung des Filtrats:** Das gereinigte Ultrafiltrat dient zum Spülen der frisch beschichteten Werkstücke.
**Rückführung:** Der beim Spülen abgewaschene, noch brauchbare Lack (Bindemittel samt Pigmenten) wird über den Kreislauf zurück ins Bad geführt.
**Wirtschaftlicher Nutzen:** So verlässt kaum Lackmaterial den Prozess — die Materialausnutzung liegt nahe 100 %; das spart Kosten und Abfall.
*Bewertung: Die Funktion der Ultrafiltration und die wirtschaftliche Bedeutung des Rückführkreislaufs werden beide korrekt und vollständig erklärt.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**
Ein Ultrafiltrationsmodul wird mit 500 l Badflüssigkeit beschickt; 20 % davon gehen als Permeat zum Spülen der Werkstücke ab, der Rest fließt als Retentat ins Bad zurück. Wie viel Permeat und wie viel Retentat entstehen?

**Ansatz:** Permeat = Badvolumen · Permeatanteil; Retentat = Badvolumen − Permeat
**Rechnung:** Permeat: 500 l · 0,20 = 100 l; Retentat: 500 l − 100 l = 400 l
**Antwortsatz:** 100 l Permeat stehen zum Spülen der Werkstücke zur Verfügung; 400 l Retentat — mit Bindemittel und Pigmenten — fließen ins Bad zurück.
*Bewertung: Der Prozentanteil wird korrekt auf die Badmenge angewandt; Permeat und Retentat sind richtig zugeordnet.*

**Frage 3** **(Anwendung, 7 Punkte)**
In einem Elektrotauchlackbad wird eine ungleichmäßige, teils zu dünne Schichtdicke auf den Werkstücken festgestellt. Nennen Sie zwei mögliche Ursachen und wie man ihnen begegnet.

**Ursache 1:** Zu niedrige Spannung oder zu kurze Verweilzeit — die Abscheidung hat nicht genug Zeit oder Triebkraft, um eine ausreichende Schicht aufzubauen.
**Gegenmaßnahme 1:** Spannung oder Tauchzeit im Rahmen der Prozessvorgaben erhöhen.
**Ursache 2:** Abweichende Badkonzentration (Festkörper zu niedrig) durch unzureichende Nachdosierung.
**Gegenmaßnahme 2:** Badparameter regelmäßig kontrollieren und Bindemittel, Pigmentpaste sowie Wasser gemäß Sollwerten nachdosieren.
*Bewertung: Zwei unterschiedliche, plausible Ursachen (Prozessparameter, Badkonzentration) werden genannt und jeweils mit einer konkreten Gegenmaßnahme verbunden.*

Kapitel 8

# Pulverlacke

# L-90 · Pulverlacke — Grundlagen und Eigenschaften

*Das lösemittelfreie 100-%-System, das durch Aufschmelzen einen Film bildet*

**Wahlqualifikation** · B 9

Ein Pulverlack ist ein lösemittelfreies 100-%-System — hohe Glasübergangstemperatur macht ihn lagerstabil, niedrige Schmelzviskosität sorgt für den Verlauf.

## Was ein Pulverlack ist

Ein Pulverlack enthält weder Löse- noch Dispersionsmittel: Bindemittel, Pigmente, Füllstoffe, Vernetzer und Additive liegen als festes, fein vermahlenes Pulver vor. Aufgetragen wird trocken; erst Wärme schmilzt die Teilchen zu einem geschlossenen Film — typisch beim Einbrennen bei 160 bis 200 °C, Niedertemperatursysteme ab etwa 130 °C. Betrieblich heißt dieser Schritt Einbrennen — bei vernetzenden Pulverlacken härtet der Lack dabei chemisch (siehe L-30), bei thermoplastischen schmilzt er nur und erstarrt beim Abkühlen wieder (siehe L-92). Da keine Löse- oder Dispersionsmittel gezielt zugesetzt werden, spricht man von einem 100-%-System; beim Einbrennen können je nach System dennoch geringe Reaktions- oder Abspaltprodukte entstehen. Insgesamt ist das Verfahren ein wichtiger Beitrag zur Emissionsminderung (siehe L-168).

## Lagerstabilität und Glasübergang

Damit das Pulver bei Transport und Lagerung nicht verklumpt oder anbackt, braucht das Bindemittel eine ausreichend hohe Glasübergangstemperatur (Richtwert >50 °C, siehe L-09) — das gilt für alle amorphen Pulverlacksysteme. Teilkristalline Vernetzer können alternativ einen scharfen Schmelzpunkt nutzen: Sie bleiben bei Raumtemperatur fest und hart, werden beim Einbrennen schlagartig flüssig und unterstützen so zusätzlich den Verlauf. Die amorphe, glasige Struktur ist jedoch der Normalfall.

Zugleich soll das Bindemittel in der ersten Einbrennphase rasch niedrigviskos werden, damit der Film gut verläuft. Dieser Zielkonflikt — hohe Tg für die Lagerung, niedrige Schmelzviskosität für den Verlauf — löst sich über Polymere mit hoher Tg, aber gezielt niedriger Molmasse: Man steuert die Polykondensation in ein stöchiometrisches Ungleichgewicht — ein kleiner Überschuss einer Komponente (z. B. Säure) stoppt das Kettenwachstum früh. Damit die Tg trotzdem hoch bleibt, wählt man starre aromatische Dicarbonsäuren wie Isophthalsäure und Terephthalsäure, kombiniert mit sterisch anspruchsvollen Diolen wie Neopentylglykol, die Kristallisation unterdrücken. Das Ergebnis sind Oligomere mit Mn ~1500–4000 g/mol: bei Raumtemperatur hart und glasig, in der Schmelze rasch niedrigviskos.

## Korngröße und Verlauf

Je feiner das Pulver, desto stärker wirken die Oberflächenkräfte der Teilchen — sie neigen zu Agglomeraten, die das Fluidisieren erschweren und Stippen oder Verlaufsstörungen verursachen. Der Zyklonsichter klassiert nach Teilchengröße: Er nutzt die Fliehkraft, die mit der Masse des Teilchens wächst (also etwa mit $d^3 \times \rho$). Im Gleichgewicht mit dem Strömungswiderstand ergibt sich daraus eine Wanderungsgeschwindigkeit nach außen, die grob proportional zu $d^2 \times \rho$ ist — deshalb trennt der Sichter nach Größe und Dichte zugleich. Grobe Partikel schleudern nach außen und fallen ab; sehr feine Partikel (<10–20 µm) folgen dem Innenluftstrom und werden in einen Nachfilter geleitet — sie gehen nicht direkt in die Gutfraktion zurück, weil sie sich schlecht elektrostatisch aufladen lassen und zur Agglomeration neigen. Die Gutfraktion (~20–90 µm) wird in den Applikationskreislauf zurückgeführt; Feinstanteile können separat in den Extrusionsprozess zurückgeführt werden.

Sehr gut verlaufende, dünne Schichten sind wegen dieser Mindestkorngröße nur begrenzt möglich. Benzoin ist ein verbreitetes Entgasungsadditiv: Es unterstützt beim Aufschmelzen das Entweichen eingeschlossener Luft und Feuchtigkeit sowie flüchtiger Abspaltprodukte (z. B. Wasser bei HAA-vernetzten Polyestern, Blockierungsmittel bei PUR-Pulverlacken) und hilft so, Krater und Nadelstiche zu vermeiden. Die eigentlichen Verlaufsadditive sind meist Polyacrylate (siehe unten).

## Vorteile

• 100-%-System ohne klassischen Lösemittelanteil — dadurch sehr geringe VOC-Emissionen aus Lösemittelverdunstung; je nach Pulverlacksystem und Anlage können dennoch Abluft- bzw. Emissionsanforderungen bestehen.
• Hoher Auftragswirkungsgrad, der Overspray ist recycelbar — kein Lackschlamm zu entsorgen.
• Wirtschaftliche Einschichtlackierung und hohe Schichtdicken ohne Applikationsprobleme.

## Grenzen

• Aufwendiges Herstellverfahren aus Extrudieren, Mahlen und Sichten.
• Spezielle Applikations- und Einbrennanlagen erforderlich.
• Hohe Mindestschichtdicke für guten Verlauf — dünne, glatte Filme sind schwierig.
• Beim Umgang mit dem Pulver sind Expositions-, Arbeits- und Explosionsschutzmaßnahmen nötig: Pulverlackpulver kann eine explosionsfähige Staub-Luft-Atmosphäre bilden. Der ausgehärtete Film selbst ist dagegen nicht staubexplosionsfähig; seine gesundheitliche Beurteilung richtet sich nach der jeweiligen Zusammensetzung.
• Preis pro Kilogramm liegt oft über dem vergleichbarer Flüssiglacke. Der Gesamtkostenvergleich fällt jedoch häufig günstiger aus: kein Lösemitteleinkauf, keine Abluftbehandlung, nahezu 100 % Materialausnutzung durch Overspray-Rückgewinnung — für Großserien ist Pulver deshalb oft die wirtschaftlichere Wahl.

## Additive für Rieselfähigkeit und Verlauf

Trockenfließmittel (Rieselhilfen) werden nach dem Mahlen trocken auf das Pulver aufgemischt; sie legen sich auf die Körner, verringern deren Oberflächenkräfte und verhindern Verklumpen. So rieselt das Pulver frei und lässt sich im Wirbelbett gleichmäßig fluidisieren und fördern.

Bei pyrogener Kieselsäure ist der Oberflächentyp entscheidend. Hydrophile Typen tragen freie Si-OH-Gruppen: Sie ziehen Feuchtigkeit an, was die elektrostatische Aufladung schwächt und die Rieselfähigkeit in feuchter Umgebung verschlechtert. In Pulverlacken werden deshalb fast ausschließlich hydrophob oberflächenbehandelte Typen eingesetzt — z. B. mit Dimethyldichlorsilan oder PDMS behandelte Typen (z. B. Aerosil® R972 oder HDK® H20). Sie stoßen Feuchtigkeit ab und sorgen für gleichmäßigere Aufladung; ihre triboelektrische Ladungstendenz ist negativ.

Aluminiumoxid ($Al_2O_3$) übernimmt eine Doppelfunktion: Als Rieselhilfe wirkt es wie Kieselsäure. Als Ladungssteuermittel ist es amphoter und lädt sich in trockener Umgebung positiv auf — das verbessert die Gleichmäßigkeit der elektrostatischen Abscheidung, besonders bei Triboapplikation. Nachteil: Mohs-Härte 9 — $Al_2O_3$ ist stark abrasiv und erhöht den Verschleiß an Pistolen und Förderleitungen.

Aus der Tonerbranche — wo die Triboladung von Druckertoner präzise gesteuert werden muss — kommen aminosilanmodifizierte Kieselsäuretypen: Die Oberfläche wird mit Aminosilanen (z. B. 3-Aminopropyltrimethoxysilan, $–Si–(CH_2)_3–NH_2$) belegt. Die Aminogruppen laden sich positiv auf; deshalb dienen diese Typen auch in Pulverlacken bei Triboapplikation als Ladungssteuermittel. Als Faustregel: Hydrophobe $SiO_2$ lädt negativ — Rieselfähigkeit; aminosilanmodifizierte $SiO_2$ und $Al_2O_3$ laden positiv — Ladungssteuerung bei Tribo.

Verlaufsadditive (meist Polyacrylate) wirken erst in der Schmelze: Sie senken die Oberflächenspannung und sorgen für einen glatten Film ohne Orangenhaut und Krater.

### Wo Pulverlacke eingesetzt werden

Pulverlacke werden überall dort eingesetzt, wo Metallteile robust und wirtschaftlich beschichtet werden: Metallmöbel, Hausgeräte (weiße Ware), Heizkörper, Architektur-Aluminium (Fenster- und Fassadenprofile), Fahrräder, Zäune, Regale, Rohre und Bewehrungsstahl. Zwei Dinge begrenzen den Einsatz: Erstens muss das ganze Werkstück durch den Einbrennofen — sehr große Objekte scheitern an der Ofengröße. Zweitens muss der Werkstoff die Einbrenntemperatur (~160–200 °C) aushalten; deshalb eignet sich Pulver vor allem für Metall (Stahl, Aluminium), Holz oder Kunststoff nur mit speziellen Niedertemperatur-Pulvern. Beim Auto werden viele Metall-Anbauteile pulverbeschichtet (Felgen, Fahrwerksteile, Federn, Motorraumteile); die Karosserie-Decklackierung dagegen bleibt überwiegend Flüssiglack — wegen des sehr glatten, dünnen Class-A-Aussehens und des einfachen Farbwechsels. Ein Pulver-Klarlack wurde entwickelt und eingesetzt, blieb aber eine Nische.

**Merksatz**

Der Pulverlack tauscht Lösemittel gegen Wärme: Statt zu verdunsten, schmilzt er. Hohe Glasübergangstemperatur für die Lagerung, niedrige Schmelzviskosität für den Verlauf — dieser Gegensatz bestimmt jede Pulverlackrezeptur.

**Stichwörter:** Pulverlack, 100-%-System, lösemittelfrei, Glasübergangstemperatur, Lagerstabilität, Schmelzviskosität, Korngröße, Zyklonsichter, Benzoin, Auftragswirkungsgrad, Einschichtlackierung, Overspray
*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur*

## Übungsblatt Ü-90 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Erklären Sie, warum ein Pulverlack eine hohe Glasübergangstemperatur, aber eine niedrige Schmelzviskosität aufweisen soll, und wie sich dieser Zielkonflikt in der Rezeptur lösen lässt.

**Hohe Glasübergangstemperatur:** Sie sichert die Lagerstabilität: Das feste Pulver darf bei Transport und Lagerung nicht verklumpen oder anbacken.
**Niedrige Schmelzviskosität:** In der ersten Einbrennphase muss das Material rasch dünnflüssig werden, damit die Teilchen zu einem geschlossenen, gut verlaufenden Film zusammenfließen.
**Lösung des Zielkonflikts:** Man wählt Bindemittel mit hoher Glasübergangstemperatur, aber niedriger Molmasse; zusätzlich setzt man teilkristalline Vernetzer mit scharfem Schmelzpunkt und niedriger Schmelzviskosität ein.
**Ergänzung:** Additive wie Benzoin fördern Verlauf und Entgasung, ohne die Lagerstabilität zu beeinträchtigen.
*Bewertung: Die Antwort benennt beide Anforderungen getrennt, erkennt den Gegensatz und löst ihn konkret über Molmasse und teilkristalline Vernetzer statt nur die Begriffe zu nennen.*

**Frage 2** **(Berechnung, 10 Punkte)**

Ein Metallteil mit 2,0 m² Fläche soll eine Pulverschicht von 80 µm Trockenschichtdicke erhalten; die Dichte des Films beträgt 1,5 g/cm³. Der Gesamtauftragswirkungsgrad liegt bei 95 %. Wie viel Pulver muss bereitgestellt werden?

**Gegeben:** A = 2,0 m² = 20000 cm²; d = 80 µm = 0,008 cm; ρ = 1,5 g/cm³; Wirkungsgrad 95 %
**Filmvolumen:** V = A · d = 20000 cm² · 0,008 cm = 160 cm³
**Filmmasse:** m(Film) = V · ρ = 160 cm³ · 1,5 g/cm³ = 240 g
**Pulverbedarf:** m(Pulver) = m(Film) / 0,95 = 240 g / 0,95 = 252,6 g
**Antwortsatz:** Es müssen rund 253 g Pulver bereitgestellt werden, um 240 g Film aufzubauen.
*Bewertung: Einheiten werden konsequent auf cm umgerechnet, der Auftragswirkungsgrad korrekt als Divisor angesetzt und das Ergebnis sinnvoll gerundet mit Antwortsatz abgeschlossen.*

**Frage 3** **(Anwendung, 7 Punkte)**

Ein Kunde klagt bei einem sehr fein gemahlenen Pulverlack über Stippen und ungleichmäßigen Verlauf. Nennen Sie die wahrscheinliche Ursache und eine Gegenmaßnahme.

**Ursache:** Bei sehr feinem Pulver wirken starke Oberflächenkräfte zwischen den Teilchen. Es bilden sich Agglomerate, die die Fluidisierung stören und als Stippen sowie Verlaufsfehler im Film erscheinen.

**Gegenmaßnahme:** Die Feinstanteile im Zyklonsichter abtrennen und aus dem Applikationskreislauf ausschleusen (allenfalls separat in die Extrusion zurückführen); die Fluidisierung durch Additivierung der Teilchen verbessern und ein Verlaufs-/Entgasungsmittel wie Benzoin einsetzen.

**Abwägung:** Zu grob darf das Pulver aber nicht werden, sonst leidet der Verlauf dünner Schichten — es gilt, die mittlere Korngröße auf die Anwendung abzustimmen.

*Bewertung: Die Antwort verknüpft die Störung ursächlich mit den Oberflächenkräften feiner Teilchen und nennt eine praxisgerechte Gegenmaßnahme samt der Grenze nach unten.*

# L-91 · Pulverlack-Applikation

*Wirbelsintern und elektrostatisches Spritzen*

**Prüfungsteil 1** · B 9 · A 8.2

Pulver wird auf zwei Wegen aufgetragen: aufgewirbelt und auf dem heißen Teil aufgeschmolzen, oder elektrostatisch aufgeladen und aufgesprüht; beide Verfahren können einen hohen Materialnutzungsgrad ermöglichen, der tatsächlich erreichbare Nutzungsgrad hängt jedoch von Geometrie, Prozessführung und Rückgewinnung ab.

## Zwei Verfahren

Für den trockenen Auftrag von Pulverlacken haben sich zwei Verfahren durchgesetzt: das ältere Wirbelsintern und das heute vorherrschende elektrostatische Spritzen. Beide vermeiden Lösemittelemission und können das Material — insbesondere mit Overspray-Rückgewinnung — sehr gut ausnutzen, unterscheiden sich aber in erreichbarer Schichtdicke und geeigneten Werkstücken.

## Wirbelsintern

Im Tauchbecken liegt eine luftdurchlässige Metallfritte; ein Luftstrom wirbelt das Pulver zu einer Wirbelschicht auf, die wie eine siedende Flüssigkeit wirkt. Ein über seinen Schmelzbereich vorgeheiztes Werkstück wird eingetaucht; auftreffende Teilchen schmelzen und bauen eine Schicht auf. Dicke und Qualität hängen von Temperatur und Wärmekapazität des Teils, vom Schmelzbereich, der Teilchengröße und der Eintauchzeit ab. Man erreicht 200 bis 600 µm, aber nur auf temperaturbeständigen, größenbegrenzten Teilen — fast ausschließlich Metall.

## Elektrostatisches Spritzen

Hier wird das Pulver in einem geschlossenen Behälter mit Druckluft fluidisiert; das Aerosol strömt über Rohre zur Pistole, wird dort elektrisch aufgeladen und versprüht. Das Werkstück ist leitfähig und geerdet — die geladenen Teilchen folgen dem Feld, schlagen sich nieder, entladen sich langsam und haften. Typisch sind Schichtdicken von 40 bis 120 µm.

## Korona und Tribo

- Koronaaufladung — Die Pistole liegt auf 50–100 kV Gleichspannung; an der Nadelspitze ionisiert das elektrische Feld die Luft und erzeugt negative Ionen (negative Korona ist der Standardfall). Pulverteilchen fliegen durch diese Ionenwolke, nehmen Ionen auf und laden sich negativ auf; die geladenen Teilchen folgen den Feldlinien zum geerdeten Werkstück und haften dort.
  Faraday-Käfig-Effekt: In Hohlräumen und Ecken dringen die Feldlinien nicht ein — diese Stellen werden schlecht oder gar nicht beschichtet. Rückionisation (Back-Ionisation): Wird der Pulverfilm zu dick oder die Spannung zu hoch, baut sich eine Gegenspannung auf → Durchschlag → kraterartige Oberflächendefekte.
- Triboaufladung — Keine Hochspannung. Das Pulver reibt an Kunststoffrohren (z. B. PTFE) in der Pistole, gibt dabei Elektronen ab und lädt sich positiv auf (Triboelektrizität). Vorteil: kein externes Feld — deshalb kein Faraday-Käfig-Effekt; Hohlräume und Kanten werden gleichmäßiger beschichtet. Nachteil: Ladung schwerer zu kontrollieren, empfindlich auf Formulierung, Additivierung und Luftfeuchte.

### Messen und Steuern der Ladung

Das Standardmessgerät für Pulverladung ist der Faraday-Becher (Faraday Cup): eine metallische, elektrisch abgeschirmte Kammer, in die eine bekannte Pulvermenge gegeben wird. Ein angeschlossenes Elektrometer misst die Gesamtladung Q; daraus ergibt sich die spezifische Ladung q/m in µC/g. Typischer Arbeitsbereich: 0,5–3 µC/g (die physikalische Obergrenze nach Pauthenier liegt für 40 µm Korngröße bei rund 5 µC/g) — zu niedrige Ladung bedeutet schlechte Haftung und hohen Overspray; zu hohe führt zu elektrostatischer Abstoßung (Rückstoß) und ungleichmäßigem Auftrag.

Oberflächenpotenzial-Messgeräte messen das elektrische Potenzial auf dem noch nicht eingebrannten Pulverfilm direkt am Werkstück und zeigen an, ob die Schicht gleichmäßig aufgeladen und ausreichend dick ist.

Steuerparameter bei Korona: Spannung (50–100 kV), Pistolen-Werkstück-Abstand, Luftdurchsatz und Pulverdurchsatz. Steuerparameter bei Tribo: Reibweg (Rohrinnenwand, meist PTFE), Additivierung des Pulvers ($Al_2O_3$, aminosilanmodifizierte $SiO_2$) und Luftfeuchte.

### Auftragswirkungsgrad und Recycling

Der primäre Auftragswirkungsgrad kann bei Pulverlacken geringer sein als bei bestimmten Nasslack-Applikationen, weil Hohlräume als Faraday-Käfige schwer zu erreichen sind; die Höhe hängt stark von Anlage, Geometrie und Prozessführung ab. Durch Rückgewinnung und Wiedereinsatz des Oversprays kann der Gesamtnutzungsgrad deutlich steigen. Nachteilig ist der hohe Reinigungsaufwand beim Farbwechsel, da sich Kontaminationen kaum entfernen lassen.

**Merksatz**

Wirbelsintern heizt das Teil, elektrostatisches Spritzen lädt das Pulver. Beide können einen hohen Materialnutzungsgrad erreichen — der recycelbare Overspray macht den Pulverlack besonders wirtschaftlich; der tatsächliche Nutzungsgrad hängt von Anlage, Geometrie und Prozessführung ab.

**Stichwörter:** Pulverlack, Applikation, Wirbelsintern, elektrostatisches Spritzen, Koronaaufladung, Triboaufladung, Faraday-Käfig, Overspray, Auftragswirkungsgrad, Recycling, Schichtdicke, Farbwechsel
*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur*

## Übungsblatt Ü-91 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**
Vergleichen Sie Wirbelsintern und elektrostatisches Spritzen hinsichtlich Prinzip, erreichbarer Schichtdicke und geeigneten Werkstücken.

**Wirbelsintern — Prinzip:** Das Pulver wird über eine Metallfritte zu einer Wirbelschicht aufgewirbelt; ein über den Schmelzbereich vorgeheiztes Teil wird eingetaucht, auftreffende Teilchen schmelzen zu einer Schicht.
**Elektrostatisches Spritzen — Prinzip:** Das fluidisierte Pulver wird an der Pistole elektrisch aufgeladen und auf das geerdete, leitfähige Werkstück gesprüht, an dem es haftet.
**Schichtdicke:** Wirbelsintern liefert dicke Schichten von 200 bis 600 µm, elektrostatisches Spritzen dünnere von 40 bis 120 µm.
**Werkstücke:** Wirbelsintern eignet sich nur für temperaturbeständige, größenbegrenzte Teile (fast nur Metall); elektrostatisches Spritzen ist flexibler und heute das vorherrschende Verfahren.
*Bewertung: Beide Verfahren werden entlang derselben drei Kriterien gegenübergestellt; die Zahlenbereiche der Schichtdicken werden korrekt zugeordnet.*

**Frage 2** **(Berechnung, 9 Punkte)**

Beim elektrostatischen Spritzen landen von 100 kg versprühtem Pulver zunächst 60 kg direkt auf dem Werkstück. 90 % des Oversprays werden zurückgewonnen und erneut eingesetzt. Berechnen Sie den effektiven Materialnutzungsgrad und den Verlust.

**Gegeben:** Einsatz 100 kg; primär auf dem Teil 60 kg; Rückgewinnung 90 % des Oversprays

**Overspray:** Overspray = 100 kg − 60 kg = 40 kg

**Zurückgewonnen:** 0,90 · 40 kg = 36 kg werden wieder genutzt, 10 % gehen verloren

**Effektiv genutzt:** 60 kg + 36 kg = 96 kg von 100 kg → Materialnutzungsgrad 96 %

**Verlust:** Verlust = 100 kg − 96 kg = 4 kg, also 4 %.

*Bewertung: Der primäre Auftrag und das Recycling werden sauber getrennt; das Ergebnis von 96 % zeigt anschaulich, warum der Gesamtnutzungsgrad trotz mäßigem Primärauftrag hoch ausfällt.*

**Frage 3** **(Anwendung, 7 Punkte)**

Bei der elektrostatischen Pulverbeschichtung eines Werkstücks mit tiefen Vertiefungen bleibt die Schicht in den Ecken zu dünn. Erklären Sie die Ursache und nennen Sie eine Abhilfe.

**Ursache:** In Vertiefungen bilden sich Faraday-Käfige: Die Feldlinien erreichen die Innenflächen kaum, sodass sich dort nur wenig geladenes Pulver abscheidet.

**Abhilfe:** Auf Triboaufladung umstellen — die reibungselektrisch geladenen Teilchen sind weniger feldabhängig und dringen besser in Hohlräume ein.

**Ergänzung:** Zusätzlich helfen angepasste Pistolenführung, Ladungs- und Luftmengeneinstellung sowie eine geeignete Teilegeometrie.

*Bewertung: Die Antwort benennt den Faraday-Käfig-Effekt korrekt und wählt mit der Triboaufladung genau die Aufladeart, die den Hohlraum besser erreicht.*

# L-92 · Thermoplastische Pulverlacke

*Filmbildung durch Schmelzen und Erstarren ohne Vernetzung*

**Wahlqualifikation** · B 9

Thermoplastische Pulverlacke bilden ihren Film allein durch Schmelzen und Erstarren — das erlaubt dicke, flexible Schichten, begrenzt aber Beständigkeit und Einsatzgebiet.

## Filmbildung ohne Vernetzung

Anders als vernetzende Pulverlacke härten Thermoplaste nicht chemisch aus: Sie schmelzen beim Einbrennen und erstarren beim Abkühlen. Das macht sie preisgünstig und erlaubt hohe Schichtdicken, begrenzt aber Chemikalien- und Wärmebeständigkeit. Das Wort Einbrennen ist dabei betrieblich gemeint: Es wird erwärmt, aber nichts chemisch vernetzt. Beim Einbrennlack entstehen die Filmeigenschaften dagegen gerade durch die chemische Vernetzung (siehe L-30). Wie weit ein thermoplastischer Pulverlack draußen einsetzbar ist, entscheidet nicht die Polymerklasse allein, sondern die Stabilisierung. Unstabilisiert sind alle hier genannten Thermoplaste UV-empfindlich; technische Beschichtungspulver werden deshalb stabilisiert und deckend pigmentiert — je nach Polymer mit UV-Absorbern, Radikalfängern oder, bei PVC, mit Wärme- und Lichtstabilisatoren. So stabilisiert sind gerade PVC- und Polyolefintypen die klassischen Außensysteme des Wirbelsinterns — Zaunpfosten, Drahtgitter, Stadtmobiliar, Spielgeräte —, und Polyamid 12 sowie lineare thermoplastische Polyester sind ebenfalls außentauglich. Die Grenze liegt in der Güte: Glanzhaltung und Farbtonbeständigkeit erreichen nicht das Niveau eines witterungsstabilen duroplastischen Polyester-Pulverlacks. Für hohe optische Ansprüche im Freien wählt man deshalb den Duroplasten, für dicke, stoßzähe und korrosionsschützende Schichten den Thermoplasten. Übliche Bindemittel sind Polyethylen, Polyvinylchlorid, Polyamide, Ethylen-Vinylalkohol-Copolymere und gesättigte Polyester.

Hinweis zu den Temperaturen beim Wirbelsintern: Die hohen Vorheiztemperaturen (bis 400 °C) beziehen sich auf das Metallwerkstück, nicht auf das Polymer. Das Metall gibt beim Eintauchen ins Wirbelbett Energie ab und schmilzt das Pulver in Sekunden auf. Das Polymer selbst erreicht diese Extremtemperaturen nur kurzzeitig; sobald der Film gebildet ist, kühlt das Werkstück ab. Bei PVC liegt die Verarbeitungstemperatur ohnehin nur bei 160–200 °C — hier greift ein anderer Mechanismus (siehe unten).

## Polyethylen und PVC

Polyethylen (PE): Wiederholeinheit –$CH_2$–$CH_2$–; einfachste Struktur, daher sehr preisgünstig. Wird meist im Wirbelsinterverfahren aufgebracht; das Metallwerkstück wird auf 280–400 °C vorgeheizt (Vorheizung des Metalls, nicht Polymertemperatur — siehe oben). Unstabilisiertes PE ist nicht wetterbeständig; für Außenteile werden UV-stabilisierte Polyolefintypen verwendet. PE haftet schlecht und benötigt einen Haftprimer; säuremodifizierte Typen bringen die Haftgruppen im Polymer selbst mit. Anwendungen: Drahtgeflecht, Bewehrungsstahl, Spülkörbe, Werkzeuggriffe, Regale.

Polyvinylchlorid (PVC): Wiederholeinheit –$CH_2$–CHCl–; enthält Chlor im Rückgrat. PVC würde oberhalb von etwa 160 °C in technisch relevantem Umfang Salzsäure (HCl) abspalten und degradieren (messbar setzt die Abspaltung schon deutlich oberhalb 100 °C ein) — die Verarbeitungstemperatur von 160–200 °C scheint dem zu widersprechen. Das wird durch zwei Maßnahmen gelöst: Weichmacher (z. B. DINP, Di-isononylphthalat) senken die nötige Verarbeitungstemperatur erheblich; Wärmestabilisatoren fangen freigesetztes HCl sofort ab und unterbrechen so die Kettenreaktion der Degradation; heute überwiegend Ca/Zn-Systeme; sie haben die früher üblichen Blei- sowie Barium/Cadmium-Stabilisatoren abgelöst, die wegen ihrer Toxizität nicht mehr eingesetzt werden. PVC-Filme sind flexibel; unstabilisiertes PVC vergilbt und kreidet unter UV-Strahlung. Technische Wirbelsinterpulver sind deshalb UV-stabilisiert und pigmentiert und werden gerade für bewitterte Teile wie Gartengitter, Spielgeräte und Absperrgitter eingesetzt.

### Polyamide

Polyamid-12 (PA-12): Wiederholeinheit –NH–$(CH_2)_{11}$–CO–; hergestellt durch Ringöffnungspolymerisation von Laurinlactam (13-gliedriger Lactamring mit NH-Gruppe). Die Amid-Bindung –CO–NH– gibt dem Film Härte und Chemikalienbeständigkeit. Schmelzpunkt ~175 °C; Metallwerkstück wird auf 280–400 °C vorgeheizt (Wirbelsintern). Anwendungen: Kraftstoffleitungen, Lebensmittelkontaktteile (geruchs- und geschmacksneutral), Absperrventile, Spülmaschinengitterkorb, Gartenarbeitsgeräte. PA-12 ist chemikalienbeständiger und etwas wetterbeständiger als PE, neigt aber zur Wasseraufnahme und leichten Vergilbung.

### Weitere Bindemittel

Ethylen-Vinylalkohol-Copolymer (EVOH): aufgebaut aus –$CH_2$–$CH_2$–-Einheiten (Ethylen) und –$CH_2$–CH(OH)–-Einheiten (Vinylalkohol); das Verhältnis beider bestimmt Schmelzpunkt und Barriereeigenschaften. Die OH-Gruppen bilden Wasserstoffbrücken und machen den Film zur dichten Gasbarriere. Wirbelsintern, Werkstück-Vorheiztemperatur 200–400 °C. Anwendungen: Barriereauskleidungen für Behälter und Verpackungen in Lebensmittel- und Pharmaindustrie.

Linearer thermoplastischer Polyester: Wiederholeinheit –O–$CH_2CH_2$–O–CO–$C_6H_4$–CO– (aromatische Dicarbonsäure + Diol, ähnlich PET). Elektrostatisches Spritzen auf das kalte Werkstück; Ofentemperatur 240 bis 400 °C. Wie oben gilt auch hier: Der Wert beschreibt den Ofen, nicht das Polymer — oberhalb von etwa 300 °C Objekttemperatur beginnt der Polyester thermisch zu schädigen. Anwendungen: Gartenmöbel, Architekturprofile, Metallbeschläge für den Außenbereich.

### Einordnung

Der Verzicht auf Vernetzung ist zugleich Stärke und Schwäche: dicke, zähe, oft flexible Schichten bei niedrigem Preis, aber geringere Chemikalien-, Wärme- und Wetterbeständigkeit als bei vernetzenden Pulverlacken. Die hohen Filmbildungstemperaturen schränken die beschichtbaren Werkstoffe auf temperaturfeste Metalle ein.

**Merksatz**

Thermoplast heißt schmelzen und erstarren, nicht vernetzen. Das gibt dicke, flexible Schichten zum kleinen Preis — auf Kosten von Beständigkeit und mit hohen Filmbildungstemperaturen.

**Stichwörter:** Pulverlack, thermoplastisch, Polyethylen, PVC, Polyamid-12, Laurinlactam, EVOH, gesättigter Polyester, Filmbildungstemperatur, Wirbelsintern, Vergilbung, Innenanwendung
*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur*

---

## Übungsblatt Ü-92 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**
Erklären Sie, wodurch sich thermoplastische von vernetzenden Pulverlacken grundsätzlich unterscheiden, und welche Konsequenzen das für Eigenschaften und Einsatz hat.

**Grundunterschied:** Thermoplaste härten nicht chemisch aus: Sie schmelzen beim Einbrennen und erstarren beim Abkühlen wieder, während vernetzende Systeme ein dauerhaftes räumliches Netzwerk bilden.

**Folge für Eigenschaften:** Thermoplaste ergeben dicke, zähe, oft flexible Schichten zu niedrigem Preis, sind aber weniger chemikalien-, wärme- und wetterbeständig als vernetzende Pulverlacke.

**Folge für den Einsatz:** Die Einsatzgrenze entscheidet nicht die Polymerklasse, sondern die Stabilisierung: Unstabilisiert sind alle Thermoplaste UV-empfindlich; UV-stabilisierte und pigmentierte PVC-, Polyolefin- und PA-12-Wirbelsinterpulver sowie elektrostatisch gespritzte lineare thermoplastische Polyester sind außentauglich. Die Grenze liegt in der Güte — Glanzhaltung und Farbtonbeständigkeit erreichen nicht das Niveau eines witterungsstabilen duroplastischen Polyester-Pulverlacks.

**Ergänzung:** Die hohen Filmbildungstemperaturen von teils 280 bis 400 °C beschränken die Werkstücke auf temperaturfeste Metalle.

*Bewertung: Der Kern — Aufschmelzen statt Vernetzen — wird korrekt getroffen und konsequent auf Eigenschaften und Einsatzgrenzen übertragen.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**

Ein Stahlteil mit 1,2 m² Oberfläche wird im Wirbelsinterverfahren mit einer 300 µm dicken Polyamid-12-Schicht (Dichte 1,01 g/cm³) beschichtet. Welche Masse Pulver wird als Film gebunden?

**Gegeben:** A = 1,2 m² = 12000 cm²; d = 300 µm = 0,03 cm; ρ = 1,01 g/cm³

**Filmvolumen:** V = A · d = 12000 cm² · 0,03 cm = 360 cm³

**Filmmasse:** m = V · ρ = 360 cm³ · 1,01 g/cm³ = 363,6 g

**Antwortsatz:** Als Film werden rund 364 g Polyamid-12 gebunden.

*Bewertung: Saubere Einheitenumrechnung und korrekter Ansatz Volumen mal Dichte; der Antwortsatz rundet sinnvoll.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**

Für ein außen bewittertes Metallgeländer soll ein preisgünstiger thermoplastischer Pulverlack gewählt werden. Beurteilen Sie Polyethylen und nennen Sie eine besser geeignete thermoplastische Alternative.

**Beurteilung Polyethylen:** Unstabilisiertes Polyethylen ist sehr preisgünstig, aber nicht wetterbeständig und haftet schlecht; für die Außenbewitterung taugt es nur als UV-stabilisierter Typ; wegen der schlechten Haftung braucht es zusätzlich einen Haftprimer oder einen säuremodifizierten Typ.

**Bessere Alternative:** Ein linearer thermoplastischer Polyester ist die geeignete Wahl — das Blatt nennt ihn ausdrücklich für Gartenmöbel, Architekturprofile und Metallbeschläge im Außenbereich.

**Hinweis:** Für dauerhaft außenbeständige Metallbeschichtungen sind wetterbeständige vernetzende Systeme überlegen, vor allem reine Polyester-Pulverlacke (siehe L-95); Epoxid/Polyester-Hybride gehören dagegen in den Innenbereich (siehe L-94).

*Bewertung: Die Antwort verwirft Polyethylen mit richtiger Begründung, nennt eine passende thermoplastische Alternative und ordnet die Grenze zu vernetzenden Systemen ehrlich ein.*

# L-93 · Epoxidharz-Pulverlacke

*Additive Härtung mit Dicyandiamid, Polyphenolen oder Anhydriden*

**Wahlqualifikation** · B 9

Bisphenol-A-Epoxidharz-Pulverlacke können mit Dicyandiamid, phenolischen Härtern oder Anhydriden vernetzt werden; der konkrete Vernetzungsmechanismus ist härterabhängig — sie bieten häufig eine sehr gute Metallhaftung und guten Korrosionsschutz, besitzen aber im Allgemeinen keine ausreichende langfristige Wetter- und UV-Beständigkeit für anspruchsvolle Außenanwendungen.

## Das Bindemittel

Epoxidharze zählten von Anfang an zu den wichtigsten Bindemitteln für Pulverlacke. Verwendet werden mittel- bis höhermolekulare Bisphenol-A-Harze (BADGE-Typ): Das Grundgerüst besteht aus zwei Phenolringen, über eine Isopropylidengruppe verknüpft (Bisphenol A), mit je einer Glycidylethergruppe an beiden Enden — jeder Arm endet im dreigliedrigen Epoxidring (Oxiranring). Schematisch: Glycidyl–O–$C_6H_4$–$C(CH_3)_2$–$C_6H_4$–O–Glycidyl, mit n ≈ 4–9 Wiederholeinheiten für Pulverlackqualitäten (die Wiederholeinheit wiegt rund 284 g/mol, das Grundmolekül rund 340 g/mol — daraus lässt sich n aus der Molmasse abschätzen). Die Glasübergangstemperatur liegt mit etwa 45–55 °C deutlich über Raumtemperatur, der davon zu unterscheidende Erweichungspunkt bei ~80–100 °C; mittlere Molmasse ~1500–3000 g/mol — beides Voraussetzung für die Lagerstabilität (siehe L-90). Zur Gesundheit der Ausgangsstoffe Bisphenol A und Epichlorhydrin siehe L-28. Härten lassen sie sich mit verschiedenen Härtern über Additionsreaktionen, bei denen keine Abspaltprodukte entstehen — das erlaubt dicke, störungsfreie Filme.

## Härter: Dicyandiamid

Dicyandiamid (DICY) ist ein kristalliner Feststoff (Fp. ~209 °C) mit der Formel $H_2N$–C(=NH)–NH–CN; es trägt mehrere reaktionsfähige NH-Gruppen und bleibt bei Raumtemperatur inaktiv (Lagerstabilität). Als feines Pulver eingemischt, reagiert es erst beim Einbrennen. Additionsreaktion: Ein NH der DICY-Gruppe öffnet den Epoxidring nucleophil: R–NH + Epoxid → R–N($CH_2$–CH(OH)–R') — kein Abspaltprodukt. Daneben katalysiert DICY bei höherer Temperatur die anionische Homopolymerisation der Epoxidgruppen. Reines Dicyandiamid benötigt ~185–220 °C; Beschleuniger (z. B. substituierte Imidazole, Arylbiguanide wie o-Tolylbiguanid) senken die Reaktionstemperatur auf 150–180 °C.

## Härter: Polyphenole und Anhydride

Polyphenolische Härter (Novolake, BPA-Addukte) tragen freie Phenolgruppen (Ph–OH). Additionsreaktion: Ph–OH + Epoxid → Ph–O–$CH_2$–CH(OH)–R (Phenylether + sekundäre OH-Gruppe) — kein Abspaltprodukt. Phenol-OH ist wenig reaktiv; Katalysatoren wie substituierte Imidazole senken die nötige Aktivierungsenergie: katalysierte Systeme härten in 10–20 min bei 130–160 °C.

Anhydridhärter (z. B. Pyromellithsäuredianhydrid, PMDA): Benzolring mit vier CO-Gruppen zu zwei Anhydridringen; sehr reaktiv gegen OH-Gruppen. Vernetzung zweistufig. Stufe 1 — Anhydrid öffnet mit einer OH-Gruppe (auch Feuchte) zum Halbester: –CO–O–CO– + HO–R → –COOH + –COO–R. Stufe 2 — die entstandene Carboxylgruppe reagiert mit dem Epoxidring: –COOH + Epoxid → –COO–$CH_2$–CH(OH)–R (Ester + OH). Das Stöchiometrieverhältnis wird über Äquivalentmassen berechnet: 1 Äquivalent Anhydridgruppe auf 1 Mol Epoxidgruppe — bei einem Dianhydrid wie PMDA also 1 Mol Substanz auf 2 Mol Epoxidgruppen; Unter- oder Überverhältnis ist eine Formulierungsentscheidung, die Vernetzungsdichte und Flexibilität beeinflusst.

### Eigenschaften und Einsatz

Epoxid-Pulverlacke bieten häufig sehr gute Metallhaftung und Korrosionsschutz und sind hart, ausreichend flexibel und chemikalienbeständig — für dauerhafte Außenbewitterung sind sie meist weniger geeignet: Im Freien können sie vermatten, kreiden und zur Vergilbung neigen. Ihr Einsatz richtet sich deshalb nach dem Anforderungsprofil, häufig als Innenbeschichtung, etwa für Maschinenteile, Metallmöbel, Hausgeräte, Behälter, Rohre und zur Elektroisolierung. Wo bessere Überarbeitbarkeit, besserer Verlauf und geringere Vergilbung gefragt sind, greift man zu Epoxid/Polyester-Hybriden (siehe L-94); für echte Außenbewitterung sind dagegen wetterbeständige reine Polyester-Pulverlacke die richtige Wahl (siehe L-95).

### Härtermenge

Stöchiometrisch folgt der Härteranteil aus dem Verhältnis der Äquivalentmassen: je Gewichtsteil Harz die NH-Äquivalentmasse des Härters geteilt durch die Epoxid-Äquivalentmasse. Der praktisch eingesetzte Anteil bei Dicyandiamid kann davon abweichen; er richtet sich nach System, Beschleuniger und Formulierung. Diese Abweichung ist kein allgemeines chemisches Prinzip, sondern hängt mit der komplexeren Rolle von Dicyandiamid im Härtungsmechanismus zusammen, nicht allein mit einer katalytischen Wirkung.

**Merksatz**

Epoxid-Pulverlacke bieten häufig eine sehr gute Metallhaftung und einen guten Korrosionsschutz und härten additiv ohne Abspaltprodukte. Reine Epoxid-Pulverlacke besitzen im Allgemeinen keine ausreichende langfristige Wetter- und UV-Beständigkeit für anspruchsvolle Außenanwendungen; sie können unter Bewitterung vermatten, kreiden und vergilben — ihr Einsatzschwerpunkt liegt deshalb bei Innen- und geschützten Anwendungen.

**Stichwörter:** Pulverlack, Epoxidharz, Bisphenol A, Dicyandiamid, Polyphenol, Novolak, Anhydridhärter, Pyromellithsäuredianhydrid, Korrosionsschutz, Innenbeschichtung, Additionsreaktion, Härtermenge

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur*

## Übungsblatt Ü-93 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Erklären Sie, warum Epoxidharz-Pulverlacke ausgezeichnet für Innenanwendungen, aber nicht für den Außeneinsatz geeignet sind, und nennen Sie zwei typische Härterklassen.

**Stärken innen:** Sie bieten häufig sehr gute Metallhaftung und Korrosionsschutz und sind hart, ausreichend flexibel und chemikalienbeständig — gut geeignet für Maschinenteile, Hausgeräte oder Elektroisolierung.

**Schwäche außen:** Reine Epoxid-Pulverlacke besitzen im Allgemeinen keine ausreichende langfristige Wetter- und UV-Beständigkeit für anspruchsvolle Außenanwendungen; sie können unter Bewitterung vermatten, kreiden und vergilben. Damit scheiden sie für die dauerhafte Außenbewitterung aus.

**Härterklassen:** Zwei typische Härter sind Dicyandiamid (auch substituiert/beschleunigt) und Polyphenole beziehungsweise Novolake; hinzu kommen Anhydridhärter.

**Einordnung:** Die additive Härtung ohne Abspaltprodukte erlaubt dicke, störungsfreie Filme — ein weiterer Grund für den Einsatz bei hohen Schichtdicken innen.

*Bewertung: Die Antwort trennt Stärken und Schwäche klar nach Innen/Außen, begründet die Außenuntauglichkeit konkret mit Kreiden und Vergilbung und nennt korrekt zwei Härterklassen.*

**Frage 2** **(Berechnung, 10 Punkte)**

Ein Epoxidharz (Epoxid-Äquivalentmasse 800 g/Äq.) soll mit einem Dicyandiamid-Derivat (NH-Äquivalentmasse 38 g/Äq.) rechnerisch stöchiometrisch vernetzt werden. Berechnen Sie den rechnerischen Härterbedarf je 100 Gewichtsteile Harz und erläutern Sie, warum der tatsächlich eingesetzte Härteranteil in der Praxis systemabhängig festgelegt wird.

**Gegeben:** EP-EW = 800 g/Äq.; NH-EW = 38 g/Äq.; Harz 100 Gewichtsteile

**Ansatz:** Stöchiometrisch gilt: gleich viele NH-Gruppen wie Epoxidgruppen, also m(Härter) = m(Harz) · NH-EW / EP-EW

**Rechnung:** m(Härter) = 100 · 38 / 800 = 4,75 Gewichtsteile

**Praxis-Einordnung:** Der tatsächlich eingesetzte Härteranteil wird formulierungsabhängig festgelegt und richtet sich nach System, Beschleuniger und Praxiserfahrung, nicht allein nach der einfachen Äquivalentmassen-Rechnung.

**Antwortsatz:** Rechnerisch werden rund 4,75 Gewichtsteile Härter je 100 Gewichtsteile Harz benötigt; der praktisch eingesetzte Anteil wird formulierungsabhängig festgelegt und kann davon abweichen.

*Bewertung: Der Äquivalentmassen-Ansatz wird korrekt aufgestellt und gerechnet; die Antwort erkennt, dass der praktische Härteranteil systemabhängig festgelegt wird und sich nicht allein über eine katalytische Wirkung pauschal begründen lässt.*

**Frage 3** **(Anwendung, 7 Punkte)**

Ein Kunde möchte Gartenmöbel dauerhaft im Freien mit einem Epoxidharz-Pulverlack beschichten. Beraten Sie ihn.

**Problem benennen:** Ein reiner Epoxid-Pulverlack ist außen ungeeignet: Er kreidet, vermattet und vergilbt unter Bewitterung.

**Empfehlung:** Für dauerhafte Außenbeständigkeit einen reinen Polyester-Pulverlack (mit Hydroxyalkylamid (HAA/Primid) oder Glycidylester vernetzt; das früher übliche TGIC ist wegen seiner Einstufung als erbgutverändernd (Muta. 1B) in Europa weitgehend durch HAA und Glycidylester ersetzt worden) wählen; ein Epoxid/Polyester-Hybrid genügt nur für erhöhte, nicht für volle Außenbeständigkeit.

**Ergänzung:** Zusätzlich auf geeignete Untergrundvorbehandlung achten, damit Haftung und Korrosionsschutz auch im Freien dauerhaft bleiben.

*Bewertung: Die Beratung verwirft das ungeeignete System mit richtiger Begründung und lenkt gezielt auf den außenbeständigen reinen Polyester statt nur allgemein abzuraten.*

# L-94 · Epoxid/Polyester-Hybrid-Pulverlacke

*Carboxylgruppenhaltiger Polyester und Epoxidharz im Verhältnis 50:50 bis 70:30*

**Wahlqualifikation** · B 9

Hybrid-Pulverlacke kombinieren einen carboxylgruppenhaltigen Polyester mit Epoxidharz (etwa 50:50 bis 70:30 Polyester zu Epoxid) — besser überarbeitbar als reines Epoxid, aber nicht voll wetterbeständig.

## Bindemittelkombination

Hybridsysteme bestehen aus den bekannten Epoxidharzen und aus gesättigten Polyestern, die freie Carboxylgruppen tragen. Wie bei den Epoxidharzen muss die Glasübergangstemperatur deutlich über Raumtemperatur liegen (bei den Polyestern über etwa 50 °C); sie bestehen daher überwiegend aus aromatischen Polycarbonsäuren und relativ kurzkettigen Polyolen. Beim Einbrennen reagieren die Carboxylgruppen des Polyesters mit den Epoxidgruppen des Harzes zu einem gemeinsamen Netzwerk.

## Mischungsverhältnis

Typische Hybridformulierungen können in einem breiten Bereich von Polyester- und Epoxidanteilen liegen (häufig etwa 50:50 bis 70:30 Polyester zu Epoxid); das Verhältnis wird über die reaktiven Äquivalente und die gewünschten Eigenschaften festgelegt. Die stöchiometrisch nötige Epoxidmenge folgt aus der Säurezahl des Polyesters und der Epoxid-Äquivalentmasse des Harzes: Die Zahl der Carboxylgruppen (Masse mal Säurezahl geteilt durch 56100) muss der Zahl der Epoxidgruppen (Masse geteilt durch Epoxid-Äquivalentmasse) entsprechen.

## Warum Hybride?

Der Polyesteranteil verbessert Überarbeitbarkeit, Verlauf und Vergilbungsverhalten gegenüber reinem Epoxid, ohne dessen gute Haftung und Chemikalienbeständigkeit ganz aufzugeben. Hybride sind je nach Formulierung weniger wetterbeständig als geeignete reine Polyester-Pulverlacke; der genaue Bewitterungswiderstand hängt vom System ab. Sie bleiben damit meist Produkte für Innen- und Industrieanwendungen mit erhöhten Ansprüchen.

## Eigenschaften und Einsatz

Hybrid-Pulverlacke sind hart, gut haftend, ausreichend flexibel und chemikalienbeständig; sie werden elektrostatisch gespritzt und bei mittleren Temperaturen eingebrannt. Typische Einsatzgebiete sind Hausgeräte, Metallmöbel, Heizkörper und allgemeine Industrieteile, bei denen kein voller Außenschutz gefordert ist.

## Abgrenzung

Gegenüber reinen Epoxid-Pulverlacken (siehe L-93) punkten Hybride bei Optik und Überarbeitbarkeit; gegenüber reinen Polyester-Pulverlacken (siehe L-95) fehlt ihnen die volle Wetterbeständigkeit. Die Wahl richtet sich danach, ob Innenbeständigkeit genügt oder Außenbewitterung gefordert ist.

## Einbrennen

Hybride werden meist bei 160 bis 180 °C eingebrannt; Niedertemperaturtypen härten schon ab etwa 140 °C — ein Vorteil bei wärmeempfindlichen oder massereichen Werkstücken.

**Merksatz**

Hybrid heißt Epoxid trifft Carboxyl-Polyester. Das Verhältnis 50:50 bis 70:30 (Polyester zu Epoxid) folgt aus Säurezahl und Epoxid-Äquivalentmasse. Besser als reines Epoxid, aber nicht außenfest — das bleibt Sache der reinen Polyester.

**Stichwörter:** Pulverlack, Hybridsystem, Epoxidharz, carboxylgruppenhaltiger Polyester, Säurezahl, Mischungsverhältnis, Vernetzung, Überarbeitbarkeit, Innenbeschichtung, Glasübergangstemperatur

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur*

## Übungsblatt Ü-94 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**
Beschreiben Sie den Aufbau eines Epoxid/Polyester-Hybrid-Pulverlacks und erklären Sie, welche Eigenschaft ihn von reinem Epoxid und von reinem Polyester unterscheidet.

**Aufbau:** Ein Hybrid kombiniert ein Epoxidharz mit einem carboxylgruppenhaltigen, gesättigten Polyester (Glasübergangstemperatur über 50 °C). Beim Einbrennen reagieren dessen Carboxylgruppen mit den Epoxidgruppen zu einem gemeinsamen Netzwerk.
**Verhältnis:** Typische Hybridformulierungen liegen häufig etwa zwischen 50:50 und 70:30 (Polyester zu Epoxid), können aber je nach Formulierung abweichen.
**Gegenüber Epoxid:** Der Polyesteranteil verbessert Verlauf, Überarbeitbarkeit und Vergilbungsverhalten.
**Gegenüber Polyester:** Der Hybrid ist je nach Formulierung weniger wetterbeständig als ein reiner Polyester-Pulverlack; er bleibt meist ein Innen-/Industrieprodukt.
*Bewertung: Die Antwort ordnet den Hybrid sauber zwischen beide Reinsysteme ein und benennt die jeweils entscheidende Eigenschaft (Optik/Überarbeitbarkeit vs. fehlende volle Wetterfestigkeit).*

**Frage 2** **(Berechnung, 10 Punkte)**
Ein carboxylgruppenhaltiger Polyester (Säurezahl 70 mg KOH/g) soll mit einem Epoxidharz (Epoxid-Äquivalentmasse 730 g/Äq.) stöchiometrisch vernetzt werden. Berechnen Sie die Epoxidmenge je 60 Gewichtsteile Polyester und ordnen Sie das Mischungsverhältnis ein.

**Gegeben:** Polyester 60 Gewichtsteile; SZ = 70 mg KOH/g; EP-EW = 730 g/Äq.
**Carboxylgruppen:** n(COOH) = m · SZ / 56100 = 60 · 70 / 56100 = 0,0749 mol
**Ansatz:** Stöchiometrisch: n(Epoxid) = n(COOH), also m(Epoxid) = n(COOH) · EP-EW
**Rechnung:** m(Epoxid) = 0,0749 Äq. · 730 g/Äq. = 54,7 Gewichtsteile
**Einordnung:** Das Verhältnis Polyester zu Epoxid beträgt rund 60:54,7, also etwa 52:48 — es liegt am epoxidreichen Ende des typischen Bereichs um 50:50.
*Bewertung: Die Säurezahl wird korrekt über den Faktor 56100 in Stoffmenge umgerechnet und das Ergebnis am typischen Hybrid-Verhältnis eingeordnet, nicht nur als Zahl genannt.*

**Frage 3** **(Anwendung, 7 Punkte)**
Für Heizkörper im Innenbereich soll ein Pulverlack mit gutem Verlauf und guter Überarbeitbarkeit bei moderaten Kosten gewählt werden. Begründen Sie, warum ein Hybridsystem passt.

**Anforderung:** Heizkörper stehen innen — volle Wetterbeständigkeit ist nicht nötig, gefragt sind Verlauf, Optik und Überarbeitbarkeit.
**Warum Hybrid:** Der Polyesteranteil gibt dem Hybrid besseren Verlauf und bessere Überarbeitbarkeit als reines Epoxid, während er die gute Haftung und Chemikalienbeständigkeit des Epoxids weitgehend behält und kein teureres Außensystem nötig ist.
**Fazit:** Da kein Außenschutz gefordert ist, ist der Hybrid hier die wirtschaftlich und technisch passende Wahl.
*Bewertung: Die Antwort verknüpft die konkrete Innen-Anforderung mit den Hybrid-Vorteilen und begründet die Wahl über den fehlenden Bedarf an voller Wetterfestigkeit.*

# L-95 · Polyester-Pulverlacke: TGIC und Hydroxyalkylamid

*Die wetterbeständigen Pulverlacke — Addition mit TGIC, Kondensation mit HAA*

**Wahlqualifikation** · B 9

Reine Polyester-Pulverlacke vernetzen carboxylgruppenhaltige Polyester mit TGIC (Addition) oder Hydroxyalkylamid (Kondensation, Wasser wird frei) — sie sind wetterbeständig und damit die Außensysteme unter den Pulverlacken.

## Das Außensystem

Reine Polyester-Pulverlacke aus carboxylgruppenhaltigen, aromatischen Polyestern sind die wetterbeständigen Vertreter der Pulverlacke. Als Vernetzer kommen vor allem zwei Klassen zum Einsatz: Triglycidylisocyanurat (TGIC) und Hydroxyalkylamide. Beide reagieren mit den Carboxylgruppen des Polyesters, unterscheiden sich aber grundlegend im Reaktionstyp — und genau dieser Unterschied bestimmt die Verarbeitung.

## TGIC und Glycidester

TGIC trägt drei Epoxidgruppen und vernetzt die Carboxylgruppen des Polyesters in einer Additionsreaktion — es entstehen keine Abspaltprodukte, was dicke, störungsfreie Filme erlaubt. Ähnlich wirken andere Glycidester wie Terephthalsäurediglycidester oder Trimellithsäuretriglycidester. Diese Systeme sind sehr witterungs- und vergilbungsstabil und daher für außenbeständige Metalllacke verbreitet. TGIC ist allerdings als erbgutverändernd (mutagen) eingestuft und wirkt sensibilisierend; beim Umgang mit dem Pulver sind Atem- und Hautschutz nötig.

## Hydroxyalkylamid (HAA)

Hydroxyalkylamide wie Tetrakis-2-hydroxyalkyladipinsäureamide reagieren mit den Carboxylgruppen in einer Kondensationsreaktion — dabei wird Wasser abgespalten. Dieses Reaktionswasser muss aus dem Film entweichen können; deshalb dürfen die Schichtdicken nicht zu hoch sein, und der Film muss gut entlüften, sonst entstehen Poren. HAA-Systeme können gegenüber TGIC ein günstigeres Gefährdungsprofil aufweisen (z. B. Primid); die Einstufung ist für den konkreten Vernetzer anhand des aktuellen Sicherheitsdatenblatts zu prüfen. HAA-vernetzte Polyester können ein hohes, mit TGIC-Systemen vergleichbares Eigenschaftsniveau erreichen; Unterschiede können je nach Formulierung und Anwendung bestehen.

## Reaktionsgleichung: TGIC- und HAA-Vernetzung

```
TGIC – Additionsreaktion, kein Abspaltprodukt:
Polyester–COOH + TGIC–Epoxid → Polyester–COO–CH2–CH(OH)–CH2–TGIC
(β-Hydroxyester)

HAA – Kondensationsreaktion, Wasserabspaltung:
Polyester–COOH + HAA–OH → Polyester–COO–HAA + H2O

Beide Wege öffnen bzw. verbrauchen die Carboxylgruppen des Polyesters; erst die Kombination
   mehrerer Gruppen je Molekül führt zum Netzwerk.
```

## Härtermenge

Die nötige Härtermenge folgt aus dem Vernetzungsverhältnis: Die Zahl der reaktiven Gruppen des Härters — bei HAA aus Masse geteilt durch OH-Äquivalentmasse — soll der Zahl der Carboxylgruppen des Polyesters (Masse mal Säurezahl geteilt durch 56100) entsprechen. Meist stellt man einen kleinen Härterüberschuss ein, um eine vollständige Vernetzung zu sichern.

### Eigenschaften und Einsatz

Reine Polyester-Pulverlacke können — abhängig von Polyesterchemie, Vernetzer, Pigmentierung und Formulierung — eine sehr gute Wetterbeständigkeit, mechanische Beständigkeit und eine ausgewogene Härte/Flexibilität erreichen; ebenso sind hohe Glanzwerte und geringe Vergilbungsneigung erreichbar. Sie werden elektrostatisch gespritzt und für außenbeständige Metallbeschichtungen eingesetzt — etwa Fassadenprofile, Gartenmöbel sowie Fahrzeug- und Bauteile im Außenbereich.

### Einbrennen

Polyester-Pulverlacke brennt man vergleichsweise heiß ein — meist bei 180 bis 200 °C.

**Merksatz**

Geeignete Polyester-Pulverlack-Systeme ermöglichen eine gute bis sehr gute Außenbeständigkeit. TGIC vernetzt per Addition (kein Abspaltprodukt), Hydroxyalkylamid per Kondensation (Wasser wird frei — Schichtdicke begrenzen). Beide erreichen ein vergleichbares Niveau.

**Stichwörter:** Pulverlack, Polyester, TGIC, Triglycidylisocyanurat, Glycidester, Hydroxyalkylamid, HAA, Kondensationsreaktion, Additionsreaktion, wetterbeständig, Säurezahl, Außenbeschichtung

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur*

---

## Übungsblatt Ü-95 — Musterlösungen

**Frage 1** (Verständnis, 8 Punkte)

Vergleichen Sie die Vernetzung von carboxylgruppenhaltigem Polyester mit TGIC und mit Hydroxyalkylamid. Gehen Sie besonders auf den Reaktionstyp und dessen Folge für die Verarbeitung ein.

**TGIC:** TGIC trägt drei Epoxidgruppen und vernetzt die Carboxylgruppen in einer Additionsreaktion — es entstehen keine Abspaltprodukte, dicke Schichten sind störungsfrei möglich.

**Hydroxyalkylamid:** HAA reagiert mit den Carboxylgruppen in einer Kondensationsreaktion, bei der Wasser abgespalten wird.

**Folge für die Verarbeitung:** Das Reaktionswasser muss entweichen können; deshalb sind bei HAA die Schichtdicken zu begrenzen, während TGIC dickere Filme zulässt.

**Gemeinsamkeit:** Beide Systeme können ein hohes, vergleichbares Niveau an Wetter- und Vergilbungsbeständigkeit erreichen; HAA-Systeme können je nach Produkt zudem ein günstigeres Gefährdungsprofil aufweisen als das mutagene TGIC — maßgeblich ist das Sicherheitsdatenblatt des konkreten Härters.

*Bewertung: Der zentrale Unterschied Addition gegen Kondensation wird korrekt herausgearbeitet und richtig auf die Schichtdickenbegrenzung bei HAA übertragen.*

**Frage 2** (Berechnung, 10 Punkte)

Ein carboxylgruppenhaltiger Polyester (Säurezahl 34 mg KOH/g) wird mit einem Hydroxyalkylamid (OH-Äquivalentmasse 84 g/Äq.) stöchiometrisch vernetzt. Berechnen Sie den Härterbedarf je 95 Gewichtsteile Polyester.

**Gegeben:** Polyester 95 Gewichtsteile; SZ = 34 mg KOH/g; OH-EW = 84 g/Äq.

**Carboxylgruppen:** n(COOH) = m · SZ / 56100 = 95 · 34 / 56100 = 0,0576 mol

**Ansatz:** Stöchiometrisch: n(OH) = n(COOH), also m(HAA) = n(COOH) · OH-EW

**Rechnung:** m(HAA) = 0,0576 Äq. · 84 g/Äq. = 4,84 Gewichtsteile

**Antwortsatz:** Es werden rund 4,8 Gewichtsteile Hydroxyalkylamid je 95 Gewichtsteile Polyester benötigt; meist stellt man einen kleinen Überschuss ein.

*Bewertung: Die Umrechnung der Säurezahl über 56100 und der Äquivalentansatz sind korrekt; der Hinweis auf den üblichen kleinen Härterüberschuss rundet die Antwort fachlich ab.*

**Frage 3** **(Anwendung, 7 Punkte)**

Ein mit Hydroxyalkylamid vernetzter Polyester-Pulverlack zeigt bei 120 µm Schichtdicke feine Poren und Nadelstiche, bei 60 µm dagegen nicht. Erklären Sie die Ursache und nennen Sie eine Abhilfe.

**Ursache:** Die HAA-Vernetzung ist eine Kondensationsreaktion, bei der Wasser frei wird. Bei hoher Schichtdicke kann dieser Wasserdampf nicht mehr störungsfrei aus dem Film entweichen und hinterlässt Poren und Nadelstiche.

**Abhilfe:** Die Schichtdicke begrenzen (dünner applizieren) sowie die Einbrennkurve so führen, dass das Reaktionswasser vor dem vollständigen Verlauf entweichen kann.

**Alternative:** Ist zwingend eine hohe Schichtdicke gefordert, auf ein additiv ohne Abspaltprodukt vernetzendes System umstellen — Glycidylester oder TGIC; bei TGIC die Einstufung als erbgutverändernd (Muta. 1B) und die Schutzmaßnahmen beachten (siehe L-20).

*Bewertung: Die Antwort führt die Störung ursächlich auf das Kondensationswasser zurück und nennt sowohl die naheliegende Schichtdickenbegrenzung als auch die systemische Alternative TGIC.*

# L-96 · Acrylat-Pulverlacke

*Die hochwertigen Systeme — Epoxyacrylat, COOH- und OH-Acrylatharze*

**Wahlqualifikation** · B 9

Acrylat-Pulverlacke können eine sehr gute Wetter- und Vergilbungsbeständigkeit bieten; die tatsächliche Beständigkeit hängt von Harz, Vernetzer, Pigmentierung und Formulierung ab. Epoxyacrylatharze mit Polycarbonsäuren liefern Automobilserien-Klarlacke, COOH- und OH-Acrylatharze weitere Varianten.

## Warum Acrylatharze?

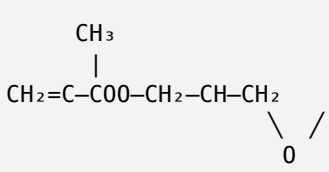
Acrylatharze stehen als Bindemittel im Wettbewerb zu den Polyestern; da sie teurer sind, werden sie gezielt dort gewählt, wo es auf besondere Wetter-, Chemikalien- und Vergilbungsbeständigkeit ankommt. Man unterscheidet sie nach der reaktiven Gruppe in Epoxy-, COOH- und OH-Acrylatharze — jede Gruppe bringt einen eigenen Härtertyp mit. Epoxidharz-Pulver scheiden für sichtbare Außenanwendungen dagegen aus: Sie kreiden, vermatten und vergilben im Freien (siehe L-93).

## Epoxyacrylatharze

Epoxyacrylatharze (genauer: glycidylfunktionelle Acrylatharze, GMA-Acrylate) sind Copolymere mit Epoxidgruppen; sie können Glycidylmethacrylat als Quelle der Epoxidgruppen enthalten, wobei die Copolymerzusammensetzung vom jeweiligen Harztyp abhängt. Nicht zu verwechseln mit den Epoxidacrylaten der Strahlungshärtung (siehe L-24), bei denen der Epoxidring bereits geöffnet ist. Vernetzt werden sie mit höheren Polycarbonsäuren wie Dodecandisäure oder Azelainsäure oder mit deren Anhydriden. Anhydride öffnen zunächst an OH-Gruppen zu freien Carbonsäuren, die dann mit den Epoxidgruppen unter Bildung von β-Hydroxyestern reagieren. Diese Systeme können sehr gute Wetter-, Glanz- und Vergilbungseigenschaften erreichen; die tatsächlichen Werte hängen von Harz, Vernetzer und Formulierung ab.

## GMA, DDDA und Azelainsäure — Strukturen

Glycidylmethacrylat (GMA) – Quelle der Epoxidgruppe ($C_7H_{10}O_3$, M = 142 g/mol):



(Oxiran = gespannter Dreiring aus –CH–$CH_2$– mit O-Brücke;
öffnet sich leicht mit Carbonsäuren oder Aminen)

Typische Vernetzungspartner (Polycarbonsäuren):
Dodecandisäure (DDDA, $C_{12}$, M = 230 g/mol):
  HOOC–$(CH_2)_{10}$–COOH

Azelainsäure ($C_9$, M = 188 g/mol):
  HOOC–$(CH_2)_7$–COOH

Vernetzungsreaktion (kein Abspaltprodukt):
Epoxid + R–COOH → R–COO–$CH_2$–CH(OH)– (β-Hydroxyester)
Die neue OH-Gruppe kann mit Anhydrid-Gruppen weiter reagieren.

## Automobilserien-Klarlack

Die Epoxyacrylat-Härtung gelingt schon bei 140 bis 160 °C — niedrig genug, um die unteren Schichten eines Automobillackaufbaus nicht zu überbrennen. Ein Pulverklarlack wird auf den vorgetrockneten Basislack elektrostatisch aufgetragen und eingebrannt; typische Einbrennparameter liegen je nach Harz, Schichtdicke und Ofenprofil in einem definierten Bereich (Richtwert rund 20 min bei 160 °C), bei einer Schichtdicke von etwa 50 bis 60 µm. Es entstehen Klarlacke mit hohem Glanz, guter Chemikalienbeständigkeit und guter Zwischenhaftung — eine typische wichtige Anwendung dieser Harze.

## BMW-Pulverklarlack — Geschichte und heutiger Stand

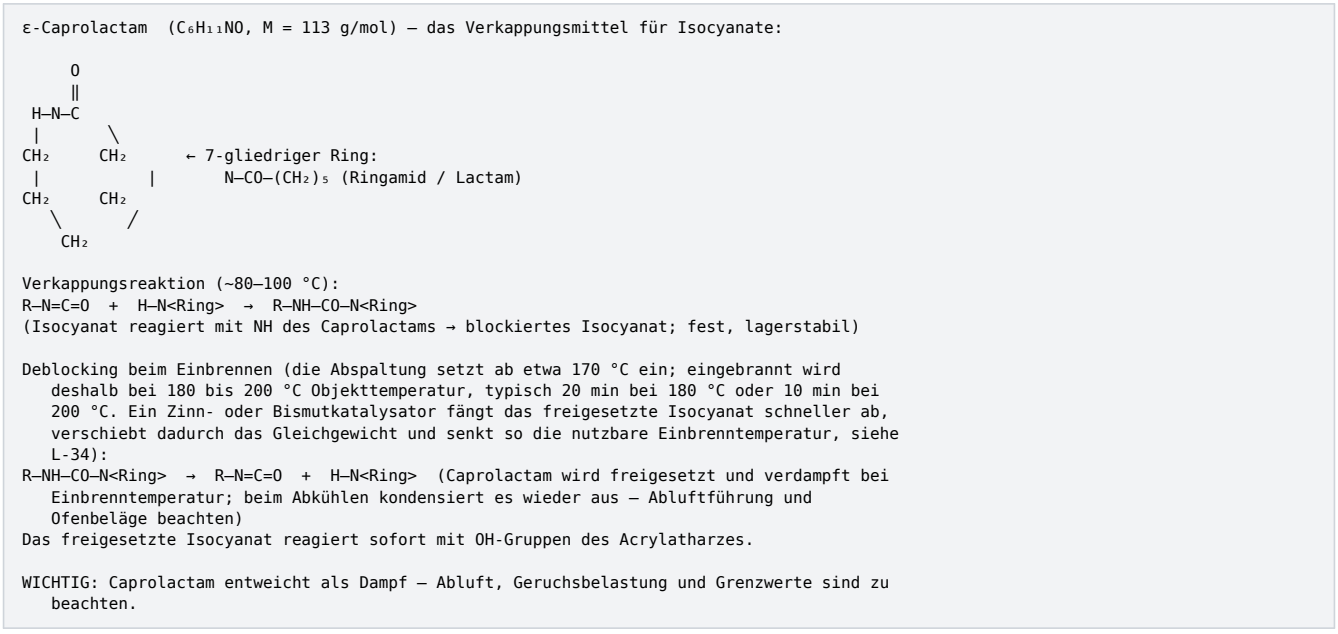
BMW setzte ab 1997 einen Pulverklarlack auf Basis glycidylfunktioneller Acrylatharze (GMA-Acrylat, vernetzt mit Dicarbonsäuren wie Dodecandisäure, siehe oben) in der Serienlackierung kompletter Karosserien ein — ein damals weltweit beachteter Schritt. Das System lief mindestens bis 2007 in Serie und wird heute in der Pkw-Serienlackierung nicht mehr eingesetzt; öffentlich zugängliche Quellen nennen weder den Zeitpunkt noch die Gründe (zu den technischen Grenzen des Verfahrens siehe L-115).

Heutiger Stand in der Automobil-Serienlackierung: 2K-PUR-Klarlacke (OH-Acrylatharz + aliphatisches oder cycloaliphatisches Polyisocyanat) und säurekatalysierte 1K-Einbrennklarlacke auf Melaminbasis dominieren. Pulverklarlacke spielen noch bei einzelnen Sonderkarosserien eine Rolle. Der Vorteil — kein Lösemittel, hoher Festkörper — bleibt für die Zukunft relevant, besonders bei niedrigschmelzenden, verlaufstarken Systemen.

## COOH- und OH-Acrylatharze

COOH-Acrylatharze tragen Carboxylgruppen (Säurezahl etwa 50 bis 80, Erweichungstemperaturen 100 bis 130 °C) und werden mit TGIC, Polycarbonsäureglycidestern, Hydroxyalkylamiden oder Epoxidharzen vernetzt. Bevorzugt werden Glycidester und Hydroxyalkylamide heute vor allem aus toxikologischen Gründen (TGIC-Einstufung als erbgutverändernd, siehe L-95), nicht wegen der Witterungsbeständigkeit — TGIC-vernetzte Systeme selbst gelten als sehr witterungs- und vergilbungsstabil. OH-Acrylatharze werden mit verkappten Polyisocyanaten — etwa mit ε-Caprolactam verkappten IPDI-Trimeren — oder mit Polyurethdionen vernetzt; sie sind vor allem in Klarlacken besonders wetterbeständig, aber teuer.

## ε-Caprolactam — Struktur und Verkappungsreaktion



### Härtermenge und Ausblick

Die Härtermenge folgt wie bei den anderen Reaktivsystemen aus dem Äquivalentverhältnis — bei der Vernetzung mit Polycarbonsäuren aus der Epoxid-Äquivalentmasse des Harzes und der Carboxyl-Äquivalentmasse der Säure. Über die Acrylatsysteme hinaus zielt die Entwicklung auf besseren Verlauf in dünnen Schichten, feinteiligere Pulver und niedrigere Einbrenntemperaturen — bis hin zu UV-vernetzbaren Pulverlacken für Holz und Kunststoff (Prinzip der radikalischen UV-Härtung siehe L-24). Für die allerhöchste Architektur-Bewitterung steht jedoch das flüssige Fluorpolymer PVDF im Coil-Coating (siehe L-102).

VERTIEFUNG — ÜBER DEM PRÜFUNGSSTOFF

### PVK bei Pulverlacken — Vertiefung

Das PVK-Konzept (Pigmentvolumenkonzentration) gilt auch für Pulverlacke — angewandt auf den eingebrannten, ausgehärteten Film:

PVK = V(Pigment + Füllstoff) / [V(Pigment + Füllstoff) + V(Bindemittel)]

Unterhalb der CPVK (kritischen PVK) ist genug Bindemittel vorhanden, um alle Pigmentpartikel vollständig zu umhüllen und Hohlräume zu füllen — dichter, glänzender Film.
Oberhalb der CPVK: Poren im Film → matt, porös, schlechter Korrosionsschutz.

Besonderheit Pulverlack: Kein Lösemittel verdunstet (Trocknungsschrumpf fehlt weitgehend). Das Bindemittelvolumen wird direkt aus Einwaage und Dichte berechnet. Orientierungswerte (systemabhängig): Weißdecklack etwa 15–25 %, Effektlacke unter 15 %, Korrosionsschutz-Grundierungen bis rund 30 %. CPVK hängt von Pigmentgeometrie, Teilchengröße und Ölzahl ab.

**Merksatz**

Acrylat-Pulverlacke: teurer, können aber sehr gute Wetter- und Vergilbungsbeständigkeit bieten — die konkrete Beständigkeit wird am formulierten System geprüft. Epoxyacrylat plus Polycarbonsäure ergibt bei niedriger Einbrenntemperatur den Automobil-Pulverklarlack.

**Stichwörter:** Pulverlack, Acrylatharz, Epoxyacrylatharz, Glycidylmethacrylat, Dodecandisäure, Anhydrid, Automobilklarlack, COOH-Acrylatharz, OH-Acrylatharz, verkapptes Polyisocyanat, Polyurethdion, UV-Pulverlack
*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur*

## Übungsblatt Ü-96 — Musterlösungen

**Frage 1** (Verständnis, 8 Punkte)
Erklären Sie, warum man für einen Automobilserien-Klarlack ein Epoxyacrylat-Pulversystem und nicht ein Epoxidharz-Pulver wählt. Nennen Sie mindestens zwei Eigenschaften und einen verfahrenstechnischen Grund.

**Eigenschaft 1:** Epoxyacrylatharze ergeben sehr wetter- und vergilbungsbeständige Filme — Voraussetzung für einen sichtbaren, dauerhaft klaren Decklack.
**Eigenschaft 2:** Sie sind hart und hochglänzend mit guter Chemikalienbeständigkeit.
**Warum kein Epoxid:** Ein Epoxidharz-Pulver kreidet, vermattet und vergilbt im Freien und scheidet als sichtbarer Außendecklack aus.
**Verfahrenstechnischer Grund:** Die Epoxyacrylat-Härtung gelingt schon bei 140 bis 160 °C. So werden die unteren Schichten des Automobillackaufbaus beim Einbrennen nicht überbrannt.
*Bewertung: Die Antwort begründet die Wahl sowohl über die Filmeigenschaften als auch über die niedrige Einbrenntemperatur und grenzt das Epoxidsystem korrekt ab.*

**Frage 2** **(Berechnung, 10 Punkte)**

Ein Epoxyacrylatharz (Epoxid-Äquivalentmasse 660 g/Äq.) wird mit Dodecandisäure (Molmasse 230 g/mol, zwei Carboxylgruppen je Molekül) stöchiometrisch vernetzt. Berechnen Sie den Härterbedarf je 100 Gewichtsteile Harz.

**Gegeben:** Harz 100 Gewichtsteile; EP-EW = 660 g/Äq.; Dodecandisäure M = 230 g/mol mit 2 COOH

**Epoxid-Äquivalente:** 100 / 660 = 0,1515 Äq.

**Carboxyl-Äquivalentmasse:** Die zweiprotonige Säure hat die Äquivalentmasse 230 / 2 = 115 g/Äq.

**Ansatz:** Stöchiometrisch: Äq.(COOH) = Äq.(Epoxid), also m(Härter) = Äq.(Epoxid) · Carboxyl-EW

**Rechnung und Antwort:** m(Härter) = 0,1515 Äq. · 115 g/Äq. = 17,4 Gewichtsteile Dodecandisäure je 100 Gewichtsteile Harz.

*Bewertung: Die Zweiprotonigkeit der Säure wird korrekt über die halbe Molmasse als Äquivalentmasse berücksichtigt — der häufigste Fehler wäre, mit der vollen Molmasse zu rechnen.*

**Frage 3** **(Anwendung, 7 Punkte)**

Ein Betrieb möchte Holzmöbel mit einem Pulverlack beschichten, scheitert aber an den hohen Einbrenntemperaturen üblicher Pulverlacke. Welchen Entwicklungsansatz schlagen Sie vor?

**Problem:** Holz ist temperaturempfindlich; die üblichen thermischen Einbrenntemperaturen der Pulverlacke würden den Werkstoff schädigen.

**Lösungsansatz:** UV-vernetzbare Pulverlacke: Das Pulver wird nur so weit erwärmt, dass es aufschmilzt und verläuft, die eigentliche Aushärtung erfolgt anschließend durch UV-Strahlung bei niedriger Temperatur (siehe L-24).

**Ergänzung:** Ergänzend zielt die Entwicklung auf feinteiligere Pulver mit gutem Verlauf in dünnen Schichten und generell niedrigere Einbrenntemperaturen.

*Bewertung: Die Antwort erkennt die thermische Grenze des Untergrunds und nennt mit dem UV-Pulverlack genau den Ansatz, der Aufschmelzen und Härtung entkoppelt.*

# L-97 · Pulverlackherstellung (Extrusion)

*Von der Einwaage über die Extrusion bis zum Sieben*

**Wahlqualifikation** · B 9

Pulverlacke sind praktisch lösemittelfrei; ihre Herstellung unterscheidet sich grundlegend von Flüssiglacken. Die Komponenten werden in einer Schmelze extrudiert, abgekühlt, zu Chips zerkleinert und zu Pulver definierter Korngröße vermahlen.

## Grundidee

Pulverlacke sind überwiegend lösemittelfreie Beschichtungsmaterialien; je nach Formulierung können jedoch flüchtige Bestandteile oder Reaktions-/Spaltprodukte auftreten. Der Pulverlack wird als festes Pulver appliziert und eingebrannt. Deshalb müssen alle festen Komponenten in einer Schmelze dispergiert werden — das geschieht bei der Extrusion, nicht wie beim Flüssiglack durch Mahlen in flüssiger Phase.

## Prozesskette

- Einwiegen — Bindemittel, Härter, Pigmente, Füllstoffe und Additive.
- Vormischen (Dry-Blend) — trockenes Homogenisieren.
- Extrudieren — im beheizten Extruder schmelzen die Harze; die Schmelze wird geknetet und alle Feststoffe gleichmäßig dispergiert, ohne dass die Vernetzung (Vorreaktion) startet. Dazu wird die Temperatur systemabhängig gewählt (häufig etwa 90 bis 120 °C), die Verweilzeit ist kurz.
- Abkühlen/Auswalzen/Schreddern — das Extrudat erstarrt auf dem Kühlband und wird zu Chips zerschlagen.
- Mahlen — eine Rotor-Sichtermühle stellt die Korngrößenverteilung ein.
- Post-Blend — Rieselhilfsmittel (z. B. pyrogene Kieselsäure) und Ladungssteuerungsmittel werden im Taumelmischer trocken aufgemischt; sie dürfen nicht durch den Extruder.
- Schutzsiebung und Abfüllen.

## Extruder-Einstellwerte (Richtwerte)

```
Typische Extruder-Temperaturzonen (systemabhängig, Richtwerte):

Zone 1  Einzug / Feststoffförderung:          40–60 °C
Zone 2  Aufschmelzzone / Plastifizierung:    80–100 °C
Zone 3  Homogenisierzone / Düse:            100–120 °C
Schmelzetemperatur am Austritt (Max.):        ≤ 140 °C

Schneckendrehzahl:   maschinenabhängig – klassische Anlagen 200–400 rpm, moderne deutlich
   darüber (bis etwa 1200 rpm). Die Drehzahl allein ist kein Prozessvergleich: Sie ist nur
   zusammen mit Schneckengeometrie und Durchsatz aussagekräftig.
Verweilzeit:          10–60 s, üblich 20–30 s  (Sekunden, nicht Minuten – kurz halten,
   sonst setzt eine Vorreaktion ein)

Zone 1 bleibt kalt, damit das Pulver als Feststoff gefördert wird – kein Schmelzpfropf am
   Einzug. Zone 2 schmilzt das Harz; Zone 3 homogenisiert. Der Grenzwert ≤ 140 °C am
   Austritt ist entscheidend: Darüber können reaktive Härter vorvernetzen – das Extrudat
   wird unbrauchbar.
```

## Besonderheiten

Die Pigmente werden bei der Herstellung typischerweise während der Extrusion dispergiert; eine nachträgliche Nuancierung über mehrere Mahlpassagen wie beim Flüssiglack ist kaum möglich, weil erneutes Extrudieren eine Teilvernetzung (Vorreaktion) auslösen würde. Die Korngrößenverteilung (Siebanalyse oder Laserbeugung) steuert die Versprühbarkeit; die Sichterdrehzahl beeinflusst die Trennschnittgröße und damit die Korngrößenverteilung; der Zusammenhang mit der Feinheit hängt von Mühle und Prozessbedingungen ab.

## Rotor-Sichtermühle (ACM) — Funktionsprinzip

Die Rotor-Sichtermühle (ACM — Air Classifying Mill) ist die Standardmühle für Pulverlacke. Zwei Funktionen in einem Gehäuse:

1. Prallrotor (Mahlung): Chips treffen mit hoher Geschwindigkeit auf den rotierenden Schlägerrotor und prallen an der Statorwand ab. Aufprall und Reibung zerkleinern die Chips zu Pulver.

2. Sichterrotor (Klassierung): Ein zweiter Rotor dreht im Luftstrom und trennt nach Größe: Zu-grobe Partikel werden nach außen geworfen (zurück zur Mahlung); Feinpartikel passieren den Sichter und gelangen als Fertigpulver in den Zyklon/Filter.

Sichterdrehzahl → steuert den Trennschnitt ($d_{50}$): hohe Drehzahl = feineres Pulver, niedrige = gröberes. Zielwerte: $d_{50}$ = 30–45 µm, $d_{98}$ < 100 µm.

Vorteil: Der Sichter verhindert Übermahlen und liefert eine enge Kornverteilung — besser als eine reine Stiftmühle.

## Rieselhilfsmittel und Ladungssteuerungsmittel

Rieselhilfsmittel (z. B. pyrogene Kieselsäure, 0,2–0,5 Gew.-%) und Ladungssteuerungsmittel werden NICHT extrudiert, sondern erst nach der Mahlung als Post-Blend zugegeben.

Warum nach der Mahlung? Im Extruder würden die feinen Additivpartikel in die Schmelze eingearbeitet und lägen nach dem Mahlen im Korninneren statt auf der Kornoberfläche — wo allein sie als Abstandhalter und Ladungssteuerer wirken.

Zugabe im Taumelmischer (Post-Blend):
• Doppelkonus- oder Taumelmischer, niedrige Drehzahl
• Mischzeit: 5–15 min (schonendes Homogenisieren)
• Kieselsäure legt sich als dünne Schicht auf die Pulverlack-Partikel → verhindert Agglomeration, verbessert Rieselfähigkeit und Förderbarkeit
• Ladungssteuerungsmittel optimieren die elektrostatische Aufladung beim Sprühen

## Vorteile und Grenzen

Vorteile: lösemittelfrei und dadurch sehr emissionsarm — emissionsfrei ist der Prozess nicht, beim Einbrennen können Spalt- und Reaktionsprodukte entstehen (siehe L-90); Overspray-Pulver ist rückgewinnbar (hoher Materialnutzungsgrad), robuste Schichten. Grenzen: Farbtonwechsel und exakte Nuancierung sind aufwändiger als beim Flüssiglack, und sehr dünne Schichten sind schwer zu erzielen.

## Umwelt und Sicherheit

Pulverstäube sind einatembar und können explosionsfähige Staub-Luft-Gemische bilden — Explosionsschutz, Absaugung und Erdung beachten. Overspray-Pulver zurückgewinnen und im Kreislauf führen; das spart Material und Abfall.

**Merksatz**

Reihenfolge: Einwiegen → Mischen → Extrudieren (schmelzen + dispergieren, ohne Vernetzung) → Kühlen/Chips → Mahlen (Sichtermühle) → Post-Blend → Sieben → Abfüllen. In der Regel nur eine Extrusion (erneutes Extrudieren würde eine Vorreaktion auslösen). Lösemittelfrei, Overspray rückgewinnbar; Staubexplosionsschutz.

**Stichwörter:** Pulverlack, Extrusion, Extruder, Dry-Blend, Chips, Rotor-Sichtermühle, Korngrößenverteilung, Schutzsiebung, Overspray, Staubexplosion
*Quellen: ISO 8130*

## Übungsblatt Ü-97 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**
Nennen Sie die Schritte der Pulverlackherstellung in der richtigen Reihenfolge und erklären Sie die Rolle der Extrusion.

**Reihenfolge:** Einwiegen → Vormischen (Dry-Blend) → Extrudieren → Abkühlen/Chips → Mahlen (Rotor-Sichtermühle) → Post-Blend (Rieselhilfsmittel und Ladungssteuerungsmittel trocken aufmischen) → Schutzsiebung → Abfüllen.
**Extrusion:** Im beheizten Extruder schmelzen die Harze; die Schmelze wird geknetet und alle Feststoffe (Pigmente, Füllstoffe) gleichmäßig dispergiert.
**Wichtig:** Die Vernetzung darf dabei nicht starten — sonst wäre das Pulver unbrauchbar.
**Mahlen:** Die erstarrten Chips werden in einer Rotor-Sichtermühle auf die gewünschte Korngröße vermahlen.
*Bewertung: Die Prozesskette ist vollständig und die Doppelrolle der Extrusion (Schmelzen + Dispergieren ohne Vernetzung) wird erkannt.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**
Ein Pulverlack soll 70 µm dick aufgetragen werden; die Dichte des Films beträgt 1,4 g/cm³. Berechnen Sie den theoretischen Pulverbedarf in g/m².

**Ansatz:** Bedarf = Schichtdicke · Dichte
**Einheiten:** 70 µm = 0,0070 cm
**Rechnung:** 0,0070 cm · 1,4 g/cm³ = 0,0098 g/cm² = 98 g/m²
**Antwortsatz:** Der theoretische Pulverbedarf beträgt rund 98 g/m² (ohne Overspray-Verluste).
*Bewertung: Schichtdicke und Dichte werden korrekt verknüpft und cm²- in m²-Bezug überführt.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**
Warum ist eine nachträgliche Farbtonkorrektur bei Pulverlacken schwieriger als bei Flüssiglacken?

**Grund:** Die Pigmente werden typischerweise bereits bei der einen Extrusion dispergiert; eine spätere Korrektur ist deutlich schwieriger als bei Flüssiglacken.
**Vorreaktion:** Ein zweites Extrudieren zum Nuancieren würde eine Teilvernetzung (Vorreaktion) auslösen und das Pulver schädigen.
**Folge:** Der Farbton muss vorab genau eingestellt werden; nachträgliches Abtönen wie beim Flüssiglack entfällt weitgehend.
*Bewertung: Der Zusammenhang zwischen einmaliger Extrusion, Vorreaktion und erschwerter Nuancierung wird korrekt erklärt.*

# L-98 · Pulverlack-Prüfungen und Ringleitungsstabilität

*Gelzeit, Einbrennverlust, Korngröße, Rieselfähigkeit, Aufladbarkeit*

**Prüfungsteil 1** · A 7.1

Pulverlacke werden auf Gelzeit, Einbrennverlust, Korngrößenverteilung, Rieselfähigkeit und Aufladbarkeit geprüft. Bei Flüssiglacken in industriellen Ringleitungen ist die Ringleitungsstabilität wichtig.

## Gelzeit und Einbrennverlust

Die Gelzeit wird auf einem beheizten Metallblock bei definierter Temperatur bestimmt und kennzeichnet die Reaktivität des Pulvers. Der Einbrennverlust (Masseverlust beim Einbrennen) zeigt den Anteil flüchtiger Bestandteile oder Abspaltprodukte.

## Gelzeit — Messung und Bedeutung (DIN EN ISO 8130-6)

Gelzeit-Messung nach DIN EN ISO 8130-6 (beheizter Metallblock):

1. Elektrisch beheizten Metallblock mit Mulde auf Prüftemperatur bringen — Regelfall (180 ± 1) °C; andere Temperaturen nur, wenn vereinbart (Gerätebereich der Norm 130 bis 230 °C).
2. (0,25 ± 0,01) ml Pulver mit dem Messlöffel in die Mulde des Blocks geben; das Pulver schmilzt auf. 3. Sobald das Pulver vollständig geschmolzen ist, die Stoppuhr starten und mit einem Rührer geringer Wärmekapazität (Norm-Beispiel: Nadel mit 1-mm-Kopf an isolierendem Griff) gleichmäßig in kleinen Kreisen rühren; den Rührer alle 2 bis 3 s aus der Schmelze heben. 4. Zeit stoppen, wenn die hochgezogenen Fäden spröde werden und sich nicht mehr ziehen lassen (Gel = Beginn der Vernetzung); Ergebnis auf 1 s genau angeben. Wichtig: Die Uhr läuft erst ab dem vollständigen Aufschmelzen, nicht ab dem Aufstreuen — sonst misst man die Aufschmelzzeit mit. Das Verfahren gilt nicht für Pulver mit Gelzeiten unter 15 s.

Typische Gelzeiten bei 180 °C: 60–180 s
• Kurze Gelzeit (< 90 s) = reaktives System, schnell vernetzend, benötigt kürzere Einbrennzeit
• Lange Gelzeit (> 150 s) = träges System, guter Verlauf, aber Ofen und Einbrennzeit anpassen

Einbrennverlust: [(m_vor – m_nach) / m_vor] × 100 %
Zeigt flüchtige Anteile (z. B. Caprolactam-Abspaltprodukt bei PUR-Pulvern, Feuchtigkeit, Restlösemittel). Hoher Einbrennverlust → Pinholes-Risiko.

VERTIEFUNG — ÜBER DEM PRÜFUNGSSTOFF

### Gelzeit mit dem Rheometer (G'/G'' Crossover) — Vertiefung

Modernes Messverfahren: Oszillations-Rheometer (Temperatursprung-Modus)

Ablauf: Pulver wird zwischen den Platten des Rheometers aufgeschmolzen; dann wird eine sinusförmige Schubspannung aufgebracht.

Gemessene Größen:
G' (Speichermodul) — der elastische, federnde Anteil
G'' (Verlustmodul) — der viskose, dämpfende Anteil

Am Gelpunkt (= Gelzeit) gilt: G' = G'', also tan δ = G''/G' = 1
Dieses G'/G''-Crossover ist das übliche instrumentelle Kriterium für den Gelpunkt — kein Beobachter, kein Rühren von Hand, keine subjektive Einschätzung. Es ist allerdings frequenzabhängig; die strenge Definition nach Winter-Chambon fordert, dass tan δ am Gelpunkt frequenzunabhängig ist.

Nach dem Gelpunkt: G' steigt weiter an (Film vernetzt durch), bis ein Plateau erreicht ist (= vollständige Vernetzung). Das Rheometer liefert damit die komplette Härtungskurve — nicht nur die Gelzeit, sondern auch den Endgrad der Vernetzung und die Aushärtezeit.

## Korngröße und Rieselfähigkeit

Die Korngrößenverteilung (Siebanalyse oder Laserbeugung) beeinflusst Applikationsverhalten und Verlauf. Die Rieselfähigkeit beschreibt, wie gut das Pulver fließt — wichtig für Förderung, Dosierung und gleichmäßigen Auftrag.

## Aufladbarkeit

Bei der elektrostatischen Applikation muss sich das Pulver gut aufladen lassen und an der geerdeten Fläche anlagern. Die Aufladbarkeit beeinflusst Auftragswirkungsgrad und Umgriff; zusätzlich wirken Pistolenparameter, Erdung, Werkstückgeometrie, Pulverkorngröße und Prozessführung.

## Ringleitungsstabilität

In industriellen Lackieranlagen zirkuliert Flüssiglack in Ringleitungen und wird dabei ständig geschert. Die Ringleitungsstabilität prüft, ob Farbton, Viskosität und Dispersion (kein Ausschwimmen, keine Flockulation) über diese Dauerbelastung stabil bleiben.

## Umwelt und Sicherheit

Pulverstäube sind einatembar und können explosionsfähige Staub-Luft-Gemische bilden — Explosionsschutz, Absaugung und Erdung beachten. Overspray-Pulver möglichst zurückgewinnen und im Kreislauf führen.

**Merksatz**

Pulverlack: Gelzeit (Reaktivität), Einbrennverlust (flüchtige Anteile), Korngröße (Applikation/Verlauf), Rieselfähigkeit (Förderung), Aufladbarkeit (elektrostatisch). Flüssiglack: Ringleitungsstabilität unter Dauerscherung.

**Stichwörter:** Pulverlack, Gelzeit, Einbrennverlust, Korngrößenverteilung, Rieselfähigkeit, Aufladbarkeit, elektrostatisch, Ringleitungsstabilität, Staubexplosion
*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; DIN EN ISO 8130-6*

## Übungsblatt Ü-98 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Welche Kennwerte prüfen Sie an einem Pulverlack und warum?

**Gelzeit:** Kennzeichnet die Reaktivität beim Einbrennen.
**Einbrennverlust:** Zeigt flüchtige Anteile bzw. Abspaltprodukte.
**Korngröße/Rieselfähigkeit:** Steuern Applikation, Verlauf, Förderung und Dosierung.
**Aufladbarkeit:** Bestimmt Auftragswirkungsgrad und Umgriff bei der elektrostatischen Applikation.
*Bewertung: Die pulverlack-typischen Kennwerte werden mit ihrer praktischen Bedeutung verknüpft.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**

Zur Bestimmung des Einbrennverlusts werden 5,00 g Pulverlack eingewogen; nach dem Einbrennen verbleiben 4,70 g. Berechnen Sie den Einbrennverlust in Prozent.

**Ansatz:** Einbrennverlust = (Einwaage − Rückwaage) / Einwaage · 100 %
**Rechnung:** = (5,00 g − 4,70 g) / 5,00 g · 100 % = 0,30 / 5,00 · 100 % = 6,0 %
**Antwortsatz:** Der Einbrennverlust beträgt 6,0 %.
**Deutung:** 6 % flüchtige Anteile/Abspaltprodukte gehen beim Einbrennen verloren.
*Bewertung: Der Masseverlust wird korrekt auf die Einwaage bezogen und als Prozentwert angegeben.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**

In einer Pulverbeschichtungsanlage kommt es zu ungleichmäßigem Auftrag und schlechtem Umgriff. Welche Pulvereigenschaften prüfen Sie?

**Aufladbarkeit:** Schlechter Umgriff deutet auf mangelnde elektrostatische Aufladung hin — Aufladbarkeit und Feuchte prüfen.
**Rieselfähigkeit/Korngröße:** Ungleichmäßige Förderung durch schlechte Rieselfähigkeit oder ungünstige Korngröße prüfen.
**Sicherheit:** Dabei Explosionsschutz (Staub), Absaugung und Erdung beachten.
*Bewertung: Die Symptome werden korrekt auf Aufladbarkeit und Rieselverhalten zurückgeführt, mit Sicherheitshinweis.*

Kapitel 9

# Anwendungen: Objektlackierung

# L-99 · Korrosionsschutzsysteme

*Schutzmechanismen, Korrosivitätskategorien und Systemaufbau*

**Wahlqualifikation** · B 8

Nicht die einzelne Schicht schützt, sondern das abgestimmte System aus Untergrundvorbereitung sowie Grund-, Zwischen- und Deckbeschichtung.

## Warum Korrosionsschutz Systemsache ist

Stahl rostet, wo Wasser, Sauerstoff und ein Elektrolyt gleichzeitig auf die Metalloberfläche wirken. Eine Beschichtung unterbricht diesen Zusammenhang. Zuverlässig gelingt das aber nur, wenn Untergrundvorbereitung, Grundierung und Deckschicht zusammenpassen — eine einzelne, noch so gute Schicht ersetzt kein abgestimmtes System.

## Die drei Schutzmechanismen

- Barrierewirkung — die Beschichtung hält Wasser, Sauerstoff und Ionen vom Metall fern. Lamellare Pigmente wie Eisenglimmer verlängern den Diffusionsweg und verstärken die Sperre.
- Aktiver (inhibierender) Schutz — Rostschutzpigmente wie Zinkphosphat geben passivierende Ionen ab, die die Stahloberfläche elektrochemisch beruhigen.
- Kathodischer Schutz — zinkstaubreiche Grundierungen enthalten so viel Zink, dass es leitenden Kontakt zum Stahl hat. Das unedlere Zink löst sich bevorzugt auf und schützt den Stahl als Opferanode.

## Korrosivitätskategorien

Die Belastung eines Bauteils wird in Kategorien eingeteilt — von C1 (innen, trocken, geheizt) über C3 (Stadt- und Industrieluft) und C4 (Chemieanlagen, Schwimmbäder) bis C5 und CX (Meeresatmosphäre, Offshore). Mit steigender Korrosivitätsbelastung und geforderter Schutzdauer steigen im Allgemeinen die Anforderungen an das Beschichtungssystem; Schichtdicke und Systemaufbau werden nach dem Anforderungsprofil festgelegt. Die Kategorie ist der Ausgangspunkt jedes Anforderungsprofils. Die geforderte Schutzdauer wird nach DIN EN ISO 12944 in vier Stufen angegeben: niedrig (bis 7 Jahre), mittel (7–15), hoch (15–25) und sehr hoch (über 25 Jahre, seit der Fassung 2017 ergänzt) — ein Planungswert bis zur ersten größeren Instandsetzung, keine Gewährleistungsfrist.

## Untergrundvorbereitung entscheidet

Für einen dauerhaften Korrosionsschutz ist eine geeignete Untergrundvorbereitung erforderlich; Rost, Zunder und Verunreinigungen müssen entsprechend dem vorgesehenen System entfernt bzw. behandelt werden. Stahl wird gestrahlt; der erreichte Reinheitsgrad heißt Entrostungsgrad (Sa 2, Sa 2½, Sa 3 beim Strahlen, St 2/St 3 bei Handentrostung). Höhere Kategorien verlangen höhere Entrostungsgrade. Das Strahlen erzeugt zugleich eine Rauheit, die die Grundierung verankert und so die Haftung sichert (siehe L-64; zur Benetzung L-12).

## Systemaufbau und Duplexsystem

Ein Schutzsystem ist mehrlagig: die Grundbeschichtung sorgt für Haftung und aktiven oder kathodischen Schutz, die Zwischenbeschichtung für Schichtdicke und Barriere, die Deckbeschichtung für Wetter-, Chemikalien- und UV-Beständigkeit sowie Farbe. Wird auf feuerverzinkten Stahl beschichtet, entsteht ein Duplexsystem: Zinküberzug und Beschichtung schützen gemeinsam und verlängern die Schutzdauer überproportional. Auf Zink ist gute Haftung eigens sicherzustellen (Anschleifen oder Sweep-Strahlen, geeignete Grundierung). Für die Materialplanung gilt: Theoretische Ergiebigkeit A ($m^2/l$) = 10 · Volumenfestkörper (%) / Trockenschichtdicke (µm); theoretischer Bedarf = Fläche / A, tatsächlicher Bedarf = theoretischer Bedarf / Auftragswirkungsgrad.

## Wie ein System für eine Kategorie geprüft wird

Die Korrosivitätskategorie wird nach den in DIN EN ISO 9223 beschriebenen atmosphärischen Korrosionsbedingungen bzw. Korrosionsraten eingeordnet; die konkrete Bestimmung folgt der Norm. Ob ein Beschichtungssystem eine Kategorie und Schutzdauer erreicht, wird dagegen im Labor nachgewiesen: nach DIN EN ISO 12944-6 (Kategorien C2–C5 und Im1–Im3) beziehungsweise Teil 9 (CX und Offshore). Geprüft wird mit Salzsprühnebel (DIN EN ISO 9227), Kondenswasser-Konstantklima (DIN EN ISO 6270) und UV-Bewitterung, bei hohen Kategorien und Offshore zusätzlich mit zyklischen Prüfungen, die den Praxiswechsel aus Nässe, Salz und Trocknung besser abbilden. Die Prüfdauer steigt mit Kategorie und Schutzdauer (Offshore-Systeme etwa 4200 Stunden Zyklustest). Bewertet werden anschließend Blasen, Rost, Rissbildung und Abblättern (DIN EN ISO 4628) sowie die Unterwanderung an einem eingebrachten Ritz.

## Andere Regelwerke — Bahn, Straße, Auto, Luftfahrt

DIN EN ISO 12944 ist der allgemeine Standard; einzelne Branchen haben eigene, oft strengere Vorschriften:

- Straßen- und Eisenbahnbrücken (auch der Deutschen Bahn): ZTV-ING Teil 4 Abschnitt 3 mit den TL/TP-KOR-Stahlbauten (herausgegeben von der BASt); sie fordern für sehr lange Schutzdauer schärfere Nachweise als die ISO 12944. Für ihre Stahlbrücken regelt die DB den Korrosionsschutz über die Ril 804 in Verbindung mit ISO 12944 bzw. TL/TP-KOR-Stahlbauten; der DBS 918 084 (früher „Blatt 84“ der TL/TP-KOR-Stahlbauten, seit 2015 eigener Standard) betrifft speziell die Beschichtung von Schottertrögen und schotterberührten Stahlflächen, der DBS 918 300 (Nachfolger der TL 918 300) die Beschichtungsstoffe für Schienenfahrzeuge — beides sind Stoffstandards und nicht das gesamte Korrosionsschutz-Regelwerk der DB, siehe L-57.
- Automobilbau: zyklische Korrosionsprüfung nach VDA 233-102 (Nachfolger der VDA 621-415).
- Luftfahrt: militärische und herstellereigene Spezifikationen wie MIL-PRF-23377 (Epoxid-Primer) und MIL-PRF-85285 (PUR-Decklack) sowie Airbus- (AIMS) und Boeing-Normen (BMS), zunehmend chromatfrei.
- Bundeswehr/Wehrtechnik: eigene Technische Lieferbedingungen (TL) und VG-Normen.
- Offshore zusätzlich: NORSOK M-501.

**Merksatz**

Erst das Anforderungsprofil aus Korrosivitätskategorie, Schutzdauer und Untergrund — dann die Auswahl von Vorbereitung, Schutzmechanismus und Schichtaufbau. Der Schutz ist immer nur so gut wie seine schwächste Stelle im System.

**Stichwörter:** Korrosionsschutz, Barrierewirkung, Eisenglimmer, Zinkphosphat, Rostschutzpigment, kathodischer Schutz, Zinkstaub, Opferanode, Korrosivitätskategorie, C4, Entrostungsgrad, Sa 2½, Duplexsystem, feuerverzinkt, Grundbeschichtung, Deckbeschichtung, Schutzdauer, DIN EN ISO 12944

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; DIN EN ISO 12944; DIN EN ISO 9227; DIN EN ISO 4628; ZTV-ING Teil 4 Abschnitt 3; DIN EN ISO 6270; DIN EN ISO 9223*

## Übungsblatt Ü-99 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**
Nennen Sie die drei Schutzmechanismen einer Korrosionsschutzbeschichtung und erläutern Sie jeden an einem Beispielpigment.

**Barrierewirkung:** Die Beschichtung hält Wasser, Sauerstoff und Ionen vom Metall fern. Lamellare Pigmente wie Eisenglimmer verlängern den Diffusionsweg und verstärken die Sperre.
**Aktiver (inhibierender) Schutz:** Rostschutzpigmente wie Zinkphosphat geben passivierende Ionen ab, die die Stahloberfläche elektrochemisch beruhigen.
**Kathodischer Schutz:** Zinkstaubreiche Grundierungen stehen in leitendem Kontakt zum Stahl. Das unedlere Zink löst sich bevorzugt auf und schützt den Stahl als Opferanode.
**Einordnung:** In der Praxis wirken die Mechanismen oft zusammen: eine zinkreiche Grundierung schützt kathodisch, die Deckschicht wirkt als Barriere.
*Bewertung: Alle drei Mechanismen werden genannt und jeweils mit einem konkreten Pigment belegt. Der Hinweis auf das Zusammenwirken im System zeigt, dass die Mechanismen nicht als Gegensätze verstanden werden.*

**Frage 2** **(Berechnung, 10 Punkte)**
Eine Stahlfläche von 480 m² erhält ein Zweischichtsystem: Grundbeschichtung 60 µm Trockenschichtdicke bei 60 % Volumenfestkörper, Deckbeschichtung 100 µm bei 50 % Volumenfestkörper. Der Auftragswirkungsgrad beträgt jeweils 50 %. Berechnen Sie den tatsächlichen Materialbedarf beider Schichten und die Summe.

**Grund — Ergiebigkeit:** A = 10 · VFK / TSD = 10 · 60 / 60 = 10,0 m²/l
**Grund — Bedarf:** V(theor) = 480 / 10,0 = 48,0 l; V(ist) = 48,0 / 0,50 = 96,0 l
**Deck — Ergiebigkeit:** A = 10 · 50 / 100 = 5,0 m²/l
**Deck — Bedarf:** V(theor) = 480 / 5,0 = 96,0 l; V(ist) = 96,0 / 0,50 = 192,0 l
**Summe:** Gesamt-Trockenschichtdicke 160 µm; tatsächlicher Bedarf 96,0 l + 192,0 l = 288,0 l.
*Bewertung: Jede Schicht wird über ihre eigene Ergiebigkeit gerechnet — die dickere und zugleich festkörperärmere Deckschicht braucht bei gleicher Fläche genau das Doppelte an Material (Faktor 100/60 · 60/50 = 2,0). Der Wirkungsgrad wird korrekt als Division angesetzt.*

**Frage 3** **(Anwendung, 7 Punkte)**
Ein feuerverzinktes Stahlgeländer soll zusätzlich farbig beschichtet werden. Begründen Sie, warum ein Duplexsystem sinnvoll ist, und nennen Sie die wichtigste Voraussetzung für dauerhafte Haftung auf Zink.

**Duplexsystem:** Zinküberzug und Beschichtung schützen gemeinsam: Das Zink schützt kathodisch, die Beschichtung wirkt als Barriere und übernimmt Farbe und Wetterbeständigkeit. Zusammen ist die Schutzdauer länger als die Summe beider Einzelschutzarten.
**Weiterer Vorteil:** Die Beschichtung schützt zugleich das Zink vor Abtrag (Weißrost) und ermöglicht die farbliche Gestaltung.
**Voraussetzung Haftung:** Zink ist glatt und reaktiv. Vor dem Beschichten ist die Oberfläche zu reinigen und aufzurauen (Sweep-Strahlen oder Anschleifen) und eine für Zink geeignete Grundierung zu wählen.
**Bezug:** Ohne Vorbehandlung droht Enthaftung: Die Zinkoberfläche ist glatt, lose Zinkkorrosionsprodukte (Weißrost) bilden eine Trennschicht, und das alkalisch reagierende Zink verseift esterhaltige Bindemittel (siehe L-16). Sweep-Strahlen oder Anschleifen entfernt die Trennschicht und schafft Rauheit (siehe L-64).
*Bewertung: Die Begründung nennt das Zusammenwirken beider Schutzarten und die überproportionale Schutzdauer. Dass die Haftung auf Zink eigens sichergestellt werden muss, ist der Punkt, an dem sich Fachwissen zeigt.*

# L-100 · Washprimer (Reaktionsgrundierung)

*Haftung und Passivierung auf blankem Metall — chromatfrei*

**Prüfungsteil 1** · A 9

Ein Washprimer haftet auf blankem Metall und passiviert es zugleich. Als Bindemittel dient meist Polyvinylbutyral mit Phosphorsäure — moderne Washprimer sind chromatfrei.

## Aufgabe

Ein Washprimer (Reaktionsgrundierung) vermittelt Haftung auf blankem, glattem Metall und passiviert die Oberfläche in einem Schritt. Er wird sehr dünn aufgetragen und bildet die erste Schicht im Korrosionsschutzaufbau.

## Aufbau

Als Bindemittel dient häufig Polyvinylbutyral (siehe L-131), oft mit Phenol- oder Epoxidharz modifiziert. Geliefert wird der Washprimer meist als Zweikomponentensystem: die Bindemittelkomponente und eine Säurekomponente.

## Die Reaktion mit Phosphorsäure

Kurz vor dem Auftragen mischt man die Phosphorsäure zu. Die saure Komponente kann die Metalloberfläche chemisch beeinflussen und zur Haftvermittlung bzw. Passivierung beitragen; Wirkung und Mechanismus hängen von Metall und Washprimer ab. Die Säure ist auch der Grund für die begrenzte Topfzeit nach dem Mischen.

## Chromatfrei statt Chromat

Klassische Washprimer enthielten Zinkchromat als korrosionsschutzaktive Substanz. Chromat (Chrom(VI)) ist krebserzeugend und steht in Anhang XIV der REACH-Verordnung; sein Einsatz ist zulassungspflichtig und außerhalb weniger zugelassener Anwendungen — etwa in der Luftfahrt — praktisch beendet. Moderne Washprimer werden häufig chromatfrei formuliert; welche Säuren und Passivierungsmittel eingesetzt werden, hängt vom konkreten Produkt und den regulatorischen Anforderungen ab.

## Anwendung

Washprimer werden vor allem auf Leichtmetalle und schwer haftende Untergründe wie Aluminium oder verzinkten Stahl aufgebracht, bevor Grundierung und Decklack folgen.

**Merksatz**

Washprimer = Haftung + Passivierung auf blankem Metall, PVB-Bindemittel + Phosphorsäure (begrenzte Topfzeit). Modern chromatfrei — das früher übliche Zinkchromat enthält krebserzeugendes Chrom(VI) und ist nach REACH zulassungspflichtig (Anhang XIV); außerhalb weniger zugelassener Anwendungen wie der Luftfahrt wird es nicht mehr eingesetzt.

**Stichwörter:** Washprimer, Reaktionsgrundierung, Polyvinylbutyral, Phosphorsäure, Passivierung, Haftvermittler, Zinkchromat, chromatfrei, Aluminium, Topfzeit

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie*

---

## Übungsblatt Ü-100 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Welche Aufgabe hat ein Washprimer, und welche Rolle spielt die Phosphorsäure?

**Aufgabe:** Haftung auf blankem, glattem Metall vermitteln und die Oberfläche passivieren — in einem dünnen ersten Anstrich.

**Phosphorsäure:** Die saure Komponente kann die Metalloberfläche chemisch beeinflussen und zur Haftvermittlung bzw. Passivierung beitragen.

**Folge:** Die Säure bewirkt eine begrenzte Topfzeit des gemischten Systems.

*Bewertung: Aufgabe und die passivierende Wirkung der Phosphorsäure werden korrekt erklärt.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**
Ein Washprimer wird im Verhältnis Bindemittelkomponente zu Säurekomponente von 4:1 angesetzt. Wie viel Säurekomponente ist für 500 g Bindemittelkomponente nötig?

**Rechnung:** m(Säure) = 500 g / 4 = 125 g

**Antwortsatz:** Es werden 125 g Säurekomponente zugegeben.

*Bewertung: Das Mischungsverhältnis wird korrekt angewendet.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**
Warum sind moderne Washprimer chromatfrei, und auf welchen Untergründen setzt man Washprimer typisch ein?

**Chromatfrei:** Das früher genutzte Zinkchromat enthält krebserzeugendes Chrom(VI); solche Systeme sind aufgrund ihrer Gefährdung und Regulierung stark eingeschränkt, moderne Systeme kommen ohne aus.

**Untergründe:** Leichtmetalle und schwer haftende Metalle wie Aluminium oder verzinkter Stahl.

*Bewertung: Chromatfreiheit (Chrom(VI)-Gefahr) und die typischen Metalluntergründe werden korrekt genannt.*

# L-101 · Zinkstaubfarbe

*Aktiver Korrosionsschutz — Zink opfert sich für das Eisen*

**Prüfungsteil 1** · A 9

Eine Zinkstaubfarbe schützt Stahl aktiv: An Fehlstellen wirkt das unedlere Zink als Opferanode (kathodischer Schutz); zusätzlich dichten Zink-Reaktionsprodukte die Schicht ab (Barriere).

## Zwei Schutzmechanismen

- Kathodischer Schutz: An Störstellen, wo blankes Eisen, Zink und Wasser Kontakt haben, gehen Zinkionen in Lösung — das unedlere Zink opfert sich, das Eisen wird nicht oxidiert (Opferanode).
- Barriereeffekt: Die Zinkstaubpartikel bilden eine Schutzschicht; Poren werden durch Reaktionsprodukte des Zinks mit Sauerstoff und Wasser (Zn(OH)2, ZnO) abgedichtet.

## Warum viel Zink nötig ist

Der kathodische Schutz wirkt erst optimal, wenn genug metallischer Zinkstaub elektrischen Kontakt hat. Nach ISO 12944-5 gelten ≥ 80 % Zinkstaub im Trockenfilm als Basis für zinkreiche Grundbeschichtungen; hochwertige Zinkstaubgrundierungen liegen in der Praxis häufig bei etwa 90–95 %. Für zinkreiche Grundierungen wird ein hoher Anteil metallischen Zinks im Zinkstaub angestrebt; die konkrete Spezifikation des Zinkstaubs richtet sich nach Produkt und System.

## Bindemittel und Verträglichkeit

Als Bindemittel eignen sich z. B. epoxidmodifizierte Alkydharze (oxidativ härtend, Sikkative und Hautverhinderer nötig), Epoxidsysteme oder feuchtigkeitshärtendes 1K-Polyurethan: Ein NCO-terminiertes Präpolymer (siehe L-26) reagiert mit der Luftfeuchtigkeit und vernetzt zu einem harten, gut haftenden Film — praktisch für die Stahlbau- und Werftlackierung, weil kein Ansetzen wie beim 2K-System nötig ist. Wichtig: keine stark sauren oder basischen Bindemittel, sonst reagiert das Zink chemisch (bei Säuren Wasserstoffbildung, lösliche Salze), was die Schutzwirkung mindert. Daneben gibt es anorganische Zinkstaubgrundierungen (Zinksilicatfarben): Klassisches Bindemittel ist ein lösemittelhaltiges Ethylsilicat (Kieselsäureester), das mit Luftfeuchtigkeit zu einem $SiO_2$-Netzwerk hydrolysiert; daneben stehen heute wasserbasierte, silanbasierte 2K-Bindemittel mit nahezu null VOC zur Verfügung (z. B. Dynasylan SIVO 140, Evonik). Sie sind sehr hitzebeständig und als Shopprimer im Schiff- und Stahlbau verbreitet (siehe L-103).

## Absetzen und Einarbeitung

Wegen der hohen Dichte setzt sich Zinkstaub schnell ab; Antiabsetzmittel (z. B. Bentonit-Paste) sind daher besonders wichtig, und der Bodensatz muss aufrührbar bleiben. Eingearbeitet wird durch langsames Einstreuen in die Bindemittellösung unter Rühren mit dem Dissolver.

## Umwelt und Sicherheit

Trockener Zinkstaub ist sehr reaktiv und brennbar (feine Teilchen, große Oberfläche): erhöhte Staubbildung vermeiden, Feuer- und Zündquellen fernhalten, elektrostatische Entladungen verhindern. Feiner Zinkstaub kann eingeatmet werden; Schutzmaßnahmen sind anhand der Gefährdungsbeurteilung, Exposition und des Sicherheitsdatenblatts festzulegen. Geeignete Atemschutzmaßnahmen sind bei relevanter Staubexposition erforderlich.

## Schweißen und thermisches Trennen zinkbeschichteter Teile

Werden Bauteile mit Zinkstaubgrundierung oder anderen zinkhaltigen Beschichtungen geschweißt, geschliffen oder thermisch getrennt (Brennschneiden, Plasmaschneiden), entsteht Zinkoxidrauch (ZnO). Das Einatmen von frischem Zinkoxidrauch kann Zinkrauchfieber auslösen — grippeähnliche Symptome (Fieber, Schüttelfrost, Gliederschmerzen), die typischerweise einige Stunden nach der Exposition auftreten und meist innerhalb von 24–48 Stunden abklingen. Vorbeugung: wirksame Absaugung am Entstehungsort, geeigneter Atemschutz nach Gefährdungsbeurteilung (je nach Exposition Partikelfilter wie P2/FFP2 oder höhere Schutzstufen, bei intensiver Exposition Gebläseatemschutz), ausreichende Lüftung des Arbeitsbereichs. Diese Maßnahmen gelten generell für alle zinkhaltigen Überzüge und Beschichtungen, nicht nur für Zinkstaubgrundierungen.

## Reaktionsgleichung: kathodischer Schutz (Opferanode)

Das unedlere Zink opfert sich (Anode):
$Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2\ e^-$

Am Eisen (Kathode) läuft die Sauerstoffreduktion:
$O_2 + 2\ H_2O + 4\ e^- \rightarrow 4\ OH^-$

So bleibt das Eisen geschützt, solange Zink vorhanden ist.

## Passiver Korrosionsschutz: 2K-EP-Grundlack mit Zinkphosphat

Neben dem aktiven Schutz durch Zinkstaub schützt ein passiver 2K-EP-Grundlack durch Barriere und Inhibitorpigmente. Zinkphosphat ersetzt das krebserzeugende Zinkchromat (Cr(VI)-frei). Zwei Rezepturvarianten nach Müller/Poth:

| Rezept 1 – Stammlack | Gew.-% |
|---|---|
| EP-Harz Typ 1 (75 % in Xylol) | 28,0 |
| Eisenoxidrot | 14,2 |
| Zinkphosphat | 14,2 |
| Schwerspat | 9,5 |
| Talkum | 9,5 |
| MIBK | 8,0 |
| Xylol | 13,0 |
| n-Butanol | 3,6 |
| Summe Stammlack | 100,0 |
| Härter: Polyamidharz 70 %ig (Aradur 115/70X, Huntsman) | 15,0 |

→ Gesamtsumme 115,0; nfA ≈ 69 %; PVK ≈ 33 Vol.-%.

| Rezept 2 – Stammlack | Gew.-% |
|---|---|
| EP-Harz Typ 1 (75 % in Xylol) | 27,0 |
| Eisenoxidrot | 15,0 |
| Zinkphosphat | 15,0 |
| Schwerspat | 10,0 |
| Talkum | 10,0 |
| MIBK | 8,0 |
| Xylol | 12,0 |
| n-Butanol | 3,0 |
| Summe Stammlack | 100,0 |
| Härter: Polyaminoamiddukt 60 %ig (Aradur 423, Huntsman) + Xylol 2,4 + n-BuOH 0,6 | 22,0 |

→ Gesamtsumme 125,0; nfA ≈ 67 %; PVK ≈ 33 Vol.-%.

Bindemittel: Beckopox EP 301/75X. Applikation: Spritzen, 40–60 µm TF.
Quelle: Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur, Tab. II-1.21.

### Merksatz

Zinkstaubfarbe = aktiver Korrosionsschutz. Zink opfert sich kathodisch für das Eisen, dazu Barrierewirkung; nötig ist ein sehr hoher Zinkanteil im Trockenfilm (ISO 12944: ≥ 80 %, Praxis oft 90–95 %) und neutrale Bindemittel. Zinkstaub ist reaktiv/brennbar, einatembar und lungengängig — Staub- und Zündschutz. Beim Schweißen oder thermischen Trennen zinkbeschichteter Teile entsteht Zinkoxidrauch (ZnO) — Atemschutz und Absaugung sind Pflicht.

**Stichwörter:** Zinkstaubfarbe, kathodischer Schutz, Opferanode, Barriereeffekt, metallisches Zink, epoxidmodifiziertes Alkydharz, Antiabsetzmittel, Zinkstaub, Staubexplosion, Dynasylan SIVO 140, anorganisches Bindemittel, Zinkrauchfieber, Zinkoxidrauch, Schweißen, thermisches Trennen, Atemschutz

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur; Evonik, Dynasylan SIVO 140 Starting Point / Technisches Datenblatt (öffentlich); ISO 12944-5*

## Übungsblatt Ü-101 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Erklären Sie die beiden Mechanismen, mit denen eine Zinkstaubfarbe Stahl vor Korrosion schützt.

**Kathodisch:** Zink wirkt als Opferanode: An Fehlstellen geht das unedlere Zink in Lösung, das Eisen wird nicht oxidiert.

**Barriere:** Zinkstaubpartikel bilden eine Schutzschicht; Poren werden durch Zn-Reaktionsprodukte (Zn(OH)2, ZnO) abgedichtet.

*Bewertung: Kathodischer Schutz und Barriereeffekt werden korrekt beschrieben.*

**Frage 2** **(Berechnung, 6 Punkte)**

Ein Zinkstaub enthält 95 % metallisches Zink. Wie viel metallisches Zink steckt in 90 g dieses Zinkstaubs?

**Ansatz:** metall. Zn = Masse · Anteil = 90 g · 0,95.

**Rechnung:** metall. Zn = 85,5 g.

*Bewertung: Der Anteil metallischen Zinks wird korrekt berechnet.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**

Warum ist beim Umgang mit trockenem Zinkstaub besondere Vorsicht geboten?

**Reaktiv/brennbar:** Feine Teilchen mit großer Oberfläche sind reaktiv und brennbar — Staubbildung und Zündquellen vermeiden, elektrostatische Entladungen verhindern.

**Lunge:** Feiner Zinkstaub ist einatembar und lungengängig — Atemschutzmaßnahmen nach Gefährdungsbeurteilung und Sicherheitsdatenblatt.

*Bewertung: Brand-/Staubgefahr und Lungengängigkeit werden erkannt.*

# L-102 · Coil-Coating-Lacke

*Bandbeschichtung von Metallcoils — elastisch für das spätere Umformen*

**Prüfungsteil 1** · A 9

Coil-Coating beschichtet Metallbänder (Coils) im schnellen Banddurchlauf und brennt sie bei hoher Temperatur ein. Die Lacke müssen eine für den vorgesehenen Umformprozess ausreichende Elastizität, Haftung und Verformbarkeit besitzen; die Anforderungen hängen vom Substrat und Umformgrad ab.

## Das Verfahren

Coils sind aufgewickelte Aluminium- und Stahlbänder. Beim Coil-Coating werden sie im Banddurchlauf mit Walzen beschichtet, im Ofen eingebrannt und wieder aufgerollt. Erst der Metallverarbeiter entrollt, stanzt und formt die Bänder — die Beschichtung ist da also schon fertig. Typische, nicht normative Trockenschichtdicken liegen bei etwa 5 bis 8 µm für den Primer und 15 bis 20 µm für den Decklack — Herstellerangaben nennen für Architektursysteme auch 18 bis 22 µm Decklack. Emballagensysteme werden dünner gefahren (siehe L-110). Aus Nassschichtdicke und Volumenfestkörper folgt: TSD = NSD · VFK/100.

## Anforderungen: Elastizität

Weil das beschichtete Band nachträglich umgeformt, tiefgezogen und gestanzt wird, muss der Lack sehr elastisch sein und ausgezeichnet haften, ohne zu reißen oder abzuplatzen — bei zugleich genügend Härte und Beständigkeit. Als Bindemittel dienen oft Polyester oder Acrylate mit Melaminharz.

## Temperaturstabile Pigmente

Wegen der hohen Einbrenntemperatur werden nur hitzebeständige Pigmente verwendet: Mischphasen- bzw. Spinellpigmente (Mischoxide mit Rutil- oder Spinellstruktur), Eisenoxide und Titandioxid. Die meisten organischen Buntpigmente sind dafür zu wenig hitzebeständig.

## Elastizität prüfen

Die Elastizität prüft man mit der Erichsen-Tiefung (DIN EN ISO 1520), bei der das Blech kugelförmig bis zur Rissbildung verformt wird, und mit der Dornbiegeprüfung (DIN EN ISO 1519), bei der es über einen Dorn gebogen wird. Die Verformung bis zum ersten Riss ist das Maß.

## Umweltvorteil

Coil-Coating gilt als ökologisch günstig: Es wird oft mit hohem Festkörper gearbeitet, und die Lösemittel der Abluft werden der thermischen Nachverbrennung zugeführt. Deren Energie heizt wiederum den Einbrennofen.

## PVDF: höchste Bewitterungsbeständigkeit

PVDF-Systeme (Polyvinylidenfluorid) gehören zu den besonders wetterbeständigen Coil-Coating-Decklacken und werden für hochwertige Außenanwendungen eingesetzt, meist als Mischung aus etwa 70 % PVDF und Acrylat, flüssig im Bandverfahren aufgetragen. Es hält Farbe und Glanz über 20 bis 25 Jahre und mehr (Klassifizierung AAMA 2605) und wird deshalb häufig für hochwertige Architektur-Fassaden gewählt. Nachteile: Es ist teuer; die Farbpalette ist begrenzter und der Glanz eher niedrig (satiniert); der weiche Fluorpolymerfilm ist zwar ausgezeichnet umformbar, dafür aber kratz- und scheuerempfindlich (Schutzfolie bis zur Montage) und quillt gegen stark polare Lösemittel wie Ketone, Ester und NMP an; es braucht hohe Einbrenntemperaturen; als Fluorpolymer steht es zudem in der PFAS-Diskussion, und Reparatur oder Überlackierung sind wegen der niedrigen Oberflächenenergie schwierig.

**Merksatz**

Coil-Coating = Bandbeschichtung mit Einbrennen, vor dem Umformen. Darum: hohe Elastizität + Haftung (Erichsen/Dornbiege), hitzestabile Mischphasenpigmente, und dank hohem Festkörper plus thermischer Nachverbrennung der Ofenabluft ein anlagenseitig emissionsarmes Verfahren.

**Stichwörter:** Coil-Coating, Bandbeschichtung, Einbrennen, Elastizität, Erichsen-Tiefung, Dornbiegeprüfung, Mischphasenpigment, Spinell, Umformen, Nachverbrennung
*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; DIN EN ISO 1519; DIN EN ISO 1520*

## Übungsblatt Ü-102 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**
Warum müssen Coil-Coating-Lacke besonders elastisch und haftfest sein, und welche Pigmente sind geeignet?

**Elastizität/Haftung:** Das beschichtete Band wird erst nach dem Einbrennen umgeformt, tiefgezogen und gestanzt; der Lack darf dabei nicht reißen oder abplatzen.
**Pigmente:** Wegen der hohen Einbrenntemperatur nur hitzebeständige Pigmente: Mischphasen-/Spinellpigmente, Eisenoxide, Titandioxid.
*Bewertung: Der Zusammenhang Umformen → Elastizität und die Wahl hitzestabiler Pigmente werden korrekt erklärt.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**
Ein Coil-Coating-Lack hat einen Volumenfestkörper von 45 % und wird mit 44 µm nass appliziert. Welche Trockenschichtdicke ergibt sich?

**Rechnung:** TSD = NSD · VFK/100 = 44 · 45/100 = 19,8 µm
**Ergebnis:** Rund 20 µm — ein typischer Coil-Coating-Wert.
*Bewertung: Die Trockenschichtdicke wird korrekt aus dem Volumenfestkörper berechnet.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**
Mit welchen zwei Prüfungen beurteilt man die Elastizität eines Coil-Coating-Films, und was bewertet man dabei?

**Erichsen-Tiefung:** DIN EN ISO 1520: kugelförmige Verformung des Bleches bis zur Rissbildung.
**Dornbiegeprüfung:** DIN EN ISO 1519: Biegen über einen Dorn; die Verformung bis zum ersten Riss ist das Maß.
*Bewertung: Beide Elastizitätsprüfungen werden mit dem richtigen Bewertungskriterium genannt.*

# L-103 · Schiffsfarbe

*Korrosionsschutz und Antifouling für Stahl im Wasser*

**Prüfungsteil 1** · A 9

Bei Schiffsfarben ist der Korrosionsschutz die Hauptaufgabe. Der Aufbau ist je nach Bereich (über/unter Wasser) abgestimmt; unter Wasser kommt ein Antifouling-Anstrich hinzu.

## Aufbau und Primäranstrich

Wasser, Salz und Schmutz greifen Stahl stark an, daher ist gründliche Vorbehandlung (Entfernen von Rost, Zunder, Schmutz) und ein abgestimmter Lackaufbau nötig. Der Schiffbau-Primäranstrich (Shopprimer) ist heute meist ein anorganischer Zink-Ethylsilicat-Primer oder ein zinkstaubpigmentierter 2K-Epoxid-Primer — beide schweißbar (siehe L-101). Polyvinylbutyral (PVB) ist beim Schiff kein typisches Primärharz; es tritt allenfalls in dünnen Wash-Primern zur kurzfristigen Überflutungsschutz-Vorbehandlung im Stahlbau auf. Im Schiffbau dominiert Epoxidharz mit aminhärtendem System wegen seiner überlegenen Haftung, Sperrwirkung und Chemikalienbeständigkeit.

## Bindemittel: 2K-Epoxid

Der Deckaufbau ist häufig ein 2K-Epoxidharz mit Polyamidoamin-Härter (Stammlack-Härter-Verhältnis nach Volumen meist etwa 3:1 bis 4:1). Weil die Epoxidharze teils niedermolekular und niedrigviskos sind, lässt sich der Lösemittelanteil deutlich senken. Die Härtermenge folgt aus der Epoxidzahl bzw. dem Epoxidäquivalentwert (EP-Wert = 100 / EP-Äquivalentmasse).

## Blaupigmente

In der Schiffslackierung dominiert Phthalocyaninblau (PB 15, Kupfer-Phthalocyanin) als organisches Pigment: hervorragende Licht- und Wetterechtheit, hohe Farbstärke, stabil gegen Laugen und Salzwasser. Für helle oder mittlere Blautöne wird Ultramarinblau (PB 29, anorganisch, schwefelhaltiges Natriumaluminiumsilicat — die eingelagerten Polysulfid-Ionen geben die Farbe) eingesetzt — preiswert und alkalibeständig, jedoch säureempfindlich (Säure zerstört die Polysulfide, das Pigment entfärbt). Berlinerblau (Eisencyanblau, PB 27) ist farbstark, aber temperaturempfindlich (Zersetzung ab etwa 180 °C unter Vergrauen und Bräunen) und wird im modernen Schiffbau selten gewählt. Cobaltblau (PB 28) und Indanthrenblau (PB 60) sind lichtechtheitsmäßig erstklassig, aber teuer und für Spezialanwendungen (Hochsee-Decklack, Yachten) reserviert. Praxis: PB 15 ist das Standardpigment, Ultramarinblau der günstige Aufheller.

### Antifouling

Der Unterwasserbereich erhält zusätzlich einen Antifouling-Anstrich gegen den Bewuchs mit tierischen (Muscheln, Seepocken) und pflanzlichen Organismen (Algen). $Cu_2O$ ist ein wichtiger Wirkstoff in vielen Antifouling-Systemen (teils auch Kupferthiocyanat); die konkrete Wirkstoffauswahl und Zulassung hängt von Produkt, Zielorganismen und regulatorischen Vorgaben ab. Gegen Algen und Schleim ergänzt man Ko-Biozide (Booster) wie Zink- oder Kupferpyrithion, DCOIT (ein Isothiazolinon), Zineb oder Dichlofluanid, neuer auch Medetomidin; ältere wie Irgarol (Cybutryn) und Diuron sind heute vielfach beschränkt oder verboten. Freigesetzt wird der Wirkstoff kontrolliert über selbstpolierende Bindemittel (die Oberfläche trägt sich langsam ab). Daneben gibt es biozidfreie Fouling-Release-Systeme (FR-Systeme) auf Siliconelastomer- oder Fluorpolymerbasis (z. B. Siliconöl-modifizierte Polyurethane). Das Wirkprinzip ist rein physikalisch: Die extrem niedrige Oberflächenenergie (Siliconfilm ≈ 22 mN/m, Fluorpolymer ≈ 18 mN/m) verhindert eine feste Adhäsion. Zusätzlich ist der Elastomer-Film weich und glatt — Organismen, die sich trotzdem ansiedeln, haften nur schwach im »weak boundary layer«. Sobald das Schiff Fahrt aufnimmt, reichen geringe Scherkräfte zum Ablösen (self-cleaning bei klassischen Siliconsystemen typischerweise erst ab rund 15 kn und hoher Fahrtaktivität; neuere Silicon-Hydrogel-Systeme reinigen sich bereits ab etwa 8 bis 10 kn selbst). Vorteil: kein Biozid, keine Toxizitätsproblematik, lange Haltbarkeit (≥ 10 Jahre). Nachteil: wirkt nicht im Hafen oder bei Stillstand — für Schiffe mit langen Liegezeiten oder geringer Fahrtgeschwindigkeit sind biozidhaltige selbstpolierende Systeme geeigneter (siehe L-04).

### Umwelt und Sicherheit

Früher übliche Organozinnverbindungen (z. B. Tributylzinnoxid, TBT) haben ein hohes ökotoxisches Potenzial gegenüber Mensch und Umwelt; ihr Einsatz ist heute stark eingeschränkt bzw. verboten. Stattdessen kommen andere Wirkstoffe zum Einsatz, deren Umweltverträglichkeit ebenfalls kritisch zu bewerten ist. Epoxid-Härter (Amine) sind reizend/sensibilisierend — Haut- und Atemschutz.

**Merksatz**

Schiffsfarbe = Korrosionsschutz zuerst. Zinkstaub-Primer, 2K-Epoxid/Polyamidoamin-Decklack (Härtermenge über die Epoxidzahl), dazu unter Wasser ein Antifouling. Organozinnverbindungen (TBT) als Antifouling-Wirkstoff sind wegen ihrer Ökotoxizität international geregelt und für Schiffsanstriche nicht mehr zulässig (IMO-AFS-Übereinkommen).

**Stichwörter:** Schiffsfarbe, Korrosionsschutz, Primäranstrich, 2K-Epoxid, Polyamidoamin, Epoxidzahl, Antifouling, Organozinn, TBT, Blaupigmente, Kupfer(I)-oxid, Fouling-Release

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie*

## Übungsblatt Ü-103 — Musterlösungen

**Frage 1** (Verständnis, 8 Punkte)

Was ist die Hauptaufgabe einer Schiffsfarbe, und welche Funktion hat der Primäranstrich?

**Hauptaufgabe:** Korrosionsschutz des Stahls gegen Wasser, Salz und Schmutz.

**Primäranstrich:** Erster Korrosionsschutz direkt nach der Vorbehandlung (Shopprimer), noch schweißbar. Im Schiffbau meist ein anorganischer Zink-Ethylsilicat-Primer oder ein zinkstaubpigmentierter 2K-Epoxid-Primer (siehe L-101). Polyvinylbutyral spielt heute nur noch als dünner Wash-Primer im Stahlbau eine Rolle.

*Bewertung: Korrosionsschutz als Hauptaufgabe und die Rolle des Primäranstrichs werden korrekt genannt.*

**Frage 2** (Berechnung, 6 Punkte)

Ein Epoxidharz hat eine Epoxidäquivalentmasse von 500 g/Äq. Berechnen Sie den Epoxidwert (EP-Wert = 100 / EP-Äquivalentmasse).

**Ansatz:** EP-Wert = 100 / EP-Äquivalentmasse.

**Rechnung:** EP-Wert = 100 / 500 = 0,20 (Epoxidgruppen je 100 g).

*Bewertung: Der Epoxidwert wird korrekt aus der Äquivalentmasse bestimmt.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**

Wozu dient ein Antifouling-Anstrich, und warum sind Organozinnverbindungen problematisch?

**Antifouling:** Verhindert im Unterwasserbereich den Bewuchs mit tierischen und pflanzlichen Organismen (Muscheln, Algen).

**Organozinn:** TBT u. Ä. sind stark ökotoxisch; ihr Einsatz ist heute stark eingeschränkt bzw. verboten.

*Bewertung: Funktion des Antifoulings und die Ökotoxizität von Organozinn werden erkannt.*

# L-104 · Flugzeug- und Luftfahrtlackierung

*Extreme Beanspruchung, leichter Aufbau, chromatfrei*

**Prüfungsteil 1** · A 9

Luftfahrtlacke müssen extreme Bewitterung, Temperaturwechsel, Erosion und Betriebsflüssigkeiten aushalten und dabei leicht und flexibel bleiben. Der Aufbau ist dreistufig — Konversionsschicht, Epoxid-Grundierung, flexibler PU-Decklack — und wandelt sich vom krebserzeugenden Chromat zu chromatfreien Systemen.

## Extreme Anforderungen

Luftfahrtlacke halten extreme Bedingungen aus: starke UV- und Bewitterungsbelastung, rasche Temperaturwechsel von etwa −55 °C in Reiseflughöhe bis über +80 °C am Boden, Erosion durch Regen und Partikel bei hoher Geschwindigkeit und Beständigkeit gegen Betriebsflüssigkeiten wie Hydrauliköl (Skydrol), Kerosin und Enteisungsmittel. Dazu kommen Korrosionsschutz für die Aluminiumstruktur, Flexibilität (die Zelle arbeitet unter Last), geringes Gewicht und ein makelloser, glänzender Decklack für Aerodynamik und Erscheinungsbild.

## Der Schichtaufbau

Der klassische Aufbau auf Aluminium ist dreistufig: eine Konversionsschicht (chemische Vorbehandlung, integral dünn, kein messbarer Auftrag) als Haft- und Korrosionsschutzbasis; darauf eine 2K-Epoxid-Grundierung (15–25 µm TF, Korrosionsschutz und Haftvermittlung); zuoberst ein 2K-Polyurethan-Decklack. Für Airline-Designs (Bemalung, Logo, Schriftzeichen) setzt man häufig ein Zwei-Schicht-System ein: Basislack (15–25 µm, trägt die Farbe und die Airline-Livery) und Klarlack (25–40 µm, gibt Schutz, Glanz und UV-Beständigkeit). Das entspricht dem Automobil-Basislack/Klarlack-Prinzip (siehe L-114/L-115): der Klarlack schützt den farbgebenden Basislack vor Bewitterung. Einfarbige Lackierungen (Grundweiß oder Silber) können als einschichtiger Decklack (50–70 µm TF) ausgeführt werden. Gesamtaufbau typisch: Konversionsschicht + Grundierung + Decklack ergibt rund 55–90 µm beim Basislack/Klarlack-Aufbau und rund 65–95 µm beim einschichtigen Decklack. Auf Faserverbund-Bauteilen (CFK, GFK) gelten angepasste Systeme ohne Konversionsschicht, stattdessen Haftvermittler.

## Bindemittel: Epoxid-Grundierung und PU-Decklack

Chemisch dominieren zwei Systeme: eine 2K-Epoxid-Grundierung für Haftung und Korrosionsschutz (siehe L-28) und ein 2K-Polyurethan-Decklack mit aliphatischem Härter für Wetter-, UV- und Chemikalienbeständigkeit bei hoher Flexibilität und hohem Glanz (siehe L-25). Die Flexibilität ist entscheidend, weil sich die Flugzeugzelle unter Last und Temperatur bewegt — ein spröder Film würde reißen.

### Chromatfrei — der große Wandel

Früher Standard: Chromat-Konversionsschicht (z. B. Bonderite® M-CR, früher Alodine®, nach MIL-DTL-81706 / MIL-DTL-5541, gelb-goldener Cr(VI)-Film) + chromathaltige Epoxid-Grundierung. Chrom(VI) ist hochgiftig und krebserzeugend; die einschlägigen Chrom(VI)-Verbindungen stehen in Anhang XIV der REACH-Verordnung und sind zulassungspflichtig. Die Ablauftermine sind nach Stoff gestaffelt und nicht einheitlich; maßgeblich ist der aktuelle Eintrag des jeweiligen Stoffs in Anhang XIV. Ziel ist die vollständige Ablösung.

Chromatfreie Alternativen in der Luftfahrt heute:
• Dreiwertiges Chrom-Konversionsverfahren (TCP — Trivalent Chromium Process): SurTec® 650 / Bonderite® M-CR T 5900 (früher Alodine® T 5900) — ähnliches Aussehen, keine Cr(VI)-Einstufung, bereits von Airbus und Boeing zugelassen.
• Titan-/Zirkonium-basierte Konversionsschichten (Hexafluorotitan- bzw. Hexafluorozirkonsäure): farblos, sehr dünne Haftschicht, ausgezeichnete Haftung ohne Cr, noch in der Qualifizierung für Primärstrukturen.
• Chromatfreie Grundierungen mit alternativen Korrosionsinhibitoren — anorganisch Molybdate und Seltenerdverbindungen ($Ce^{3+}$/$La^{3+}$), organisch etwa Azol- und Oxazolintypen wie die Bisoxazoline — Selbstheilungseffekt nachgewiesen, noch nicht vollständig gleichwertig zu Chromat in der Praxis.

### Besondere Funktionen

Luftfahrtlacke erfüllen oft Sonderfunktionen: selektiv entfernbare (strippbare) Decklacke, damit sich das Flugzeug zum Neulackieren entlacken lässt, ohne die Grundierung zu zerstören; elektrisch ableitfähige Schichten gegen statische Aufladung; und auf Faserverbund ein Blitzschutz durch leitfähige Netze unter dem Lack. Die Systeme müssen strenge Herstellervorgaben erfüllen — etwa MIL-PRF-23377 für die Grundierung und MIL-PRF-85285 für den Decklack, dazu Airbus-AIMS- und Boeing-BMS-Spezifikationen (siehe L-99).

### Gesundheit und Umwelt

Die 2K-Polyurethan-Systeme enthalten Isocyanate — beim Spritzen sind Kabine und Atemschutz Pflicht (siehe L-26, L-173). Die früher üblichen Chromate sind krebserzeugend und werden verdrängt; auch aggressive Abbeizer (früher Dichlormethan) werden ersetzt. Der Trend geht zu lösemittelarmen High-Solid-Systemen.

**Merksatz**

Luftfahrtlack = Konversionsschicht plus Epoxid-Grundierung plus flexibler PU-Decklack, auf Aluminium und Faserverbund, für extreme Bewitterung, Erosion und Flüssigkeitsbeständigkeit. Großes Thema: weg vom krebserzeugenden Chromat, hin zu chromatfreien Systemen.

**Stichwörter:** Luftfahrtlack, Flugzeuglackierung, Konversionsschicht, Epoxid-Grundierung, Polyurethan-Decklack, chromatfrei, Skydrol, Erosion, strippbar, Blitzschutz, MIL-PRF
*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur*

## Übungsblatt Ü-104 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**
Welche extremen Anforderungen muss ein Luftfahrtlack erfüllen?
**Klima:** Starke UV-/Bewitterungsbelastung und rasche Temperaturwechsel (etwa −55 °C bis über +80 °C).
**Mechanik/Medien:** Erosion durch Regen und Partikel bei hoher Geschwindigkeit; Beständigkeit gegen Hydrauliköl (Skydrol), Kerosin und Enteisungsmittel.
**Struktur:** Korrosionsschutz für Aluminium, hohe Flexibilität (arbeitende Zelle), geringes Gewicht und ein glänzender Decklack für Aerodynamik und Optik.
*Bewertung: Klima-, Mechanik-/Medien- und Struktur-Anforderungen werden mit Beispielen genannt.*

**Frage 2** **(Verständnis, 6 Punkte)**

Warum und wohin verändert sich die Vorbehandlung und Grundierung in der Luftfahrt?

**Warum:** Die früher üblichen Chromate (Chrom(VI)) schützen sehr gut, sind aber krebserzeugend (siehe L-41).

**Wohin:** Hin zu chromatfreien Konversionsschichten und Grundierungen mit modernen Inhibitoren — regulatorisch und arbeitsmedizinisch getrieben.

*Bewertung: Die Krebsgefahr des Chromats und der Wandel zu chromatfreien Systemen werden benannt.*

**Frage 3** **(Anwendung, 8 Punkte)**

Beschreiben Sie den typischen Schichtaufbau eines Flugzeuglacks auf Aluminium und die verwendeten Bindemittel.

**Konversionsschicht:** Chemische Vorbehandlung für Haftung und Korrosionsschutz.

**Grundierung:** 2K-Epoxid-Grundierung für Korrosionsschutz und Haftvermittlung (siehe L-28).

**Decklack:** 2K-Polyurethan-Decklack mit aliphatischem Härter — flexibel, wetter-, UV- und flüssigkeitsbeständig, hochglänzend (siehe L-25).

*Bewertung: Konversionsschicht, Epoxid-Grundierung und flexibler PU-Decklack werden mit ihrer Funktion genannt.*

# L-105 · Chlorkautschuk-Beschichtungen

*Wasser- und chemikalienfest für Becken, Beton und Korrosionsschutz*

**Prüfungsteil 1** · A 9

Chlorkautschuk ist ein physikalisch trocknendes Bindemittel mit guter Wasser- und Chemikalienbeständigkeit für Schwimmbecken, Beton- und Korrosionsschutz; seine Eignung und Verbreitung hängen von Anwendung, Formulierung und regulatorischen Anforderungen ab.

## Was Chlorkautschuk ist

Chlorkautschuk wird durch Chlorierung von Naturkautschuk bzw. geeigneten Polyisoprenen hergestellt. Die Chloratome geben dem Bindemittel eine gewisse Polarität und die hohe Beständigkeit. Er trocknet rein physikalisch durch Verdunsten des Lösemittels und bleibt damit in Lösemitteln wieder anlösbar, ist also lösemittelempfindlich.

## Eigenschaften

Chlorkautschukfilme können eine gute Wasser- und Chemikalienbeständigkeit sowie gute Haftung auf geeigneten mineralischen Untergründen wie Beton aufweisen; die Beständigkeit ist system- und formulierungsspezifisch. Sie sind seidenglänzend, aber nicht hitzebeständig.

## Anwendung

Chlorkautschuk ist nach wie vor im Einsatz, aber stark rückläufig. Noch aktive Einsatzgebiete: Stahlbrücken und Industrieanlagen (Korrosionsschutz nach ISO 12944, Kategorien C4 und C5; die ältere Unterteilung C5-I für Industrie- und C5-M für Meeresatmosphäre findet sich in Bestandsdokumenten noch häufig), Schwimmbecken (Beständigkeit gegen Chlor und Hypochlorit), Betonböden in Industrie und Parkhäusern — zunehmend verdrängt durch wässrige 2K-Epoxidsysteme (siehe L-108). Auch Hafenbauwerke und maritime Stahlkonstruktionen im Spritzwasser- und Tidebereich nutzen noch Chlorkautschuk-Deckbeschichtungen. Fahrbahnmarkierungen sind heute überwiegend auf Acrylat- oder Polyurethanbasis umgestellt. Regulatorisch einschränkend wirkt bei diesen Anwendungen vor allem das Anlagenrecht (31. BImSchV, TA Luft); die Decopaint-Richtlinie und die ChemVOCFarbV greifen nur für Bautenbeschichtungen und die Fahrzeugreparaturlackierung, dort mit produktkategoriespezifischen Grenzwerten (siehe L-168, L-176).

## Lösemittel

Weil Chlorkautschuk durch die Chloratome polar ist, passen Lösemittel ähnlicher Polarität: aromatische Kohlenwasserstoffe (z. B. Xylol), Ketone und Ester. Aliphatische Kohlenwasserstoffe dienen als Verschnittmittel.

## Arbeitssicherheit und Umwelt

Wärme und UV-Licht spalten HCl ab (Dehydrochlorierung, Kettenreaktion). Die praktische Dauergebrauchsgrenze liegt bei etwa 70–80 °C; die eigentliche thermische Abspaltung wird erst deutlich darüber relevant — system- und formulierungsabhängig. Als HCl-Fänger dienen niedermolekulare Epoxidverbindungen und epoxidierte Öle (z. B. epoxidiertes Sojaöl, ESBO): der Oxiranring öffnet sich mit HCl zum Chlorhydrin und bricht so die Kettenreaktion. Zinkoxid als Fänger ist zu meiden — $ZnCl_2$ als Reaktionsprodukt katalysiert die Abspaltung (Zinkschaden, siehe L-22). Der Lösemittelgehalt ist hoch (typisch 500–600 g VOC/L) und liegt als Bautenbeschichtung über den Grenzwerten der ChemVOCFarbV (Regelwerke siehe Abschnitt Anwendung). Absaugung und PSA obligatorisch. Hinzu kommt, dass chlororganische Bindemittel aus Umwelt- und Entsorgungsgründen (HCl-Abspaltung, Verbrennungsrückstände) zunehmend gemieden werden.

**Merksatz**

Chlorkautschuk: physikalisch trocknend, sehr wasser- und chemikalienbeständig, gut auf Beton — aber lösemittelreich und daher rückläufig. Lösemittel nach Polarität (Aromaten, Ketone, Ester).

**Stichwörter:** Chlorkautschuk, physikalische Trocknung, Schwimmbecken, Betonschutz, Korrosionsschutz, Wasserbeständigkeit, Lösemittel, VOC, Fahrbahnmarkierung
*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; ISO 12944*

## Übungsblatt Ü-105 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**
Beschreiben Sie Trocknung und Eigenschaften von Chlorkautschuk und nennen Sie zwei typische Anwendungen.

**Trocknung:** Physikalisch durch Verdunsten des Lösemittels; der Film bleibt in Lösemitteln wieder anlösbar.
**Eigenschaften:** Sehr wasser- und chemikalienbeständig, gute Haftung auf mineralischen Untergründen, nicht hitzebeständig.
**Anwendungen:** Zwei aus: Schwimmbecken, Betonschutz, Korrosionsschutz an Stahlbrücken und Industrieanlagen, maritime Stahlbauten. Nicht mehr zutreffend ist die Fahrbahnmarkierung — dort wird heute überwiegend Acrylat- oder Polyurethanbasis eingesetzt.
*Bewertung: Physikalische Trocknung, Beständigkeit und zwei Anwendungen werden korrekt genannt.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**
Ein Chlorkautschuklack hat 60 % Festkörper und soll für den Auftrag auf 50 % verdünnt werden. Wie viel Verdünner ist je 100 kg Lack nötig?

**Festkörper:** 100 kg · 0,60 = 60 kg (bleibt konstant)
**Gesamtmasse:** m = 60 kg / 0,50 = 120 kg
**Verdünner:** 120 kg − 100 kg = 20 kg
*Bewertung: Der konstante Festkörper wird korrekt als Bezug genommen und die Verdünnermenge sauber bestimmt.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**
Warum werden Chlorkautschuksysteme zunehmend ersetzt?

**Umwelt:** Sie sind lösemittelreich und verursachen hohe VOC-Emissionen.
**Chlor:** Chlororganische Bindemittel werden aus Umwelt- und Entsorgungsgründen (HCl-Abspaltung, Verbrennungsrückstände) zunehmend gemieden.
**Ersatz:** Wässrige oder 2K-Systeme übernehmen die Anwendungen emissionsärmer.
*Bewertung: Die Antwort nennt VOC/Lösemittel und die chlorierte Chemie als Gründe für den Ersatz.*

# L-106 · PVC-Einschichtdecklack

*Chemikalienfester Decklack aus PVC-Mischpolymerisat*

**Prüfungsteil 1** · A 9

PVC-Einschichtdecklacke nutzen die hohe Chemikalien- und Korrosionsbeständigkeit von Polyvinylchlorid. PVC-Homopolymere besitzen eine begrenzte Löslichkeit in vielen üblichen Lacklösemitteln; durch geeignete Copolymerisation kann die Löslichkeit und Verträglichkeit gezielt verbessert werden.

## Warum Mischpolymerisate

PVC-Homopolymere sind in vielen Lacklösemitteln schwer löslich. Für Lackanwendungen copolymerisiert man Vinylchlorid deshalb häufig mit anderen Monomeren (z. B. Vinylacetat, Maleinsäureester, Acrylsäureester). Die so entstehenden PVC-Mischpolymerisate haben eine bessere, gezielt einstellbare Löslichkeit, Haftung und Verträglichkeit. Nachteilig sinken Wasserfestigkeit und Verseifungsbeständigkeit. Es sind physikalisch trocknende Filmbildner.

## Haftung auf Metall

Auf blanken Metallen haftet PVC schlecht. Die Haftung verbessert man durch carboxylgruppenhaltige Comonomere oder durch Zusatz spezieller ungesättigter Polyester-Haftharze (mit freien Carboxylgruppen, ca. 5–10 % auf Festharz).

## Lösemittel und Additive

Als Lösemittel eignen sich Ester (z. B. Butylacetat) und Ketone (z. B. Methylethylketon, Cyclohexanon); aromatische Kohlenwasserstoffe dienen zum Verschneiden. Übliche Additive sind Netz- und Dispergiermittel sowie Antiabsetzmittel. Zur Stabilisierung gegen HCl-Abspaltung werden z. B. niedermolekulare Epoxidverbindungen zugesetzt; Weichmacher erhöhen die Flexibilität.

## HCl-Abspaltung

PVC kann bei erhöhter Temperatur und unter UV-Einwirkung dehydrochlorieren; Temperatur, Zeit, Stabilisierung und Formulierung bestimmen den Beginn und das Ausmaß der HCl-Abspaltung. Deshalb sind Wärme- und Lichtstabilisatoren nötig. Die Abspalttemperatur lässt sich bestimmen, indem man die Probe langsam erhitzt und die entweichenden Gase in eine Indikatorlösung leitet — der Farbumschlag bzw. die steigende Leitfähigkeit durch die entstehende Säure zeigt den Beginn der HCl-Abspaltung an (konduktometrisches Verfahren nach DIN EN ISO 182-3, pH-Verfahren nach DIN EN ISO 182-2; das klassische Kongorot-Verfahren nach DIN EN ISO 182-1 arbeitet stattdessen mit Indikatorpapier im Prüfröhrchen). Ein echter Chloridnachweis wäre dagegen die Fällung als Silberchlorid.

## Umwelt und Sicherheit

PVC-Mischpolymerisate werden heute vor allem eingesetzt, wo ihre Eigenschaften schwer zu ersetzen sind: Im Coil Coating als Plastisol (PVC-Pulver in Weichmacher suspendiert, lösemittelfrei, Sintern bei 180–220 °C) für Blechverkleidungen, Markisen und Dachelemente. Organosole (Plastisol + Lösemittel) ermöglichen häufig dünnere Schichten und werden vor allem für Dosendeckel, Verschlüsse und Behälterbeschichtungen eingesetzt. PVC-Klarlacke auf Lösemittelbasis für Behälterbeschichtung und Einschicht-Decklacke im chemischen Anlagenbau bestehen fort. Die PFAS-Diskussion betrifft PVC nicht direkt (PVC enthält Chlor, nicht Fluor); PVC ist nicht als PFAS eingestuft. Regulatorisch einschränkend sind VOC- Verordnungen (lösemittelhaltige Systeme) und die Diskussion um Weichmachermigration (Phthalate → Ersatz durch DINCH, DOTP). Bei thermischer Belastung HCl-Dämpfe — Überhitzung vermeiden, Lösemittelemissionen gering halten.

**Merksatz**

PVC-Decklack = Chemikalien- und Korrosionsschutz aus PVC-Mischpolymerisat (Copolymer für Löslichkeit). Physikalisch trocknend, Haftharz für Metall, Stabilisatoren gegen die HCl-Abspaltung — und keine thermische Überlastung. Zur Einordnung: Die Dauergebrauchstemperatur liegt bei etwa 60 bis 70 °C, eine technisch relevante thermische Dehydrochlorierung setzt aber erst deutlich oberhalb 100 °C ein — deshalb lassen sich stabilisierte Plastisole bei 180 bis 220 °C gelieren.

**Stichwörter:** PVC-Einschichtdecklack, PVC-Mischpolymerisat, Copolymer, Vinylchlorid, Haftharz, HCl-Abspaltung, Stabilisator, physikalisch trocknend, Chemikalienbeständigkeit
*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; DIN EN ISO 182-1; DIN EN ISO 182-2; DIN EN ISO 182-3*

## Übungsblatt Ü-106 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**
Warum wird PVC im Decklack als Mischpolymerisat und nicht als Homopolymerisat eingesetzt?

**Homopolymer:** Reines PVC ist wegen seiner geringen Löslichkeit in vielen Lacklösemitteln lacktechnisch nur eingeschränkt einsetzbar.
**Copolymer:** Comonomere (z. B. Vinylacetat, Acrylester) verbessern Löslichkeit, Haftung und Verträglichkeit; nachteilig sinken Wasserfestigkeit und Verseifungsbeständigkeit.
*Bewertung: Der Grund für den Einsatz von Mischpolymerisaten wird korrekt erklärt.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**
Ein PVC-Decklack hat ein Pigment-Bindemittel-Verhältnis von 1 : 1,1 (Masse). Wie viel Pigment und Bindemittel enthalten 800 g Festkörper?

**Ansatz:** Gesamtanteile = 1 + 1,1 = 2,1; Pigment = 800 · 1/2,1, Bindemittel = 800 · 1,1/2,1.
**Rechnung:** Pigment ≈ 381 g, Bindemittel ≈ 419 g (Summe 800 g).
*Bewertung: Die Aufteilung nach dem Massenverhältnis wird korrekt berechnet.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**
Ab welcher Temperatur ist mit einer thermischen HCl-Abspaltung aus PVC zu rechnen, wo liegt die Gebrauchsgrenze, und wie wird stabilisiert?

**Temperatur:** Die Dauergebrauchstemperatur von PVC-Beschichtungen liegt bei etwa 60 bis 70 °C; eine technisch relevante thermische Dehydrochlorierung setzt erst deutlich oberhalb 100 °C ein. UV-Licht löst die Abspaltung zusätzlich und unabhängig von der Temperatur aus.
**Stabilisierung:** Wärme- und Lichtstabilisatoren, z. B. niedermolekulare Epoxidverbindungen; Überhitzung vermeiden (ätzende HCl-Dämpfe).
*Bewertung: Gebrauchsgrenze und Zersetzungsbeginn werden auseinandergehalten; die Stabilisierung wird korrekt genannt.*

# L-107 · Bitumenbeschichtungen

*Wasserfeste Bauwerksabdichtung — mit Gesundheits- und Umweltauflagen*

**Prüfungsteil 1** · A 9

Bitumen ist ein thermoplastisches Kohlenwasserstoff-Bindemittel für Bauwerksabdichtung und Korrosionsschutz — sehr wasserbeständig, aber mit Gesundheits- und Umweltauflagen (Dämpfe, PAK, Lösemittel).

## Was Bitumen ist

Bitumen ist ein hochmolekulares Kohlenwasserstoffgemisch aus der Erdöldestillation. Es ist thermoplastisch und schwarz und lässt sich als lösemittelfreies Bindemittel, als Lösung oder als Emulsion in Wasser einsetzen.

## Eigenschaften

Bitumenbeschichtungen sind sehr wasserbeständig und wirken dampfbremsend bis dampfsperrend; der sd-Wert steigt mit Schichtdicke und Aufbau. Für die erdberührte Abdichtung ist genau diese geringe Dampfdurchlässigkeit erwünscht. Sie haften gut auf trockenen, sauberen mineralischen Untergründen und sind thermoplastisch, erweichen also bei Wärme.

## Anwendung

Typisch ist die Abdichtung von Gebäudefundamenten und Sockeln gegen Wasser und Salze, außerdem Korrosionsschutz und Dachbahnen. Aufgetragen wird durch Streichen, Rollen oder im Airless-Verfahren.

## Kombination und Füllstoffe

Bitumen lässt sich mit anderen Bindemitteln kombinieren. Füllstoffe geben Standfestigkeit und ein thixotropes Verhalten, damit die Beschichtung an senkrechten Flächen nicht abläuft.

## Arbeitssicherheit und Umwelt

Bitumendämpfe — besonders beim Heißverarbeiten — enthalten polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) und reizen Haut und Atemwege; daher sind Absaugung, Haut- und Atemschutz nötig. Lösemittelhaltige Typen emittieren VOC, weshalb aus Umweltgründen Emulsions- und wasserbasierte Systeme vorzuziehen sind.

**Merksatz**

Bitumen: thermoplastisches Kohlenwasserstoff-Bindemittel, sehr wasserfest, für Fundamentabdichtung. Dämpfe (PAK) und Lösemittel beachten — Schutzausrüstung, und im Zweifel wasserbasiert.

**Stichwörter:** Bitumen, Bauwerksabdichtung, Fundament, thermoplastisch, wasserbeständig, Emulsion, PAK, VOC, Korrosionsschutz, Arbeitssicherheit

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie*

---

## Übungsblatt Ü-107 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Was ist Bitumen chemisch, und welche Eigenschaften machen es für die Fundamentabdichtung geeignet?

**Chemie:** Ein hochmolekulares Kohlenwasserstoffgemisch aus der Erdöldestillation, thermoplastisch und schwarz.

**Eigenschaften:** Sehr wasserbeständig und wasserfest; die Schicht wirkt zugleich dampfbremsend bis dampfsperrend (hoher sd-Wert), was für die erdberührte Abdichtung erwünscht ist. Gute Haftung auf trockenen, sauberen mineralischen Untergründen.

**Formen:** Lösemittelfrei, als Lösung oder als Emulsion in Wasser.

*Bewertung: Chemie und die abdichtungsrelevanten Eigenschaften werden korrekt genannt.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**
Eine Bitumenfarbe hat einen Festkörper von 65 %. Wie viel Trockenmasse bleibt aus einem Ansatz von 800 g nach vollständiger Trocknung?

**Rechnung:** m(trocken) = 800 g · 65/100 = 520 g

**Antwortsatz:** Es bleiben 520 g Trockenmasse.

*Bewertung: Die Festkörperrechnung ist korrekt.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**
Welche Gesundheits- und Umweltaspekte sind bei Bitumenfarben zu beachten?

**Gesundheit:** Bitumendämpfe (besonders heiß) enthalten PAK und reizen Haut und Atemwege — Absaugung, Haut- und Atemschutz.

**Umwelt:** Lösemittelhaltige Typen emittieren VOC; Emulsions- und wasserbasierte Systeme sind vorzuziehen.

*Bewertung: PAK/Dämpfe und die VOC-/Umweltabwägung werden korrekt genannt.*

# L-108 · Betonbodenbeschichtung

*Wässrige 2K-Epoxidharzsysteme für industrielle Betonböden*

**Prüfungsteil 1** · A 9

Moderne Betonbodenbeschichtungen nutzen wässrige 2K-Epoxidharzsysteme: niedrig-VOC, sehr chemikalienbeständig, haftfest auf Beton. Der dreistufige Aufbau — Tiefgrund, Grundierung, Versiegelung — ist der Stand der Technik und löst lösemittelreiche Chlorkautschuk-Systeme ab.

## Anforderungen an den Industrieboden

Beton ist saugend, porös, alkalisch (pH > 12 im frischen Beton) und neigt zu Ausblühungen. Der Schutzfilm soll hohe Abriebfestigkeit (DIN EN 13892-3, Prüfmethode nach Böhme), Rutschhemmung (R-Gruppen), Beständigkeit gegen Chemikalien (Öle, Säuren, Laugen, Reinigungsmittel), gute Reinigungsfähigkeit sowie Haftung auf dem alkalischen Untergrund bieten. In Produktionshallen kommt Druckbelastbarkeit durch Gabelstapler hinzu: Der Betonuntergrund muss mindestens 25 N/mm² Druckfestigkeit aufweisen (Festigkeitsklasse C20/25) — das ist die allgemeine Untergrenze für die Beschichtbarkeit, nicht das Planungsziel. Für stark befahrene Industrieböden wird planerisch mindestens C25/30 vorgesehen, bei hohem Verschleiß (Verschleißklassen XM2/XM3) entsprechend höher. In der Lebensmittelindustrie kommt die Eignung für Lebensmittelkontakt und hygienische Reinigbarkeit hinzu; die Trinkwasserbewertung (KTW-BWGL, DVGW W 270) gilt dagegen für Beschichtungen im Trinkwasserkontakt.

## Warum wässriges 2K-Epoxid

Wässrige 2K-Epoxidharze (EP-Dispersionen) verbinden die Stärken des Epoxids — ausgezeichnete Haftung auf Beton, hohe Chemikalien- und Abriebbeständigkeit, gute Druckfestigkeit — mit niedrigem Lösemittelgehalt (VOC < 50 g/L, weit unter den Grenzwerten; Chlorkautschuk > 500 g/L). Keine HCl-Abspaltung, kein Risiko toxischer Zersetzungsprodukte bei thermischer Belastung. Nachteile: längere Durchhärtung als beim physikalisch trocknenden Chlorkautschuk, höherer Preis, kein Anlösen und kein Überlackieren ohne Vorbehandlung.

## Bindemittel und Härter

Komponente A ist eine wässrige Epoxidharzdispersion (meist Bisphenol-A/F-basiert, Epoxidäquivalentmasse 180–220 g/Äq., ca. 50–65 % Feststoff in Wasser). Komponente B ist ein wasserverdünnbarer oder selbstemulgierender Polyamin-Härter — entweder aliphatische Polyamine (kurze Topfzeit, gute Chemikalienbeständigkeit) oder Polyamidoamine (längere Topfzeit, bessere Flexibilität, weniger blushing). Mischungsverhältnis stöchiometrisch aus der NH-Äquivalentmasse des Härters (AHEW) und der Epoxidäquivalentmasse des Harzes (EEW) berechnen; das Massenverhältnis Härter zu Harz ist AHEW/EEW (siehe L-28, L-29). Topfzeit typisch 30–60 Minuten bei 20 °C.

## Dreistufiger Systemaufbau

1. Tiefgrund (Primer, 50–80 µm nass): wässriger Epoxid-Tiefgrund, niedrigviskos (50–100 mPas), festkörperarm (~30 %), dringt in den Beton ein, verfestigt den Untergrund und sperrt Alkalität ab. Verhindert, dass Feuchtigkeit von unten die Haftung zerstört.
2. Grundierung/Zwischenbeschichtung (200–400 µm nass): wässriger 2K-EP-Lack, deckend, gefüllt (Quarzmehl, Bariumsulfat), schließt die Poren, egalisiert den Untergrund. Pigmentierung je nach Anforderung.
3. Versiegelung (150–200 µm nass): transparenter oder gefärbter 2K-EP-Klarlack oder Polyurethan-Klarlack (UV-stabiler), abriebfest, leicht zu reinigen, ggf. mit Quarzsand-Einstreuung für Rutschfestigkeit (Klasse R11–R12).

## Untergrundvorbereitung

Betonfeuchte max. 4 % (CM-Messung); frischer Beton mind. 28 Tage aushärten lassen. Oberflächenzugfestigkeit ≥ 1,5 N/mm² (Abreißversuch DIN EN 1542). Mechanische Vorbehandlung: Kugelstrahlen oder Diamantschleifen entfernt Zementleim, öffnet Poren. Chemische Vorbehandlung (Fluatierung) für besonders alkalische Böden. Ausblühungen und Altbeschichtungen vollständig entfernen — der häufigste Delaminationsgrund sind Verunreinigungen oder Restfeuchte.

## Prüfungen und Nachweis

Abrieb nach DIN EN 13892-3 (Böhme-Scheibe), Druckfestigkeit des Untergrundes, Haftfestigkeit (Abreißversuch ≥ 1,5 N/mm²), Chemikalienbeständigkeit (Lagerversuche in Öl, Säure, Lauge), Rutschhemmung (Bewertungsgruppen R 9 bis R 13; ermittelt im Begehungsverfahren auf der schiefen Ebene mit Schuhwerk nach DIN EN 16165 Anhang B — die frühere DIN 51130 ist damit abgelöst, Altprüfzeugnisse bleiben gültig. Die Zuordnung der R-Gruppen zu Arbeitsbereichen regelt ASR A1.5 Anhang 2, früher DGUV Regel 108-003/BGR 181. Das Pendelverfahren nach DIN EN 16165 Anhang C dient der Kontrollmessung am verlegten Boden). Schichtdicke nass und trocken messen.

## Umwelt und Sicherheit

Epoxid-Härter (Amine/Polyamine) sind sensibilisierend und reizend — Haut- und Augenschutz, Handschuhe (Nitril, nicht Latex). Auch das ungehärtete Epoxidharz selbst ist hautreizend und hautsensibilisierend (H315, H317, H319, H411; nach der IFA-EIS-Liste stark sensibilisierend) — Hautkontakt mit beiden Komponenten vermeiden, nicht nur mit dem Härter. Erst der vollständig ausgehärtete Film ist weitgehend inert. Abluft beim Auftragen für die Amine beachten.

## Lösemittelfreier 2K-PUR-Bodenbelag (selbstverlaufend)

Für Betonfußböden im Innenbereich bieten lösemittelfreie 2K-PUR-Systeme mit aromatischem Isocyanat eine wirtschaftliche Alternative zu wässrigen Systemen (praktisch ohne VOC; es gibt keine Ablüftphase, wohl aber eine chemische Aushärtezeit). Aus Müller/Poth, Tab. IV-1.1:

| Komponente A | Gew.-% | |
|---|---|---|
| Polyol Desmophen 1150 | 37,3 | (Polyether/ester, 5 % OH, OH-Äqw. 340) |
| Ricinusöl 50 % / Baylith | 7,4 | (Trockenmittel) |
| Schwerspat | 32,4 | |
| Pigmentgemisch | 4,9 | |
| Summe A | 82,0 | |
| **Komponente B** | **Gew.-%** | |
| Desmodur VL (31,5 % NCO) | 18,0 | (aromatisches Polyisocyanat, MDI-Basis) |
| Gesamtsumme A + B | 100,0 | |

NCO:OH ≈ 1,1 – nachgerechnet: NCO 18,0 g · 0,315 / 42,02 g/mol = 0,135 Äq.; OH 37,3 g / 340 g/Äq. = 0,110 Äq. aus dem Polyol plus rund 0,011 Äq. aus dem Ricinusöl der Trockenmittelpaste (3,7 g, OH-Zahl rund 160 mg KOH/g) = 0,121 Äq. → 1,12 (Müller/Poth: 1,13). Ohne den Ricinusöl-Beitrag käme man fälschlich auf 1,23. Lösemittelfrei; selbstverlaufend. P/B = (32,4 + 4,9) : (37,3 + 7,4 + 18,0) = 0,6 : 1.

Hinweis: Aromatische Isocyanate (MDI) vergilben unter UV – nur für UV-geschützte Innenböden geeignet, nicht für Außenbereiche. Applikation durch Gießen und Rollen.
Quelle: Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur, Tab. IV-1.1.

### Lösemittelarmes 2K-EP-Bodensystem (gefüllt, Quarzmehl)

```
Lösemittelarme 2K-EP-Systeme erzielen maximale Füllstoffdichte und exzellente
   Chemikalienbeständigkeit; Benzylalkohol wirkt als nichtreaktiver Verdünner, Weichmacher
   und Härtungsbeschleuniger – er wird nicht in das Netzwerk eingebaut und ist mit einem
   Siedepunkt von 205 °C VOC-relevant. Echte Reaktivverdünner für Epoxide sind
   Glycidylether. Aus Müller/Poth, Tab. IV-1.2:

Komponente A                            Gew.-%
EP-Harz flüssig, D.E.R. 3531 (Dow)       42,0   (EP-Wert 0,52; Äqw. 193 g/Äq.)
Pigment                                   5,0
Quarzmehl Sikron SF 300 (d50 = 10 µm)    49,0
Entschäumer (Byk A530 + Efka 2020)        2,0
Benzylalkohol (nichtreakt. Verdünner)     2,0
Summe A                                 100,0

Komponente B                            Gew.-%
Polypox H 354 L (cycloaliphatisch,        20,0   (NH-Äqw. 93 g/Äq.)
  lösemittelfrei)

Stöchiometrie: 42 g EP × 0,52 val/100 g = 218 mmol Epoxid; 20 g Amin ÷ 93 g/Äq. = 215 mmol
   NH → EP:NH ≈ 1,0.
P/B = (5 + 49) : (42 + 2 + 20) = 0,85 : 1.
Applikation: Rollen oder Rakel. Topfzeit bei 20 °C laut TDS beachten.
Quelle: Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur, Tab. IV-1.2.
```

**Merksatz**

Wässriges 2K-EP-Bodensystem: Tiefgrund (eindringen, absperren) → Grundierung (füllen, egalisieren) → Versiegelung (abriebfest, rutschsicher). VOC niedrig, keine HCl-Gefahr, hervorragende Haftung und Chemikalienbeständigkeit — Untergrundfeuchte und -festigkeit sind die kritischen Erfolgsfaktoren.

**Stichwörter:** Betonbodenbeschichtung, wässriges 2K-Epoxid, Tiefgrund, Grundierung, Versiegelung, Abriebfestigkeit, Rutschfestigkeit, Delamination, Polyamin-Härter, Polyamidoamin, Untergrundvorbereitung, VOC, Industrieboden, lösemittelfrei, Desmodur VL, Desmophen 1150, aromatisches Isocyanat, Benzylalkohol, Quarzmehl, D.E.R. 3531, Polypox

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur; DIN EN 13892-3; DIN EN ISO 12944; DIN EN 16165; ASR A1.5; DIN EN 1542*

## Übungsblatt Ü-108 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Welche Eigenschaften soll eine Betonbodenbeschichtung haben, und warum hat das wässrige 2K-Epoxidsystem den früher üblichen Chlorkautschuk abgelöst?

**Eigenschaften:** Abriebfestigkeit (Böhme-Verschleiß nach DIN EN 13892-3), Rutschhemmung, Ausgleich von Unebenheiten, Reinigungsfähigkeit, Beständigkeit gegen Chemikalien, Öle und Fette sowie Haftung auf dem alkalischen Untergrund.

**Wässriges 2K-Epoxid:** Ausgezeichnete Haftung auf Beton, hohe Chemikalien- und Abriebbeständigkeit, gute Druckfestigkeit — bei VOC < 50 g/L. Es vernetzt chemisch und spaltet bei thermischer Belastung keine Salzsäure ab.

**Chlorkautschuk (abgelöst):** Physikalisch trocknend, aber mit über 500 g/L VOC und der HCl-Abspaltung bei Hitze nicht mehr Stand der Technik.

*Bewertung: Die Anforderungen an den Industrieboden werden genannt und die Ablösung des Chlorkautschuks durch das wässrige 2K-Epoxid wird über VOC und Zersetzungsverhalten begründet.*

**Frage 2** **(Berechnung, 6 Punkte)**

Pro Schicht soll eine Trockenschichtdicke von 45 µm erreicht werden. Bei einem Volumenfestkörper von 50 % — welche Nassschichtdicke ist nötig?

**Ansatz:** NSD = TSD · 100 / Volumenfestkörper.

**Rechnung:** NSD = 45 · 100 / 50 = 90 µm.

*Bewertung: Die Nassschichtdicke wird korrekt bestimmt.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**

Welche Gefahr ging von Chlorkautschuk bei thermischer Belastung aus, und was ist beim Betonuntergrund unabhängig vom Bindemittel wichtig?

**Thermisch:** Bei Überhitzung — deutlich oberhalb der Dauergebrauchsgrenze von etwa 80 °C — spaltet Chlorkautschuk ätzende Salzsäuredämpfe ab (Atemwege, Augen) — Überhitzung vermeiden.

**Untergrund:** Beton gründlich reinigen und mechanisch/chemisch vorbehandeln (ggf. Fluatierung); Verunreinigungen und Restfeuchte (max. 4 %, CM-Messung) sind der häufigste Delaminationsgrund.

*Bewertung: HCl-Gefahr und die Untergrundvorbehandlung werden erkannt.*

# L-109 · Tiefgrund

*Grundierung für saugende, mineralische Untergründe*

**Prüfungsteil 1** · A 9

Ein Tiefgrund verfestigt saugende mineralische Untergründe, senkt die Saugfähigkeit und verbessert die Haftung der folgenden Beschichtung. Er muss niedrigviskos und festkörperarm sein, um tief einzudringen.

## Aufgabe

Der Name „Tiefgrund“ beschreibt die Kernleistung: Der niedrigviskose, festkörperarme Lack soll möglichst tief in den saugenden Untergrund eindringen — im Gegensatz zu einem aufbauenden Decklack, der auf der Oberfläche verbleibt.

Bei mineralischen Untergründen soll ein Tiefgrund die Saugfähigkeit aufheben oder mindern, den Untergrund verfestigen, imprägnieren und/oder hydrophobieren. Außerdem verbessert er die Haftung nachfolgender Beschichtungen. Das Bindemittel muss für die Alkalität des mineralischen Untergrunds ausreichend beständig sein (die erforderliche Alkalibeständigkeit ist systemabhängig); außerdem sollte er einfach verarbeitbar sein.

## Bindemittel

Für Tiefgründe werden unterschiedliche Bindemittel eingesetzt, je nach Untergrund und Beanspruchung:

• Wässrige Polyacrylatdispersionen (für Fassade, Innen- und Außenwände): niedrigviskos, alkalibeständig. Butylacrylat weichmachend; längerkettige (Meth)acrylate und Styrol-Comonomer steigern Hydrophobie. Hergestellt durch Emulsionspolymerisation.

• Wässrige Epoxidharzdispersionen (EP-Tiefgrund, für Industrie- und Betonböden mit chemischer Beanspruchung): dringen in den Beton ein, verfestigen den Untergrund und haften dort chemisch. Bessere Chemikalienbeständigkeit und Sperrwirkung als Acrylat — Voraussetzung für wässrige 2K-EP-Bodenbeschichtungssysteme (siehe L-108). Bindemittel: niedrig- molekulare EP-Dispersion, Härter wasserverdünnbares Polyamin, Topfzeit beachten (20–40 min; L-108 nennt für das dort beschriebene System 30–60 min). Beide Angaben können nebeneinander richtig sein: Die Topfzeit hängt von Harz und Härter, Temperatur, Mischungsverhältnis, Ansatzgröße und der zulässigen Viskositäts- bzw. Verarbeitungsgrenze ab und lässt sich nicht auf eine Zahl vereinheitlichen.

• Lösemittelhaltige Tiefgründe (Alkydharz, PUR, EP): für Spezialanwendungen, rückläufig wegen VOC.

## Imprägnieren statt beschichten

Wird ein mineralischer Untergrund nicht beschichtet, sondern nur wasserabweisend gemacht, spricht man von Imprägnierung oder Hydrophobierung. Drei Wirkstoffgruppen sind gebräuchlich:

• Siliconate sind wässrig und stark alkalisch. Sie reagieren mit dem Kohlendioxid der Luft über Silanole zum Siliconharz; dabei bleibt Kaliumcarbonat als weißer Belag zurück, und im Frühstadium sind sie noch auswaschbar. Für Fassaden sind sie deshalb nur bedingt geeignet.

• Silane sind die kleinsten Moleküle und dringen am tiefsten ein. Das Silan selbst wirkt aber noch nicht — erst die Reaktion mit der Feuchtigkeit im Baustoff bildet über Silanole das eigentliche, wasserabweisende Siliconharz. Nachteil: Leichtflüchtige Silane können verdunsten, bevor sie reagiert haben.

• Siliconharze und Oligosiloxane haben Molmassen von nur etwa 1.000 bis 3.000 und dringen deshalb ebenfalls gut in Poren und Kapillaren ein; ihre Wirkung ist bereits nach dem Verdunsten des Lösemittels da.

Für alle drei gilt als grobe, systemabhängige Orientierung dieselbe praktische Regel: Oberhalb von etwa 5 bis 10 % Wirkstoff bringt eine höhere Konzentration meist keine bessere Wirkung mehr, denn das Lösemittel trägt wesentlich zur Eindringtiefe bei. Mehr Wirkstoff ist hier also nur teurer, nicht besser.

### Absperrmittel und Additive

Absperrmittel sind Grundierungen, die ein Durchschlagen farbiger oder löslicher Verunreinigungen auf die folgende Beschichtung verhindern. Typische Problemstoffe: Nikotinbeläge und Rauchgaskondensate, Bitumen und Teerprodukte, Holzgerbstoffe (Tannine, besonders in Eiche), lösliche Farbstoffe und Beizen. Diese Stoffe bluten ohne Absperrung in den Decklack ein und führen zu Verfärbungen. Die Wirkstoffbasis des Absperrmittels richtet sich nach dem Problemstoff: Schellack-Absperrgrunde (alkoholisch, Klassiker gegen Holzinhaltsstoffe, Nikotin und Ruß), lösemittel- oder wasserbasierte Sperrbindemittel sowie dicht pigmentierte Systeme, deren geschlossene Pigmentpackung die Diffusion mechanisch blockiert. Fluate gehören nicht dazu — sie dienen der Neutralisierung und Verfestigung alkalischer mineralischer Untergründe. Biozide verringern den mikrobiologischen Befall. Zu viel Pigment/Füllstoff kann das Eindringen behindern und zum Kreiden führen.

### Vorbehandlung

Die nötige Vorbehandlung hängt von der Vorgeschichte des Untergrundes ab. Neue, unbehandelte Flächen müssen zunächst trocknen; Verunreinigungen werden mechanisch (Draht- oder Wurzelbürste) entfernt, Schäden und Risse ausgebessert. Bei bereits beschichteten Flächen werden lose Anstrichteile entfernt und der Untergrund gründlich gereinigt.

### Umwelt und Sicherheit

Bei der mechanischen Vorbehandlung mineralischer Untergründe entstehen Stäube, die meist alkalisch reagieren und quarzhaltig sein können — Tätigkeiten mit alveolengängigem Quarzfeinstaub gelten nach TRGS 906 als krebserzeugend, daher staubarm arbeiten; geeigneten Atemschutz nach Gefährdungsbeurteilung verwenden (TRGS 559, quarzhaltiger Staub) — je nach Staubart und Exposition Partikelfilter wie P2/FFP2 oder höhere Schutzstufen. Als Augenschutz gegen abplatzende Lackpartikel oder mineralische Partikel Schutzbrille verwenden. Biozide sachgerecht und sparsam einsetzen.

**Merksatz**

Tiefgrund = verfestigen, Saugfähigkeit senken, Haftung verbessern auf mineralischem Untergrund. Niedrigviskos und festkörperarm zum Eindringen, alkalibeständig (der Untergrund ist alkalisch), Absperrmittel gegen Durchschlagen — bei der Vorbehandlung Staub- und Augenschutz.

**Stichwörter:** Tiefgrund, mineralischer Untergrund, Saugfähigkeit, Polyacrylat-Dispersion, unverseifbar, Absperrmittel, Fluat, Hydrophobierung, Biozid, Eindringtiefe, Imprägnierung, Siliconat, Silan, Oligosiloxan
*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; Heilen/Herrwerth, Silicone Resins and their Combinations; TRGS 559; TRGS 906*

## Übungsblatt Ü-109 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**
Welche Aufgaben hat ein Tiefgrund, und warum muss er niedrigviskos, festkörperarm und alkalibeständig sein?

**Aufgaben:** Saugfähigkeit senken, verfestigen, imprägnieren/hydrophobieren, Haftung der Folgeschicht verbessern.
**Eigenschaften:** Niedrigviskos/festkörperarm für gute Eindringtiefe; alkalibeständig (praktisch: verseifungsstabil), weil mineralische Untergründe meist alkalisch sind.
*Bewertung: Aufgaben und die Begründung der Eigenschaften werden korrekt genannt.*

**Frage 2** **(Berechnung, 6 Punkte)**
Eine Polyacrylat-Dispersion ist 30 %ig. Wie viel Festkörper enthalten 200 g der Dispersion?

**Ansatz:** Festkörper = Masse · Anteil = 200 g · 0,30.
**Rechnung:** Festkörper = 60 g.
*Bewertung: Der Festkörperanteil wird korrekt bestimmt.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**

Was sind Absperrmittel, und welche Schutzmaßnahmen sind bei der Vorbehandlung mineralischer Untergründe wichtig?

**Absperrmittel:** Grundierungen, die ein Durchschlagen farbiger Verunreinigungen (z. B. Rauchgaskondensate, Bitumen) verhindern; die Wirkstoffbasis richtet sich nach dem Problemstoff — üblich sind Schellack-Absperrgrunde, lösemittel- oder wasserbasierte Sperrbindemittel und dicht pigmentierte Systeme. Fluate gehören nicht dazu; sie dienen der Neutralisierung und Verfestigung alkalischer mineralischer Untergründe.

**Schutz:** Alkalische, oft quarzhaltige Stäube → staubarm arbeiten, geeigneten Atemschutz nach Gefährdungsbeurteilung (TRGS 559) — je nach Staubart und Exposition Partikelfilter wie P2/FFP2 oder höhere Schutzstufen; abplatzende Partikel → Schutzbrille.

*Bewertung: Funktion der Absperrmittel und die Schutzmaßnahmen werden erkannt.*

# L-110 · Emballagenlack (Dosenaußenlack)

*Harte, flexible Außenlackierung für Metallverpackungen*

**Prüfungsteil 1** · A 9

Emballagenlacke beschichten Metallverpackungen (Dosen). Polyester-Melamin-Einbrennlack ist heute das Standard-Außenlacksystem — BPA-basierte Epoxidsysteme sind für Lebensmittelkontaktmaterialien in der EU verboten (VO (EU) 2024/3190). Gleitmittel flotieren beim Einbrennen an die Oberfläche; Nahtlacke sind eigene Produkte für die Schweißnaht.

## Anforderungen

An eine Emballagen-Außenlackierung werden hohe Ansprüche gestellt: gute Haftung auf dem Metall, große Härte, zugleich hohe Elastizität und Flexibilität (die Dose wird nach dem Lackieren umgeformt), hohe Abrieb- und Gleitfähigkeit sowie gute Bedruckbarkeit mit Druckfarben.

## BPA-freie Außenlacksysteme — Stand der Technik

Das klassische BPA-Epoxidharz + Melaminharz ist für Lebensmittelkontaktmaterialien nicht mehr zulässig (VO (EU) 2024/3190, Übergangsfrist Außenbeschichtung bis 20. Januar 2028). Stand der Technik:

- Polyester-Melamin-Einbrennlack (Hauptsystem): gesättigter Isophthalat-/Terephthalsäure-Polyester, OH-Zahl 80–120 mg KOH/g, HMMM-Melaminvernetzer 20–30 Gew.-% auf Bindemittel. Vernetzungsreaktion: R–OH + $CH_3O–CH_2–N<$ (HMMM) → $R–O–CH_2–N<$ + $CH_3OH$ (Methanol als Spaltprodukt — Ofenemissionen erfassen). Das Polyestergerüst gibt die nötige Flexibilität für Necking und Flanging der Dose.
- Acrylat-Melamin-Einbrennlack (Alternative, besonders Weißdecklack): hydroxyfunktionelles Acrylat + Melamin; höhere UV-Stabilität, etwas weniger flexibel als Polyester.
- Wässrige Varianten auf Polyesterbasis: im Kommen, noch weniger verbreitet als lösemittelbasierte Systeme.
- Doseninnenlacke (direkter Lebensmittelkontakt): eigenes, noch strengeres Anforderungsprofil mit Acrylat-Vinyl-Copolymeren, Polyesterbeschichtungen oder PET-Folienlamination — nicht Gegenstand dieses Blatts.

## Gleitmittel — Mechanismus und Typen

Gleitmittel sind als Additive im Lack eingebaut (0,3–1,5 Gew.-% auf Lack). Beim Einbrennen migrieren sie durch das noch niedrigviskose Lackmilieu an die Oberfläche — sie schwimmen auf und bilden nach dem Abkühlen eine mikroskopisch dünne Gleitschicht.

Warum nötig: Dosenfülllinien laufen mit 1.000–2.000 Dosen/min. Ohne Gleitmittel verklemmen und verkratzen Dosen auf Führungsschienen; außerdem leidet die Druckqualität der Etiketten. Zielgröße: Reibungskoeffizient $\mu < 0{,}1–0{,}2$.

Typen: Polyethylenwachse (PE-Wachs) — häufigste Wahl; Carnaubawachs — natürlich, lebensmittelrechtlich unbedenklich; PTFE-Wachse — sehr niedriger Reibwert, teuer.

Formulierungshinweis: zu viel Wachs → schlechtere Druckhaftung beim Dekorbedrucken. Zu wenig → Linienstörungen. Die Dosierung ist rezepturseitig sorgfältig auszubalancieren.

## Nahtlacke (Stripe Coat) — was, warum, wie

Nahtlacke sind eigene Produkte, keine Verdünnung des Außenlacks. Hintergrund: Das Blech wird lackiert — als Tafel auf der Bogenanlage oder als Band im Coil Coating —, dann stanzt man Platinen, rollt sie zur Dosenzarge und verschweißt die Längsnaht elektrisch (Widerstandsschweißen). Die Schweißhitze verbrennt den Lack beidseitig der Naht auf einem Streifen von ca. 3–6 mm. Dieser blanke Streifen wird nachgelackt:

• Außennahtlack (Außenstreifen): Liquid-Stripe-Coat oder Pulver-Stripe-Coat, appliziert über Fixdüse oder Dosierrad als schmaler Streifen, Einbrennen im Durchlaufofen. Schichtdicke 20–60 µm (deutlich dicker als der Basislack, weil der Streifen allein den Nahtkorrosionsschutz leisten muss). Optisch muss er dem Außenlack entsprechen.

• Innennahtlack: muss Lebensmittelkontaktanforderungen erfüllen; spezieller Acrylat- oder phenolharzvernetzter Lack, ebenfalls 20–60 µm.

Fazit: Nahtlack = eigenes Produkt, eigene Applikationsstation in der Zargenlinie.

## Flexibilitätsprüfung — warum und wie

Warum so wichtig: Die Dose wird nach dem Lackieren umgeformt — Necking (Einziehen des oberen Dosenendes für den Deckel), Flanging (Bördelrand). Der Lack muss diese plastische Verformung ohne Risse überstehen.

Prüfverfahren:

• Dornbiegung (ISO 1519): beschichtetes Blech 180° um einen Dorn definierter Dicke biegen, dann Risssuche (Lupe oder Tesafilmtest). Angabe: kleinster Dorndurchmesser ohne Rissbildung. Dosenaußenlack Zielwert: typisch 5–10 mm Dorn, kein Riss.

• Erichsen-Tiefung (ISO 1520): Kugelstempel drückt von der Rückseite ins Blech; gemessen wird die Tiefe beim ersten Lackriss. Simuliert die zweiachsige Dehnung beim Tiefziehen. Dosenlacke: Zielwert ≥ 6–8 mm.

• Schlagbeständigkeit (ISO 6272): Fallgewicht — direkter und rückwärtiger Schlag (Reverse Impact). Zeigt Haftungsversagen unter schlagartigem Stress. Typisch: 40–80 kg·cm reverse impact ohne Ablösung.

Alle drei Prüfungen immer kombinieren: Ein Lack kann bei der Dornbiegung bestehen und beim Reverse Impact versagen — das weist auf schlechte Substrat-Haftung hin.

## Applikation, Schichtdicken, Viskositäten

Applikation: Walzenauftrag (Rollercoating). Bei dreiteiligen Weißblechdosen ist die Tafelbeschichtung das Regelverfahren: Die zugeschnittenen Weißblechtafeln laufen durch den Walzenapplikator und härten stehend im Wicket-Ofen aus. Grund ist, dass Innen- und Außenseite unterschiedliche Lacke und Lagenzahlen brauchen und der mehrfarbige Dekordruck registerhaltig auf der ebenen Tafel erfolgt; die Naht wird erst nach dem Schweißen in einer eigenen Station nachlackiert. Das Coil Coating auf dem Metallband vor dem Stanzen ist demgegenüber das Verfahren für große Mengen einheitlicher Spezifikation und dominiert das Bandmaterial allgemein — bei der dreiteiligen Emballage spielt es die kleinere Rolle. Beim Coil Coating läuft das Metallband mit 60–120 m/min durch den Walzenapplikator, dann Durchlaufofen.

Schichtdicken: Primer (Grundlack) 5–8 µm TF; Decklack 8–15 µm TF je Lage; Gesamtsystem 13–23 µm TF.

Viskosität: Walzenauftrag typisch 40–80 s DIN-Becher 4 mm/20 °C; eingestellt mit Aromaten (Solvesso) oder Estergemischen.

Einbrennen: 200–250 °C Peak-Metal-Temperature bei nur 15–45 s Verweilzeit im Durchlaufofen — die sehr kurze Aushärtezeit ist typisch für das Bandverfahren. Auf Weißblechtafeln (Wicket-Ofen) gelten dagegen 180–210 °C Metalltemperatur bei 8–12 min Ofenzeit.

Anwendungsfälle: Konservendosen, Aerosoldosen und andere dreiteilige Dosen (Weißblech) — zweiteilige Getränkedosen werden dagegen nahtlos tiefgezogen und erst nach dem Umformen bedruckt und lackiert. Der dreiteilige Weg lohnt überall dort, wo Hochglanz, bedruckbare Oberfläche und Liniengängigkeit bei hoher Produktionsgeschwindigkeit gefordert sind.

### Umwelt und Sicherheit

Bei Lacken mit Lebensmittelkontakt gelten strenge Migrationsregeln. Klassische Epoxid-Dosenlacke waren Bisphenol-A-basiert; BPA ist in der EU für Lebensmittelkontaktmaterialien seit Januar 2025 grundsätzlich verboten (Verordnung (EU) 2024/3190) — erfasst sind auch Lacke, Beschichtungen und Dosen-Epoxidharze. Die allgemeine Übergangsfrist bis 20. Juli 2026 ist inzwischen abgelaufen; für einzelne Anwendungen ohne bislang geeignete Alternativen — darunter ausdrücklich außenbeschichtete Metallverpackungen — gelten verlängerte Übergangsfristen bis 20. Januar 2028. BPA-freie Systeme sind daher Stand der Technik. Elektrostatische Aufladung nicht leitender Stoffe kann Funken und Brände auslösen; dagegen helfen Erdung, höhere Luftfeuchte und leitfähige Materialien.

**Merksatz**

Dosenaußenlack = Polyester-Melamin-Einbrennlack (BPA-frei, VO (EU) 2024/3190); hart UND flexibel UND bedruckbar. Gleitmittel (PE-Wachs) flotieren beim Einbrennen an die Oberfläche (μ < 0,2). Nahtlack = eigenes Stripe-Coat-Produkt nach dem Schweißen. Flexibilität prüfen: Dornbiegung (ISO 1519) + Erichsen (ISO 1520) + Reverse Impact (ISO 6272) — alle drei kombinieren.

**Stichwörter:** Emballagenlack, Dosenaußenlack, Polyester-Melamin, Einbrennlack, BPA-frei, VO 2024/3190, Lebensmittelkontakt, Gleitmittel, PE-Wachs, Flotation, Nahtlack, Stripe Coat, Flexibilität, Dornbiegung, Erichsen-Tiefung, Schlagbeständigkeit, Reverse Impact, Rollercoating, Coil-Coating

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; ISO 1519; ISO 1520; ISO 6272*

## Übungsblatt Ü-110 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Warum muss ein Dosenaußenlack sowohl hart als auch flexibel sein, und wie wird die Vernetzung des Polyester-Melamin-Systems erreicht?

**Hart und flexibel:** Die Dose wird nach dem Lackieren umgeformt; die Schicht braucht Härte (Abrieb, Handling) und zugleich Flexibilität, um beim Umformen nicht zu reißen.

**Vernetzung:** Beim Einbrennen reagieren die OH-Gruppen des Polyesters mit dem veretherten Melaminharz (HMMM) unter Kondensation/Umetherung — Spaltprodukt ist Methanol.

*Bewertung: Der Zielkonflikt hart/flexibel und die Melamin-Kondensationsvernetzung des Polyesters werden richtig erklärt.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**

Ein Emballagenlack hat ein Pigment-Bindemittel-Verhältnis von 1 : 1,4 (Masse). Wie viel Pigment und Bindemittel enthalten 700 g Festkörper?

**Ansatz:** Gesamtanteile = 1 + 1,4 = 2,4; Pigment = 700 · 1/2,4, Bindemittel = 700 · 1,4/2,4.

**Rechnung:** Pigment ≈ 291,7 g, Bindemittel ≈ 408,3 g (Summe 700 g).

*Bewertung: Die Aufteilung nach dem Massenverhältnis wird korrekt berechnet.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**

Welche Aufgabe haben Nahtlacke, und worauf ist bei Dosenlacken mit Lebensmittelkontakt zu achten?

**Nahtlack:** Er schützt die verschweißte Rumpflängsnaht zusätzlich gegen Korrosion.

**Lebensmittelkontakt:** Strenge Migrationsregeln; klassische Epoxid-Dosenlacke waren BPA-basiert. BPA ist in der EU für Lebensmittelkontakt verboten (VO (EU) 2024/3190) — BPA-freie Systeme sind Stand der Technik.

*Bewertung: Funktion der Nahtlacke und die Migrations-/BPA-Problematik werden erkannt.*

# L-111 · Automobil-Lackaufbau (OEM-Serienlackierung)

*Vier Schichten auf Stahl: KTL, Füller, Basislack, Klarlack*

**Wahlqualifikation** · B 7 · B 3

Die Serienlackierung baut auf dem phosphatierten Stahlblech vier Schichten auf — KTL, Füller, Basislack und Klarlack. Jede hat eine eigene Aufgabe; zusammen ergeben sie Korrosionsschutz, Steinschlagfestigkeit, Farbe und Oberflächenschutz.

## Der Schichtaufbau

Auf dem vorbehandelten, phosphatierten Stahlblech folgen nacheinander die kathodische Tauchlackierung (KTL), der Füller, der Basislack und der Klarlack. Keine einzelne Schicht übernimmt im OEM-Aufbau alle Funktionen — die Schichten werden gezielt aufeinander abgestimmt und liefern gemeinsam Korrosionsschutz, Steinschlagfestigkeit, Farbe und Effekt sowie einen dauerhaften Oberflächenschutz. Basislack und Klarlack können im Nass-in-Nass-Verfahren appliziert und anschließend gemeinsam eingebrannt werden; die genaue Prozessführung ist systemabhängig.

## KTL — die Grundierung

Die kathodische Tauchlackierung ist die erste Schicht und sorgt für den Korrosionsschutz und die Haftbasis. Sie wird elektrophoretisch abgeschieden und bedeckt auch Hohlräume und Kanten sehr gleichmäßig (siehe L-88). In der modernen Serienfertigung gilt sie als praktisch unverzichtbare Grundlage für einen dauerhaften Korrosionsschutz der Karosserie, weil Spritzverfahren allein Hohlräume und Kanten nicht vergleichbar zuverlässig erreichen.

## Füller und Basislack

Der Füller gleicht den Untergrund aus, macht ihn schleifbar, verbessert die Zwischenschichthaftung und schützt vor allem gegen Steinschlag (siehe L-113). Darauf trägt der Basislack Farbe und Effekt — als Uni-Ton oder als Metallic-/Perlglanzlack; er wird dünn appliziert und nass in nass mit dem Klarlack überschichtet (siehe L-114).

## Klarlack — Schutz und Glanz

Der Klarlack ist die letzte, sichtbare Schicht. Er schützt den Basislack vor Bewitterung, Chemikalien und Kratzern und gibt der Oberfläche den Tiefenglanz (siehe L-115). Seine Wetter- und Kratzbeständigkeit entscheidet maßgeblich über die Lebensdauer des gesamten Aufbaus.

## Einbrennen und Emission

Die Schichten werden bei erhöhter Temperatur eingebrannt (Größenordnung 140 bis 175 °C, je nach Schicht: KTL am heißesten, Basislack/Klarlack am kühlsten). Welche Schichten wässrig und welche festkörperreich lösemittelhaltig ausgeführt werden, zeigt der Abschnitt VOC-Emissionsregeln (siehe auch L-168).

## Typische Schichtdicken im OEM-Serienaufbau

Richtwerte für den Lackaufbau auf Stahlkarosserie (nach Müller/Poth, Abb. I-3.10):

Phosphatierung ≈ 1 µm (Konversionsschicht, keine Lackschicht)
KTL 18–25 µm Trockenfilmdicke
Füller (Primer-Surfacer) 20–40 µm Trockenfilmdicke
Basislack Metallic 10–15 µm Trockenfilmdicke
Basislack Uni-Ton 15–25 µm Trockenfilmdicke
Klarlack 25–40 µm Trockenfilmdicke

Gesamtaufbau Lackschichten: rund 73 bis 120 µm beim Metallic-Aufbau; mit Uni-Basislack rund 78 bis 130 µm.
Die Quellentabelle gibt für den Klarlack 25 bis 40 µm an — das ist der Wert dieser Quelle, nicht der Serienstandard. In der Serienlackierung sind etwa 30 bis 50 µm Trockenfilm anzutreffen, mit einem Schwerpunkt um 40 µm (siehe L-115); jede OEM-Linie fährt innerhalb dieses Rahmens ihr eigenes Fenster. Mit 40 µm Klarlack ergeben sich rund 88 bis 120 µm beim Metallic-Aufbau. Die Summen oben folgen dagegen den Tabellenwerten. Diese Werte sind OEM-Richtwerte; konkrete Vorgaben hängen von Substrat, System und Prozess ab.
Quelle: Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur, Abb. I-3.10.

## Wann und warum der Füller geschliffen wird

Der Füller trägt 20–40 µm auf und schützt die KTL. In der OEM-Serienlinie wird er in der Regel nicht vollflächig geschliffen, sondern nur punktuell nachgearbeitet (Stippen, Staubeinschlüsse, Läufer) — die Haftung des Basislacks wird dort über die chemische Abstimmung der Schichten erreicht. In Nacharbeit und Reparaturlackierung wird dagegen vollflächig geschliffen: Applikationstextur und Einschlüsse zeichneten sich sonst durch den dünnen Basislack und den Klarlack hindurch als Orangenhaut oder Körnung ab.
Der Schleifvorgang erfüllt dabei zwei Aufgaben gleichzeitig: Erstens wird die Oberfläche plangemacht, damit der Basislack einen optisch ebenen Grund vorfindet. Zweitens erzeugt das Schleifkorn eine definierte Mikrorauheit als mechanischen Anker für die Zwischenschichthaftung auf der bereits eingebrannten, reaktionsarmen Oberfläche.
Praxis: Schleifen mit P320–P400 (nass oder trocken), anschließend Entstauben und Reinigen. Sichtprüfung: keine Fehlstellen, gleichmäßige Schleifstruktur über die gesamte Fläche.

## VOC-Emissionsregeln im Automobilwerk

OEM-Lackieranlagen unterliegen der 31. BImSchV (Verordnung über die Begrenzung von Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen — VOC — bei der Verwendung organischer Lösemittel). Sie setzt lösemittelmengenbezogene Emissionsgrenzwerte für Fahrzeuglackieranlagen (Anhang III der Verordnung); Grenzwerte gelten als Jahresmittelwert in g VOC je m² Karosseriefläche.
Daraus folgen konkrete Formulierungszwänge; die Technologie im Einzelnen hängt von Lackschicht, Werk und Prozess ab:
• KTL: wässrig — seit Jahrzehnten Standard, kein VOC-Problem.
• Füller: heute überwiegend wässrig in OEM-Anlagen, lösemittelhaltige Systeme nur noch in Altanlagen oder Speziallinien.
• Basislack: wässrig — flächendeckender Standard seit ca. 2000.
• Klarlack: noch überwiegend lösemittelhaltig, aber festkörperreich (High Solid ≥ 55 % nfA) formuliert, um VOC zu minimieren.
Ofenemissionen (Spaltprodukte aus Melaminhärtung, Lösemittelreste) werden mit regenerativer thermischer Oxidation (RTO) bei 700–800 °C nachbehandelt. Das ist einer von zwei Wegen zur Einhaltung der Grenzwerte; alternativ kann der Betreiber einen Reduzierungsplan nach Anhang IV der 31. BImSchV fahren und die Emissionen rezepturseitig senken. Die TA Luft tritt im VOC-Bereich dieser Anlagen hinter die 31. BImSchV zurück.

**Merksatz**

Stahl, dann KTL (Korrosionsschutz), Füller (Steinschlag und Egalisieren), Basislack (Farbe und Effekt), Klarlack (Schutz und Glanz). Je nach Prozess werden einzelne Schichten separat eingebrannt, oder Basis- und Klarlack werden gemeinsam eingebrannt.

**Stichwörter:** Automobillackierung, Serienlackierung, OEM, Schichtaufbau, KTL, Füller, Basislack, Klarlack, Steinschlagschutz, Nass-in-Nass, Korrosionsschutz, Einbrennen, Schichtdicke, Trockenfilmdicke, µm, Schleifbarkeit, Mikrorauheit, Zwischenschichthaftung, 31. BImSchV, VOC, RTO, TA Luft

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur*

## Übungsblatt Ü-111 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 9 Punkte)**

Nennen Sie die vier Lackschichten der Automobil-Serienlackierung in ihrer Reihenfolge und jeweils ihre Hauptaufgabe.

**KTL:** Kathodische Tauchlackierung als erste Schicht auf dem phosphatierten Blech — liefert Korrosionsschutz und Haftbasis, elektrophoretisch und sehr gleichmäßig abgeschieden.
**Füller:** Egalisiert den Untergrund, macht ihn schleifbar, verbessert die Zwischenschichthaftung und schützt vor Steinschlag.
**Basislack:** Bringt Farbe und Effekt (Uni oder Metallic/Perlglanz), dünn appliziert.
**Klarlack:** Schützt vor Bewitterung, Chemikalien und Kratzern und gibt den Glanz.
*Bewertung: Reihenfolge KTL → Füller → Basislack → Klarlack korrekt, jede Schicht mit ihrer charakteristischen Hauptaufgabe benannt.*

**Frage 2** **(Berechnung, 7 Punkte)**

Ein Aufbau hat folgende Trockenschichtdicken: KTL 20 µm, Füller 35 µm, Basislack 15 µm, Klarlack 40 µm. Berechnen Sie die gesamte Trockenschichtdicke.

**Ansatz:** Die Schichten liegen übereinander, ihre Dicken addieren sich.
**Rechnung:** 20 + 35 + 15 + 40 = 110 µm
**Antwortsatz:** Der gesamte Lackaufbau ist rund 110 µm dick — etwa so dick wie ein Blatt Papier.
*Bewertung: Einfache Addition korrekt ausgeführt und mit anschaulichem Antwortsatz eingeordnet.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**

Warum verarbeitet man Basislack und Klarlack in der Serienlackierung nass in nass und nicht in zwei getrennten Einbrennschritten?

**Grund:** Nass in nass spart eine komplette Einbrennstufe und damit Energie, Zeit und Anlagenaufwand in der Lackierstraße.
**Voraussetzung:** Basislack und Klarlack müssen aufeinander abgestimmt sein, damit sich die Schichten beim gemeinsamen Einbrennen nicht stören (kein Aufreißen, keine Störungen der Effektorientierung).
**Ablauf:** Der Basislack wird nur vorgetrocknet, dann der Klarlack aufgetragen und beide zusammen eingebrannt.
*Bewertung: Die Antwort nennt den wirtschaftlichen Vorteil und die technische Voraussetzung abgestimmter Systeme.*

# L-112 · Füller (Füllprimer)

*Zwischenschicht mit Füllen, Schleifen und Haftung — für Industrie, Fahrzeug und Refinish*

**Prüfungsteil 1** · A 9

Ein Füller ist kein beliebiger Zwischenanstrich — er ist ein technisch definiertes Produkt mit fünf gleichzeitigen Aufgaben: Füllen, Schleifbarkeit, Zwischenschichthaftung, Korrosionsschutz und Wegschlagverhinderung. Modernes Standardsystem: gesättigter Polyester-Melamin (Einbrennfüller) oder 2K-PUR (Reparaturfüller).

## Was ein Füller ist — fünf Aufgaben gleichzeitig

Die fünf Aufgaben im Einzelnen:

1. Füllen: Unebenheiten bis 20–80 µm ausgleichen, Porosität des Untergrunds schließen.
2. Schleifbarkeit: spezifische Kornstruktur durch Talkum und Bariumsulfat — das Schleifpapier soll nicht zusetzen, die Fläche soll glatt und eben werden.
3. Zwischenschichthaftung: der Füller muss auf dem Untergrund (Grundierung, KTL, blankes Metall) haften und selbst dem Decklack oder Basislack Haftung bieten.
4. Korrosionsschutz: Barrierepigmente oder Passivierungspigmente, Porenverschluss.
5. Wegschlagverhinderung: ausreichend Bindemittel, damit der aufgebrachte Decklack nicht in den Füller 'wegschlägt' und matt wird.

Ein Füllprimer (Primer-Surfacer) vereint Grundierung und Füller in einem Produkt — spart eine Schicht, wenn Untergrundanforderungen nicht zu hoch sind.

Anwendungen: Automobilserie (L-113), Fahrzeugreparatur (L-116), Industrielackierung (Maschinen, Landmaschinen, Stahlbau), Möbel und Holzwerkstoff.

## Modernes System nach Anwendung

Der Alkyd-Melamin-Einbrennfüller ist historisch; heute je nach Anwendung:

- Industrie-Einbrennfüller (Metallmöbel, Landmaschinen): gesättigter Polyester-Melamin-Einbrennlack (140–160 °C); PVK ≈ 20–35 Vol.-% (Einbrennfüller typisch 20–30), Talkum und Bariumsulfat als Schleiffüllstoffe, kein BPA.
- OEM-Automobil: wasserbasierter Polyester oder PU-Dispersion + Melaminharz, wässrig (L-113).
- Reparaturfüller (Refinish): 2K-PUR, lösemittelhaltig oder High-Solid; Raumtemperatur oder forciert 60 °C (L-116).
- Korrosionsschutz-Füllprimer Industrie: 2K-EP-Füllprimer (EP-Harz + Polyaminhärter) — sehr gute Haftung und Korrosionsschutz auf blankem Stahl.

Gemeinsam bei allen: höhere PVK als der Decklack (etwa 20–35 Vol.-% gegen 13–20 Vol.-%) und Talkum als Schleiffüllstoff. Die Schichtdicke liegt je nach System unter oder über der Decklackdicke (Werte siehe Applikation und Schichtdicken).

## Untergrundvorbehandlung — Querverweis

Die Vorbehandlung des Metalluntergrunds (Phosphatierung, chromfreie Konversionsschicht) ist ein eigenes Thema und Voraussetzung für die Haftung des Füllers — aber nicht Teil des Füllers selbst. Zu den Vorbehandlungsverfahren → L-64 (Untergründe und ihre Vorbehandlung). Die früher übliche Chromatierung von Zink und Aluminium nutzte Chrom(VI)-Salze; Chrom(VI) ist krebserzeugend, deshalb werden heute chromfreie Konversionsverfahren auf Titan-, Zirkon- oder Silanbasis eingesetzt. Stahl wird vor der KTL nach wie vor zinkphosphatiert (siehe L-64). Nicht zu verwechseln mit Zinkphosphat als Korrosionsschutzpigment im Lackfilm (L-41).

## Objekttemperatur und Vernetzung

Maßgeblich für die Vernetzung ist die Objekttemperatur (OT), also die tatsächliche Temperatur des Werkstücks. Sie liegt unter der Ofentemperatur, weil das Werkstück langsamer aufheizt. Überbrennen (zu lange/heiß) macht den Film hart und spröde; Unterbrennen (zu kurz/kühl) ergibt Untervernetzung und damit schlechtere Beständigkeit.

## Applikation und Schichtdicken

Spritzapplikation: Druckluft (HVLP), Airless oder elektrostatisch. Typische Verarbeitungsviskositäten: 20–35 s DIN-Becher 4 mm/20 °C spritzfertig.
Schichtdicken:
• Einbrennfüller (Industrie, OEM): 20–40 µm TF
• Reparaturfüller (Refinish, 2K-PUR): 30–80 µm TF
Einbrennbedingungen Industrie-Einbrennfüller: 140–160 °C Objekttemperatur (OT), 20–30 min; OEM-Automobilfüller: 160–170 °C OT, 20–25 min (siehe L-113); Reparaturfüller 2K-PUR: forciert 40–60 °C/30 min oder Raumtemperatur.

## Schleifbarkeit

Ein Füller muss sich gut schleifen lassen; Talkum verbessert Schleifbarkeit und Haftung. Geprüft wird mit definiertem Schleifpapier und Anpressdruck, ob das Papier zusetzt und wie die Schleiffläche aussieht.

VERTIEFUNG – ÜBER DEM PRÜFUNGSSTOFF

### PVK berechnen — Formel und kritische PVK (KPVK)

Die Pigment-Volumen-Konzentration (PVK) gibt den Raumanteil von Pigmenten und Füllstoffen im trockenen Film an:

PVK [Vol.-%] = (V_P + V_F) / (V_P + V_F + V_Bm) × 100

V_P = Volumen Pigment, V_F = Volumen Füllstoff, V_Bm = Volumen nicht flüchtiges Bindemittel.
Volumina aus: Masse ÷ Dichte (Dichten aus TDS; Orientierungswerte: $TiO_2$ Rutil ≈ 4,1 g/cm³, Talkum ≈ 2,8 g/cm³, Schwerspat/Bariumsulfat ≈ 4,4 g/cm³, Bindemittel ≈ 1,1–1,3 g/cm³).

Kritische PVK (KPVK) — Näherung aus Ölzahl (OZ, g Öl / 100 g Pigment):
KPVK ≈ 100 / (1 + ρ_P × OZ / (ρ_Öl × 100))

Unterhalb KPVK: alle Poren mit Bindemittel gefüllt → glänzend, dicht, gute Schutzwirkung.
Oberhalb KPVK: Bindemittelmangel → matt, porös, schlechte Korrosionsbeständigkeit.

Richtwerte (Einbrennlacke nach Müller/Poth):
Einbrennfüller: PVK ≈ 20–30 Vol.-%
Einbrenndecklack: PVK ≈ 13–20 Vol.-%
Quelle: Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur, Teil I Kap. 3.

## Richtwerte Pigmentierungshöhen (P/B-Verhältnis)

Das Pigment-Bindemittel-Verhältnis (P/B) gibt die Einwaagemengen von Pigmenten und Füllstoffen (Pigmentgemisch) im Verhältnis zum nichtflüchtigen Bindemittelanteil (nfA) an. Richtwerte nach Müller/Poth (Tab. I-3.7):

Grundanstrich: P/B = (2–4) : 1 — hoher Füllstoffanteil für Haftung und Porenabdichtung
Zwischenanstrich: P/B = (1,5–2,5) : 1 — ausgewogen, Fülle und Zwischenschichthaftung
Deckanstrich: P/B = (0,1–1) : 1 — wenig Füllstoff für Glanz und Deckvermögen

Führt ein hohes P/B — nach Umrechnung über die Dichten — zu einer PVK oberhalb der KPVK, entstehen Porosität, Mattheit und geringe Kohäsion; ein zu niedriges P/B erhöht die Rohstoffkosten unnötig (Umrechnung siehe L-55).
Quelle: Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur, Tab. I-3.7.

## Einbrenndecklack weiß — Rezeptur mit Produktnamen (Alkyd/Melamin)

```
Fertigungsrezeptur eines lösemittelhaltigen Einbrenndecklacks weiß nach Müller/Poth (Tab.
   II-2.4); PVK = 20 Vol.-%, Ansatzviskosität 70 s DIN 4/20 °C, mit Isobutanol auf
   Spritzviskosität 20–35 s DIN 4 einzustellen; Einbrennen 30 min / 135 °C; Schichtdicke 45
   µm; hochglänzend, flexibel, wetterbeständig:

Dispergieransatz                    Gew.-%
Setal 84 (70 % SN, allnex)          16,60  (kurzöliger Alkyd)
Kronos 2310 (Kronos Intl.)          30,50  (TiO₂ Rutil)
Disperbyk 163 45 % (Byk)            1,20  (Dispergiermittel)
Arom. KW (Sdb. 158–170 °C)          2,50

Auflacken                           Gew.-%
Setal 84 (70 % SN)                  20,37
Luwipal 072 (75 % IB, BASF)         11,49  (Melamin-Imino-Typ, 135 °C-Vernetzer)
Baysilon OL 55 (5 % SN, Borchers)    1,00  (Verlaufmittel)
Arom. KW (158–170 °C)                3,84
Solvesso 150                         5,00
Isobutanol                           5,13
2-Ethylhexanol (BASF)                2,50

Summe                               100,13  (≈ 100,0)
nfA ≈ 65,6 %; Lösemittelanteil ≈ 34,4 %.
Quelle: Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur, Tab. II-2.4.
```

**Merksatz**

Füller = 5 Aufgaben: Füllen, Schleifbarkeit, Haftung, Korrosionsschutz, Wegschlagverhinderung. Heute: Polyester-Melamin (Einbrennen), 2K-PUR (Reparatur), 2K-EP (Korrosionsschutz-Primer). Talkum ist der entscheidende Schleiffüllstoff. Applikation: 20–35 s DIN 4; Schichtdicke 20–80 µm je System.

**Stichwörter:** Füller, Füllprimer, Grundierung, Phosphatierung, Chromatierung, Chrom(VI), Objekttemperatur, Schleifbarkeit, PVK, KPVK, Talkum, Einbrenndecklack, Alkydharz, Melaminharz, Setal 84, Luwipal 072, Kronos 2310, Pigmentierungshöhe, P/B-Verhältnis

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur*

## Übungsblatt Ü-112 — Musterlösungen

**Frage 1** (Verständnis, 8 Punkte)

Welche Aufgaben hat ein Füller, und wodurch unterscheidet sich ein Füllprimer?

**Aufgaben (fünf):** Füllen (Unebenheiten ausgleichen, Poren schließen), Schleifbarkeit, Zwischenschichthaftung, Korrosionsschutz und Wegschlagverhinderung.

**Lage:** Er liegt unter dem Deck- oder Basislack und wird geschliffen.

**Füllprimer:** Vereint Primer und Füller in einem Produkt, direkt auf dem Substrat.

*Bewertung: Die Füller-Aufgaben und der Füllprimer-Begriff werden korrekt erklärt.*

**Frage 2** (Berechnung, 8 Punkte)

Ein Füller hat ein Pigment-Bindemittel-Verhältnis von 1:1. Wie viel Pigment und Füllstoff enthält er bei 600 g Festkörper?

**Verhältnis:** 1:1 bedeutet gleiche Massen Pigment/Füllstoff und Bindemittel.

**Rechnung:** Pigment/Füllstoff = 600 g / 2 = 300 g

*Bewertung: Das 1:1-Verhältnis wird korrekt auf den Festkörper angewendet.*

**Frage 3** (Anwendung, 6 Punkte)

Warum wird die Chromatierung zur Metallvorbehandlung nicht mehr eingesetzt, und was verwendet man stattdessen?

**Gefahr:** Chromatierung nutzt Chrom(VI)-Salze; Chrom(VI) ist krebserzeugend und umweltgefährlich — daher stark eingeschränkt.

**Ersatz:** Für Zink und Aluminium chromfreie Konversionsverfahren auf Titan-, Zirkon- oder Silanbasis; Stahl wird nach wie vor zinkphosphatiert (siehe L-64) — nicht zu verwechseln mit dem Pigment Zinkphosphat im Lack (L-41).

*Bewertung: Die Chrom(VI)-Gefahr und der chromfreie Ersatz (Titan-/Zirkon-/Silanverfahren; Zinkphosphatierung für Stahl) werden korrekt genannt.*

# L-113 · Füller (Primer-Surfacer) in der Automobillackierung

*Steinschlagschutz, Egalisieren und Haftvermittlung zwischen KTL und Basislack*

**Wahlqualifikation** · B 7 · B 3

Der Füller egalisiert den Untergrund, macht ihn schleifbar, vermittelt Haftung und schützt vor Steinschlag — ein pigmentreicher, zähelastischer Polyester-Einbrennlack, zunehmend wässrig.

## Aufgabe des Füllers

Der Füller liegt zwischen KTL und Basislack (siehe L-111). Er gleicht Unebenheiten des Untergrunds aus, ist gut schleifbar, verbessert die Zwischenschichthaftung und gibt dem Basislack einen ebenen, deckenden Grund. Eine zentrale Funktion des Füllers ist der Steinschlagschutz: Er nimmt Schlagenergie auf und verhindert Durchschläge bis zum Blech.

## Aufbau (lösemittelhaltig)

Filmbildner ist meist ein gesättigter Polyester, der beim Einbrennen mit einem verkappten Polyisocyanat und einem Melaminharz vernetzt (siehe L-32). Pigmentiert und gefüllt wird mit Titandioxid, Bariumsulfat und etwas Ruß in relativ hoher Pigment-Volumen-Konzentration — das gibt Deckvermögen, Schleifbarkeit und Fülle.

## Steinschlagschutz durch Zähelastizität

Der Steinschlagschutz beruht auf der richtigen Einstellung von Härte und Elastizität. Ein zu spröder Füller platzt bei Schlag ab, ein zu weicher schützt nicht. Über Bindemittelwahl und Vernetzungsgrad wird ein zähelastisches, gut haftendes Netzwerk eingestellt, das die Energie eines Steinschlags aufnimmt, ohne dass die darunterliegende KTL verletzt wird.

## Wasserfüller

Aus Umweltgründen dominieren heute Wasserfüller. Wasserfüller können beispielsweise wasserverdünnbare Polyester, die über ihre Säuregruppen mit einem Amin neutralisiert werden (leicht alkalisch, pH etwa 8), oder Polyurethandispersionen enthalten; die Vernetzung erfolgt abhängig vom konkreten Bindemittel- und Härtersystem. Sie senken den Lösemittelausstoß deutlich (siehe L-168) bei vergleichbarem Eigenschaftsniveau.

## Kennzahlen und Applikation

Applikation OEM: elektrostatischer ESTA-Hochrotationszerstäuber; Verarbeitungsviskosität wässrig 30–45 s DIN 4/20 °C; Feststoffgehalt Wasserfüller ca. 45–55 Gew.-%.
Schichtdicke: 25–40 µm Trockenfilm (Automobil-Füller, OEM).
Einbrennen: 160–170 °C Objekttemperatur, 20–25 min.
Wichtig vor dem Einbrennen: kurze Zwischenlüftung 5–10 min bei Raumluft, damit das Wasser entweichen kann — sonst entstehen Kocher (Blasen) im Film.
Nach dem Einbrennen in der Nacharbeit bzw. Reparaturlackierung: Schleifen mit P320–P400 (nass oder trocken), Entstauben, Reinigen. In der OEM-Serienlinie wird der Füller in der Regel nicht vollflächig geschliffen, sondern nur punktuell nachgearbeitet.
nfA und PVK sind die zentralen Rezepturkennzahlen (siehe L-55, L-112).

## Vernetzungsreaktion im Wasserfüller

Wasserfüller auf Polyester-Melamin-Basis — zwei Schritte:

Schritt 1 — Wasserdispergierbarkeit durch Neutralisation: Der gesättigte Polyester trägt freie Carboxylgruppen (–COOH). Ein flüchtiges Amin, meist DMEA (Dimethylethanolamin), entzieht der Carboxylgruppe das Proton, wird dabei selbst protoniert und neutralisiert sie so: R–COOH + $(CH_3)_2N–CH_2CH_2OH$ → $R–COO^-$ + $[(CH_3)_2NH–CH_2CH_2OH]^+$. Der ionisch geladene Polyester wird damit wasserdispergierbar.

Schritt 2 — Vernetzung beim Einbrennen: Das Amin verdampft bei 80–100 °C aus dem Film (pH sinkt). Die nun freien Carboxyl- und OH-Gruppen des Polyesters reagieren mit dem HMMM-Melaminvernetzer: R–OH + $CH_3O–CH_2–N<$ → $R–O–CH_2–N<$ + $CH_3OH$ (Umetherung) oder R–COOH + $CH_3O–CH_2–N<$ → $R–COO–CH_2–N<$ + $CH_3OH$. Im vollveretherten Melaminharz sitzen keine freien Methylolgruppen mehr, deshalb wird Methanol frei und nicht Wasser; Wasser entsteht nur bei nicht veretherten, methylolfunktionellen Aminoharzen. Das freigesetzte Methanol ist bei der Abluftbetrachtung zu berücksichtigen. Ergebnis: dreidimensionales Polyester-Melamin-Netzwerk mit guter Chemikalienbeständigkeit und Steinschlagzähigkeit.

Praxishinweis: Zu saures oder zu basisches Milieu beim Mischen oder Lagern verschlechtert die Dispersionsstabilität. pH-Zielwert des Wasserfüllers: 8,0–8,5.

## Einbrennfüller hellgrau — Herstellrezept (Polyester/Melamin)

Vollständiges Herstellrezept eines lösemittelhaltigen Einbrennfüllers hellgrau nach Müller/Poth (Tab. II-2.3); PVK = 25 Vol.-%, Einbrennen 165 °C, 35 µm TF; elektrostatisch gespritzt:

| Mahlansatz | Gew.-% | |
|---|---|---|
| Desmophen T 1665 (65 % SN/IB, Covestro) | 14,08 | (ges. Polyester) |
| Ti-Pure R 706 (Chemours) | 16,55 | ($TiO_2$ Rutil) |
| Blanc Fixe N (Sachtleben) | 16,55 | (Bariumsulfat) |
| Micro Talc IT extra (Mondo) | 1,75 | (Talkum) |
| Bayferrox 3910 LV (Lanxess) | 0,10 | (Eisenoxidgelb) |
| Flammruß 101 (Evonik) | 0,04 | (Ruß) |
| Octa Soligen Ca 10 % (Borchers) | 0,30 | (Netzmittel) |
| Bentone 34 (10 % IB, Elementis) | 2,50 | (Antiabsetz) |
| Solventnaphtha (Exxon) | 3,13 | |
| Isobutanol | 1,50 | |
| Zwischensumme Mahlansatz | 56,50 | |

| Auflacken | Gew.-% | |
|---|---|---|
| Desmophen T 1665 (65 % SN/IB) | 15,00 | |
| Cymel 327 (90 % IB, Allnex) | 10,41 | (Melamin-Imino-Typ) |
| Epikote 1001 (Hexion, 60 %) | 5,78 | (EP-Harz als Haftungsverbesserer) |
| Additol XL 490 (Verlaufmittel) | 0,30 | |
| Solventnaphtha | 6,37 | |
| Methoxypropanol (MPA) | 2,22 | |
| Isobutanol | 0,92 | |
| Butyldiglykol | 2,50 | |
| Zwischensumme Auflacken | 43,50 | |

| Gesamtsumme | 100,00 |
|---|---|

nfA = 65,8 %; Lösemittel = 34,2 % (Angabe der Quelle). Wer selbst nachrechnet — Einwaage mal Feststoffanteil der jeweiligen Lieferform, aufsummiert — kommt auf rund 67 %. Solche Abweichungen von ein bis zwei Prozentpunkten entstehen, weil die tatsächlichen Feststoffgehalte der Hilfsprodukte (Netzmittel, Verlaufmittel, Antiabsetzmittel) von den gerundeten Katalogangaben abweichen. Für die Praxis heißt das: Die nfA einer übernommenen Rezeptur immer nachrechnen und den eigenen Wert dokumentieren.

Herstellreihenfolge: Mahlansatz auf Korngröße ≤ 15 µm dispergieren, dann Auflackkomponenten zugeben und homogenisieren.

Quelle: Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur, Tab. II-2.3.

### Optimales AK:MF-Verhältnis für Alkyd-Melamin-Einbrennsysteme

Beim Alkyd-Melamin-Einbrennsystem (AK = Alkydharz, MF = Melaminharz) bestimmt das Mischungsverhältnis das Eigenschaftsniveau entscheidend. Das Optimum für die Summe aus Härte, Flexibilität und Wetterbeständigkeit liegt nach Müller/Poth bei ca. 70:30 bis 80:20 Gew.-% (AK:MF):

< 65 % AK (zu viel MF): hohe Vernetzungsdichte, aber spröde, mangelnde Elastizität, Haftungsprobleme — der Film ist übernetzt.
70–80 % AK / 20–30 % MF: optimales Gleichgewicht aus Härte, Flexibilität und Witterungsbeständigkeit. Praxisstartpunkt: 75:25.
> 85 % AK (zu wenig MF): ausreichende Flexibilität, aber unzureichende Vernetzung → geringe Härte, schlechtere Wetterbeständigkeit.

Anpassung: Für Einbrennfüller (höhere Flexibilität gewünscht) tendenziell mehr AK; für harte Decklacke tendenziell mehr MF — aber stets im genannten Optimumfenster bleiben.
Quelle: Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur, Abb. II-2.10.

**Merksatz**

Der Füller ist der zähelastische Puffer: Er egalisiert, macht schleifbar, haftet und fängt vor allem den Steinschlag ab. Pigmentreicher Polyester-Einbrennlack mit verkapptem Isocyanat und Melamin — heute überwiegend wässrig.

**Stichwörter:** Füller, Primer-Surfacer, Automobillackierung, Steinschlagschutz, gesättigter Polyester, verkapptes Polyisocyanat, Melaminharz, Zähelastizität, Wasserfüller, Polyurethandispersion, PVK, Einbrennlack, Desmophen, Cymel 327, Mahlansatz, Auflacken, Einbrennfüller, AK:MF-Verhältnis, Alkyd-Melamin
*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur*

## Übungsblatt Ü-113 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**
Erklären Sie, worauf der Steinschlagschutz eines Füllers beruht, und warum sowohl ein zu sprödes als auch ein zu weiches Einstellen ungünstig ist.

**Grundprinzip:** Der Füller muss die Energie eines Steinschlags aufnehmen, ohne dass die darunterliegende KTL verletzt wird — er wirkt als zähelastischer Puffer.
**Zu spröde:** Ein zu spröder Film platzt bei Schlag ab und gibt den Untergrund frei.
**Zu weich:** Ein zu weicher Film schützt nicht ausreichend und lässt sich schlecht schleifen.
**Einstellung:** Über Bindemittelwahl und Vernetzungsgrad wird ein zähelastisches, gut haftendes Netzwerk eingestellt.
*Bewertung: Die Antwort erklärt den Puffer-Gedanken und begründet beide Fehlrichtungen (spröde/weich) konkret.*

**Frage 2** **(Berechnung, 10 Punkte)**
Ein Füller enthält je Rezeptureinheit: 22 GT Titandioxid (Dichte 4,1), 30 GT Bariumsulfat (Dichte 4,4), 0,6 GT Ruß (Dichte 1,8) und 20 GT Bindemittel-Festkörper (Dichte 1,2). Berechnen Sie die Pigment-Volumen-Konzentration: PVK = (V(Pigment) + V(Füllstoff)) / (V(Pigment) + V(Füllstoff) + V(Bindemittel)) · 100; Volumen = Masse ÷ Dichte (siehe L-112).

**Pigmentvolumina:** TiO2: 22/4,1 = 5,37; BaSO4: 30/4,4 = 6,82; Ruß: 0,6/1,8 = 0,33; Summe = 12,52 Volumenteile
**Bindemittelvolumen:** 20/1,2 = 16,67 Volumenteile
**PVK:** PVK = Pigmentvolumen / (Pigmentvolumen + Bindemittelvolumen) · 100 % = 12,52 / (12,52 + 16,67) · 100 %
**Ergebnis:** PVK = 12,52 / 29,19 · 100 % = 42,9 %
*Bewertung: Alle Feststoffe werden über Masse durch Dichte in Volumen umgerechnet; das Ergebnis von rund 43 % ist für einen Füller ein hoher Wert — er erklärt Fülle und Schleifbarkeit. Ob er nahe der kritischen PVK liegt, lässt sich erst mit der KPVK des konkreten Pigment-/Bindemittelsystems beurteilen (Bestimmung siehe L-55); die im Rezept dieser Tafel angesetzten 25 Vol.-% sind der übliche Bereich.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**

Ein Automobilhersteller möchte den VOC-Ausstoß der Lackierlinie senken und erwägt, den lösemittelhaltigen Füller zu ersetzen. Welche Alternative empfehlen Sie und wie ist sie aufgebaut?

**Empfehlung:** Einen Wasserfüller einsetzen.

**Aufbau:** Als Bindemittel wasserverdünnbare Polyester, die über ihre Säuregruppen mit einem Amin neutralisiert werden (leicht alkalisch, pH etwa 8), oder Polyurethandispersionen — jeweils mit Melaminharz vernetzt.

**Nutzen:** Deutlich geringerer Lösemittelausstoß bei vergleichbarem Eigenschaftsniveau (siehe L-168).

*Bewertung: Die Antwort nennt den Wasserfüller und beschreibt Bindemittel und Neutralisation korrekt.*

# L-114 · Basislacke: Uni, Effekt und Nass-in-Nass

*Farbe und Effekt in dünner Schicht — die vorletzte Lage des Automobilaufbaus*

**Wahlqualifikation** · B 3 · B 7

Der Basislack trägt Farbe und Effekt in dünner Schicht und wird nass in nass mit dem Klarlack überschichtet. Uni-Lacke brauchen Deckkraft, Effektlacke die richtige Plättchenorientierung — heute meist wässrig.

## Farbe und Effekt in dünner Schicht

Der Basislack liegt zwischen Füller und Klarlack (siehe L-111) und bringt Farbe und optischen Effekt. Er wird typischerweise dünn appliziert — Größenordnung 10 bis 25 µm — und unter definierten Bedingungen abgelüftet bzw. vorgetrocknet, bevor der Klarlack aufgetragen wird. Der Klarlack liefert Glanz und Schutz, der Basislack allein wäre nicht beständig.

## Uni-Basislacke

Uni-Basislacke sind Volltonfarben und brauchen ein hohes Deckvermögen. Eigentlich verlangt das eine hohe Schichtdicke, doch die Nass-in-Nass-Applikation begrenzt sie: Zu dick appliziert drohen Läufer und Kocher. Die Deckkraft wird deshalb wesentlich über Pigmentart und Pigmentierung eingestellt, die Schichtdicke nur innerhalb dieser Grenze.

## Effektbasislacke und Interferenzpigmente

Effektbasislacke enthalten plättchenförmige Effektpigmente. Aluminiumpigmente (Metallic) wirken wie winzige Spiegel: parallel ausgerichtet reflektieren sie Licht gerichtet — daher der Hell-Dunkel-Flop, der sich mit dem Betrachtungswinkel ändert (goniophotometrisch messbar). Eine winkelabhängige Farbtonänderung — die Goniochromie — zeigen erst die folgenden Interferenzpigmente.

Perlglanz- und Interferenzpigmente (gleiches Dünnschicht-Prinzip; von Interferenzpigmenten spricht man, wenn die winkelabhängige Interferenzfarbe im Vordergrund steht): durchsichtige Plättchen aus Glimmer (Muskovit) oder Borosilicat, belegt mit dünnen Metalloxidschichten — meist $TiO_2$ oder $Fe_2O_3$. An den Schichtgrenzen wird Licht teils reflektiert, teils durchgelassen; die reflektierten Anteile überlagern sich konstruktiv oder destruktiv je nach Blickwinkel — das ergibt den perlmuttartigen, farbwechselnden Effekt. Die $TiO_2$-Schichtdicke bestimmt die Interferenzfarbe: ca. 40–60 nm = Silberweiß, 60–80 nm = Gold, ca. 90 nm = Rotviolett, ca. 135 nm = Blaugrün. Mehrlagenaufbauten ($TiO_2/SiO_2/TiO_2$) verstärken den Farbwechsel.

Bekannte Handelsnamen: Iriodin® (Merck KGaA), Xirallic® (Merck, $Al_2O_3$-Träger für besonders scharfen Farbwechsel), Colorstream® (Merck).

Plättchenorientierung: Für den Effekt müssen die Plättchen flach zur Oberfläche liegen. Das gelingt durch dünnen Auftrag und angepasste Rheologie (thixotrop, strukturviskos).

## Chemie des Wasserbasislacks — Filmbildung und Vernetzung

OEM-Wasserbasislacke sind in der Regel 1K-Systeme (eine Komponente) — sie trocknen physikalisch: Das Wasser verdunstet, die Polymerpartikel (PU-Dispersion + wässriges Acrylat-Copolymer) nähern sich, diffundieren über Partikelgrenzen hinaus und bilden einen homogenen Film. Bei Raumtemperatur vernetzt der Film noch nicht.

Die chemische Vernetzung kommt erst beim gemeinsamen Einbrand mit dem Klarlack: Dafür enthält der Basislack einen eigenen Vernetzer — üblicherweise ein methanolverethertes Melaminharz (HMMM oder methylierter Imino-Typ, siehe L-32) und/oder ein blockiertes Polyisocyanat, das die OH-Gruppen der PUD/Acrylat-Komponente verknüpft. Weil beide Schichten gemeinsam vernetzen und an der Grenzfläche interdiffundieren, müssen Basislack und Klarlack aufeinander abgestimmt sein — ein fremdes Klarlacksystem kann die Basislackhaftung gefährden.

Hinweis Refinish (2K-Wasserbasislack): Im Reparaturlackbereich gibt es inzwischen echte 2K-Wasserbasislacke (PU-Dispersion + wasserverdünnbares Isocyanat), die schon bei Raumtemperatur vernetzen — das kann der 1K-OEM-Basislack nicht, er braucht den Ofen.

### Nass-in-Nass

Beim Nass-in-Nass-Verfahren wird der Basislack nur kurz vorgetrocknet, dann der Klarlack nass aufgetragen und beide gemeinsam eingebrannt. Das spart eine Einbrennstufe, verlangt aber aufeinander abgestimmte Systeme, damit sich die Schichten nicht stören.

### Wasserbasislacke

Wasserbasislacke sind im Automobilbereich weit verbreitet, unter anderem wegen ihrer reduzierten VOC-Emissionen. Da Wasser langsamer verdunstet als Lösemittel, braucht die Vortrocknung mehr Wärme. Die Rheologie ist besonders wichtig, weil sie die Effektorientierung steuert. Basis sind Acrylat- und Polyurethandispersionen (siehe L-71 ff.).

### Applikation, Schichtdicken, Viskositäten

Applikation OEM: elektrostatisch, ESTA-Hochrotationszerstäuber oder HVLP-Pistole.
Schichtdicken: Metallic-Basislack 10–15 µm TF; Uni-Basislack 15–25 µm TF (für kritische Buntpigmente in zwei Spritzgängen, um trotz Nass-in-Nass-Grenze das Deckvermögen zu erreichen).
Verarbeitungsviskosität wässrig: 18–25 s DIN 4/20 °C; Feststoffgehalt 15–20 Gew.-%.
Zwischenlüftung nach Basislackauftrag: 5–10 min bei 60–80 °C (IR-Zone oder Warmluft) — Wasser muss entweichen, sonst Störungen an der Basislack-Klarlack-Grenze.
Danach Klarlack nass in nass; gemeinsamer Einbrand: 140–160 °C Objekttemperatur, 20–30 min.

**Merksatz**

Basislack heißt Farbe und Effekt in dünner Schicht, nass in nass unter den Klarlack gelegt. Uni braucht Deckkraft aus der Pigmentierung, Effekt die parallele Plättchenorientierung — heute überwiegend wässrig.

**Stichwörter:** Basislack, Uni-Basislack, Effektbasislack, Aluminiumpigment, Perlglanzpigment, Interferenzpigment, Iriodin, Xirallic, Flop, Goniochromie, Nass-in-Nass, Wasserbasislack, 1K physikalisch trocknend, PU-Dispersion, Acrylat-Copolymer, Deckvermögen, Automobillackierung, Rheologie, Plättchenorientierung, Schichtdicke, ESTA
*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur*

## Übungsblatt Ü-114 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**
Erklären Sie, wie beim Effektbasislack der Hell-Dunkel-Flop zustande kommt und wodurch man ihn steuert.

**Effektpigmente:** Effektbasislacke enthalten plättchenförmige Aluminium- oder Perlglanzpigmente.
**Flop:** Der Hell-Dunkel-Flop entsteht durch die Orientierung dieser Plättchen im Film; je nach Blickwinkel wird unterschiedlich viel Licht reflektiert.
**Steuerung:** Dünner Auftrag und eine passend eingestellte Rheologie legen die Plättchen parallel zur Oberfläche — das erzeugt den gewünschten Effekt.
**Bezug wässrig:** Bei Wasserbasislacken ist die Rheologiesteuerung besonders wichtig, weil Wasser langsamer verdunstet.
*Bewertung: Die Antwort verknüpft Plättchenorientierung mit dem Flop und nennt dünnen Auftrag und Rheologie als Steuergrößen.*

**Frage 2** **(Berechnung, 10 Punkte)**
Ein Wasserbasislack (nfA 20 %, Dichte des Nasslacks 1,0 g/cm³) wird mit einer Nassauftragsmenge von 100 g/m² appliziert. Berechnen Sie die Trockenschichtdicke, wenn die Trockenfilmdichte 1,3 g/cm³ beträgt.

**Festkörper je m²:** 100 g/m² · 0,20 = 20 g/m² Trockenmasse
**Trockenvolumen:** V = 20 g / 1,3 g/cm³ = 15,38 cm³ je m²
**Umrechnung auf Dicke:** 1 m² = 10 000 cm²; d = 15,38 cm³ / 10 000 cm² = 0,001538 cm
**Ergebnis:** d = 0,001538 cm = 15,4 µm — eine typische Basislack-Schichtdicke.
*Bewertung: Die Kette Nassmasse → Festkörper → Volumen → Dicke ist sauber, und das Ergebnis liegt im typischen Basislackbereich.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**

Bei einem Uni-Basislack in kräftigem Rot ist das Deckvermögen zu gering, aber die Schichtdicke lässt sich wegen der Nass-in-Nass-Applikation nicht beliebig erhöhen. Wie lösen Sie das?

**Problem:** Höhere Schichtdicke würde bei Nass-in-Nass zu Läufern und Kochern führen, ist also keine Option.

**Lösung:** Das Deckvermögen über die Pigmentierung verbessern — deckstärkere oder besser dispergierte Buntpigmente, gegebenenfalls eine angepasste Pigment-Volumen-Konzentration.

**Hinweis:** Zusätzlich kann ein farblich passender Füller das Deckvermögen des Aufbaus unterstützen.

*Bewertung: Die Antwort erkennt die Schichtdickengrenze und lenkt richtig auf die Pigmentierung statt auf mehr Schichtdicke.*

# L-115 · Automobil-Klarlacke

*Die letzte Schicht: Glanz, Wetter-, Chemikalien- und Kratzbeständigkeit*

**Wahlqualifikation** · B 7 · B 3

Der Klarlack schützt den Basislack und gibt Glanz. Von 1K-Acrylat/Melamin über 2K-PUR bis Pulver- und Wasserklarlack entscheiden Wetter-, Säure- und Kratzbeständigkeit — Letztere zunehmend über Nanopartikel.

## Aufgabe des Klarlacks

Der Klarlack ist die letzte, sichtbare Schicht des Aufbaus (siehe L-111). Er schützt den Basislack vor Bewitterung, Chemikalien und Kratzern und liefert den Tiefenglanz. Seine Beständigkeit bestimmt maßgeblich, wie lange die Lackierung schön und intakt bleibt.

## Die Systeme — OEM-Standard und Alternativen

OEM-Standard heute ist lösemittelhaltiger High-Solid-Klarlack — entweder als 1K-Acrylat/Melamin (HMMM, säurekatalysiert, HS ≥ 55 % nfA) oder als 2K-PUR (OH-Acrylat + aliphatisches oder cycloaliphatisches Polyisocyanat, z. B. HDI-Trimer oder IPDI-Trimer). Wässrige Klarlacke existieren und werden in einzelnen Anlagen eingesetzt, sind aber kein flächendeckender OEM-Standard. Reparaturklarlack (Refinish) ist nahezu durchgängig lösemittelhaltiger 2K-PUR; wässrige Refinish-Klarlacke gibt es, sie sind aber Nische.

- 1K-Acrylat/Melamin: einfachere Verarbeitung (keine Topfzeit), gut für Hochvolumenlinie; Säurekatalysator (p-Toluolsulfonsäure) senkt die Vernetzungstemperatur.
- 2K-PUR: sehr hohes Beständigkeitsniveau (Wetter, Chemikalien, Kratzer) bei geeigneter Formulierung; Nachteil: Topfzeit, Isocyanat-Gesundheitsrisiko.
- Pulverklarlack auf Basis glycidylfunktioneller Acrylatharze (GMA-Acrylat, siehe L-96): völlig lösemittelfrei, Overspray rückführbar — bei BMW ab 1997 im Serieneinsatz auf kompletten Karosserien. Grenzen: Verlauf und Oberflächenstruktur, höhere Mindestschichtdicke, aufwendiger Farbwechsel; heute nur noch vereinzelt eingesetzt.
- Wasserklarlack: reduzierte Emissionen, aber film-physikalisch anspruchsvoll, wenig verbreitet.

## Reale Rohstoffdaten: aliphatisches Polyisocyanat

Covestro gibt für Desmodur N 3300, ein typisches aliphatisches Polyisocyanat der 2K-PUR-Klarlackchemie, laut Produktdatenblatt einen NCO-Gehalt von rund 21,8 %, eine Viskosität von rund 3.000 mPa·s bei 23 °C und ein NCO-Äquivalentgewicht von rund 193 g/Äq. an. Auf der Harzseite liefert etwa BASF mit Joncryl 500 ein OH-funktionelles Acrylatharz, dessen OH-Zahl zusammen mit dem NCO-Gehalt des Härters (z. B. Basonat HI 100 NG) das Mischungsverhältnis festlegt. Solche Kennzahlen bestimmen die exakte Mischungsstöchiometrie (siehe Rechner „Härterberechnung“); ein Produktdatenblatt allein macht daraus aber noch keinen fertigen Klarlack.

## Reaktionsgleichung Standard-Klarlack

2K-PUR-Klarlack (Polyaddition, keine Spaltprodukte):
OH-funktionelles Acrylatharz (OH-Zahl 120–160 mg KOH/g):
R–OH (Acrylat) + O=C=N–R' (aliphatisches Isocyanat) → R–O–CO–NH–R' (Urethanbindung)
Das Isocyanat ist ein aliphatisches HDI-Trimer (Desmodur N 3300) oder ein cycloaliphatisches IPDI-Trimer (Isophorondiisocyanat-Isocyanurat, z. B. Desmodur Z 4470). Stöchiometrie: NCO:OH = 1,0–1,2 (leichter Isocyanatüberschuss für vollständige OH-Umsetzung).

1K-Acrylat/Melamin-Klarlack (Kondensation, Methanol als Spaltprodukt):
R–OH (Acrylat) + $CH_3O–CH_2–N<$ (HMMM-Melamin) → $R–O–CH_2–N<$ + $CH_3OH$
Säurekatalysator (z. B. p-Toluolsulfonsäure, 0,5–1 % auf Harz) senkt die Vernetzungstemperatur von ~180 °C auf ~140 °C.
Das Methanol muss aus dem Film entweichen — deshalb Ofenemissionen erfassen (31. BImSchV, RTO).

## Wetterbeständigkeit

Für die Bewitterung wählt man vergilbungsarme, cycloaliphatische Bausteine. UV-Absorber wie Hydroxyphenyltriazine fangen UV-Licht ab, sterisch gehinderte Amine (HALS) unterbrechen den radikalischen Abbau. Fehlt dieser Schutz, drohen Rissbildung im Klarlack und Schäden bis in den Basislack.

## Kratzfestigkeit und Nanopartikel

Kratzer entstehen mechanisch (Waschanlage, Äste). Zwei Strategien:
1. Hohe Vernetzungsdichte: höhere Funktionalität bzw. niedrigeres Äquivalentgewicht der Harze — mehr Vernetzungsstellen je Molekül → härterer Film. Der NCO-Überschuss von 1,0–1,2 dient dagegen der vollständigen OH-Umsetzung, nicht der Härtesteigerung.
2. Nanopartikel-Einbau: kolloidale $SiO_2$-Partikel, Größe 5–50 nm — oberflächenmodifizierte Kieselsole (z. B. Nanocryl-/Nanopox-Typen) oder ORMOSIL (organisch modifiziertes Siliziumdioxid). Pyrogene Kieselsäuren wie Aerosil® R 972 gehören nicht hierher: Sie liegen als Aggregate vor, wirken als Rheologie- und Mattierungsadditiv und würden den Klarlack eintrüben.
Zwei Typen:
• Unfunktionalisiertes kolloidales $SiO_2$: physikalisch in der Matrix eingebettet, keine kovalente Bindung, trotzdem Härtesteigerung durch nanomechanische Verstärkung.
• Funktionalisiertes $SiO_2$ (ORMOSIL): Oberfläche mit Methacrylat- oder Epoxidgruppen modifiziert → kovalente Einbindung in das Polymernetzwerk beim Vernetzen; festere Anbindung, weniger Partikelaggregation.
Härte vs. Sprödigkeit und Schleifbarkeit: $SiO_2$ erhöht die Pencil-Härte und Kratzeindringhärte messbar. Bei zu hohem $SiO_2$-Anteil wird der Film jedoch spröder und schwerer zu schleifen — bekannter Zielkonflikt im Refinish: hoch nanopartikelgefüllte OEM-Klarlacke lassen sich schlechter schleifen und polieren, weshalb Reparaturklarlacke eigene Formulierungen ohne oder mit weniger $SiO_2$ benötigen. Elastische Flexibilisierungssegmente (weiche Polyolbausteine im Acrylat) mildern diesen Kompromiss.
Rückfedernde Netzwerke (Self-Healing): Sehr flexible, vernetzte Acrylate können leichte Mikrokratzer bei Wärme (Sonneneinstrahlung) teilweise zurückfedern — spezielle Eigenschaft bestimmter OEM-Klarlacke.

## Applikation und Schichtdicken

Applikation OEM: elektrostatisch, ESTA-Hochrotationszerstäuber; nass in nass auf den vorgelüfteten Wasserbasislack.
Schichtdicke: etwa 30–50 µm TF, Schwerpunkt um 40 µm — Volumenlinien fahren eher am unteren Rand, kratzfeste Premium-Klarlacke am oberen.
Verarbeitungsviskosität: 25–35 s DIN 4/20 °C (lösemittelhaltig); Festkörpergehalt High-Solid ≥ 55 %.
Einbrennen: gemeinsam mit Basislack, 140–160 °C Objekttemperatur, 20–30 min.
Reparaturklarlack (Refinish): HVLP-Pistole; Schichtdicke 50–70 µm TF; Einbrennen forciert 60 °C/30 min oder Raumtemperatur; beschleunigt wird über einen Zinn- oder Bismutkatalysator in der Stammlackkomponente — nicht im Isocyanathärter, das senkt dessen Lagerstabilität.

## Säurebeständigkeit und Einordnung

Saurer Regen greift klassische melaminvernetzte Klarlacke an; 2K-PUR- und angepasste Systeme sind hier beständiger. 2K-PUR gehört damit zu den leistungsfähigen Referenzsystemen (Vor- und Nachteile der einzelnen Systeme siehe Abschnitt Die Systeme).

**Merksatz**

OEM-Klarlack-Standard: lösemittelhaltiger High-Solid 1K-Acrylat/Melamin oder 2K-PUR; wässrig ist Nische. Schichtdicke rund 30–50 µm TF (Schwerpunkt 40 µm); Einbrand 140–160 °C.
Wetterschutz: UV-Absorber + HALS. Kratzfestigkeit: Nanopartikel ($SiO_2$, ORMOSIL) erhöhen Härte — aber: zu viel $SiO_2$ → Sprödigkeit und schlechte Schleifbarkeit im Refinish.

**Stichwörter:** Klarlack, Automobillackierung, 2K-PUR-Klarlack, Acrylat-Melamin, High-Solid, Pulverklarlack, Kratzfestigkeit, Nanopartikel, $SiO_2$, ORMOSIL, UV-Absorber, HALS, Säurebeständigkeit, Wetterbeständigkeit,

cycloaliphatisch, IPDI, HDI, Desmodur N 3300, Desmodur Z 4470, Urethanbindung, Polyaddition, Self-Healing, Schleifbarkeit, Sprödigkeit

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur; Covestro, Desmodur N 3300 Produktdatenblatt; BASF, Joncryl 500 Technical Data Sheet (Rev. 6, Juni 2024); BASF, Basonat HI 100 NG Technical Data Sheet*

## Übungsblatt Ü-115 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Vergleichen Sie den 1K-Acrylat/Melamin-Klarlack mit dem 2K-PUR-Klarlack hinsichtlich Vernetzung, Beständigkeit und Verarbeitung.

**1K-Acrylat/Melamin:** OH-Acrylatharz wird mit Melaminharz säurekatalysiert beim Einbrennen vernetzt; einkomponentig und einfach zu verarbeiten.

**2K-PUR:** OH-Acrylat wird mit aliphatischem Polyisocyanat (HDI- oder IPDI-Trimer) vernetzt; kann eine sehr dichte und beständige Filmstruktur erzeugen, abhängig von der Formulierung.

**Beständigkeit:** 2K-PUR ist bei Kratz-, Chemikalien- und Säurebeständigkeit überlegen; melaminvernetzte Klarlacke sind empfindlicher gegen sauren Regen.

**Verarbeitung:** 2K-PUR hat eine begrenzte Topfzeit; 1K-Systeme sind in der Handhabung einfacher.

*Bewertung: Die Antwort stellt beide Systeme entlang Vernetzung, Beständigkeit und Verarbeitung gegenüber und trifft die Säurebeständigkeit korrekt.*

**Frage 2** **(Berechnung, 10 Punkte)**

Ein OH-Acrylatharz (OH-Zahl 140 mg KOH/g) soll mit einem Polyisocyanat (NCO-Gehalt 21 %) im Verhältnis NCO:OH = 1:1 vernetzt werden. Berechnen Sie den Härterbedarf je 100 g Harzfestkörper.

**Stoffmenge OH:** n(OH) = m · OH-Zahl / 56100 = 100 · 140 / 56100 = 0,2496 mol

**NCO-Äquivalentmasse:** aus dem NCO-Gehalt: 42,02 / (21/100) = 200,1 g/Äq. (Formel aus L-58)

**Ansatz:** Für NCO:OH = 1:1 gilt n(NCO) = n(OH), also m(Härter) = n(OH) · NCO-Äquivalentmasse

**Ergebnis:** m(Härter) = 0,2496 Äq. · 200,1 g/Äq. = 49,9 g je 100 g Harzfestkörper

*Bewertung: OH-Zahl korrekt über 56100 in Stoffmenge umgerechnet und die NCO-Äquivalentmasse aus dem NCO-Gehalt bestimmt; Ergebnis rund 50 g Härter.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**

Kunden beklagen matte, feine Kratzer nach der Waschanlage. Welche zwei rezepturseitigen Ansätze verbessern die Kratzfestigkeit eines Klarlacks?

**Ansatz 1:** Höhere Vernetzungsdichte einstellen — ein dichteres Netzwerk widersteht mechanischer Beanspruchung besser.

**Ansatz 2:** Nanopartikel wie Siliziumdioxid kovalent in die Filmmatrix einbinden; sie erhöhen die Kratzfestigkeit gezielt.

**Ergänzung:** Elastische Netzwerke lassen leichte Kratzer teilweise zurückfedern, sodass sie weniger sichtbar sind.

*Bewertung: Die Antwort nennt zwei zutreffende rezepturseitige Hebel (höhere Vernetzungsdichte, Nanopartikel-Einbau) und begründet ihre Wirkung; der Hinweis auf elastisch rückstellende Netzwerke ist Zusatzleistung.*

# L-116 · Autoreparaturlacke (Refinish)

*Warum bei niedriger Temperatur — Systemaufbau und Trocknung*

**Wahlqualifikation** · B 7 · B 3

Autoreparaturlacke müssen in der Regel bei für das montierte Fahrzeug geeigneten Temperaturen härten; deshalb werden häufig luft- oder forciertrocknende 2K-PUR-Systeme eingesetzt.

## Warum nicht einbrennen

Das montierte Fahrzeug enthält Kunststoffe, Glas, Elektronik und Dichtungen — es verträgt keine 140 °C. Repariert wird meist am Einzelstück in der Werkstatt. Deshalb härten Reparaturlacke bei Raumtemperatur oder forciert bei etwa 60 °C (auch mit Infrarot-Strahlern), nicht im Einbrennofen der Serienlackierung. Genau das ist der Kernunterschied zur OEM-Serienlackierung (siehe L-111).

## Warum 2K-PUR dominiert

Bei niedriger Temperatur muss die Vernetzung chemisch von selbst ablaufen. 2K-PUR (OH-Bindemittel plus Isocyanathärter, siehe L-25 und L-27) härtet schon bei Raumtemperatur oder leicht erhöht zu harten, wetter- und chemikalienbeständigen Filmen — ideal für Füller und Klarlack. Für einfachere Arbeiten gibt es daneben 1K-Systeme.

## Schichtaufbau und Grundierungswahl

Typischer Reparaturaufbau: Altlack anschleifen und reinigen → Grundierung auf blankem Metall → schleifbarer Reparaturfüller (Primer-Surfacer) → Wasserbasislack → 2K-Klarlack.

Zwei Grundierungstypen für blankes Metall:

1. Reaktionsgrundierung (Washprimer): Bindemittel ist PVB (Polyvinylbutyral) in Alkohol, 2K-System mit Phosphorsäure-Härter. Die Phosphorsäure ätzt das Metall mikroskopisch an und bildet mit dem Substratmetall eine dünne Metallphosphat-Schicht — auf Stahl Eisenphosphat, auf Aluminium Aluminiumphosphat, auf verzinktem Stahl Zinkphosphat. Diese Konversionsschicht trägt die chemische Haftung; viele chromatfreie Washprimer enthalten außerdem Zinkphosphat als Korrosionsschutzpigment (siehe L-100). Film 5–10 µm dünn. Wichtig: nicht schleifen (Phosphatschicht würde zerstört), direkt mit Füller überarbeiten. Einsatz: blanker Stahl, Aluminium, verzinkter Stahl, wenn schnell weitergearbeitet werden muss.
2. Epoxidgrundierung (2K-EP-Primer): EP-Harz (Bisphenol A oder F) + Polyaminhärter (Addukt). Härtung bei RT, Schichtdicke 30–60 µm, gut schleifbar nach 2–4 h. Ausgezeichneter Korrosionsschutz und Haftung. Einsatz: tiefe Schäden bis zum blanken Metall, Schweißnähte, stark korrodierte Bereiche, wo maximaler Korrosionsschutz gefordert ist.

Unterschiede auf einen Blick: Washprimer = dünn, chemische Metallhaftung, nicht schleifbar. EP-Grundierung = dick, mechanische + chemische Haftung, schleifbar, besser für Korrosionsschutz.

## Wasserbasislack, Klarlack und VOC — was ist heute was

Fahrzeugreparaturlacke unterliegen der ChemVOCFarbV (Deutschland) bzw. der Decopaint-Richtlinie (EU) mit produktkategorie-spezifischen VOC-Grenzwerten (siehe L-176).

- Basislack: wässrig — im europäischen Refinish-Markt flächendeckender Standard (fast alle Basislacksysteme). Wichtig: OEM-Wasserbasislacke sind 1K-Systeme (physikalisch trocknend); im Refinish gibt es inzwischen 2K-Wasserbasislacke (PU-Dispersion + wasserverdünnbares Isocyanat) für bessere Eigenvernetzung.
- Reparaturfüller: überwiegend lösemittelhaltiger oder High-Solid-2K-PUR (Low-VOC); wasserbasierende Füller verfügbar, aber weniger verbreitet als im OEM.
- Klarlack: lösemittelhaltiger 2K-PUR ist und bleibt Standard im Refinish — wässrige Klarlacke sind Nische. Der Grund: Wasser verdunstet langsamer, Glätte und Verlauf sind im lösemittelhaltigen System leichter zu kontrollieren.

## Beschleuniger: Forciertrocknung und Katalysatoren

2K-PUR-Lacke reagieren bei Raumtemperatur, aber ohne Beschleunigung langsam — volle Durchhärtung in 12–24 h, für eine Werkstatt unwirtschaftlich. Praxis:

• Katalysator in der Stammlackkomponente: DBTL (Dibutylzinndilaurat) ist der klassische Zinnkatalysator; er senkt die Aktivierungsenergie der NCO+OH-Reaktion deutlich. Dosierung ca. 0,01–0,1 % auf den Festkörper der Stammlackkomponente (im Isocyanathärter würde er dessen Lagerstabilität verschlechtern). Achtung: DBTL ist als reproduktionstoxisch der Kategorie 1B eingestuft (H360FD — kann die Fruchtbarkeit beeinträchtigen und das Kind im Mutterleib schädigen; zusätzlich STOT RE 1, H372) und unterliegt zunehmendem Regulierungsdruck (REACH). Moderne Formulierungen ersetzen ihn durch Bismut-Neodekanoat (Bi-Katalysator) — vergleichbare Aktivität, deutlich besseres toxikologisches Profil.

• Forciertrocknung (60 °C in der Spritzkabine nach Ablüftphase): beschleunigt die Vernetzung erheblich; polierbereit nach 30–45 min statt nach Stunden.

• Schnellhärter-Formulierungen: Kombinationen aus HDI- und IPDI-Trimer ergeben bei RT in 2–4 h polierbare Filme — das IPDI erhöht die Glasübergangstemperatur und damit die frühe Polierfestigkeit; reaktiver gegenüber OH-Gruppen ist es nicht (siehe L-26).

Faustregel: Katalysator + 60 °C Forcierung = Standardprozess im Karosserie-Fachbetrieb.

## Chemie: Polyaddition bei Raumtemperatur

'Lufttrocknend' bedeutet im Refinish nicht oxidative Trocknung (wie beim Alkydharz, L-16), sondern chemische Vernetzung ohne externen Ofen:

2K-PUR-Polyaddition: R–OH (OH-Acrylatharz) + O=C=N–R' (aliphatisches Isocyanat) → R–O–CO–NH–R' (Urethanbindung).

Die Reaktion läuft spontan ab, sobald A- und B-Komponente gemischt sind. Das Resultat ist ein dreidimensional vernetztes Polyurethannetzwerk — kein physikalisch getrockneter, wieder lösbarer Film.

Zum Vergleich: 1K-Alkydlack = oxidative Trocknung ($O_2$ aus der Luft vernetzt Doppelbindungen in den Fettsäuren) — langsamer, weniger chemikalienbeständig. 1K-Acryllack = physikalische Trocknung (Lösemittelverdunstung) — schnell, aber nicht vernetzt. Nur 2K-PUR erreicht bei Niedertemperatur das Beständigkeitsniveau der OEM-Einbrennlacke.

## Gesundheit und Sicherheit

Die Isocyanathärter sind atemwegssensibilisierend (Gefahr von Isocyanat-Asthma). Isocyanathaltige Spritzapplikationen erfordern geeignete technische und persönliche Schutzmaßnahmen nach Gefährdungsbeurteilung und den Vorgaben des Produkts; Spritzarbeiten erfolgen unter geeigneter Absaugung. Lösemittel und Reiniger werden nach Gefahrstoffrecht gehandhabt.

**Merksatz**

Reparaturlack = 2K-PUR-Polyaddition bei RT oder forciert 60 °C (kein Ofen). Aufbau: Washprimer oder EP-Grundierung → Reparaturfüller → Wasserbasislack (1K oder 2K) → lösemittelhaltiger 2K-Klarlack. Beschleuniger: Bismut-Katalysator (DBTL zunehmend abgelöst) + Forciertrocknung 60 °C/30 min. Isocyanathärter = Atemwegssensibilisierung → Atemschutz!

**Stichwörter:** Autoreparaturlack, Refinish, Niedertemperatur, forcierte Trocknung, 2K-PUR, Polyaddition, Urethanbindung, Washprimer, Reaktionsgrundierung, PVB, Phosphorsäure, EP-Grundierung, Epoxidgrundierung, Füller, Wasserbasislack, 1K physikalisch, 2K Wasserbasislack, Klarlack, DBTL, Bismut-Katalysator, Decopaint, ChemVOCFarbV, Isocyanat-Asthma

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur; ChemVOCFarbV; Covestro, Uralac 7136 E-70 Produktdatenblatt*

## Übungsblatt Ü-116 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**
Warum werden Autoreparaturlacke nicht wie OEM-Lacke eingebrannt, und welche Folge hat das für die Bindemittelwahl?

**Kein Ofen:** Das montierte Fahrzeug enthält Kunststoffe, Glas, Elektronik und Dichtungen — es verträgt keine Einbrenntemperaturen um 140 °C.
**Niedertemperatur:** Repariert wird bei Raumtemperatur oder forciert bei etwa 60 °C (auch mit IR-Strahlern).
**Folge:** Die Vernetzung muss bei niedriger Temperatur von selbst ablaufen — deshalb dominiert 2K-PUR (OH plus Isocyanat), das schon bei RT hart und beständig aushärtet.
*Bewertung: Der fehlende Ofen (empfindliches Fahrzeug), die Niedertemperaturhärtung und die daraus folgende 2K-PUR-Wahl werden verknüpft.*

**Frage 2** **(Verständnis, 6 Punkte)**
Welche besondere Gesundheitsgefahr geht vom 2K-PUR-Reparaturlack aus und wie schützt man sich?

**Gefahr:** Die Isocyanathärter sind atemwegssensibilisierend (Isocyanat-Asthma).
**Schutz:** Nur in der Lackierkabine mit Frischluft-/Atemschutz spritzen, Spritznebel absaugen; Sicherheitsdatenblatt beachten.
*Bewertung: Die Atemwegssensibilisierung durch Isocyanate und der Atemschutz in der Kabine werden benannt.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**
Nennen Sie den typischen Schichtaufbau einer Reparaturlackierung auf angeschliffenem Altlack.

**Grundierung:** Bei blankem Metall eine Reaktions-/Epoxidgrundierung für Haftung und Korrosionsschutz.
**Füller:** Ein schleifbarer Füller (Primer-Surfacer) egalisiert und schafft den Untergrund.
**Basis + Klar:** Basislack (Uni/Effekt) für Farbe und Effekt, darüber 2K-Klarlack für Glanz und Schutz.
*Bewertung: Grundierung, Füller, Basislack und Klarlack werden in richtiger Reihenfolge mit ihrer Funktion genannt.*

# L-117 · Farbtonangleich und Beilackierung

*Den vorhandenen Farbton treffen und unsichtbar reparieren*

**Wahlqualifikation** · B 7 · B 3

Beim Reparaturlackieren soll der neue Farbton möglichst genau an den gealterten Altlack angepasst werden — dafür dienen Mischsysteme, Farbmessung und die Technik der Beilackierung.

## Das Problem: den Ton treffen

Der Altlack ist gealtert und weicht oft vom Originalton ab; dazu kommt die Serienstreuung der Farbtöne. Ein nur nach Farbcode gemischter Ton passt deshalb selten exakt. Die Abweichung wird als Farbabstand $\Delta E^*ab = \sqrt{(\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2})}$ gemessen (Details siehe L-163), der möglichst klein bleiben soll.

## Mischsysteme — wer mischt wie

Große Karosserie-Fachbetriebe haben eigenes Mehrwinkel-Spektrophotometer + vollständige Mischbank (je Lacklinie rund 60–120 Mischlacke in Rührdosen, automatische Dosierwaage). Die Software (z. B. Standox Standowin iQ, Glasurit Color Online, Sikkens MIXIT mit Automatchic-Messgerät) liest den gemessenen Farbton, schlägt aus der Herstellerdatenbank die beste Rezeptur oder Variante vor und druckt das Einwaageprotokoll. Gemischt wird im Betrieb selbst — sofort einsatzbereit.

Kleinere Betriebe ohne Vollausstattung: Farbcode + Fahrzeug-ID → Bestellung beim Lackhändler → der Händler mischt per Software aus seiner Mischbank und liefert die fertig getönte Dose (häufigste Praxis kleiner Werkstätten).

Varianten im System: Ein Farbcode hat oft 5–15 Rezeptvarianten (Serienstreuung bei OEM-Lackierung, Karosserieteil vs. Stoßstange, Alterung). Das Spektrophotometer wählt die passende Variante — besser als reines Farbcode-Nachschlagen.

Für Effektlacke: Mehrwinkel-Messung bei 15°, 45°, 110° (gegenüber dem Glanzwinkel) erfasst Flop und Textur der Metallic/Perleffekte — ein Einwinkelgerät reicht hier nicht.

Eine Ausspritzkarte (Musterblech) sichert den Ton vor der eigentlichen Reparatur ab.

## Verblenden (Blending) — Schritt für Schritt

Das Problem: Selbst bei perfekt getroffenen Farbtönen entsteht an der Kante zwischen frisch lackiertem und altem Bauteil eine sichtbare Linie — neuer Klarlack hat andere Textur als gealterter Altklarlack; bei Metallic-Effektlacken ändert sich der Flop minimal mit jeder Schichtdickenabweichung.

Lösung — Verblenden Schritt für Schritt:

1. Schadstelle ausbessern, Füller anschleifen, Untergrund fertigstellen.
2. Basislack auf der Reparaturzone applizieren; danach die Spritzdistanz erhöhen, Lackmenge reduzieren und Blendzusatz (spezielle Verdünnung, die den BL transparent macht) beimischen → der Basislack läuft mit abnehmendem Farbtonanteil 10–20 cm in das Nachbarbauteil (z. B. Tür) hinein. Keine harte Kante, sondern eine breite Ausblendzone.
3. Klarlack über das gesamte reparierte Bauteil ziehen und die Basislack-Ausblendzone im Nachbarbauteil vollständig überdecken — der Klarlack reicht also weiter als der Basislack (Richtwert 25–40 cm, bzw. bis zur nächsten Sicke, Kante oder Bauteilgrenze). Nur so liegt die Klarlackkante außerhalb der Ausblendzone, und es bleibt kein ungeschützter Basislack stehen.
4. Klarlackkante anpolieren (Stufenpolitur): Den Übergang von neuem zu altem Klarlack auspolieren, bis keine Höhenstufe mehr fühlbar ist.

Ergebnis: keine sichtbare Reparaturkante. Bei Metallic besonders wichtig, weil 5 µm Schichtdickenunterschied im Basislack den Flop und damit die Helligkeit des Tons sichtbar verändern.

## Spot-Repair

Kleine Schäden wie Steinschläge oder Kratzer werden punktuell instand gesetzt (Spot-Repair) — das ist schneller und materialsparender als eine Vollreparatur des Bauteils.

**Merksatz**

Der Altlack ist gealtert → nach Code allein trifft man den Ton selten. Mischbank + Spektralphotometer (Mehrwinkel für Effekt) + Ausspritzkarte liefern die passende Rezeptur; Beilackierung/Blending macht den Rest-Unterschied unsichtbar.

**Stichwörter:** Farbtonangleich, Farbcode, Variante, Mischbank, Spektralphotometer, Mehrwinkelmessung, Ausspritzkarte, Beilackierung, Blending, Spot-Repair, Serienstreuung
*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur*

## Übungsblatt Ü-117 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**
Warum trifft ein nur nach Farbcode gemischter Ton den vorhandenen Lack selten exakt, und wie löst man das?

**Alterung:** Der Altlack ist gealtert und weicht vom Originalton ab; dazu kommt die Serienstreuung.
**Messung:** Ein Spektralphotometer (bei Effektlacken ein Mehrwinkelgerät) misst den Altlack und schlägt die beste Rezeptur/Variante vor.
**Absicherung:** Eine Ausspritzkarte prüft den Ton vor der eigentlichen Reparatur; die Abweichung wird als ΔE beurteilt (siehe L-163).
*Bewertung: Alterung/Serienstreuung als Ursache sowie Spektralphotometer und Ausspritzkarte als Lösung werden genannt.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**
Ein Spektralphotometer vergleicht die Ausspritzkarte mit dem Altlack und liefert $\Delta L^* = -0{,}6$, $\Delta a^* = +0{,}9$ und $\Delta b^* = -1{,}2$. Berechnen Sie den Farbabstand $\Delta E^*ab$ und beurteilen Sie, ob der Ton ohne Beilackierung übernommen werden kann.

**Formel:** $\Delta E^*ab = \sqrt{(\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2})}$
**Einsetzen:** $\Delta E^*ab = \sqrt{(0{,}6^2 + 0{,}9^2 + 1{,}2^2)} = \sqrt{(0{,}36 + 0{,}81 + 1{,}44)} = \sqrt{2{,}61}$
**Ergebnis:** $\Delta E^*ab = 1{,}62$
**Beurteilung:** Ein ΔE um 1 liegt bei geübten Beobachtern etwa an der Wahrnehmbarkeitsgrenze. 1,62 ist damit sichtbar — vor allem an einer direkt angrenzenden Fläche, wo beide Töne unmittelbar nebeneinanderliegen und das Auge sehr empfindlich vergleicht.
**Konsequenz:** Entweder die Rezeptur über eine Variante nachstellen oder — der übliche Weg — beilackieren: Der Basislack wird in die Nachbarfläche ausgelaufen und verblendet, sodass es keine harte Kante gibt, an der sich die Töne vergleichen lassen.
**Hinweis:** Feste Toleranzgrenzen gibt es nicht allgemein; sie hängen von Hersteller, Bauteil und Farbton ab. Bei Effektlacken ist zusätzlich der Flop über mehrere Messwinkel zu beurteilen — ein einzelner ΔE-Wert reicht dort nicht.
*Bewertung: Die ΔE-Formel wird korrekt angewendet. Für die volle Punktzahl muss der Wert praktisch gedeutet werden — sichtbar an der angrenzenden Fläche, deshalb Beilackierung — und bei Effektlacken die Mehrwinkelbetrachtung über mehrere Messwinkel genannt werden.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**
Was versteht man unter Beilackierung (Blending) und warum ist sie gerade bei Effektlacken wichtig?

**Prinzip:** Der Basislack läuft in die angrenzende Fläche aus und wird dort verblendet; der Klarlack wird über das ganze reparierte Bauteil gezogen und muss die Basislack-Ausblendzone im Nachbarbauteil vollständig überdecken — er reicht also weiter als der Basislack, damit kein ungeschützter Basislack stehenbleibt.
**Zweck:** Ein kleiner, unvermeidlicher Farbunterschied wird so unsichtbar.
**Effektlacke:** Bei Metallic/Perlglanz fällt schon eine geringe Abweichung durch den Flop auf — Blending gleicht das weich aus.
*Bewertung: Das Blending-Prinzip und der Grund für seine Bedeutung bei Effektlacken werden erklärt.*

# L-118 · Polyesterspachtel (UP-Spachtel)

*Dicke, schnell schleifbare Füllschicht aus UP-Harz und Härterpaste*

**Prüfungsteil 1** · A 8.3 · A 10

Polyesterspachtel bestehen typischerweise aus einem ungesättigten Polyesterharz mit Füllstoffen und Reaktivverdünner; sie härten mit einem organischen Peroxid-Initiator bei Umgebungstemperatur aus — zu einer harten, schnell schleifbaren Schicht mit möglichst geringem Volumenschrumpf zum Ausfüllen von Unebenheiten.

## Was ein Spachtel leisten muss

An Spachtelmassen für metallische Untergründe werden besondere Anforderungen gestellt: hohe Füllkraft und gute Abdeckung von Unebenheiten, geringer Volumenschrumpf, schnelle Aushärtung bei noch ausreichender Topfzeit, hohe Härte, gute Haftung, schon kurz nach der Verarbeitung schleifbar und mit den meisten Decklacken überlackierbar.

## Bindemittel und Härtung

Das Bindemittel ist ein ungesättigtes Polyesterharz, gelöst im Reaktivverdünner Styrol (Aufbau und Härtung siehe L-23). Gehärtet wird mit einer Härterpaste: einem Peroxid als Initiator, versetzt mit einem Weichmacher (Phlegmator) zur Entschärfung und einem Farbstoff. Die Farbe der Paste macht sichtbar, ob sie homogen eingemischt ist. Der zum Dibenzoylperoxid passende Beschleuniger — ein tertiäres aromatisches Amin, meist N,N-Dimethyl-p-toluidin — steckt bereits im Harz (aminvorbeschleunigtes UP-Harz); Cobaltbeschleuniger gehören dagegen zu den Ketonperoxid-Systemen der Laminierharze. Peroxid und Beschleuniger bleiben bis zum Ansetzen getrennt.

## Füllstoffe für Spachtel

Verwendet werden preisgünstige anorganische Pigmente und Füllstoffe: Talkum für gute Haftung und hervorragende Schleifbarkeit — Talkum (Magnesiumhydroxysilicat) besitzt eine lamellare Kristallstruktur; die Schichtpakete gleiten beim geringsten Schereintrag aneinander vorbei (Mohs-Härte 1, das weichste Mineral). Beim Schleifen brechen die Talkum-Aggregate entlang dieser Gleitebenen sauber auf: Das Schleifpapier schneidet gleichmäßig, verstopft nicht und erzeugt ein feines, gleichmäßiges Korn. Weitere Füllstoffe sind gefälltes Bariumsulfat (Blancfixe) mit feinen, gedrungen-isometrischen Teilchen und niedriger Ölzahl (hohe Packungsdichte bei geringem Bindemittelbedarf), Carbonate zur Einsparung von Weißpigment und Quarzmehl für höhere Härte. Zur Färbung genügen Ruß, Titandioxid oder Eisenoxide.

## Volumenschrumpf, Vorbehandlung, Applikation

Weil sehr dicke Schichten aufgetragen werden, muss der Volumenschrumpf gering sein — sonst drohen Einfallstellen und Spannungsrisse über der gespachtelten Fläche; er lässt sich über Schichtdickenmessung oder aus Nass- und Trockenfilmdichte bestimmen. Vor dem Spachteln wird ausgebeult, geschliffen (grob P80–P120, Nachschliff P150–P180) und mit Siliconentferner gereinigt. Aufgetragen wird mit dem Japan- oder Flächenspachtel in einem oder mehreren Zügen, nach der Härtung wird nachgeschliffen. Hochviskose Massen werden im Vakuumdissolver dispergiert; geeignete Misch- und Dispergierbedingungen können Lufteinschlüsse reduzieren, zu hoher Schereintrag bzw. ungeeignete Aggregate können jedoch unerwünschte Erwärmung oder Prozessprobleme verursachen.

## Umwelt und Sicherheit

Organische Peroxide sind explosionsfähig und empfindlich gegen Schlag und Wärme; sie dürfen niemals unmittelbar mit dem Beschleuniger oder anderen Reduktionsmitteln vermischt werden, weil dabei ein hochexplosives Gemisch entsteht. Styrol hat einen niedrigen Arbeitsplatzgrenzwert und riecht stark — lösemittelarm arbeiten und gut lüften. Beim Schleifen Atemschutz gegen Staub tragen.

## UP-Karosseriespachtel — Rezeptur mit Produktnamen

```
Praxisrezeptur eines UP-Karosseriespachtels nach Müller/Poth (Tab. IV-1.3);
   Verarbeitungszeit 20 °C: 4–6 min (bei 3 % Härter) bis 6+ min (bei 1,5 %); schleifbar
   nach 10–20 min:

Komponente A – Spachtelmasse           Gew.-%
UP-Harz Roskydal K 40 T (allnex)       30,0   (65 % in Styrol; hochreaktiv,
  aminvorbeschleunigt, SZ max. 15 mg KOH/g)
Additiv Benetzung                        0,5
Additiv Rheologie                        1,0
Pigment anorganisch                      2,5
Talkum (Korngröße < 50 µm)             44,0
Füllstoffe Dolomit/Carbonat/Schwerspat  20,0
Styrol (Viskositätseinstellung)          2,0
Summe A                                100,0

Komponente B – Härterpaste             Gew.-%
BPO-Paste 50 % in Weichmacher        1,5–3,0   (bezogen auf Komp. A)

P/B-Verhältnis: (2,5 + 44,0 + 20,0) : (30,0 + 2,0 + 1,0 + 0,5) ≈ 2 : 1.
Mischung: BPO-Paste auf glatter Unterlage mit Spachtel gleichmäßig einarbeiten; homogene
   Farbe zeigt vollständige Mischung an.
Achtung: BPO-Paste (Oxidationsmittel) niemals direkt mit dem Aminbeschleuniger oder einem
   anderen Reduktionsmittel vermischen – Explosionsgefahr! Der Beschleuniger ist in der
   Komponente A bereits enthalten und wird ausschließlich über die Spachtelmasse zugeführt.
Quelle: Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur, Tab. IV-1.3.
```

**Merksatz**

UP-Spachtel = hochgefülltes UP-Harz + Peroxid-Härterpaste (Beschleuniger im Harz). Wichtig sind geringer Volumenschrumpf, schnelle Schleifbarkeit und hohe Füllkraft — und die strikte Trennung von Peroxid und Beschleuniger bis zum Ansetzen.

**Stichwörter:** Polyesterspachtel, UP-Spachtel, Spachtelmasse, Härterpaste, Peroxid, Phlegmator, Aminbeschleuniger, Dimethyl-p-toluidin, Volumenschrumpf, Füllkraft, Talkum, Blancfixe, Quarzmehl, Vakuumdissolver, Schleifbarkeit, Roskydal, BPO-Paste, Karosseriespachtel, Verarbeitungszeit
*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur*

## Übungsblatt Ü-118 — Musterlösungen

**Frage 1** (Verständnis, 8 Punkte)
Nennen Sie vier Anforderungen an einen Polyesterspachtel und erklären Sie, warum ein geringer Volumenschrumpf besonders wichtig ist.

**Anforderungen:** z. B. hohe Füllkraft, geringer Volumenschrumpf, schnelle Schleifbarkeit, hohe Härte, gute Haftung, überlackierbar.

**Warum wenig Schrumpf:** Weil sehr dicke Schichten aufgetragen werden; ein starker Schrumpf würde Einfallstellen und Risse über der gespachtelten Fläche verursachen.

*Bewertung: Mehrere sinnvolle Anforderungen und der Zusammenhang zwischen dicker Schicht und Schrumpf werden richtig erklärt.*

**Frage 2** (Berechnung, 8 Punkte)
Eine Spachtelmasse hat eine Nassfilmdichte von 1,80 g/cm³ und nach dem Aushärten eine Trockenfilmdichte von 1,86 g/cm³. Berechnen Sie den Volumenschrumpf in Prozent.

**Ansatz:** Bei gleicher Masse gilt V = m/ρ, also Schrumpf = 1 − ρ_nass / ρ_trocken.

**Rechnung:** Schrumpf = 1 − 1,80 / 1,86 = 1 − 0,968 ≈ 0,032 = 3,2 %.

*Bewertung: Der Volumenschrumpf wird über die Dichten korrekt zu rund 3,2 % bestimmt.*

**Frage 3** (Anwendung, 6 Punkte)
Warum ist die Härterpaste eines UP-Spachtels eingefärbt, und warum darf das Peroxid nicht unmittelbar mit dem Beschleuniger vermischt werden?

**Farbe:** Die Einfärbung zeigt an, ob die Paste homogen in die Masse eingearbeitet ist; verschwinden die Farbschlieren, ist gut gemischt.

**Trennung:** Peroxid und Beschleuniger/Reduktionsmittel bilden zusammen ein hochexplosives Gemisch; deshalb werden sie erst über die Masse zusammengeführt.

*Bewertung: Sowohl der Zweck der Einfärbung als auch die Explosionsgefahr bei direkter Mischung werden erkannt.*

# L-119 · Glasfaserspachtel

*Faserverstärkter UP-Spachtel für hohe Zug- und Reißfestigkeit*

**Prüfungsteil 1** · A 8.3 · A 10

Ein Glasfaserspachtel ist ein UP-Spachtel, dem Fasern zugesetzt sind. Sie geben der Masse hohe Zug- und Reißfestigkeit, sodass sich größere Löcher und Risse überbrücken lassen.

## Wozu Fasern

Glasfaserspachtel ist ein etabliertes, aktuell eingesetztes Spezialsystem — nicht der Alltagsspachtel, sondern das Mittel der Wahl für mechanisch hoch belastete Stellen: große Löcher und Durchrostungen, GFK-Karosserieteile (Kunststofffahrzeuge, Sportboote) und Stellen, an denen normaler UP-Spachtel zu spröde bricht. Für reguläre Dellen und Schrammen bleibt UP-Spachtel (→ L-118) Standard.

Wird von einer Spachtelmasse hohe mechanische Zug- und Reißfestigkeit verlangt, ist der Zusatz faserförmiger Stoffe vorteilhaft. Verwendet werden Fasern von etwa 0,15 bis 18 mm Länge, anorganisch (z. B. Glasfasern) oder organisch. Grundlage bleibt ein ungesättigtes Polyesterharz in Styrol, gehärtet mit einer Peroxid-Härterpaste (Aufbau und Härtung siehe L-118).

## Packungsdichte

Die Packungsdichte ist der Anteil des ausgefüllten Volumens am Gesamtvolumen einer Füllstoffpackung. Mischt man Teilchen unterschiedlicher Größe, steigt sie, weil kleine Teilchen die Hohlräume zwischen großen ausfüllen. Eine höhere Packungsdichte kann den erforderlichen Bindemittelanteil und die Porosität verringern; die resultierende Wasser- und Gasdurchlässigkeit hängt zusätzlich von Bindemittel, Porenstruktur und Füllstoffoberfläche ab. Als Füllstoff dient u. a. Schwerspat (Bariumsulfat) mit guter Benetzbarkeit und Hitzebeständigkeit.

## Plastizität und Standvermögen

Plastizität bezeichnet ein Fließverhalten mit Fließgrenze: Ohne Scherkraft fließt das Material nicht, erst beim Spachteln sinkt die Viskosität. So hat die Masse hohes Standvermögen und läuft auch an senkrechten Flächen nicht ab, lässt sich aber gut auftragen.

## Fasern einarbeiten, Blasen vermeiden

Zu hoher Schereintrag (z. B. mit dem Dissolver) kann bestimmte Fasern verkürzen oder beschädigen und dadurch die Verstärkungswirkung vermindern; die Empfindlichkeit hängt von Faserart und Prozess ab. Deshalb die Fasern langsam und mit langsam laufenden Aggregaten einrühren. Blasen in der Spachtelschicht entstehen z. B. durch fehlerhafte Vorbehandlung, Restfeuchte oder überlagerte Materialien.

## Umwelt und Sicherheit

Beim Verarbeiten der Glasfasern Staubmaske tragen, um das Einatmen feiner Glasstaub-Partikel zu vermeiden. Für Styrol und die Peroxid-Härterpaste gelten die Hinweise aus L-118: Styrol lösemittelarm und gut belüftet verarbeiten, Peroxid nie unmittelbar mit dem Beschleuniger mischen.

**Merksatz**

Glasfaserspachtel = UP-Spachtel + Fasern für Zug-/Reißfestigkeit zum Überbrücken von Löchern und Rissen. Hohe Packungsdichte spart Bindemittel, Plastizität gibt Standvermögen, Fasern schonend einrühren — und Glasstaub-Schutz nicht vergessen.

**Stichwörter:** Glasfaserspachtel, faserverstärkt, Glasfasern, Zugfestigkeit, Packungsdichte, Schwerspat, Bariumsulfat, Plastizität, Fließgrenze, Standvermögen, Blasenbildung, Glasstaub

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie*

## Übungsblatt Ü-119 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**
Was bewirken die Fasern in einem Glasfaserspachtel, und was versteht man unter der Packungsdichte der Füllstoffe?

**Fasern:** Sie geben hohe Zug- und Reißfestigkeit, sodass größere Löcher und Risse überbrückt werden können.
**Packungsdichte:** Anteil des ausgefüllten Volumens am Gesamtvolumen; durch Mischen verschiedener Teilchengrößen steigt sie und der Bindemittelbedarf sinkt.
*Bewertung: Faserwirkung und der Begriff Packungsdichte werden korrekt erklärt.*

**Frage 2** **(Berechnung, 6 Punkte)**
Ein Glasfaserspachtel wird mit Härterpaste im Massenverhältnis Harz : Härterpaste = 100 : 2,5 angesetzt. Wie viel Härterpaste braucht man für 400 g Harz?

**Ansatz:** Härterpaste = 400 g · 2,5/100.
**Rechnung:** Härterpaste = 10 g.
*Bewertung: Die Härterpastenmenge wird korrekt aus dem Massenverhältnis bestimmt.*

**Frage 3** **(Anwendung, 8 Punkte)**
Warum müssen die Glasfasern schonend eingearbeitet werden, und worauf ist beim Arbeitsschutz zu achten?

**Einarbeitung:** Hoher Scher-/Energieeintrag (z. B. Dissolver) kann die Fasern verkürzen oder beschädigen und die Verstärkungswirkung mindern — langsam laufende Aggregate verwenden.
**Arbeitsschutz:** Beim Verarbeiten der Glasfasern Staubmaske gegen feinen Glasstaub tragen; für Styrol und Peroxid gelten die Hinweise aus L-118.
*Bewertung: Der Grund für schonende Einarbeitung und der Glasstaub-/Peroxidschutz werden erkannt.*

# L-120 · Unterbodenschutz und PVC-Plastisole

*Steinschlagschutz aus PVC-Pulver und Weichmacher*

**Prüfungsteil 1** · A 9

Unterbodenschutz schützt Fahrzeugböden vor Steinschlag und Korrosion. Er basiert meist auf PVC-Plastisolen — PVC-Pulver in Weichmacher, das beim Erhitzen zu einem zähelastischen Film geliert.

## Aufgabe

Der Unterbodenschutz bildet eine dicke, zähelastische Schicht (oft um 250 µm) am Fahrzeugunterboden. Er verteilt die Stoßenergie von Steinschlag über einen großen Bereich und schützt zusätzlich vor Korrosion. Neben den PVC-Plastisolen gibt es lösemittelhaltige Unterbodenschutzmittel auf Wachs-Bitumen-Basis, vor allem für die Nachbehandlung im Reparaturbereich und für die Hohlraumkonservierung. Sie trocknen physikalisch durch Lösemittelverdunstung und haben deshalb — anders als das Plastisol — einen Festkörper deutlich unter 100 %.

## PVC-Plastisole

Polyvinylchlorid (PVC), ein pulverförmiges Homopolymerisat aus Vinylchlorid, ist in vielen üblichen Lacklösemitteln schwer bzw. nur begrenzt löslich; die Löslichkeit hängt von PVC-Typ und Lösemittel ab. Man mischt es mit Weichmacher zu einem Plastisol.

Die Gelierung beim Erhitzen (ca. 160–200 °C Objekttemperatur; im Coil Coating mit sehr kurzer Verweilzeit entsprechend höher, 180–220 °C, siehe L-106) ist eine physikalische Fusion, keine chemische Vernetzung: Die PVC-Teilchen quellen im Weichmacher auf, erweichen oberhalb der Geliertemperatur und verschmelzen zu einem kontinuierlichen, homogenen Film. Beim Abkühlen erstarrt dieser zu einem zähelastischen Feststoff; das PVC bleibt thermoplastisch. Das Verarbeitungsfenster ist eng: Zu niedrige Temperatur → unvollständige Gelierung, klebrig und spröde. Zu hohe Temperatur oder zu lange Verweilzeit → Dehydrochlorierung (HCl-Abspaltung, Gelbverfärbung). Temperatur und Zeit müssen ans konkrete System angepasst werden. Das Fließverhalten von Plastisolen ist komplex und stark formulierungs- und scherratenabhängig: Bei niedrigen Scherraten zeigen viele Systeme eher strukturviskoses Verhalten, bei hohen Scherraten kann dagegen — etwa durch enge Teilchenpackung — Dilatanz (Scherverdickung) auftreten. Eine pauschale Einordnung als „dilatant“ greift deshalb zu kurz; für die Applikation (Airless, Rakel) muss das konkrete Rheologieprofil auf das Verfahren abgestimmt werden.

## Weichmacher

Der Weichmacher füllt die Hohlräume zwischen den PVC-Teilchen; seine Polarität muss zum PVC passen. Klassisch waren Phthalsäureester, doch bestimmte Phthalate (z. B. DEHP) sind heute unter REACH beschränkt (SVHC, siehe L-48); man weicht auf Adipate, Citrate, Terephthalate (DOTP) oder Cyclohexandicarboxylate (DINCH) aus — deren regulatorischer Status und Migrationsverhalten sind jedoch jeweils eigens zu bewerten (siehe L-48).

## Verarbeitung und Grenzen

Achtung bei der Herstellung: Bei sehr hohem Schereintrag (z. B. Hochleistungsdissolver mit hoher Umfangsgeschwindigkeit) können Plastisole durch Dilatanz stark eindicken — das Material ist kaum noch pumpbar, der Dissolver kann festfahren. Plastisole daher immer mit langsam laufendem Dissolver oder Planetenmischer ansetzen (niedrige Umfangsgeschwindigkeit, kurze Mischzeiten).

Die Applikationsart richtet sich nach dem Produkt: Unterbodenschutzmassen (dünnflüssigere Plastisole) werden per Airless gespritzt (hoher Druck, 200–400 µm Nassfilm); Nahtabdichtmassen und Nahtfüller sind dickflüssigere Pasten, die mit Rakel oder Spachtel manuell in Schweißnähte und Flansche gedrückt werden — auch Borstenauftrag oder Druckluftverpressung ist möglich. Beide Produktfamilien gehören zur Gruppe der Unterbodenschutzsysteme, werden aber separat formuliert und eingesetzt. Damit die dicke Schicht nicht abläuft, stellt man das Plastisol thixotrop ein — dafür dienen Rheologieadditive wie pyrogene Kieselsäure oder organophile Schichtsilicate (siehe L-49, L-46); sie verhindern zugleich das Absetzen der Füllstoffe. Unstabilisiertes PVC beginnt in technisch relevantem Umfang ab etwa 160 °C Chlorwasserstoff abzuspalten (siehe L-92); Beginn und Ausmaß hängen von PVC-Typ, Stabilisierung, Temperatur und Verweilzeit ab. Wärme- und Lichtstabilisatoren erlauben es, das Plastisol trotzdem bei rund 200 °C zu gelieren, ohne dass es sich übermäßig zersetzt. Chlorhaltige Systeme stehen zudem unter Umweltvorbehalt.

## Prüfung

Die Steinschlagfestigkeit prüft man mit der Einzelschlagprüfung (ein definierter Schlagkörper) und der Multischlag- bzw. Kugelstrahlprüfung (viele Stahlkugeln). Bewertet wird die Fläche, auf der Haftungsverlust eingetreten ist.

**Merksatz**

Unterbodenschutz = dicker, zähelastischer Steinschlagschutz aus PVC-Plastisol (PVC-Pulver + Weichmacher, geliert bei etwa 160 bis 200 °C). Phthalat-Weichmacher meiden (REACH); Dehydrochlorierung durch geeignete Wärmestabilisatoren begrenzen — Verarbeitungsfenster und Stabilisierung sind systemabhängig.

**Stichwörter:** Unterbodenschutz, PVC-Plastisol, Polyvinylchlorid, Weichmacher, Steinschlagschutz, Airless, Phthalat, REACH, Salzsäure, Gelieren

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie*

# Übungsblatt Ü-120 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Was ist ein PVC-Plastisol, und wie entsteht daraus der Film?

**Plastisol:** PVC-Pulver (in üblichen Lacklösemitteln schwer bzw. nur begrenzt löslich), gemischt mit Weichmacher, der die Hohlräume zwischen den Teilchen füllt.

**Filmbildung:** Beim Erhitzen in einem geeigneten Temperaturbereich (Richtwert etwa 200 °C) gelieren die PVC-Teilchen im Plastisol zu einem zähelastischen Film.

**Fließverhalten:** Plastisole zeigen je nach Formulierung und Schergefälle unterschiedliches Fließverhalten: Bei niedrigen Schergefällen überwiegt strukturviskoses (pseudoplastisches) Verhalten; bei sehr hohen Schergefällen und hohem Füllstoffgehalt kann auch dilatantes Verhalten auftreten.

*Bewertung: Aufbau des Plastisols und das Gelieren zum Film werden korrekt beschrieben.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**

Ein lösemittelhaltiger Unterbodenschutz auf Wachs-Bitumen-Basis hat einen Festkörper von 58 %. Wie viel Trockenmasse bleibt aus einem Ansatz von 500 g — und warum lässt sich diese Rechnung nicht auf ein PVC-Plastisol übertragen?

**Rechnung:** m(trocken) = 500 g · 58/100 = 290 g

**Antwortsatz:** Es bleiben 290 g Trockenmasse.

**Abgrenzung Plastisol:** Ein PVC-Plastisol ist lösemittelfrei (nfA nahe 100 %): Der Weichmacher bleibt beim Gelieren im Film, es verdunstet praktisch nichts. Dort sind Nass- und Trockenschichtdicke nahezu gleich.

*Bewertung: Die Festkörperrechnung ist korrekt auf die Einwaage bezogen. Für die volle Punktzahl muss zusätzlich erkannt werden, dass ein PVC-Plastisol lösemittelfrei ist (nfA nahe 100 %): Der Weichmacher bleibt beim Gelieren im Film, deshalb sind dort Nass- und Trockenschichtdicke nahezu gleich und eine Festkörperrechnung dieser Art ist nicht übertragbar.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**

Welche zwei Sicherheits-/Umweltaspekte sind bei PVC-Plastisolen zu beachten?

**Weichmacher:** Bestimmte Phthalat-Weichmacher (z. B. DEHP) sind unter REACH beschränkt; auf Alternativen wie Adipate, Citrate, DOTP oder DINCH ausweichen — deren Status ist jeweils eigens zu bewerten.

**Thermische Zersetzung:** Unstabilisiertes PVC spaltet ab etwa 160 °C in technisch relevantem Umfang Salzsäure (HCl) ab; nicht überhitzen, stabilisieren.

*Bewertung: Phthalat-/REACH-Aspekt und die HCl-Zersetzung werden korrekt genannt.*

# L-122 · Säurehärtende Lacke (SH-Lacke)

*Der Klassiker der Holz- und Möbelfinishlackierung — säurekatalysiert bei Raumtemperatur*

**Wahlqualifikation** · B 5 · B 1

SH-Lacke vernetzen einen hydroxylhaltigen Filmbildner mit einem Aminoharz — bei Raumtemperatur säurekatalysiert, unter Abspaltung von Methanol und/oder Wasser. Säurehärtende Lacke sind ein wichtiges und seit Jahrzehnten etabliertes System für Möbel-, Türen- und Treppenlackierungen; ihr Kernthema ist die Formaldehydemission.

## Etabliertes System im Holzfinish

Klassische säurehärtende Lacke werden als Stammlack mit saurer Härterkomponente formuliert; konkrete Systeme und Handelsformen variieren je Hersteller. Sie überzeugen durch sehr gute Chemikalien- und mechanische Beständigkeit und erfüllen die Anforderungen an Möbeloberflächen (siehe L-123). Anders als Melamin-Einbrennlacke (siehe L-32), die dieselbe Chemie erst bei hoher Temperatur nutzen, härten sie bei Raumtemperatur — das macht sie zur bevorzugten Wahl überall dort, wo keine Öfen möglich sind.

## Aufbau und Vernetzung

Filmbildner sind hydroxylgruppenhaltige Polyester, Polyether oder wässrige Acrylatdispersionen; ihr Reaktionspartner ist ein Aminoharz — klassisch ein Harnstoffharz, häufig auch ein Melaminharz. Beim Härten vernetzen die Hydroxylgruppen des Filmbildners mit den Methylol- beziehungsweise Methoxymethylgruppen des Aminoharzes in einer säurekatalysierten Polykondensation. Veretherte Methylolgruppen reagieren dabei typischerweise unter Abspaltung von Methanol; freie Methylolgruppen können stattdessen unter Wasserabspaltung kondensieren — welcher Weg überwiegt, hängt vom Aminoharz und der Formulierung ab. Das jeweilige Abspaltprodukt muss aus dem Film entweichen können.

## Der saure Härter

Als Katalysator dient eine starke Säure, meist para-Toluolsulfonsäure (p-TSA). Der Mechanismus: Die p-TSA protoniert die Methylolgruppen (–$CH_2$–OH) bzw. Methoxymethylgruppen (–$CH_2$–$OCH_3$) des Aminoharzes. Dadurch entsteht eine aktivierte Abgangsgruppe (–$OH_2^+$ bzw. –$OCH_3H^+$), die leicht abgespalten wird — das Kohlenstoffatom wird elektrophil und reagiert mit einer OH-Gruppe des Filmbildners. Ohne Säure ist das Aminoharz bei Raumtemperatur stabil; erst die Protonenquelle senkt die Aktivierungsenergie so weit, dass die Kondensation bei RT abläuft. Deshalb hat der angesetzte Lack eine begrenzte Topfzeit — nach dem Mischen läuft die Vernetzung unaufhaltsam ab. Das Mischungsverhältnis Stammlack zu Härter wird vom konkreten Bindemittel-/Aminoharzsystem und der Säurekonzentration vorgegeben; typische Produkte besitzen definierte Herstellerangaben.

## Formaldehyd — das Kernthema

Bei der Kondensation kann Formaldehyd frei werden — ein Stoff, der nach CLP als akut giftig auch beim Einatmen (H331), hautätzend (H314), hautsensibilisierend (H317), vermutlich keimzellmutagen (Kat. 2, H341) und krebserzeugend (Kat. 1B, H350) eingestuft ist; der Arbeitsplatzgrenzwert nach TRGS 900 beträgt 0,3 ml/m³ (0,37 mg/m³) mit Überschreitungsfaktor 2. Deshalb sind Exposition am Arbeitsplatz und Abgabe aus dem fertigen Bauteil streng geregelt. Um die Emission zu senken, setzt man Fänger zu — Verbindungen mit freien Aminogruppen (–$NH_2$): Harnstoff und Melamin durch ihre Amino-Substituenten, Kasein (ein Milchprotein) über Lysin-Seitenketten. Diese –$NH_2$-Gruppen reagieren mit freiem Formaldehyd (HCHO) in einer Additionsreaktion: R–$NH_2$ + HCHO → R–NH–$CH_2OH$ (N-Methylolverbindung, chemisch ein Halbaminal). Die Methylolverbindung kann weiter zur Methylenbrücke kondensieren. Das Formaldehyd ist damit chemisch gebunden; die Gleichgewichtslage liegt unter Normalbedingungen weit auf der Produktseite. Die Bindung ist jedoch reversibel: Wärme, Feuchte und der im Film verbleibende saure Katalysator können Formaldehyd über Monate wieder freisetzen — Fänger senken die Emission, sie beenden sie nicht. Harnstoff ist am günstigsten und weit verbreitet; Melamin reagiert vollständiger; Kasein (teuer) wird in sensiblen Anwendungen wie Kinderspielzeug und Innenräumen eingesetzt. Die zulässige Formaldehydabgabe von Holzwerkstoffen ist in Deutschland über die Chemikalien-Verbotsverordnung geregelt: Seit dem 1. Januar 2020 gilt als Referenzverfahren die Prüfkammermessung nach DIN EN 16516 mit einem Grenzwert von 0,1 ppm (124 µg/m³). Das ältere Gasanalyse-Verfahren nach DIN EN ISO 12460-3 (vormals EN 717-2, Richtwert rund 3,5 mg je Stunde und Quadratmeter) ist ein abgeleitetes Verfahren und dient nur noch der werkseigenen Produktionskontrolle. Das Formaldehyd-Management ist der kritische Punkt jeder SH-Rezeptur.

## Wässrige SH-Lacke und Einordnung

Seit den 1970er-Jahren gibt es wässrige SH-Lacke; wässrige SH-Systeme sind in Europa etabliert und können den Lösemittelanteil deutlich reduzieren; Marktanteile sind abhängig von Anwendung und Region. Insgesamt bieten SH-Lacke ein sehr hohes Beständigkeitsniveau bei niedrigen Kosten; ihre Nachteile sind die Formaldehydthematik und — bei lösemittelhaltigen Typen — der VOC-Gehalt (siehe L-168).

## Applikation und Schichtdicken

Verarbeitungstemperatur 18–23 °C, Luftfeuchte über etwa 40 % r. F. — beides sind systemspezifische Praxiswerte. Maßgeblich sind Bindemittelsystem, Katalysator, Rezeptur und die Herstellerangaben; sehr trockene Raumluft kann die Härtung und die Filmbildung ungünstig beeinflussen. Lösemittelhaltig: Druckluftspritzung DIN 4, Auslaufzeit 20–30 s; 60–80 µm Nassfilm je Lage; 2–3 Lagen; Gesamttrockenschichtdicke etwa 50–90 µm bei 30–40 % Festkörper; Topfzeit je nach System 4–8 h. Wässrige Systeme: HVLP- oder Druckluftpistole, ähnliche Nassfilmdicken, aber längere Ablüftzeiten zwischen den Lagen (Wasser muss entweichen). Schliff: Zwischenschliff zwischen den Lagen P220–P280, Feinschliff der letzten Lage P320–P400. Soll auf Hochglanz poliert werden, wird die ausgehärtete Oberfläche vorher stufenweise nass bis P1000–P3000 geschliffen und erst dann poliert.

**Merksatz**

SH-Lack = hydroxylhaltiger Filmbildner plus Aminoharz (Harnstoff-/Melaminharz), bei Raumtemperatur mit Säure vernetzt (Kondensation; je nach Aminoharz werden Methanol und/oder Wasser frei). Seit Jahrzehnten etabliert im Holzfinish — mit dem Formaldehyd-Management als Kernaufgabe.

**Stichwörter:** SH-Lack, säurehärtend, Holzlack, Möbellack, Melaminharz, Aminoharz, Polykondensation, para-Toluolsulfonsäure, Formaldehyd, Chemikalien-Verbotsverordnung, DIN EN 16516, DIN EN ISO 12460-3, Topfzeit, Stammlack

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur; DIN EN ISO 12460-3; DIN EN 16516*

## Übungsblatt Ü-122 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**
Beschreiben Sie Aufbau und Vernetzung eines säurehärtenden Lacks und erklären Sie, warum der angesetzte Lack nur eine begrenzte Topfzeit hat.

**Aufbau:** Ein Stammlack aus hydroxylgruppenhaltigem Filmbildner (Polyester, Polyether oder wässrige Acrylatdispersion) und einem Aminoharz — klassisch ein Harnstoffharz, häufig auch ein Melaminharz —, dazu eine saure Härterkomponente.
**Vernetzung:** Die Hydroxylgruppen des Filmbildners vernetzen mit den Methylol-/Methoxymethylgruppen des Aminoharzes in einer säurekatalysierten Polykondensation; dabei werden je nach Aminoharz Methanol und/oder Wasser abgespalten.
**Topfzeit:** Erst die Zugabe der Säure (meist para-Toluolsulfonsäure) startet die Reaktion. Da die Vernetzung ab dann fortlaufend abläuft, steigt die Viskosität an und der Lack ist nur begrenzt verarbeitbar.
**Abgrenzung:** Die Härtung geschieht bei Raumtemperatur — im Unterschied zu Melamin-Einbrennlacken, die dieselbe Chemie erst bei hoher Temperatur nutzen.
*Bewertung: Die Antwort nennt die drei Bestandteile (hydroxylhaltiger Filmbildner, Aminoharz, saurer Härter), beschreibt die säurekatalysierte Polykondensation mit dem Abspaltprodukt, begründet die Topfzeit ursächlich über den Start durch den sauren Härter und grenzt die Raumtemperatur-Härtung gegen den Melamin-Einbrennlack ab.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**
Ein SH-Stammlack wird mit 8 % Härter, bezogen auf die Stammlackmenge, angesetzt. Berechnen Sie die Härtermenge und die Gesamtmasse für 2,5 kg Stammlack.

**Gegeben:** Stammlack 2,5 kg; Härterzugabe 8 % (bezogen auf Stammlack)
**Härtermenge:** m(Härter) = 2,5 kg · 0,08 = 0,20 kg = 200 g
**Gesamtmasse:** m(gesamt) = 2,5 kg + 0,20 kg = 2,70 kg
**Antwortsatz:** Zu 2,5 kg Stammlack werden 200 g Härter gegeben; der Ansatz wiegt 2,70 kg und muss innerhalb der Topfzeit verarbeitet werden.
*Bewertung: Prozentbezug auf die richtige Größe (Stammlack) und sauberer Antwortsatz mit Hinweis auf die Topfzeit.*

**Frage 3** **(Anwendung, 7 Punkte)**
Eine Möbelwerkstatt klagt bei einem lösemittelhaltigen SH-Lack über die Formaldehydemission der fertigen Oberflächen. Erklären Sie die Ursache und nennen Sie zwei Ansätze zur Abhilfe.

**Ursache:** Bei der säurekatalysierten Kondensation des Melaminharzes kann Formaldehyd frei werden und aus dem Film ausgasen.
**Abhilfe 1:** Formaldehydfänger wie Harnstoff, Melamin oder Kasein in die Rezeptur aufnehmen.
**Abhilfe 2:** Auf einen formaldehydarm eingestellten oder wässrigen SH-Lack umstellen und die Emission kontrollieren — als Referenz die Prüfkammermessung nach DIN EN 16516 (Grenzwert 0,1 ppm), für die laufende Produktionskontrolle die Gasanalyse nach DIN EN ISO 12460-3.
*Bewertung: Die Antwort führt die Emission auf die Kondensationsreaktion zurück und nennt sowohl einen rezepturseitigen (Fänger) als auch einen systemseitigen Lösungsweg.*

# L-123 · Cellulosenitrat-Lacke für die Möbellackierung

*Der physikalisch trocknende Klassiker — Grundierungen, Hart- und Decklacke*

**Wahlqualifikation** · B 5

Cellulosenitrat-Lacke trocknen physikalisch, sind einfach zu verarbeiten und gut reparierbar, weil die Filmschichten durch geeignete Lösemittel wieder angelöst werden können — sie eignen sich besonders für bestimmte offenporige Möbelaufbauten, erkauft mit hohem Lösemittelanteil und Vergilbungsneigung.

## Der Klassiker der Möbellackierung

Cellulosenitrat-Lacke sind seit Jahrzehnten in der handwerklichen wie industriellen Möbelfertigung verbreitet. Sie lassen sich einfach spritzen oder gießen, trocknen schnell physikalisch (siehe L-21) und feuern das Holz sehr schön an. CN-Klarlacke werden häufig mit relativ niedrigem Verarbeitungsfestkörper formuliert (Richtwert etwa 15–25 %); der konkrete Festkörper hängt von Rezeptur und gewünschtem Filmaufbau ab. Der niedrige Festkörper ist typisch für offenporige Eichenmöbel-Lackierungen, bedeutet aber auch hohen Lösemittelanteil — und damit hohe VOC-Emissionen. In der industriellen Möbelfertigung werden CN-Lacke deshalb zunehmend durch wässrige Systeme (→ L-124) und UV-Lacke verdrängt (VOC-Anlagenrecht: 31. BImSchV). Standard bleiben sie in der handwerklichen Möbelfertigung und der Restaurierung historischer Möbel.

## Warum kombiniert wird

Cellulosenitrat allein ergibt harte, aber spröde Filme. Deshalb setzt man Weichmacher zu — Adipinsäureester, Butylstearat, Rizinusöl, Zitronensäureester oder epoxidiertes Sojaöl. In den sogenannten Nitro-Kombilacken wird Cellulosenitrat zusätzlich mit weiteren Filmbildnern kombiniert: mit Naturharzen wie Dammar (ein Naturharz aus tropischen Bäumen der Gattung Shorea/Dipterocarpaceae; gut löslich in Terpentinöl und aromatenreichen Lösemitteln wie Lacknaphtha, in aromatenarmem Testbenzin nur teilweise löslich; verbessert Glanz, Tiefenwirkung und Fülle des CN-Films), Schellack oder Kolophonium, mit Maleinat- und Hartharzen oder mit Alkydharzen, um Fülle, Härte und Glanzgrad anzuheben.

## Grundierungen

Cellulosenitrat-Grundierungen wie Feinschliffgrund, Einlassgrund, Füllgrund und Aufhellgrund werden direkt auf das Holz oder auf Beizen aufgetragen. Sie füllen und benetzen den Untergrund, trocknen schnell und sind gut schleifbar; Zinkstearat dient dabei als Schleifmittelzusatz. Sie bilden die Basis für den anschließenden Mehrschichtaufbau.

## Hart- und Decklacke, Reparaturfähigkeit

Hartlacke sind CN-Kombinationslacke mit einem Anteil harter Harze — typisch Maleinatharze, Ketonharze (Cyclohexanonharze) oder Cyclohexanon-Formaldehyd-Kondensate. Diese Harze erhöhen den Tg des Filmbildner-Gemisches, verbessern die Kratzfestigkeit und geben dem Film mehr Körper und Schleifbarkeit. Der Weichmacher senkt allerdings die Härte; erst die Harzkombination gleicht diesen Härteverlust wieder aus — das ist der Lack, den man im Möbelbereich „Hartlack“ nennt. Hartlacke gibt es als Grund-, Mehrschicht- und Überzugslacke in verschiedenen Glanzgraden (einstellbar über Mattierungsmittel), Decklacke von matt bis seidenmatt. Verarbeitet werden sie meist als Mehrschichtlacke aus Grund- und Decklack. Die gute Wiederanlösbarkeit von CN-Filmen erleichtert Reparatur und Überarbeitung, sofern das konkrete System und der Untergrund dies zulassen. Geeignete CN-Systeme können je nach Formulierung die Anforderungen der relevanten DIN-68861-Kategorie erfüllen; die Einstufung ist über die jeweilige Prüfung nachzuweisen.

### Grenzen

Der große Nachteil ist der hohe Lösemittelanteil, besonders bei Klarlacken. Unter UV-Licht neigen CN-Lacke zur Vergilbung, wenn kein UV-Schutz eingebaut ist, der den Abbau der Cellulosenitratketten bremst. Ein weiteres Problem ist die Weichmachermigration, etwa bei Kontakt mit PVC-Kunststoffen wie Türdichtungsbändern. Deshalb werden sie zunehmend durch wässrige Systeme ersetzt (siehe L-124).

Lösemittel- und Reinigungsmittelbeständigkeit: CN-Lacke sind physikalisch trocknend und damit prinzipiell in geeigneten Lösemitteln wieder lösbar. Ester und Ketone (Ethylacetat, Aceton) sind echte Löser für Cellulosenitrat und lösen den Film auf — was einerseits die Reparaturfähigkeit ermöglicht, andererseits die Gebrauchsbeständigkeit begrenzt. Alkohole wie Ethanol wirken bei den esterlöslichen E-Typen als Latentlösemittel: Sie quellen und erweichen den Film. Aliphaten und Aromaten (Testbenzin, Mineralöl) sind Nichtlöser bzw. Verdünner und weniger aggressiv (siehe L-21). Wasserbeständigkeit ist mäßig. Reinigungsmittel mit Alkohol oder Lösemittelanteil sollten auf CN-Oberflächen vermieden werden. Gegenüber vernetzten Systemen (2K-PUR, SH-Lack) ist die chemische Beständigkeit deutlich geringer.

**Merksatz**

Cellulosenitrat-Lack ist der physikalisch trocknende Möbelklassiker: schnelle Trocknung, ausgeprägte Holzanfeuerung, sehr gute Reparaturfähigkeit — erkauft mit hohem Lösemittelanteil und Vergilbungsneigung. Weichmacher und Kombiharze machen den spröden Film erst gebrauchsfähig.

**Stichwörter:** Cellulosenitrat, CN-Lack, Möbellack, Holzanfeuerung, Nitro-Kombilack, Weichmacher, Schleifgrund, Einlassgrund, Füllgrund, Aufhellgrund, Reparaturfähigkeit, DIN 68861, Vergilbung, Weichmachermigration
*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur*

## Übungsblatt Ü-123 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Warum ergibt Cellulosenitrat als alleiniger Filmbildner keine gebrauchsfähigen Möbellacke, und wie löst man das? Nennen Sie außerdem zwei typische Vorteile von CN-Lacken.

**Problem:** Cellulosenitrat allein bildet spröde Filme.
**Lösung:** Man setzt Weichmacher zu (z. B. Adipinsäureester, Butylstearat, Rizinusöl) und/oder kombiniert mit weiteren Filmbildnern zu Nitro-Kombilacken (Naturharze, Maleinat-, Hart- oder Alkydharze) für Fülle, Härte und Glanz.
**Vorteil 1:** Sehr gute Reparaturfähigkeit durch die gute Anlösbarkeit der Schichten.
**Vorteil 2:** Schnelle physikalische Trocknung und schöne Holzanfeuerung, dazu einfache Verarbeitung.
*Bewertung: Die Antwort erklärt die Sprödigkeit als Grund für Weichmacher/Kombiharze und nennt zwei zutreffende, für CN charakteristische Vorteile.*

**Frage 2** **(Berechnung, 10 Punkte)**

Ein CN-Klarlack besteht aus 18 GT Cellulosenitrat-Lösung (Collodiumwolle, siehe L-21; 30 % Festkörper), 8 GT Alkydharz-Lösung (75 % Festkörper), 3 GT Weichmacher (100 %), 1 GT Zinkstearat (100 %) und 70 GT Lösemittelgemisch. Berechnen Sie den nicht flüchtigen Anteil (nfA).

**Ansatz:** Der nfA ist die Summe der Festkörperanteile aller Komponenten je 100 GT Lack.
**Collodiumwolle:** 18 GT · 0,30 = 5,4 GT Festkörper
**Alkydharz:** 8 GT · 0,75 = 6,0 GT Festkörper
**Weichmacher + Zinkstearat:** 3 GT + 1 GT = 4,0 GT (beide zu 100 % nicht flüchtig)
**Ergebnis:** nfA = 5,4 + 6,0 + 4,0 = 15,4 GT je 100 GT → nfA = 15,4 %. Das Lösemittel (70 GT) verdunstet vollständig.
*Bewertung: Jede Komponente wird korrekt mit ihrem Festkörperanteil angesetzt; das Ergebnis liegt im typischen Bereich eines CN-Klarlacks und bestätigt den niedrigen Verarbeitungsfestkörper.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**

An einem CN-lackierten Möbelstück zeigen sich an den Kontaktstellen zu den PVC-Türdichtungsbändern klebrige, weiche Stellen. Erklären Sie die Ursache.

**Ursache:** Weichmachermigration: Weichmacher aus dem PVC (oder umgekehrt) wandern in den CN-Lackfilm und weichen ihn an den Kontaktstellen auf.

**Zusammenhang:** CN-Filme enthalten selbst Weichmacher und sind für solche Wechselwirkungen mit weichmacherhaltigen Kunststoffen anfällig.

**Abhilfe:** Direkten Dauerkontakt zu weichmacherhaltigem PVC vermeiden oder ein migrationsunempfindlicheres System (z. B. wässrig, siehe L-124) wählen.

*Bewertung: Die Antwort benennt die Weichmachermigration korrekt als Ursache und nennt eine praxisgerechte Abhilfe.*

# L-124 · Wässrige Holzlacke: IK, selbstvernetzend, 2K-PUR und UV

*Lösemittel gegen Wasser getauscht — die emissionsarme Möbel- und Türenlackierung*

**Wahlqualifikation** · B 1

Wässrige Holzlacke senken den VOC-Ausstoß: IK-Systeme trocknen physikalisch oder vernetzen selbst, wässrige 2K-PUR- und UV-Lacke liefern hohe Beständigkeit — dafür ist die Applikation anspruchsvoller.

## Warum wässrige Holzlacke

Für die industrielle Holzbeschichtung senken wässrige Systeme den Ausstoß organischer Lösemittel gegenüber lösemittelhaltigen CN-, SH- und PUR-Lacken deutlich. Basis sind meist Acrylat- oder Polyurethandispersionen (siehe L-71 ff.). Der Preis dafür: langsamere Trocknung, höhere Nassauftragsmenge und größere Empfindlichkeit gegenüber dem Trocknungsklima.

## IK-Wasserlacke: physikalisch, SV, NSV

Einkomponenten-Wasserlacke trocknen physikalisch durch Verdunsten von Wasser und Rest-Lösemittel. Bei nicht selbst vernetzenden Typen (NSV) bleibt es dabei: Die Polymerteilchen verschmelzen (Koaleszenz) zu einem thermoplastischen Film. Selbstvernetzende Typen (SV) enthalten zusätzlich ein Vernetzungssystem, das bereits fertig in den Einkomponentenlack eingearbeitet ist und erst nach der Filmbildung chemisch reagiert — klassisch Ketogruppen im Polymer (aus Diacetonacrylamid) und ein zugesetztes Dihydrazid (Adipinsäuredihydrazid), die beim Trocknen zum Hydrazon reagieren. Für den Anwender bleibt es ein 1K-System; anders als bei der Selbstvernetzung im engeren Sinn (siehe L-36) stammen die Reaktivgruppen aus zwei Bausteinen. Das resultierende leichte Netzwerk verbessert chemische und mechanische Beständigkeit gegenüber NSV deutlich.

## Wässrige 2K-PUR-Lacke

Hier reagiert ein hydroxylgruppenhaltiger Filmbildner (meist Polyacrylat) mit einem Polyisocyanat-Härter, der hydrophil oder hydrophob eingestellt sein kann. Es entsteht ein dichtes Urethannetzwerk mit sehr guter Chemikalien- und mechanischer Beständigkeit. Wie bei lösemittelhaltigen 2K-PUR-Lacken (siehe L-25) gibt es eine begrenzte Topfzeit und die Nebenreaktion des Isocyanats mit Wasser unter Abspaltung von Kohlendioxid.

## UV-härtende Wasserlacke

Diese Systeme verbinden die physikalische Trocknung (das Wasser verdunstet) mit einer anschließenden UV-Vernetzung (siehe L-24). Sie kommen mit wenig oder ohne Reaktivverdünner aus. UV-härtende Wasserlacke können hohe Härte, Kratzfestigkeit und Beständigkeit erreichen; das konkrete Eigenschaftsniveau hängt von Harz, Photoinitiator, Pigmentierung und Aushärtung ab, was sie für hochwertige Möbelbauteile interessant macht.

Neben den wässrigen UV-Lacken gibt es lösemittelfreie 100 %-Festkörper-UV-Lacke: Sie bestehen im Wesentlichen aus UV-Oligomeren (Epoxyacrylat, Urethanacrylat), Reaktivverdünnern (Acrylatmonomere), Photoinitiator und Additiven — keine Wasser- und keine Lösemittelemissionen. Nach der Applikation werden sie sofort unter der UV-Lampe vernetzt (Sekundenbereich). Diese Systeme sind in der industriellen Möbelfertigung auf Durchlaufanlagen der Produktionsstandard: hohe Liniengeschwindigkeit, sehr gute Kratzfestigkeit, kaum VOC.

### Einordnung und Anforderungen

Wässrige Holzlacke sind für Möbel, Türen und Treppen weit verbreitet. Je nach Filmbildner erfüllen sie die chemische Beständigkeit nach DIN 68861 und die Anforderungsprofile großer Möbelhersteller. Ihr Vorteil ist die geringe Emission; die Herausforderung liegt in Verlauf, Trocknung und Klimaempfindlichkeit — genau dort entscheidet die Rezeptur- und Applikationsführung.

Marktstandard nach Anwendung: Industrielle Möbelproduktion auf Durchlaufanlagen → UV-Lacke (100 %-FK oder wässrige UV). Hochwertige Einzelmöbel, Küchenfronten, Treppen mit hoher Beanspruchung → wässrige 2K-PUR. Einfachere Innenholzteile, Innentüren, DIY → wässrige SV-1K. CN-Lacke verbleiben im Handwerk und in der Restaurierung.

**Merksatz**

Wässrige Holzlacke tauschen Lösemittel gegen Wasser: IK physikalisch oder selbstvernetzend für einfache Ansprüche, wässrige 2K-PUR und UV für hohe Beständigkeit. Weniger VOC — dafür anspruchsvollere Applikation.

**Stichwörter:** Wasserlack, Holzlack, IK-Wasserlack, selbstvernetzend, nicht selbstvernetzend, Acrylatdispersion, Polyurethandispersion, wässriger 2K-PUR, UV-Wasserlack, Möbellack, VOC, DIN 68861
*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur; DIN 68861*

## Übungsblatt Ü-124 — Musterlösungen

**Frage 1** (Verständnis, 8 Punkte)
Erklären Sie den Unterschied zwischen nicht selbst vernetzenden (NSV) und selbstvernetzenden (SV) IK-Wasserlacken und nennen Sie je einen Filmbildungsmechanismus.

**NSV:** Nicht selbst vernetzende IK-Wasserlacke trocknen rein physikalisch durch Verdunsten von Wasser und Rest-Lösemittel; es entsteht keine chemische Vernetzung.
**SV:** Selbstvernetzende IK-Wasserlacke vernetzen zusätzlich chemisch während und nach der Trocknung — über Ketogruppen im Polymer (aus Diacetonacrylamid) und ein bereits eingearbeitetes Dihydrazid (Adipinsäuredihydrazid), die zum Hydrazon reagieren. Für den Anwender ist das ein 1K-System; die Reaktivgruppen stammen aber aus zwei Bausteinen (Abgrenzung zur Selbstvernetzung im engeren Sinn siehe L-36).
**Folge:** Die Selbstvernetzung verbessert die chemische und mechanische Beständigkeit gegenüber dem rein physikalisch trocknenden Typ deutlich.
**Einordnung:** Beide sind Einkomponentensysteme; für hohe Beständigkeitsanforderungen kommen häufig wässrige 2K-PUR- oder UV-Systeme infrage, die optimale Auswahl hängt vom Anforderungsprofil ab.
*Bewertung: Die Antwort trennt physikalische von chemischer Filmbildung, nennt einen konkreten SV-Mechanismus und zieht die richtige Folge für die Beständigkeit.*

**Frage 2** (Berechnung, 10 Punkte)
Vergleichen Sie den Lösemittelausstoß: Ein wässriger Holzlack hat 40 % nfA und 5 % organische Lösemittel, ein lösemittelhaltiger CN-Klarlack 20 % nfA und 80 % Lösemittel. Berechnen Sie je System die Masse organischen Lösemittels pro kg aufgetragenem Festkörper.

**Wässriger Lack:** Je 1 kg Lack: 0,40 kg Festkörper, 0,05 kg Lösemittel → 0,05 / 0,40 = 0,125 kg Lösemittel je kg Festkörper
**CN-Klarlack:** Je 1 kg Lack: 0,20 kg Festkörper, 0,80 kg Lösemittel → 0,80 / 0,20 = 4,0 kg Lösemittel je kg Festkörper
**Vergleich:** 4,0 / 0,125 = 32 — der CN-Klarlack setzt je kg Festkörper rund 32-mal so viel organisches Lösemittel frei.
**Antwortsatz:** Der wässrige Holzlack ist dem CN-Klarlack in der Lösemittelbilanz um mehr als eine Größenordnung überlegen.
*Bewertung: Beide Systeme werden konsequent auf denselben Bezug (kg Festkörper) gerechnet; der Faktor 32 macht den Emissionsvorteil des Wasserlacks anschaulich.*

**Frage 3** **(Anwendung, 7 Punkte)**

Ein Kunde fertigt hochwertige Küchenfronten und braucht maximale Chemikalien- und Kratzbeständigkeit bei möglichst geringer Emission. Welches wässrige System empfehlen Sie und warum?

**Empfehlung:** Ein wässriges 2K-PUR-System oder ein UV-härtender Wasserlack.

**Begründung 2K-PUR:** Das dichte Urethannetzwerk gibt sehr gute Chemikalien- und mechanische Beständigkeit; zu beachten sind Topfzeit und die Nebenreaktion mit Wasser.

**Begründung UV:** UV-Wasserlacke ergeben besonders harte, kratzfeste Filme bei geringer Emission.

**Abgrenzung:** Ein einfaches IK-System (NSV) wäre für diese hohen Ansprüche zu wenig beständig.

*Bewertung: Die Antwort wählt ein hochbeständiges wässriges System passend zur Anforderung und grenzt es gegen das zu schwache IK-System ab.*

# L-125 · Parkettlack (Fußbodenversiegelung)

*2K-PUR-Versiegelung für Holzböden — hart, abriebfest, rutschsicher*

**Prüfungsteil 1** · A 9

Ein Parkettlack versiegelt den Holzboden: Er füllt die Poren und schützt vor Abrieb, Schmutz und Feuchtigkeit. 2K-PUR und wasserverdünnbare Systeme sind heute wichtige Parkettlacktechnologien.

## Aufgabe

Durch die Versiegelung werden die Zwischenräume gefüllt, die Holzporen geschlossen und das Holz gegen Abrieb, Schmutz und Feuchtigkeit geschützt. Früher wurden dafür physikalisch trocknende (Cellulosenitrat), oxidativ vernetzende Alkyd- und säurehärtende Systeme verwendet; wegen höherer Qualitätsanforderungen und aus Umweltgründen dominieren heute Polyurethane und wasserverdünnbare Versiegelungen.

## Bindemittel

Typisch ist ein 2K-System aus einem OH-funktionellen Polymer und einem Polyisocyanat-Härter. Polyester, Polyether und Polyacrylate können als OH-funktionelle Bindemittel eingesetzt werden; das Eigenschaftsprofil hängt vom konkreten Polymer und der Formulierung ab.

## Härter, Feuchtigkeit, Mischung

Bei lösemittelhaltigen oder lösemittelfreien 2K-PUR-Parkettlacken reagiert der klassische Isocyanat-Härter stark mit Wasser ($CO_2$-Bildung → Blasen und Nebenreaktionen). Deshalb müssen Rohstoffe, Geräte und Umgebung möglichst trocken sein: Wassergehalt vorher prüfen, trockene Gebinde verwenden und den Behälter mit Schutzgas (z. B. Stickstoff) fluten; Restfeuchte lässt sich mit Trockenmitteln (z. B. Molekularsieb) binden. Wasserverdünnbare 2K-PUR-Parkettlacke verwenden dagegen hydrophil eingestellte oder bereits dispergierte Isocyanate, die auf den Kontakt mit Wasser ausgelegt sind (siehe L-124) — die genannten Trockenheits- und Schutzgasmaßnahmen sind dort nicht in gleicher Weise nötig, auch wenn die Nebenreaktion Isocyanat/Wasser grundsätzlich bestehen bleibt. Die Härtermenge richtet sich nach der OH-Zahl des Bindemittels — der Masse KOH in Milligramm, die den in 1 g Festharz gebundenen OH-Gruppen äquivalent ist.

## Anforderungen und Gleitwiderstand

Ein Parkettlack braucht hohe Härte, hohe Abriebfestigkeit, gute Haftung, gutes Verhalten bei Druckbelastung (Verblockung) und Beständigkeit gegen Haushaltschemikalien. Für Fußböden ist der Gleitwiderstand wichtig: Er soll rutschsicher sein und lässt sich über den Reibungskoeffizienten bestimmen (Neigung einer Ebene, bis ein Gewicht mit definierter Fläche rutscht).

## Umwelt und Sicherheit

Isocyanat-Härter können die Atemwege sensibilisieren — Spritznebel und Hautkontakt meiden, geeignete Schutzausrüstung tragen. Beim Schleifen des Holzes entsteht feiner Staub, der Allergien oder Asthma auslösen kann; direkt an der Maschine absaugen und Staubmaske tragen. Lösemittelarme oder wasserverdünnbare Systeme sind zu bevorzugen.

**Merksatz**

Parkettlack = Versiegelung des Holzbodens. Meist 2K-PUR (OH-Polymer + Polyisocyanat), Härtermenge über die OH-Zahl, Rohstoffe trocken halten (Isocyanat + Wasser = Blasen), rutschsicher einstellen — und Isocyanat- sowie Schleifstaub-Schutz beachten.

**Stichwörter:** Parkettlack, Fußbodenversiegelung, 2K-PUR, Polyisocyanat, OH-Zahl, Gleitwiderstand, Rutschfestigkeit, Verblockung, Trockenmittel, Schleifstaub

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie*

## Übungsblatt Ü-125 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**
Welches Bindemittelsystem ist für einen modernen Parkettlack typisch, und warum müssen bei lösemittelhaltigen 2K-PUR-Systemen die Rohstoffe trocken sein?

**Bindemittel:** 2K-System aus OH-funktionellem Polymer (Polyester/Polyacrylat) und Polyisocyanat-Härter.

**Trocken:** Isocyanate reagieren mit Wasser unter CO2-Bildung → Blasen; daher Wassergehalt prüfen, Schutzgas oder Trockenmittel (z. B. Molekularsieb) einsetzen.

*Bewertung: 2K-PUR-System und die NCO-Wasser-Problematik werden korrekt erklärt.*

**Frage 2** **(Berechnung, 6 Punkte)**
Stammlack und Härter werden im Verhältnis 2 : 1 gemischt. Wie viel Härter braucht man für 900 g Stammlack?

**Ansatz:** Härter = Stammlack / 2.

**Rechnung:** Härter = 900 g / 2 = 450 g.

*Bewertung: Die Härtermenge wird korrekt aus dem Mischungsverhältnis bestimmt.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**
Was ist der Gleitwiderstand einer Fußbodenlackierung, und welche Gesundheitsgefahr besteht beim Schleifen des Holzes?

**Gleitwiderstand:** Maß für die Rutschsicherheit; bestimmbar über den Reibungskoeffizienten (Neigung, bis ein Gewicht rutscht).

**Schleifen:** Feiner Holzstaub kann Allergien/Asthma auslösen — direkt absaugen und Staubmaske tragen.

*Bewertung: Gleitwiderstand und die Schleifstaub-Gefahr werden richtig benannt.*

# L-126 · Kunststoffbeschichtung — Vorbehandlung und Haftung

*Niedrige Oberflächenenergie überwinden: reinigen, aktivieren, Haftvermittler*

**Wahlqualifikation** · B 6 · B 2

Viele unpolare Kunststoffe, insbesondere Polyolefine, besitzen eine niedrige Oberflächenenergie, wodurch Benetzung und Haftung von Lacken erschwert werden können. Reinigen und Aktivieren (Beflammen/Plasma/Corona) machen sie lackierbar; bei Polyolefinen kommt in der Regel zusätzlich ein CPO-Haftvermittler dazu.

## Das Grundproblem

Viele technische Kunststoffe, allen voran Polyolefine wie Polypropylen und Polyethylen, sind unpolar und haben eine niedrige Oberflächenenergie (Größenordnung 29 bis 36 mN/m). Der flüssige Lack benetzt eine solche Fläche schlecht, zieht sich zusammen und perlt ab, statt einen geschlossenen Film zu bilden; selbst wenn er sich auftragen lässt, haftet er kaum und platzt bei geringer Belastung ab (siehe L-12).

## Reinigen und Entfetten

Aus dem Spritzguss bleiben oft Trennmittelreste an der Oberfläche, die eine unsichtbare, haftungsmindernde Schicht bilden. Vor jeder Vorbehandlung steht deshalb das Reinigen und Entfetten — lösemittel- oder wasserbasiert, mit $CO_2$-Schnee oder Dampf.

## Beflammen, Plasma, Corona

Diese Verfahren erhöhen die Oberflächenenergie, ohne den Werkstoff im Volumen zu verändern. Beim Beflammen — im Automobilbau am häufigsten — wird die Kunststoffoberfläche oxidativ aktiviert; dabei werden polare sauerstoffhaltige Gruppen gebildet (Hydroxyl-, Hydroperoxid-, Aldehyd-, Keto- und Carboxylgruppen), wodurch die Oberflächenenergie steigt. Wie gut die Aktivierung gelungen ist, prüft man im Betrieb mit Testtinten nach DIN ISO 8296 (früher DIN 53364, zurückgezogen) oder über den Kontaktwinkel; als Richtwert gilt: ab etwa 38 mN/m ist eine Oberfläche lackierfähig, für wasserverdünnbare Systeme sollten rund 44 mN/m erreicht werden. Die Aktivierung hält nicht dauerhaft: Die eingebauten polaren Gruppen wandern mit der Zeit in das Polymerinnere zurück, die Oberflächenenergie sinkt wieder — vorbehandelte Teile deshalb innerhalb des festgelegten Zeitfensters (meist wenige Stunden) beschichten. Plasma- und Coronabehandlung wirken ähnlich über eine elektrische Entladung, die sauerstoffhaltige Gruppen einbaut und die Oberfläche zugleich feinreinigt.

## Haftvermittler (Primer)

Für besonders schwierige Substrate wie Polyolefine setzt man Haftvermittler ein: modifizierte, meist chlorierte Polyolefine (CPO), die in organischen Lösemitteln löslich sind und eine Brücke zwischen dem unpolaren Kunststoff und dem Decklack bilden. Sie werden sehr dünn aufgetragen (wenige µm) und sind niedrig im Festkörper. Für andere Kunststoffe wie Polycarbonat gibt es angepasste, auch wässrige Primer.

## Metalle im Vergleich

Metalle haben eine hohe freie Oberflächenenergie und lassen sich daher leicht benetzen; hier genügen meist Reinigen und Entfetten plus eine Konversions- oder Grundierschicht (siehe L-64, zum Systemaufbau L-99). Der eigentliche Vorbehandlungsaufwand liegt beim Kunststoff.

**Merksatz**

Kunststoff lackieren heißt zuerst die Oberfläche aktivieren: reinigen, dann die Oberflächenenergie erhöhen (Beflammen, Plasma, Corona) und bei Polyolefinen einen CPO-Haftvermittler setzen — sonst perlt der Lack ab und platzt.

**Stichwörter:** Kunststoffbeschichtung, Oberflächenenergie, Polyolefine, Polypropylen, Benetzung, Trennmittel, Beflammen, Plasma, Corona, Haftvermittler, chlorierte Polyolefine, Polycarbonat

## Übungsblatt Ü-126 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Erklären Sie, warum sich unbehandelte Polyolefine wie PP und PE schlecht lackieren lassen, und nennen Sie zwei Vorbehandlungsverfahren mit ihrer Wirkung.

**Ursache:** Polyolefine sind unpolar und haben eine niedrige Oberflächenenergie. Der Lack benetzt schlecht, perlt ab und haftet kaum; zusätzlich mindern Trennmittelreste aus dem Spritzguss die Haftung.

**Verfahren 1 — Beflammen:** In der oxidierenden Flamme wird die Oberfläche oxidativ aktiviert; dabei werden polare sauerstoffhaltige Gruppen (Hydroxyl-, Carbonyl-, Carboxylgruppen) eingebaut. Das erhöht die Oberflächenenergie.

**Verfahren 2 — Plasma/Corona:** Eine elektrische Entladung baut ebenfalls sauerstoffhaltige polare Gruppen ein und reinigt die Oberfläche fein.

**Ergebnis:** Die erhöhte Oberflächenenergie verbessert Benetzung und Haftung, ohne den Werkstoff stark zu verändern.

*Bewertung: Die Antwort führt das Problem auf die niedrige Oberflächenenergie und Trennmittel zurück und nennt zwei Verfahren mit dem gemeinsamen Wirkprinzip (polare Gruppen einbauen).*

**Frage 2** **(Berechnung, 9 Punkte)**

Ein Kunststoff-Haftvermittler mit 5 % Festkörper soll einen 2 µm dicken Trockenfilm ergeben (Trockenfilmdichte 1,0 g/cm³). Welche Nassauftragsmenge in g/m² ist nötig?

**Trockenvolumen je m²:** $V = 2\ \mu m \cdot 1\ m^2 = 0{,}0002\ cm \cdot 10\,000\ cm^2 = 2{,}0\ cm^3/m^2$

**Trockenmasse je m²:** $m(trocken) = 2{,}0\ cm^3 \cdot 1{,}0\ g/cm^3 = 2{,}0\ g/m^2$

**Nassmenge:** Bei 5 % Festkörper: $m(nass) = 2{,}0\ g\ /\ 0{,}05 = 40\ g/m^2$

**Antwortsatz:** Es sind rund 40 g/m² Nassauftrag nötig, um einen 2 µm dünnen Haftvermittlerfilm zu erzeugen.

**Deutung:** Weil der Haftvermittler nur 5 % Festkörper hat, sind für 2 g Trockenfilm 40 g Nassauftrag nötig — 95 % der aufgetragenen Masse verdunsten wieder.

*Bewertung: Die Kette Trockenvolumen → Trockenmasse → Nassmenge ist sauber, und der niedrige Festkörper erklärt die vergleichsweise hohe Nassmenge für eine sehr dünne Schicht.*

**Frage 3** **(Anwendung, 7 Punkte)**

An einem lackierten PP-Stoßfängerteil platzt der Lack schon bei leichter Belastung ab. Nennen Sie zwei mögliche Ursachen und die Abhilfe.

**Ursache 1:** Keine oder unzureichende Vorbehandlung — die niedrige Oberflächenenergie des PP wurde nicht erhöht, der Lack haftet nicht.

**Ursache 2:** Trennmittelreste aus dem Spritzguss auf der Oberfläche, die die Haftung blockieren.

**Abhilfe:** Gründlich reinigen/entfetten, die Oberfläche durch Beflammen oder Plasma aktivieren und einen CPO-Haftvermittler auftragen, bevor lackiert wird.

*Bewertung: Die Antwort nennt beide typischen Ursachen (fehlende Aktivierung, Trennmittel) und die vollständige Abhilfekette aus Reinigen, Aktivieren und Haftvermittler.*

# L-127 · Kunststofflack-Systeme

*Elastische Lacke für flexible Substrate — 2K-PUR, Soft-Feel, wässrig*

**Wahlqualifikation** · B 6 · B 2

Auf vorbehandeltem Kunststoff kommen elastische Lacksysteme zum Einsatz — lösemittelhaltige und wässrige 1K-/2K-PUR-Lacke sowie Soft-Feel-Effekte —, abgestimmt auf die Flexibilität des Bauteils.

## Elastizität zuerst

Kunststoffbauteile sind oft flexibel; der Lackfilm muss die Verformung mitmachen, ohne zu reißen. Man wählt daher elastische Bindemittel und stellt das Verhältnis von Härte und Elastizität gezielt über die Rezeptur ein — anders als bei den eher starren Metalllacken (siehe L-11). Ein zu spröder Film reißt, ein zu weicher ist nicht beständig genug.

## 2K-PUR für Kunststoff

2K-PUR-Systeme aus einem hydroxylhaltigen Bindemittel und einem Polyisocyanat-Härter (siehe L-25) sind eine wichtige Option für hochwertige Kunststofflackierungen und können sehr gute Chemikalien-, Kratz- und Wetterbeständigkeit erreichen und lassen sich gut auf Flexibilität einstellen; nachteilig ist die begrenzte Topfzeit. Für einfachere Ansprüche gibt es 1K-Systeme.

## Soft-Feel und Effekte

Für eine angenehme Haptik stellt man die Oberfläche matt und samtig ein — die sogenannten Soft-Feel- oder Soft-Touch-Lacke. Der Mechanismus beruht auf zwei Bausteinen: einem weichen, weichsegmentreichen Polyurethan-Bindemittel, das dem Film die gummiartige Nachgiebigkeit gibt, und eingearbeiteten Haptik- bzw. Mattierungspartikeln, die die Oberfläche mikroskopisch aufrauen — klassisch organische Polymethylharnstoff-Typen (z. B. Deuteron MK, Pergopak M) sowie mikronisierte Polyester-Elastomerpartikel. Erst das Zusammenspiel aus weicher Matrix und mikrostrukturierter Oberfläche ergibt die samtige, leicht gummiartige Haptik. Zusätzliche Mattierungsmittel (pyrogene oder gefällte Kieselsäure) senken den Glanzgrad und verstärken den optischen Soft-Touch-Eindruck. Effektlacke auf Kunststoff: Metallic-Effekte (Aluminiumflakes für Stoßfänger und Spiegel), Chromoptik-Simulation durch sehr feines Aluminium, Strukturlacke für Innenraum-Oberflächen sowie Kombinationen wie Soft-Feel + Metallic für Instrumententafel-Elemente. Kunststofflackierung erlaubt so mehr Gestaltungsfreiheit als eingefärbtes Material.

## Lösemittelhaltig

Klassisch lösemittelhaltige Kunststofflacke (2K-PUR, 1K) bieten robuste Beständigkeit und einfache Verarbeitung. Ihr Nachteil ist der Gehalt an organischen Lösemitteln (siehe L-168); man stellt sie deshalb zunehmend festkörperreich ein.

## Wässrige Kunststofflacke

Aus Umweltgründen setzen sich wässrige Systeme durch — auf Basis von Acrylat- und Polyurethandispersionen (siehe L-71 ff.), als wässrige Primer wie als Decklacke. Sie senken die Emission deutlich, verlangen aber eine sorgfältige Abstimmung von Trocknung, Verlauf und Haftung auf dem Kunststoff.

OEM-Standard heute: Wässriger Primer → wässriger Basislack (PUD + Acrylat-Copolymer) → lösemittelhaltiger 2K-PUR-Klarlack (oder wässriger KL im Einzelfall). Dieses System ist in der automobilen OEM-Fertigung für Kunststoff-Außenteile (Stoßfänger, Spoiler) etabliert. Für Aftermarket/Reparatur werden lösemittelhaltige 2K-PUR-Systeme weiterhin breit eingesetzt.

**Merksatz**

Auf Kunststoff zählt Elastizität: 2K-PUR für hohe Beständigkeit, Soft-Feel für die Haptik, wässrig für geringe Emission — immer auf einem vorbehandelten, haftvermittelten Untergrund (siehe L-126).

**Stichwörter:** Kunststofflack, 2K-PUR, 1K-Lack, Soft-Feel, Elastizität, wässriger Kunststofflack, Acrylatdispersion, Polyurethandispersion, Mattierung, VOC, Effektlack, Haptik
*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur*

## Übungsblatt Ü-127 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**
Warum spielt Elastizität bei Kunststofflacken eine so große Rolle, und welches Lacksystem wählen Sie für hohe Chemikalien- und Kratzbeständigkeit?

**Elastizität:** Kunststoffbauteile sind oft flexibel; der Lackfilm muss die Verformung mitmachen, ohne zu reißen. Ein zu spröder Film reißt, ein zu weicher ist nicht beständig genug.
**Systemwahl:** Für hohe Chemikalien- und Kratzbeständigkeit wählt man einen 2K-Polyurethanlack aus hydroxylhaltigem Bindemittel und Polyisocyanat-Härter.
**Eigenschaften:** 2K-PUR ist gut auf Flexibilität einstellbar und sehr beständig; zu beachten ist die begrenzte Topfzeit.
**Alternative:** Für einfachere Ansprüche genügen 1K-Systeme.
*Bewertung: Die Antwort begründet die Elastizitätsanforderung über die Flexibilität des Substrats und wählt korrekt 2K-PUR für hohe Beständigkeit.*

**Frage 2** **(Berechnung, 9 Punkte)**
Ein 2K-PUR-Kunststofflack wird im Verhältnis Stammlack:Härter = 100:25 (nach Gewicht) angesetzt, dazu 10 % Verdünnung bezogen auf die Mischung. Berechnen Sie Härtermenge, Verdünnung und Gesamtmasse für 2,0 kg Stammlack.

**Härter:** m(Härter) = 2,0 kg · 25/100 = 0,50 kg
**Mischung:** m(Mischung) = 2,0 kg + 0,50 kg = 2,50 kg
**Verdünnung:** m(Verdünnung) = 2,50 kg · 0,10 = 0,25 kg
**Gesamtmasse:** m(gesamt) = 2,50 kg + 0,25 kg = 2,75 kg — innerhalb der Topfzeit zu verarbeiten.
*Bewertung: Die Reihenfolge (erst Härter zur Mischung, dann Verdünnung auf die Mischung) ist korrekt; der Hinweis auf die Topfzeit rundet die Antwort ab.*

**Frage 3** **(Anwendung, 7 Punkte)**
Ein Hersteller von Kunststoffgehäusen möchte die Emission senken, braucht aber eine angenehme, samtige Haptik der Oberfläche. Was empfehlen Sie?

**Emission:** Ein wässriges Kunststofflacksystem auf Basis von Acrylat- oder Polyurethandispersionen senkt den Lösemittelausstoß deutlich.
**Haptik:** Für die samtige Haptik ein Soft-Feel-/Soft-Touch-Lack mit passenden Bindemitteln, Additiven und Mattierungsmitteln einstellen.
**Voraussetzung:** Der Untergrund muss vorbehandelt und gegebenenfalls mit Haftvermittler versehen sein (siehe L-126), sonst haftet auch das beste System nicht.
*Bewertung: Die Antwort verbindet die Emissionssenkung (wässrig) mit der Haptik-Anforderung (Soft-Feel) und erinnert an die notwendige Vorbehandlung.*

# L-128 · Gelcoat und faserverstärkte Kunststoffe (GFK)

*UP-Deckschicht mit Styrol — mit klarer Arbeitssicherheit*

**Prüfungsteil 1** · A 9

Ein Gelcoat ist die UP-Deckschicht von GFK-Bauteilen; das Styrol copolymerisiert und wird Teil des Films. Bei styrolhaltigen Gelcoats sind geeignete technische und persönliche Schutzmaßnahmen nach Gefährdungsbeurteilung und Sicherheitsdatenblatt erforderlich; insbesondere ist die Exposition gegenüber Styrol zu minimieren.

## Was ein Gelcoat ist

Ein Gelcoat ist die gut haftende, beständige Oberflächenschicht von glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK). Er gibt dem Bauteil Optik, Schutz und Chemikalienbeständigkeit und wird auf Basis ungesättigter Polyesterharze formuliert.

## Aufbau und Prozessablauf

GFK-Bauteile entstehen in einer Form (Negativ- oder Positivform). Der typische Ablauf: (1) Trennmittel auftragen — Wachs (mehrfach polieren), Folientrennmittel (PVA-Lösung, je Entformung neu) oder semipermanente Trennmittel für Mehrfachentformungen; ohne Trennmittel klebt das Bauteil in der Form fest. (2) Gelcoat aufspritzen: 300–600 µm nass, typisch 400–500 µm; thixotrop eingestellt, damit er an senkrechten Formwänden nicht abläuft. Die Schichtdicke sichert die spätere Oberflächenqualität: Zu dünn → Pinholes und schlechte Deckung; zu dick → Risse durch Schrumpfspannungen. (3) Angelieren: 20–60 min bei Raumtemperatur (je nach Initiator/Beschleuniger), bis der Gelcoat geliert ist und beim Antippen zwar noch klebrig (tacky) ist, aber nicht mehr auf dem Finger abfärbt und sich nicht mehr verziehen lässt. In diesem Zustand ist er noch reaktionsfähig — das Laminat bindet chemisch optimal an. Ein bereits klebfrei durchgehärteter Gelcoat ergibt eine deutlich schlechtere Zwischenhaftung. (4) Laminate aufbauen: Laminatharz + Glasfasermatten (CSM = Chopped Strand Mat, 300–600 g/m²) oder Gewebe (Woven Roving) von Hand auflaminieren oder im Spritzverfahren. Jede Laminat-Lage typisch 500–2000 µm; Gesamtwanddicke je nach Bauteil 2–8 mm (Bootsbau 4–6 mm, Fahrzeugkarosserie 2–4 mm). (5) Aushärten durch exotherme Copolymerisation. (6) Entformen nach vollständiger Durchhärtung.

## Härtung mit Styrol

Das ungesättigte Polyesterharz wird mit Styrol als Reaktivverdünner verarbeitet; beide copolymerisieren radikalisch (siehe L-23), das Styrol verdunstet nicht, sondern wird Teil des Films. Gehärtet wird mit einem Peroxid-Initiator, oft mit einem Cobalt-Beschleuniger; zum Inhibitor siehe „Wichtigste Additive im Gelcoat“, Punkt (3).

## Gelierzeit

Die Gelierzeit ist die Zeit, in der das flüssige Harz in den gelierten Zustand übergeht. Sie wird über Initiator- (MEKP) und Beschleunigermenge (Co-Octoat) gesteuert; Verunreinigungen oder Temperaturabweichungen verändern sie. Klassische Messung: Gelation-Timer (Stabmethode; die Gelierzeit flüssiger UP-Harze wird nach DIN EN ISO 2535 bestimmt, die von Pulverlacken dagegen nach DIN EN ISO 8130-6) — ein Rührstab dreht im Harz, bis der Widerstand schlagartig zunimmt. Moderne Qualitätskontrolle: Oszillationsrheologie — Speichermodul G' und Verlustmodul G'' werden zeitaufgelöst gemessen. Als praktisches Kriterium für den Gelpunkt gilt der Crossover G' = G'' (tan δ = 1): Das System wechselt von flüssig (G'' > G') zu fest-elastisch (G' > G''). Er ist allerdings frequenzabhängig und keine allgemeingültige Definition (siehe L-98, L-179). Diese Methode liefert zusätzlich Härtungskinetik, Endmodul und Aussagen zur Vernetzungsdichte.

## Thixotropiermittel nach Harzsystem

Pyrogene Kieselsäure als Thixotropiermittel wird je nach Harzsystem gezielt ausgewählt — das Prinzip: Die Kieselsäureoberfläche darf vom Harz nicht zu gut solvatisiert werden, sonst bricht das Partikelnetzwerk zusammen (siehe L-46). UP-Harze tragen zwar Estergruppen, aber kaum H-Brücken-Donoren → die Silanolgruppen der hydrophilen Kieselsäure (AEROSIL 200, von Evonik für UP-Gelcoats empfohlen) finden im Harz wenig Partner und bilden untereinander ein Netzwerk aus Wasserstoffbrücken — sie wirkt stark verdickend. Vinylesterharze tragen durch die Öffnung der Epoxidringe zahlreiche sekundäre Hydroxylgruppen und sind dadurch H-Brücken-aktiver als UP-Harze: Sie benetzen und solvatisieren die Silanolgruppen der hydrophilen Kieselsäure so gut, dass sich kein tragfähiges Aggregatnetzwerk mehr aufbaut — die Verdickung bleibt zu gering. Hier arbeitet man mit hydrophob nachbehandelten Typen (Evonik empfiehlt AEROSIL R 202, PDMS-modifiziert; daneben R 972, dimethylsilyliert); ihre Wirkung beruht darauf, dass die organisch belegte Oberfläche vom polaren Harz schlecht benetzt wird: Solche Partikeloberflächen lagern sich aneinander und bauen das Netzwerk auf (siehe L-46). Für Polyurethansysteme und Epoxidsysteme gelten ähnliche Überlegungen. Für PUR-Decklacke empfiehlt Evonik AEROSIL R 812 S, für Epoxidsysteme AEROSIL R 805 (zur Dosierlogik allgemein siehe L-46).

## GFK

Glasfasern können gegenüber unverstärktem Harz die mechanische Festigkeit und Formstabilität deutlich erhöhen; die Wirkung auf Schlagzähigkeit und Chemikalienbeständigkeit hängt von Faser, Matrix und Verbundaufbau ab. Der Glasfaseranteil von GFK liegt je nach Verfahren und Bauteil deutlich variabel; der konkrete Anteil wird an die erforderlichen Verbundeigenschaften angepasst.

## Vinylesterharze

Vinylesterharze (VE-Harze) sind eine Weiterentwicklung der UP-Harze: Sie entstehen durch Veresterung eines Epoxidharzes (meist Bisphenol-A-Epoxid; zur stoffrechtlichen Einordnung von Bisphenol A siehe L-28) mit ungesättigten Monocarbonsäuren (typisch Methacrylsäure). Dadurch sitzen die reaktiven C=C-Doppelbindungen an den Kettenenden — im Gegensatz zu UP-Harzen, bei denen sie in der Hauptkette verteilt sind. Vorteile gegenüber UP: Weniger Estergruppen in der Hauptkette → besser hydrolysestabil → deutlich höhere Beständigkeit gegen Wasser, Basen und viele organische Lösemittel. Außerdem bessere Zähigkeit und Schlagfestigkeit (längere Kettensegmente zwischen den Vernetzungspunkten). Vernetzt wird wie beim UP-Harz radikalisch mit Styrol als Reaktivverdünner (MEKP + Co-Beschleuniger). Anwendungen: Chemikalienbeständige Behälter und Rohrleitungen (Säuren, Laugen), Marine (Bootsrümpfe mit überlegener Osmoseresistenz gegenüber UP), Windrotorblätter, Hochleistungs-GFK-Strukturen. Preis: höher als UP-Harz, deshalb nur dort eingesetzt, wo die überlegene Beständigkeit gefordert ist.

## Wichtigste Additive im Gelcoat

Gelcoats sind komplex formulierte Systeme; die wichtigsten Additive: (1) Thixotropiermittel (pyrogene $SiO_2$, siehe oben) — verhindert Ablaufen an der Formwand und sichert gleichmäßige Schichtdicke. (2) Lufttrocknungsadditiv (Paraffinwachs, ca. 0,1–0,5 %): Flotiert beim Gelieren an die Oberfläche und bildet einen dünnen Film, der den Luftsauerstoff von der Grenzfläche ausschließt — $O_2$ inhibiert die radikalische Polymerisation und würde eine klebrige, unvollständig ausgehärtete Oberfläche erzeugen. (3) Inhibitor (MEHQ, Hydrochinon): Im Grundprodukt eingearbeitet; verhindert eine vorzeitige Polymerisation bei der Lagerung. (4) Initiator (MEKP) + Beschleuniger (Co-Octoat, Co-Naphthenat): Kurz vor der Verarbeitung zugegeben; Menge steuert Gelierzeit. (5) UV-Stabilisatoren (HALS + UV-Absorber): Für Außen-Gelcoats (Bootsbau, Fassadenteile) gegen Vergilbung und Kreidung bei Bewitterung. (6) Pigmente und Füllstoffe: $TiO_2$ für Deckung und weiße Farbe; Bariumsulfat als chemisch beständiger Füllstoff mit niedriger Ölzahl — hoher Füllgrad bei geringem Bindemittelbedarf, geringer Schwund.

### Arbeitssicherheit — Styrol

Styrol wird über die Lunge gut aufgenommen und reichert sich im Fettgewebe an; nach CLP ist es als reproduktionstoxisch Kategorie 2 eingestuft (H361d — kann vermutlich das Kind im Mutterleib schädigen) und schädigt bei längerer oder wiederholter Exposition das Gehör (H372); außerdem wirkt es haut- und augenreizend (H315, H319) und reizt die Atemwege (H335). Der Arbeitsplatzgrenzwert beträgt 20 ml/m³ (86 mg/m³). Deshalb ist auf eine niedrige Arbeitsplatzkonzentration zu achten: Absauganlagen und persönliche Schutzausrüstung sind Pflicht. Auch der MEKP-Härter verlangt Sorgfalt: Er ist ein organisches Peroxid (erwärmungs- und zersetzungsgefährlich, H242) und verursacht schwere Augenschäden — Schutzbrille tragen. Initiator und Cobalt-Beschleuniger niemals direkt miteinander mischen (explosionsartige Zersetzung); immer erst den Beschleuniger im Harz verteilen, dann das Peroxid zugeben.

**Merksatz**

Gelcoat = UP-Deckschicht für GFK; Styrol copolymerisiert und bleibt im Film. Gelierzeit über Initiator/Beschleuniger steuern — und wegen der Styrol-Gefahr immer mit Absaugung und Schutzausrüstung arbeiten.

**Stichwörter:** Gelcoat, GFK, ungesättigter Polyester, Styrol, Reaktivverdünner, Gelierzeit, Peroxid, Hydrochinon, Glasfaser, Arbeitssicherheit, AEROSIL 200, Fließgrenze

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; Evonik, Technical Bulletin 54 (AEROSIL in UP-/Vinylesterharzen, Gelcoat-Startformulierung); DIN EN ISO 2535; DIN EN ISO 8130-6*

## Übungsblatt Ü-128 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Was ist ein Gelcoat, welche Rolle spielt das Styrol, und was bewirkt der Inhibitor?

**Gelcoat:** Die haftende, beständige UP-Deckschicht von GFK-Bauteilen.
**Styrol:** Reaktivverdünner, der radikalisch mit dem Polyester copolymerisiert und Teil des Films wird (verdunstet nicht).
**Inhibitor:** Ein Stoff wie Hydrochinon, der eine vorzeitige Polymerisation verhindert (Lagerstabilität).

*Bewertung: Gelcoat, Styrol als Reaktivverdünner und die Inhibitorfunktion werden korrekt erklärt.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**

Ein Gelcoat-Ansatz von 400 g wird mit 2 % Peroxid-Härter (bezogen auf den Ansatz) gehärtet. Wie viel Härter ist nötig?

**Rechnung:** m(Härter) = 400 g · 2/100 = 8 g
**Antwortsatz:** Es werden 8 g Peroxid-Härter zugegeben.

*Bewertung: Die Prozentrechnung ist korrekt.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**

Welche Arbeitsschutzmaßnahmen sind bei der Verarbeitung von styrolhaltigen Gelcoats zwingend, und warum?

**Gefahr:** Styrol wird über die Lunge aufgenommen; es ist reproduktionstoxisch Kat. 2 (H361d) und schädigt bei wiederholter Exposition das Gehör (H372); AGW 20 ml/m³.
**Maßnahmen:** Niedrige Arbeitsplatzkonzentration durch Absauganlagen, dazu persönliche Schutzausrüstung.

*Bewertung: Die Styrol-Gefahr wird korrekt benannt und mit Absaugung und PSA verknüpft.*

Kapitel 10

# Spezial- und Funktionsbeschichtungen

# L-129 · Funktionelle Beschichtungen — Überblick

*Easy-to-clean, selbstreinigend, antimikrobiell, kratzfest*

**Prüfungsteil 1** · A 9

Funktionelle Beschichtungen geben einer Oberfläche eine Zusatzfunktion über Schutz und Dekoration hinaus — etwa leichte Reinigbarkeit, Selbstreinigung, antimikrobielle Wirkung oder erhöhte Kratzfestigkeit.

## Was funktionelle Beschichtungen leisten

Neben Schutz und Farbe erfüllen sie eine gezielte technische Funktion. Als Matrix dienen oft anorganisch-organische Hybride (Sol-Gel-Systeme). Gängige Gruppen sind Easy-to-clean/hydrophob, photokatalytisch-selbstreinigend, antimikrobiell und kratzfest.

## Easy-to-clean und hydrophob

Niedrige Oberflächenenergie und ein hoher Wasser-Kontaktwinkel (über 90–100°, superhydrophob über 150° — Lotuseffekt) können die Benetzung durch Wasser vermindern; Easy-to-clean-Eigenschaften hängen zusätzlich von Oberflächenchemie, Rauheit und Verschmutzungsart ab. Erreicht wird das über Fluor- oder Siliconchemie. Fluorhaltige Systeme beruhen dabei meist auf PFAS; diese Stoffgruppe steht unter einem laufenden europäischen Beschränkungsverfahren, weshalb siliconbasierte und andere fluorfreie Alternativen an Bedeutung gewinnen. Die Wischfestigkeit (Randwinkel-Abnahme nach vielen Reibzyklen) ist ein wichtiges Prüfmerkmal.

## Photokatalytisch selbstreinigend

Photokatalytisch aktives $TiO_2$ (z. B. Anatas) kann unter geeigneter UV-Bestrahlung reaktive Spezies bilden, die bestimmte organische Verunreinigungen abbauen können. Zugleich wird die Oberfläche superhydrophil: Wasser läuft als geschlossener Film ab und spült die gelösten Reste weg. $TiO_2$ wirkt als Photokatalysator und wird im idealisierten Reaktionszyklus nicht stöchiometrisch verbraucht; ein Abbau von Gerüchen oder Luftschadstoffen ist nur unter geeigneten Bedingungen und mit entsprechendem Nachweis zu erwarten.

## Antimikrobiell und kratzfest

Antimikrobielle Beschichtungen wirken über Silber- oder Kupferionen oder über Photokatalyse. Der Nachweis der antibakteriellen Wirkung erfolgt bei ionisch wirkenden Systemen nach ISO 22196, bei photokatalytischen Systemen nach ISO 27447 — dort wird unter definierter UV-Bestrahlung geprüft. Beide Normen prüfen nur Bakterien; für Pilze und Viren sind eigene Verfahren nötig. Kratzfeste Klarlacke enthalten $SiO_2$-Nanopartikel (Nanokomposit), die Kratz- und Abriebfestigkeit erhöhen — bekannt vom kratzfesten Automobil-Klarlack.

## Umwelt und Sicherheit

Beim Umgang mit Nanopartikeln Stäube und Aerosole nicht einatmen (Absaugung, Schutzausrüstung). Biozide Wirkstoffe unterliegen der Biozidverordnung; nur REACH-konforme, freigegebene Rohstoffe einsetzen.

**Merksatz**

Funktionell = Zusatzfunktion. Easy-to-clean: niedrige Oberflächenenergie, Wasser-Kontaktwinkel über 90 bis 100° — Rauheit und Schmutzart entscheiden mit. Selbstreinigend: Nano-$TiO_2$ + UV → superhydrophil + Radikale. Antimikrobiell: Ag/Cu (ISO 22196) bzw. Photokatalyse (ISO 27447). Kratzfest: $SiO_2$-Nanokomposit.

**Stichwörter:** funktionelle Beschichtung, Easy-to-clean, hydrophob, Lotuseffekt, Kontaktwinkel, photokatalytisch, selbstreinigend, Titandioxid, antimikrobiell, Nanokomposit, kratzfest

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; ISO 22196; ISO 27447; Verordnung (EU) Nr. 528/2012 (Biozidverordnung)*

## Übungsblatt Ü-129 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Wie funktioniert eine photokatalytisch selbstreinigende Beschichtung?

**Photokatalysator:** Nano-Titandioxid (Anatas) wird durch UV-Licht aktiviert.

**Radikale:** Es entstehen Sauerstoffradikale, die organischen Schmutz zersetzen.

**superhydrophil:** Die Oberfläche wird superhydrophil — Wasser läuft als Film ab und spült die Reste weg.

**Dauerhaftigkeit:** $TiO_2$ wirkt als Photokatalysator und wird nicht stöchiometrisch verbraucht; unter geeigneten Bedingungen können auch Gerüche und Luftschadstoffe abgebaut werden.

*Bewertung: Das Zusammenspiel von UV-Anregung, Radikalbildung und Superhydrophilie wird korrekt beschrieben, und es wird erkannt, dass $TiO_2$ als Katalysator wirkt und dabei nicht verbraucht wird.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**

Ein kratzfester UV-härtender Klarlack (100 % Festkörper, Dichte 1,10 g/cm³) enthält 4,0 Ma-% $SiO_2$-Nanopartikel (Partikeldichte 2,2 g/cm³). Berechnen Sie den Volumenanteil des $SiO_2$ im ausgehärteten Film.

**Gegeben:** Massenanteil $SiO_2$ = 4,0 Ma-%; $\rho(SiO_2)$ = 2,2 g/cm³; $\rho$(Lack) = 1,10 g/cm³.

**Basis 100 g Lack:** $V(SiO_2)$ = 4,0 g / 2,2 g/cm³ = 1,818 cm³; V(Lack) = 100 g / 1,10 g/cm³ = 90,91 cm³.

**Volumenanteil:** $\varphi(SiO_2)$ = 1,818 / 90,91 · 100 % = 2,0 Vol-%.

**Antwortsatz:** Der $SiO_2$-Anteil beträgt rund 2,0 Vol-% im ausgehärteten Film.

*Bewertung: Die Umrechnung von Massen- in Volumenanteile mit den Dichten von $SiO_2$ und Lack wird korrekt durchgeführt.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**

Für einen häufig berührten Handlauf im Krankenhaus soll eine funktionelle Beschichtung gewählt werden. Was empfehlen Sie und wie sichern Sie die Wirkung ab?

**Auswahl:** Vorrangig eine Easy-to-clean-Beschichtung mit guter Reinigungs- und Desinfektionsmittelbeständigkeit — der Handlauf muss desinfizierend gereinigt werden können. Eine antimikrobielle Ausrüstung (Silber-/Kupferionen) kommt ergänzend in Frage.

**Grenzen:** Antimikrobielle Oberflächen ersetzen keine Flächendesinfektion; ihr infektionspräventiver Zusatznutzen im Krankenhausalltag ist nicht belegt.

**Nachweis:** Antibakterielle Wirkung nach ISO 22196 (Laborwert); zusätzlich Abrieb-/Kratzfestigkeit und Beständigkeit gegen die eingesetzten Desinfektionsmittel prüfen.

**Sicherheit:** Nur zugelassene, biozidrechtskonforme Wirkstoffe einsetzen (Verordnung (EU) Nr. 528/2012).

*Bewertung: Die Empfehlung stellt die Reinig- und Desinfizierbarkeit voran, ordnet die antimikrobielle Ausrüstung als Ergänzung mit begrenztem Nutzennachweis ein und sichert Wirkung und Zulassung ab.*

# L-130 · Glasbeschichtung

*Lacke auf Glas — Haftung auf einer glatten, polaren Oberfläche*

**Prüfungsteil 1** · A 9

Glas ist hart, glatt und chemisch beständig — die Herausforderung beim Beschichten ist die Haftung. Je nach Zweck kommen magere Alkydharze, UV-härtende UP-Systeme oder wässrige Dispersionen zum Einsatz.

## Werkstoff Glas

Glas besteht überwiegend aus Siliciumdioxid in amorpher (gestaltloser) Anordnung von SiO4-Tetraedern, dazu Metalloxide wie Natrium-, Kalium- und Calciumoxid. Es ist lichtdurchlässig, hart und spröde, gegenüber vielen Medien beständig, kann jedoch insbesondere durch starke Laugen sowie je nach Glaszusammensetzung durch weitere aggressive Medien angegriffen werden, und ist empfindlich gegen plötzliche Temperaturwechsel.

## Bindemittel für Glas

Je nach Anwendung (Malfarben, dauerhafte Beschichtung) können magere Alkydharze, UV-härtende UP-/Acrylatsysteme oder wässrige Dispersionen eingesetzt werden; die Eignung hängt von Glas, Vorbehandlung und Anforderung ab. Bei wässrigen Systemen kommen Dispersionen auf Basis von Polyvinylacetat und Polyvinylbutyral (PVB) zum Einsatz.

## Farbstoffe und Additive

Für transparente Farbwirkung eignen sich lösliche Farbstoffe, vor allem Metallkomplex-Farbstoffe (zentrales Metallatom mit Liganden) sowie lösliche Azo-Farbstoffe (Kupferphthalocyanine hingegen sind typische organische Pigmente, keine Farbstoffe). Cellulosenitrat dient als physikalisch trocknender Filmbildner zur schnelleren Antrocknung; als Additive kommen z. B. Verlaufsmittel und Rheologieadditive gegen Läuferbildung hinzu.

## Vorbehandlung und Haftung

Vor der Beschichtung muss das Glas sauber, fettfrei und trocken sein; gereinigt wird mit einem entfettenden Lösemittel. Anders als man meinen könnte, ist Glas nicht unpolar, sondern polar und hochenergetisch (Silanolgruppen an der Oberfläche) — es wird deshalb gut benetzt. Das Haftungsproblem ist zweifach: Die Oberfläche ist sehr glatt (wenig mechanische Verankerung), und der polare Verbund ist wasserempfindlich, sodass Feuchtigkeit die Haftung an der Grenzfläche unterwandern kann. Abhilfe schaffen Haftvermittler auf Silan-Basis: Sie können über hydrolysierte Silangruppen mit der Glasoberfläche wechselwirken und über organofunktionelle Gruppen an die Beschichtung anbinden; dadurch kann die Haftung und Feuchtebeständigkeit verbessert werden. Zusätzlich lässt sich die Oberfläche durch Anätzen aufrauen. Störungen durch Staub sind bei transparenten Lacken besonders sichtbar (Unebenheiten, Krater, Haftungsminderung).

## Umwelt und Sicherheit

Zum Anätzen genannte Flusssäure ist hochgiftig und stark ätzend — Verwendung nur mit besonderer Fachkunde und Schutzausrüstung, sonst Alternativen bevorzugen. Wegen der Bruchgefahr beim Umgang mit Glas Schutzbrille und schnittfeste Handschuhe tragen. Lösemittelemissionen gering halten.

**Merksatz**

Glasbeschichtung = Haftung auf glattem, polarem Untergrund. Glas wird gut benetzt, aber die glatte, wasserempfindliche Oberfläche hält schlecht — Silan-Haftvermittler verbessern Haftung und Feuchtebeständigkeit deutlich. Bindemittel nach Zweck (magere Alkyde, UV-UP, PVAc/PVB-Dispersionen), transparente Farbstoffe, reinigen bzw. anätzen — und Glasbruch- sowie Flusssäuregefahr ernst nehmen.

**Stichwörter:** Glasbeschichtung, Siliciumdioxid, magere Alkydharze, UV-Lack, Polyvinylbutyral, Polyvinylacetat, Metallkomplex-Farbstoff, Phthalocyanin, Anätzen, Flusssäure, Glasbruch, Silan-Haftvermittler

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie*

## Übungsblatt Ü-130 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Warum ist die Haftung das Hauptproblem beim Beschichten von Glas, und welche Bindemittel werden je nach Zweck eingesetzt?

**Haftung:** Glas ist glatt, hart und chemisch beständig. Es ist zwar polar und wird gut benetzt, aber die glatte Oberfläche bietet wenig mechanische Verankerung, und der polare Verbund ist wasserempfindlich — deshalb Silan-Haftvermittler.

**Bindemittel:** Magere Alkydharze für haftende Beschichtungen, UV-Lacke auf UP-Basis, für wässrige Systeme Dispersionen aus Polyvinylacetat und Polyvinylbutyral.

*Bewertung: Das Haftungsproblem und passende Bindemittel je nach Anwendung werden korrekt genannt.*

**Frage 2** **(Berechnung, 6 Punkte)**

Ein mageres Alkydharz ist 60 %ig (in Xylol) gelöst. Wie viel Festharz steckt in 250 g der Harzlösung?

**Ansatz:** Festharz = Masse · Festkörperanteil = 250 g · 0,60.

**Rechnung:** Festharz = 150 g.

*Bewertung: Der Festharzanteil wird korrekt aus Masse und Konzentration bestimmt.*

**Frage 3** **(Anwendung, 8 Punkte)**

Wie bereitet man Glas für die Beschichtung vor, wie lässt sich die Haftung verbessern, und welche Gefahren sind dabei zu beachten?

**Vorbehandlung:** Glas sauber, fettfrei und trocken machen (entfettendes Lösemittel).

**Haftung:** Ein Silan-Haftvermittler kann über seine hydrolysierten Silangruppen an die Glasoberfläche anbinden und verbessert so Haftung und Feuchtebeständigkeit; zusätzlich verbessert Anätzen die mechanische Verankerung.

**Gefahren:** Flusssäure zum Anätzen ist hochgiftig/ätzend (nur mit Fachkunde/Schutz); Glasbruchgefahr — Schutzbrille und schnittfeste Handschuhe.

*Bewertung: Reinigung, Anätzen und die Sicherheitsaspekte (Flusssäure, Glasbruch) werden erkannt.*

# L-131 · Polyvinylbutyral (PVB) und Folienbeschichtung

*Ein elastischer, sehr gut haftender Filmbildner für Folienlacke*

**Wahlqualifikation** · B 12

Polyvinylbutyral (PVB) ist ein thermoplastischer Filmbildner mit guter Elastizität und häufig guter Haftung auf geeigneten Substraten; es wird unter anderem für Folienlacke und Haftgründe eingesetzt. Seine Eigenschaften hängen vom Anteil der Vinylalkohol-Gruppen ab.

## Was PVB ist

Polyvinylbutyral gehört zu den Polyvinylacetalen und entsteht aus Polyvinylalkohol und Butyraldehyd. Es ist thermoplastisch und kann hohe Elastizität und gute Haftung auf geeigneten Glas-, Metall- und Kunststoffoberflächen zeigen; das Eigenschaftsniveau hängt von PVB-Typ und Formulierung ab. Bekannt ist PVB als Zwischenschicht in Verbund-Sicherheitsglas; in der Lacktechnik dient es als Filmbildner für Folienlacke und als Haftgrund.

## Aufbau und Vinylalkohol-Gruppen

Ein PVB-Molekül trägt Vinylbutyral-, Vinylalkohol- und Vinylacetat-Einheiten. Der Anteil der Vinylalkohol-Gruppen (handelsüblich meist etwa 11 bis 27 %, bei Folien- und Lacktypen häufig 18 bis 21 %) steuert die Eigenschaften: Mit steigendem Vinylalkohol-Anteil nehmen Polarität, Glasübergangstemperatur, Festigkeit, Härte und die Haftung auf polaren Untergründen (Glas, Metall) zu, während Bruchdehnung und Löslichkeit in unpolaren Lösemitteln abnehmen; die Zahlenwerte hängen vom PVB-Typ und der Molekülstruktur ab.

## Löslichkeit

PVB kann in geeigneten niederen Alkoholen, Glykolethern und Alkohol/Aromat-Lösemittelgemischen löslich sein; die Löslichkeit hängt vom PVB-Typ und der Zusammensetzung des Lösemittels ab. Die hydrophoben Vinylbutyral-Einheiten bewirken die Löslichkeit in vielen Lösemitteln, die hydrophilen Vinylalkohol-Einheiten die Löslichkeit in polaren Lösemitteln.

## Kombination und Anwendung

PVB wird oft mit Amino-, Phenol-, Alkyd- oder Epoxidharzen kombiniert und plastifiziert diese Harze. Als Folienlack wird es dünn — Trockenschichtdicke etwa 5 bis 10 µm — auf Kunststofffolien aufgetragen, meist im Walzverfahren.

## Heißsiegelbarkeit

Kunststofffolien werden erst nach dem Bedrucken und Beschichten durch Heißsiegeln verbunden: Erwärmen unter Druck verschweißt die thermoplastische Oberfläche. Ein Folienlack darf die Heißsiegelbarkeit deshalb nicht behindern.

**Merksatz**

PVB = elastischer, sehr gut haftender Polyvinylacetal-Filmbildner; der Vinylalkohol-Anteil steuert Glasübergang, Festigkeit und Löslichkeit. Einsatz als Folienlack und Haftgrund, dünn im Walzverfahren, ohne die Heißsiegelbarkeit zu stören.

**Stichwörter:** Polyvinylbutyral, PVB, Polyvinylacetal, Vinylalkohol, Folienlack, Haftgrund, Heißsiegelbarkeit, Verbundglas, Walzverfahren, thermoplastisch

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie*

## Übungsblatt Ü-131 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Beschreiben Sie den Aufbau von Polyvinylbutyral und erklären Sie, wie der Anteil der Vinylalkohol-Gruppen die Eigenschaften steuert.

**Aufbau:** PVB ist ein Polyvinylacetal aus Polyvinylalkohol und Butyraldehyd; es trägt Vinylbutyral-, Vinylalkohol- und Vinylacetat-Einheiten.

**Wirkung Vinylalkohol:** Mit steigendem Vinylalkohol-Anteil nehmen Glasübergangstemperatur, Festigkeit, Härte und Haftung auf polaren Untergründen zu; die Elastizität (Bruchdehnung) nimmt dagegen ab.

**Löslichkeit:** Zugleich verschiebt sich die Löslichkeit zu polareren Lösemitteln.

*Bewertung: Aufbau und die Rolle der Vinylalkohol-Gruppen werden korrekt verknüpft.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**

Ein Folienlack auf PVB-Basis hat einen Volumenfestkörper von 15 % und wird mit 40 µm nass aufgetragen. Welche Trockenschichtdicke ergibt sich, und liegt sie im typischen Bereich von 5 bis 10 µm?

**Trockenschichtdicke:** TSD = NSD · VFK/100 = 40 · 15/100 = 6 µm

**Bewertung:** 6 µm liegt im typischen Folienlack-Bereich von 5 bis 10 µm.

*Bewertung: Die Trockenschichtdicke wird korrekt aus dem Volumenfestkörper berechnet und eingeordnet.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**

Warum darf ein Folienlack die Heißsiegelbarkeit der Folie nicht behindern?

**Heißsiegeln:** Folien werden erst nach dem Bedrucken und Beschichten durch Erwärmen unter Druck verbunden (versiegelt).

**Folge:** Ein Lack, der das Verschweißen behindert, macht die Verpackung unbrauchbar.

*Bewertung: Der Bezug zwischen nachgelagertem Heißsiegeln und der Anforderung an den Folienlack wird erkannt.*

# L-132 · Hammerschlag- und Effektlacke

*Struktur aus Benard-Zellen, gesteuert durch Siliconöle*

**Prüfungsteil 1** · A 8.4

Effektlacke wie der Hammerschlaglack erzeugen ihr Muster gezielt über Oberflächenspannungs-Unterschiede: Siliconhaltige Additive können die Ausbildung von Benard-Zellen beeinflussen, die zusammen mit Metallpigmenten die typische Struktur bilden.

## Was Effektlacke sind

Effektlacke nutzen einen Oberflächeneffekt gezielt zur Dekoration. Der Hammerschlaglack ahmt die Optik von gehämmertem Metall nach — ein gewollter Struktureffekt, der ohne den passenden Zusatz ein Materialfehler wäre.

## Benard-Zellen

Beim Verdunsten der Lösemittel kühlt und konzentriert sich die Lackoberfläche unterschiedlich stark. Dadurch entstehen an der Filmoberfläche Unterschiede der Oberflächenspannung. Diese Gradienten ziehen Lack aus Bereichen niedriger in Bereiche hoher Oberflächenspannung (Marangoni-Strömung); die Strömung ordnet sich zu wabenförmigen Konvektionszellen — den Benard-Zellen. Diese Zellen transportieren die Pigmente und erzeugen das sichtbare Muster. Rein dichtegetriebene Konvektion spielt in Lackfilmen von wenigen 10 µm Dicke praktisch keine Rolle.

## Siliconöle als Effektgeber

Ausgelöst und gesteuert wird der Effekt durch Siliconöle. Ihre Wirkung hängt stark vom Polymerisationsgrad ab: kurzkettige Typen wirken als Verlaufsmittel, langkettige Siliconadditive können als Effektgeber eingesetzt werden; der geeignete Polymerisationsgrad (Richtwert etwa 1400 bis 2000) und die Dosierung sind systemabhängig.

## Metallpigmente

Den metallischen Charakter geben Aluminium-Bronzen. Für den Hammerschlageffekt nutzt man non-leafing-Typen, die vom Bindemittel benetzt werden und sich im Film verteilen, statt an der Oberfläche aufzuschwimmen.

## Formulierung

Als Bindemittel dienen oft Alkyd-Melaminharz-Kombinationen für Einbrennhammerschlag. Antiabsetzmittel wie Schichtsilicat- oder Kieselsäurepaste (siehe L-46) halten die Bronze in Schwebe; das Siliconöl wird erst vor der Viskositätseinstellung zugegeben, damit der Effekt reproduzierbar bleibt.

**Merksatz**

Hammerschlageffekt = gezielte Benard-Zellen. Siliconöl mit hohem Polymerisationsgrad als Effektgeber, non-leafing-Aluminiumbronze für den Metallglanz — ein kontrollierter Oberflächenspannungs-Effekt.

**Stichwörter:** Effektlack, Hammerschlaglack, Benard-Zellen, Siliconöl, Oberflächenspannung, Aluminiumbronze, non-leafing, Polymerisationsgrad, Struktureffekt, Einbrennlack

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie*

## Übungsblatt Ü-132 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Wie entsteht der Hammerschlageffekt? Nennen Sie die drei beteiligten Elemente.

**Benard-Zellen:** Beim Verdunsten entstehen an der Filmoberfläche Unterschiede der Oberflächenspannung; die daraus folgende Marangoni-Strömung ordnet sich zu wabenförmigen Konvektionszellen.

**Siliconöl:** Langkettiges Siliconöl (hoher Polymerisationsgrad) löst den Effekt aus und steuert ihn.

**Metallpigment:** Non-leafing-Aluminiumbronze gibt den Metallglanz und wird durch die Zellen zum Muster geordnet.

*Bewertung: Benard-Zellen, Siliconöl und Metallbronze werden als Zusammenspiel korrekt genannt.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**

Das Effekt-Siliconöl hat einen Polymerisationsgrad von 1500; die Dimethylsiloxan-Einheit hat die molare Masse 74,15 g/mol. Berechnen Sie die mittlere Molmasse.

**Formel:** $M_n \approx P \cdot M_0$ (siehe L-04)

**Rechnung:** $M = 1500 \cdot 74{,}15\ \text{g/mol} \approx 111\,000\ \text{g/mol}$

**Deutung:** Die hohe Molmasse zeigt ein langkettiges Siliconöl — nach Lernblatt der geeignete Effektgeber (Richtwert $P \approx 1400–2000$).

*Bewertung: Die Molmasse wird korrekt aus Polymerisationsgrad mal Einheitsmasse bestimmt und gedeutet.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**

Warum verwendet man für den Hammerschlageffekt non-leafing- und nicht leafing-Aluminiumbronze?

**non-leafing:** Sie wird vom Bindemittel benetzt und verteilt sich im Film.

**leafing:** Leafing-Bronze schwimmt an die Oberfläche auf und gibt eine gleichmäßige Metallschicht statt eines Musters.

**Folge:** Für den beschriebenen Effekt werden typischerweise non-leafing-Aluminiumbronzen eingesetzt, weil sie im Film verteilt bleiben und durch die Strömungszellen beeinflusst werden können.

*Bewertung: Der Unterschied non-leafing/leafing wird korrekt mit dem Struktureffekt verknüpft.*

# L-133 · Strukturlacke

*Struktur als Effekt — Lackstörungen gezielt genutzt*

**Prüfungsteil 1** · A 9

Strukturlacke nutzen Oberflächenstörungen bewusst als Effekt: Runzel-, Reiß-, Hammerschlag- oder Ledernarbeneffekte überdecken kleine Mängel und geben eine dekorative Struktur.

## Was Strukturlacke sind

Bei Strukturlacken werden definierte Trocknungs- und Oberflächeneffekte gezielt zur Erzeugung einer gewünschten Struktur genutzt. Dazu gehören Runzel- und Reißlacke, Hammerschlaglacke (siehe L-132) sowie Ledernarben- und Kunstlederlacke (Kunstlederplastik). So lassen sich kleine Unebenheiten überdecken oder ein bestimmtes Aussehen (z. B. Armaturenbretter) erzeugen.

## Runzel- und Rissbildung

Runzelbildung: Trocknet die Oberfläche deutlich schneller als die darunterliegende Schicht, entstehen Schrumpf- und Spannungsunterschiede, die den Film zu Runzeln aufwerfen. Gezielt erzeugt wird das über eine starke Oberflächensikkativierung (z. B. Cobalt-Sikkativ) oder über schnell verdunstende Lösemittel. Rissbildung: Ein geeigneter Unterschied in Trocknung, Schrumpfung und Filmbildung zwischen Grund- und Deckschicht kann Rissbildung begünstigen; ein magerer Decklack auf fetterem Grundlack ist ein möglicher Ansatz.

## Bindemittel

Für die grobe Narbe wird oft ein 2K-System aus OH-Polymer und Polyisocyanat verwendet; für Kunstlederplastik auch physikalisch trocknende Kombinationen aus Polyvinylchlorid und Poly(meth)acrylat. Additive sind vor allem Antiabsetz-, Thixotropier- und Verdickungsmittel; ein Katalysator (z. B. für die Isocyanatvernetzung) kann zugegeben werden.

## Applikation und Prüfung

Bei grober Narbe wird zunächst eine deckende Schicht mit verdünntem Lack gespritzt, dann das unverdünnte Material mit relativ großer Düse und geringem Spritzdruck appliziert; die Struktur wird wesentlich durch Viskosität, Düsengröße, Spritzdruck, Schichtdicke und Trocknungsverhalten beeinflusst: Je höher die Verarbeitungsviskosität und je gröber die Zerstäubung, desto weniger verläuft das Material und desto gröber bleibt die Narbe. Die Rautiefe misst man mit einem Tastschnitt- oder geeigneten optischen Verfahren; den Wassergehalt (bei 2K-PUR wichtig) mit der Karl-Fischer-Titration.

## Umwelt und Sicherheit

Bei der Spritzapplikation nur in abgesaugter Kabine arbeiten; beim Spritzen entstehen Lackaerosole, der Atemschutz wird nach Gefährdungsbeurteilung und Expositionssituation ausgewählt (z. B. Kombinationsfilter A2-P2; bei höherer Belastung und isocyanathaltigen Härtern umluftunabhängiger bzw. Gebläseatemschutz nach TRGS 430). Eine Staubmaske reicht nicht: Sie hält Lösemitteldämpfe nicht zurück. Dazu Schutzbrille und Schutzkleidung; der Kompressor gehört außerhalb der Kabine bzw. EX-geschützt. Isocyanat-Härter sind in der Regel atemwegs- und hautsensibilisierend eingestuft (H334, H317 — maßgeblich ist das Sicherheitsdatenblatt); beim Spritzen ist das Einatmen des Aerosols die führende Gefährdung — die Grenzwerte liegen im Mikrogramm-Bereich (TRIG 10 µg NCO/m³, siehe L-83). Deshalb zusätzlich Schutzhandschuhe gegen Hautkontakt; Tätigkeiten mit Diisocyanaten sind seit dem 24.08.2023 nach REACH Anhang XVII Nr. 74 nur nach vorheriger Schulung zulässig.

**Merksatz**

Strukturlack = Lackstörung als Effekt. Runzel (Oberfläche trocknet schneller als der Untergrund → Schrumpfspannung) und Riss (magerer Deck- auf fettem Grundlack) gezielt erzeugen; Struktur über Düse, Druck und Viskosität steuern — und beim Spritzen isocyanathaltiger Systeme auf Atemschutz mit Kombinationsfilter und Handschuhe achten.

**Stichwörter:** Strukturlack, Runzellack, Reißlack, Ledernarbenlack, Kunstlederplastik, grobe Narbe, Tastschnittgerät, Karl-Fischer, 2K-PUR, Spritzapplikation
*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie*

## Übungsblatt Ü-133 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**
Erklären Sie, wie bei Strukturlacken Runzel- und Rissbildung gezielt erzeugt werden.

**Runzel:** Die Oberfläche wird gezielt zum schnelleren Trocknen gebracht — über starke Oberflächensikkativierung oder schnell verdunstende Lösemittel. Der Trocknungsunterschied zur darunterliegenden Schicht erzeugt Schrumpf- und Spannungsunterschiede; der Film wirft sich zu Runzeln auf.

**Riss:** Ein magerer Decklack (wenig Bindemittel) auf einem fetten Grundlack reißt beim Schrumpfen auf.

*Bewertung: Für beide Effekte wird sowohl die konkrete Erzeugungsmaßnahme genannt (Runzel: Oberflächensikkativierung oder schnellflüchtige Lösemittel; Riss: magerer Deck- auf fettem Grundlack) als auch der Mechanismus über Trocknungs- und Schrumpfunterschiede erklärt.*

**Frage 2** **(Anwendung, 8 Punkte)**
Wie lässt sich die Oberflächenstruktur bei der Applikation steuern, und wie wird sie geprüft?

**Steuern:** Über Lackviskosität, Düsengröße und Spritzdruck; höhere Viskosität begünstigt die Struktur, große Düse und geringer Druck grobe Narbe.

**Prüfen:** Rautiefe mit einem Tastschnitt- oder geeigneten optischen Verfahren; Wassergehalt (2K-PUR) mit Karl-Fischer-Titration.

*Bewertung: Steuerung über Applikationsparameter und die Prüfmethoden werden erkannt.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**
Welche Schutzmaßnahmen sind bei der Spritzapplikation von Strukturlacken wichtig?

**Spritzen:** Absaugung; Atemschutz nach Gefährdungsbeurteilung und Expositionssituation (z. B. Kombinationsfilter A2-P2; bei isocyanathaltigen Härtern und höherer Belastung gebläseunterstützter Atemschutz nach TRGS 430) — eine Staubmaske reicht nicht, sie hält keine Lösemitteldämpfe zurück; Schutzbrille und Schutzkleidung; Kompressor außerhalb der Kabine bzw. EX-geschützt.

**Härter:** Isocyanat-Härter sind atemwegs- und hautsensibilisierend: Aerosol nicht einatmen, Hautkontakt vermeiden, Schutzhandschuhe.

*Bewertung: Die Spritz- und Isocyanat-Schutzmaßnahmen werden erkannt, und es wird erkannt, dass eine Staubmaske nicht ausreicht.*

# L-134 · Straßenmarkierungsfarbe

*Kennzeichnen statt schützen — reflektierend, abriebfest, elastisch*

**Prüfungsteil 1** · A 9

Straßenmarkierungsfarben kennzeichnen, statt zu schützen. Straßenmarkierungssysteme umfassen unter anderem thermoplastische, lösemittel-/wasserbasierte und reaktive Systeme; physikalisch trocknende Acrylatsysteme sind eine wichtige Klasse. Sie reflektieren über eingestreute Glasperlen und benötigen je nach Einsatz eine hohe Abriebfestigkeit, ausreichende Verformbarkeit und eine anwendungsgerechte Dauerhaftigkeit.

## Aufgabe

Anders als die meisten Beschichtungen dienen Straßenmarkierungsfarben nicht dem Korrosionsschutz oder der Dekoration, sondern der Kennzeichnung und Leitung des Verkehrs. Wegen der riesigen Straßenflächen sind sie wirtschaftlich sehr bedeutend.

## Bindemittel

Häufig ist ein physikalisch trocknendes Acrylatharz (lösemittel- oder wasserbasiert), das schnell überfahrbar ist. Daneben gibt es lösemittelfreie Zweikomponenten-Kaltplastiken und Heißschmelz-Systeme, für die der Begriff Thermoplastikmarkierung reserviert ist.

## Reflexion durch Glasperlen

Damit die Markierung nachts leuchtet, werden Glasperlen eingemischt oder frisch aufgestreut. Glasperlen erzeugen Retroreflexion, indem einfallendes Licht über Brechung und Reflexion bevorzugt in Richtung der Lichtquelle zurückgeführt wird, und sorgen so für die Nachtsichtbarkeit.

## Anforderungen

Die Farbe muss je nach Einsatz eine hohe Abriebfestigkeit (ständiger Verkehr), ausreichende Verformbarkeit und Weißtonbeständigkeit aufweisen, mit guter Haftung auf Asphalt. Die Überfahrbarkeit wird durch System, Schichtdicke, Temperatur und Feuchte bestimmt; viele schnell trocknende Systeme können nach relativ kurzer Zeit freigegeben werden.

## Umwelt und Sicherheit

Wegen der großen eingesetzten Mengen ist Emissionsarmut besonders wichtig: Bevorzugt werden lösemittelarme, wasserbasierte oder Heißschmelz-Systeme. Flammpunkt und VOC-Gehalt sind zu beachten.

**Merksatz**

Straßenmarkierung = Kennzeichnen. Physikalisch trocknendes Acrylat (schnell überfahrbar), Glasperlen für die Retroreflexion, sehr abriebfest und dauerelastisch — und wegen der Mengen möglichst emissionsarm.

**Stichwörter:** Straßenmarkierung, physikalisch trocknendes Acrylat, Glasperlen, Retroreflexion, Abriebfestigkeit, Dauerelastizität, Asphalt, Heißschmelz, überfahrbar, VOC

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie*

---

## Übungsblatt Ü-134 — Musterlösungen

**Frage 1** (Verständnis, 8 Punkte)

Welche Funktion hat eine Straßenmarkierungsfarbe, welches Bindemittel ist typisch, und wie entsteht die Reflexion?

**Funktion:** Kennzeichnung und Leitung des Verkehrs (nicht Korrosionsschutz/Dekoration).
**Bindemittel:** Meist ein physikalisch trocknendes Acrylatharz (schnell überfahrbar); daneben 2K-Kaltplastiken und Heißschmelz-Systeme (Thermoplastikmarkierung).
**Reflexion:** Eingemischte oder aufgestreute Glasperlen werfen das Licht zurück (Retroreflexion).

*Bewertung: Funktion, Bindemittel und die Retroreflexion durch Glasperlen werden korrekt genannt.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**

Eine Markierung soll eine Trockenschichtdicke von 300 µm erreichen. Bei einem Volumenfestkörper von 55 % — welche Nassschichtdicke ist nötig?

**Umstellung:** NSD = TSD · 100 / VFK

**Rechnung:** NSD = 300 · 100 / 55 ≈ 545 µm

*Bewertung: Die Nassschichtdicke wird korrekt aus Zielschichtdicke und Volumenfestkörper bestimmt.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**

Warum wird bei Straßenmarkierungsfarben besonders auf Emissionsarmut geachtet?

**Menge:** Wegen der riesigen Straßenflächen werden sehr große Mengen verarbeitet.

**Folge:** Schon geringe Lösemittelanteile summieren sich; daher lösemittelarme, wasserbasierte oder Heißschmelz-Systeme.

*Bewertung: Der Mengeneffekt als Grund für emissionsarme Systeme wird erkannt.*

# L-135 · Abziehlack

*Temporärer Schutz, der sich rückstandsfrei wieder abziehen lässt*

**Prüfungsteil 1** · A 9

Ein Abziehlack schützt Bauteile vorübergehend (z. B. bei Lagerung und Transport) und wird danach als geschlossener Film wieder abgezogen. Er darf sich leicht und rückstandsfrei entfernen lassen.

## Aufgabe

Abziehlacke dienen dem temporären Schutz: Maschinen, Geräte oder Bauteile werden während Lagerung und Transport geschützt und der Film vor Gebrauch wieder entfernt. Der Abziehlack soll sich nach der vorgesehenen Schutzdauer möglichst leicht und rückstandsarm bzw. rückstandsfrei entfernen lassen. Bestimmte temporäre Korrosionsschutz- oder Wachssysteme können aufgrund regionaler Umwelt- oder Produktvorschriften Einschränkungen unterliegen.

## Anforderungen

An einen Abziehlack werden gestellt: preiswerte Herstellung, schnelle und wirtschaftliche Applikation, leichte und vollständige Entfernbarkeit, keine oder nur reversible Quellbarkeit durch Wasser, Verträglichkeit mit dem Untergrund ohne diesen während der vorgesehenen Einsatzdauer unzulässig zu verändern oder zu schädigen, keine Abzeichnung des Untergrundes sowie umweltschonende Verarbeitung und Entsorgung (möglichst recyclingfähig).

## Bindemittel und Antihaftmittel

Als Bindemittel dienen wässrige Dispersionen, z. B. Polyvinylacetat-Ethylen- oder Polyacrylsäureester-Copolymere. Antihaftmittel — meist Siliconöle, Fettsäureester oder mit Polytetrafluorethylen modifizierte Polyesterwachse — senken die Oberflächenspannung stark, sodass die Haftung zum Untergrund gering ist und der Film sich abziehen lässt. Verdicker stellen die Rheologie ein.

## Farbgebung und Applikation

Zur Einfärbung dienen transparent dispergierte Pigmente oder wasserlösliche Farbstoffe (z. B. Triarylmethan- oder Anthrachinon-Farbstoffe). Abziehlacke werden häufig mit einer ausreichend hohen Schichtdicke appliziert, damit ein zusammenhängender, mechanisch abziehbarer Film entsteht; die erforderliche Dicke ist systemabhängig, häufig etwa 100 µm Trockenschichtdicke oder darüber. Aufgetragen wird mit Pinsel, Rolle oder Airless (Spritznebel vermeiden, da schlecht entfernbar).

## Umwelt und Sicherheit

Die abgezogene Beschichtung ist je nach Zusammensetzung und Einstufung fachgerecht zu entsorgen; giftige oder schwermetallhaltige Pigmente sind zu vermeiden. Wünschenswert sind gute biologische Abbaubarkeit und Recyclingfähigkeit. Wässrige Systeme sind ohnehin emissionsarm.

**Merksatz**

Abziehlack = temporärer Schutzfilm, der rückstandsfrei abgezogen wird. Wässrige Dispersion, Antihaftmittel senkt die Haftung, TSD häufig etwa 100 µm oder darüber zum reißfreien Abziehen — und keine giftigen Pigmente; die abgezogene Folie ist je nach Einstufung fachgerecht zu entsorgen.

**Stichwörter:** Abziehlack, temporärer Schutz, Antihaftmittel, Oberflächenspannung, Polyvinylacetat-Dispersion, Trockenschichtdicke, recyclingfähig, Entsorgung, wasserlösliche Farbstoffe

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie*

## Übungsblatt Ü-135 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**
Welche zentralen Anforderungen werden an einen Abziehlack gestellt, und wodurch lässt er sich leicht abziehen?

**Anforderungen:** Leichte, rückstandsarme bzw. rückstandsfreie Entfernbarkeit, keine/reversible Wasserquellung, Verträglichkeit mit dem Untergrund, keine Abzeichnung, umweltschonende Entsorgung.

**Abziehbarkeit:** Antihaftmittel (z. B. Siliconöle, PTFE-modifizierte Wachse) senken die Oberflächenspannung → geringe Haftung zum Untergrund.

*Bewertung: Anforderungen und die Rolle der Antihaftmittel werden korrekt erklärt.*

**Frage 2** **(Berechnung, 6 Punkte)**
Der Film soll eine Trockenschichtdicke von 100 µm erreichen. Bei einem Volumenfestkörper von 50 % — welche Nassschichtdicke ist nötig?

**Ansatz:** NSD = TSD · 100 / Volumenfestkörper.

**Rechnung:** NSD = 100 · 100 / 50 = 200 µm.

*Bewertung: Die Nassschichtdicke wird korrekt bestimmt.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**
Was ist bei der Entsorgung der abgezogenen Folie zu beachten?

**Fachgerecht:** Die abgezogene Folie ist je nach Zusammensetzung und Einstufung fachgerecht zu entsorgen; giftige oder schwermetallhaltige Pigmente sind zu vermeiden.

**Wunsch:** Gute biologische Abbaubarkeit und Recyclingfähigkeit sind wünschenswert.

*Bewertung: Die Entsorgungsanforderung und der Verzicht auf giftige Pigmente werden erkannt.*

# L-136 · Antigraffitilack

*Beschichtung, auf der Sprühfarbe schlecht haftet — leicht wieder zu entfernen*

**Prüfungsteil 1** · A 9

Ein Antigraffitilack sorgt dafür, dass aufgesprühte Graffiti schlecht haften und sich leicht wieder entfernen lassen — entweder über eine Opferschicht oder über eine dauerhaft schmutzabweisende Oberfläche.

## Aufgabe

Graffiti an Gebäuden, Zügen und großen Flächen zu beseitigen, kostet jedes Jahr hohe Summen. Ein Antigraffitilack erleichtert das Entfernen: Auf der Beschichtung haftet die Sprühfarbe nur schwach und lässt sich durch Abwaschen, notfalls mit Hochdruckreiniger oder Spezialreiniger, wieder abnehmen.

## Zwei Wirkprinzipien

- Opferschicht — eine dünne, leicht abtragbare Schicht (z. B. aufschwimmendes Wachs); sie wird beim Reinigen zusammen mit der Farbe entfernt und danach neu aufgetragen.
- Dauerhaft (permanent) — eine öl- und schmutzabweisende (oleophobe) Oberfläche, etwa durch Silicon- oder Fluorbeschichtung. Silicon- oder fluorhaltige Oberflächen können die Oberflächenenergie und Benetzung durch Graffitifarben reduzieren und dadurch deren Haftung erschweren.

## Bindemittel, Additive, Deckvermögen

Permanente Antigraffiti-Systeme können beispielsweise auf siliconmodifizierten Acrylat-/PUR-Systemen oder anderen geeigneten Bindemitteln basieren. Als Lösemittel eignen sich Ester, Ketone und Glykolester; als Additive Antiabsetzmittel, Katalysatoren sowie Oberflächenadditive, die Verlauf und Gleiten (Slip) verbessern. Das Deckvermögen wird über Kontrastkarten (schwarz/weiß) farbmetrisch oder mit dem Kryptometer bestimmt.

## Langzeitwirkung

Der Antigraffitieffekt darf den Untergrund nicht schädigen und muss dauerhaft wirken — auch nach Alterung, Witterung und mehreren Reinigungsaktionen. Daneben gelten die üblichen Anforderungen an Beständigkeit, Haftung, Elastizität und Deckvermögen.

## Umwelt und Sicherheit

Wird das Material als Spraydose formuliert, ist das Treibgas (z. B. Propan/Butan) extrem entzündbar (Aerosol: H222) — nur in gut belüfteter Umgebung und fern von Zündquellen verarbeiten. Isocyanat-Härter können die Atemwege sensibilisieren; Spritznebel meiden, geeignete Atem- und Hautschutzausrüstung tragen. Lösemittelarme Systeme sind zu bevorzugen.

**Merksatz**

Antigraffiti = Farbe haftet schlecht und geht leicht wieder ab. Zwei Wege: Opferschicht (mitentfernt und neu aufgetragen) oder dauerhaft oleophobe Oberfläche. Wirkung muss Alterung und wiederholtes Reinigen überstehen.

**Stichwörter:** Antigraffiti, Opferschicht, oleophob, Oberflächenenergie, Silicon, siliconisiertes Acrylat, Isocyanatvernetzung, Deckvermögen, Kryptometer, Spraydose, Treibgas

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie*

## Übungsblatt Ü-136 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**
Erklären Sie die zwei grundsätzlichen Wirkprinzipien eines Antigraffitilackes.

**Opferschicht:** Eine leicht abtragbare Schicht (z. B. aufschwimmendes Wachs) wird mit der Graffitifarbe entfernt und danach neu aufgetragen.

**Permanent:** Eine dauerhaft oleophobe Oberfläche (Silicon/Fluor) senkt die Oberflächenenergie, sodass die Farbe kaum haftet und abgewaschen werden kann.

*Bewertung: Beide Prinzipien und der jeweilige Entfernungsmechanismus werden korrekt beschrieben.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**
Eine permanente Beschichtung soll 40 µm Trockenschichtdicke erreichen. Bei einem Volumenfestkörper von 45 % — welche Nassschichtdicke ist nötig?

**Ansatz:** NSD = TSD · 100 / Volumenfestkörper

**Rechnung:** NSD = 40 · 100 / 45 ≈ 88,9 µm

*Bewertung: Die Nassschichtdicke wird korrekt aus Trockenschichtdicke und Volumenfestkörper bestimmt.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**
Warum muss die Wirkung eines Antigraffitilackes über lange Zeit erhalten bleiben, und was darf er nicht verursachen?

**Langzeit:** Die Beschichtung soll auch nach Alterung, Witterung und mehreren Reinigungsaktionen noch wirken.

**Untergrund:** Sie darf den Untergrund nicht schädigen und muss die üblichen Anforderungen an Haftung, Beständigkeit und Elastizität erfüllen.

*Bewertung: Dauerwirkung nach wiederholter Reinigung und die Unbedenklichkeit für den Untergrund werden erkannt.*

# L-137 · Elektroisolierlack (Tränklack)

*Imprägniert und verfestigt die Wicklungen von Elektromotoren*

**Prüfungsteil 1** · A 9

Elektroisolierlacke isolieren und verfestigen elektrische Bauteile. Tränklacke imprägnieren die Wicklungen von Motoren; ein bewährtes Bindemittel ist das Polyesterimid.

## Aufgabe

Zu den Elektroisolierlacken gehören Draht-, Tränk- und Träufellacke sowie Gießharze. Tränklacke sind weder Klebstoffe noch klassische Lacke: Sie sind Imprägniermassen, die die Hohlräume zwischen den Wicklungsdrähten vollständig ausfüllen. Nach dem Aushärten entsteht ein fester Polymer-Verbundkörper (Duromer) — nicht schmelzbar, nicht reversibel. Der ausgehärtete Tränklack (1) stabilisiert die Wicklung mechanisch gegen Erschütterungen und Fliehkräfte, (2) verbessert die Wärmeleitung Draht→Blechpaket (weniger Lufteinschlüsse = weniger thermische Isolation), (3) isoliert elektrisch, (4) schützt gegen Feuchtigkeit und Chemikalien. Anforderungen: Beständigkeit gegen thermische, chemische und mechanische Belastung, elektrische Isolierung (hoher Durchgangswiderstand, hohe Durchschlagfestigkeit) sowie gute Penetration in feinste Hohlräume bei der Applikation.

## Polyesterimid

Polyesterimide entstehen aus drei Bausteinen: (1) Polyol (z. B. Ethylenglykol, Glycerin) für die Ester-Verknüpfungen; (2) Trimellithsäureanhydrid (TMA) — liefert sowohl Estergruppen als auch den Imidring-Vorläufer; (3) Diamin (technisch üblich: 4,4'-Diaminodiphenylmethan, MDA) für die Imidringbildung.

Reaktion in zwei Stufen: (1) Polykondensation bei 150–180 °C: TMA-Anhydrid + Diamin → Amic-Säure (–CO–NH– + freie Carboxylgruppe) + Esterbindungen mit dem Polyol → $H_2O$ wird abgespalten. (2) Cyclodehydratisierung ab 180–220 °C: Die Amic-Säure-Gruppen schließen unter $H_2O$-Abspaltung zum planaren, mit dem Aromaten kondensierten Imidring (Phthalimid-Struktur, –CO–N–CO–). Der Imidring ist thermisch extrem stabil; er bestimmt die Wärmeklasse (nach IEC 60085: Klasse F = 155 °C, Klasse H = 180 °C).

Warum taucht Styrol auf? Manche Polyesterimid-Vorpolymere enthalten ungesättigte Doppelbindungen (UP-Polyesterimid-Hybrid). Styrol copolymerisiert radikalisch mit diesen Doppelbindungen und vernetzt das Polymer zusätzlich — Ergebnis: nahezu 100 % Festkörper ohne schwerflüchtige Lösemittel. Früher wurden Kresole (Methylphenole) als Lösemittel eingesetzt (hohe Lösekraft für PI-Vorpolymere), die aber physiologisch bedenklich sind (niedriger Arbeitsplatzgrenzwert, hautresorptiv — H-Markierung nach TRGS 900); sie werden heute durch Styrol oder kresolfreie Alternativsysteme ersetzt.

## Applikation

Wickelgüter werden durch Tauchen imprägniert. Mit zusätzlichem Vakuum (Vakuumimprägnierung) werden die Hohlräume sehr gut ausgefüllt; Aushärten unter Rotation verbessert das Ergebnis. Bei der Träufelimprägnierung wird das Tränkharz über Düsen auf das vorgewärmte, sich drehende Objekt geträufelt und dann durch Erwärmen ausgehärtet.

## Isolationskennwerte

Lufteinschlüsse verschlechtern die Isolation; bei hohen Spannungen kann es zum Durchschlag (direkte Leitung von Draht zu Draht) kommen. Kennwerte sind der spezifische Durchgangswiderstand (in Ω·m bzw. Ω·cm) und die Durchschlagfestigkeit (in kV/mm). Pigmente und Füllstoffe können die elektrischen Eigenschaften beeinflussen; deshalb werden Zusammensetzung und Einsatzmenge bei Elektroisolierlacken gezielt ausgewählt.

### Umwelt und Sicherheit

Styrol als Reaktivverdünner hat einen niedrigen Arbeitsplatzgrenzwert und gilt als reproduktions-/gesundheitsbedenklich — lösemittelarm arbeiten, gut lüften, Schutzausrüstung tragen. Kresole sind physiologisch bedenklich. Das Diamin MDA ist als krebserzeugend (Carc. 1B, H350) eingestuft und in REACH Anhang XIV gelistet (zulassungspflichtig; für die Verwendung als isoliertes Zwischenprodukt in der Harzsynthese gilt die Zulassungspflicht nicht, wohl aber streng kontrollierte Bedingungen); im ausgehärteten Tränklack liegt es chemisch gebunden vor, beim Umgang mit den Rohstoffen sind strenge Schutzmaßnahmen einzuhalten. Bei Prüfung und Anwendung ist die Gefahr durch elektrischen Strom zu beachten.

**Merksatz**

Tränklack = Wicklungen imprägnieren und verfestigen. Polyesterimid mit Styrol (nahe 100 % Festkörper), Tauch-/Vakuum-/Träufelimprägnierung; Lufteinschlüsse verschlechtern die Isolation; Pigmente und Füllstoffe können die elektrischen Eigenschaften beeinflussen — Zusammensetzung und Einsatzmenge werden deshalb gezielt gewählt. Styrol und Kresole beachten.

**Stichwörter:** Elektroisolierlack, Tränklack, Polyesterimid, Vakuumimprägnierung, Träufelimprägnierung, Durchgangswiderstand, Durchschlagfestigkeit, Lufteinschluss, Styrol, Kresol

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie*

## Übungsblatt Ü-137 — Musterlösungen

**Frage 1** (Verständnis, 8 Punkte)

Welche Aufgabe hat ein Tränklack, und aus welchen Rohstoffen ist ein Polyesterimid aufgebaut?

**Tränklack:** Imprägniert (homogen verfüllt) und verfestigt die Wicklungen von Elektromotoren; isoliert elektrisch und leitet Wärme ab.

**Polyesterimid:** Kondensation aus Polyolen (z. B. Ethylenglykol), Trimellithsäureanhydrid (TMA) und Diaminen (z. B. MDA). Bei den ungesättigten Typen (UP-Hybrid) kommt Styrol als Reaktivverdünner hinzu und ermöglicht dort rund 100 % Festkörper.

*Bewertung: Aufgabe des Tränklacks und der Aufbau des Polyesterimids werden korrekt genannt.*

**Frage 2** (Berechnung, 6 Punkte)

Eine Isolierschicht hat eine Durchschlagfestigkeit von 70 kV/mm. Bei welcher Spannung schlägt eine 0,5 mm dicke Schicht durch?

**Ansatz:** U = Durchschlagfestigkeit · Schichtdicke.

**Rechnung:** U = 70 kV/mm · 0,5 mm = 35 kV.

*Bewertung: Die Durchschlagspannung wird korrekt bestimmt.*

**Frage 3** (Anwendung, 6 Punkte)

Nennen Sie ein Imprägnierverfahren und die wichtigen Sicherheitsaspekte bei Tränklacken.

**Verfahren:** z. B. Vakuumimprägnierung (füllt Hohlräume gut aus) oder Träufelimprägnierung auf das drehende, vorgewärmte Objekt.

**Sicherheit:** Styrol (niedriger AGW, reproduktionsbedenklich) und Kresole beachten; bei Anwendung Gefahr durch elektrischen Strom.

*Bewertung: Imprägnierverfahren und die Sicherheitsaspekte werden erkannt.*

# L-138 · Brandschutzbeschichtungen (Dämmschichtbildner)

*Intumeszierender passiver Brandschutz für Stahl*

**Prüfungsteil 1** · A 9

Brandschutzbeschichtungen (Dämmschichtbildner) schäumen im Brandfall auf ein Vielfaches ihrer Dicke auf und bilden einen isolierenden Kohlenstoffschaum. Dieser verzögert die Erwärmung tragender Stahlbauteile und hält deren Tragfähigkeit über eine definierte Zeit aufrecht.

## Aufgabe und Wirkprinzip

Die Tragfähigkeit von Stahl nimmt mit steigender Temperatur deutlich ab; die kritische Temperatur ist abhängig von Bauteil, Ausnutzungsgrad und Bemessung und liegt nicht pauschal bei 500 °C. Dämmschichtbildner sind reaktive, intumeszierende Beschichtungen: Bei geeigneten Systemen setzen ab einem charakteristischen Temperaturbereich chemische Reaktionen ein, die zur Schaumbildung führen; Beginn und Verlauf sind systemabhängig. Die Schicht bläht sich um ein Vielfaches auf und bildet einen porösen Kohlenstoffschaum. Dieser wirkt als Wärmedämmung und verzögert den Temperaturanstieg im Stahl — passiver, baulicher Brandschutz.

## Chemischer Aufbau

- Bindemittel — bildet die Matrix.
- Säurespender (z. B. Ammoniumpolyphosphat) — liefert bei Hitze Polyphosphorsäure.
- Kohlenstoff-/Gerüstbildner (z. B. Pentaerythrit) — bildet das Kohlenstoffgerüst.
- Treibmittel/Gasbildner (z. B. Melamin) — bläht die Schicht durch Gasabspaltung auf.
- Katalysatoren und Additive; alternativ Blähgraphit als reaktiver Bestandteil.

## Wirkreaktion: Wie Polyphosphorsäure den Kohlenstoffschaum erzeugt

Das Wirktrio reagiert in drei überlappenden Schritten:

1. Ammoniumpolyphosphat (APP) zersetzt sich ab ca. 250–300 °C: APP → $NH_3$ + Polyphosphorsäure $H(PO_3)n$. $NH_3$ entweicht als Gas (erster Beitrag zur Blähung).

2. Die Polyphosphorsäure dehydratisiert Pentaerythrit: Sie verestert die vier Hydroxylgruppen — Wasser wird abgespalten, ein verzweigtes Phosphat-Kohlenstoff-Netzwerk entsteht (Char-Vorläufer). Das ist der eigentliche Kohlenstoff-Bildner-Schritt: Polyphosphorsäure liefert die Säureaktivierung, Pentaerythrit den Kohlenstoffkörper.

3. Melamin zersetzt sich ab ca. 300 °C: $NH_3$ und $N_2$-haltige Gase blähen das entstehende Kohlenstoffgerüst auf ein Vielfaches auf (20–50-faches Volumen). Das Bindemittel hält die Schaumstruktur zusammen, bis der Char verfestigt ist.

Ergebnis: Ein poröser, isolierender Kohlenstoffschaum — ein hoch effektiver Hitzeschild, solange er mechanisch intakt bleibt. Deshalb darf die aufgeschäumte Schicht nicht freigelegt oder mechanisch beschädigt werden.

## Systemaufbau und Klassen

Ein zugelassenes System besteht aus Grundierung, dem eigentlichen Dämmschichtbildner und einer optionalen Deckbeschichtung. Zugelassene Systeme werden entsprechend ihrer geprüften Feuerwiderstandsdauer klassifiziert; je nach System und Anwendung sind unterschiedliche Feuerwiderstandsklassen möglich (z. B. R30 bis R120, früher F30–F120 nach DIN 4102-2); geprüft wird nach DIN EN 13381-8, klassifiziert nach DIN EN 13501-2. Die nötige Trockenschichtdicke hängt von der geforderten Feuerwiderstandsdauer, der kritischen Stahltemperatur und dem Profilfaktor (Verhältnis Oberfläche zu Volumen) des Bauteils ab.

### Verarbeitung

Dämmschichtbildner dürfen nur mit bauaufsichtlichem Verwendbarkeitsnachweis — allgemeine bauaufsichtliche Zulassung des DIBt zusammen mit einer allgemeinen Bauartgenehmigung, oder Europäische Technische Bewertung (ETA) plus Bauartgenehmigung — und von geschulten Fachkräften aufgebracht werden. Die Schichtdicke ist exakt einzuhalten und zu dokumentieren (Nass- und Trockenschichtdicke messen). Für den Hochbau gelten Zellulosebrand-Kurven; für Kohlenwasserstoffbrände (z. B. Offshore) kommen epoxidbasierte Systeme zum Einsatz.

### Umwelt und Sicherheit

Wasserbasierte bzw. lösemittelarme Systeme bevorzugen. Beim Verarbeiten Stäube (Ammoniumpolyphosphat, Melamin) meiden und absaugen. Die Zulassung und die Herstellervorgaben strikt einhalten — hier hängt die Personensicherheit im Brandfall unmittelbar von der korrekten Ausführung ab.

**Merksatz**

Dämmschichtbildner = intumeszierend: Ab einem systemabhängigen Temperaturbereich schäumen sie auf → Kohlenstoffschaum dämmt den Stahl. Wirktrio: Säurespender + Kohlenstoffbildner + Treibmittel. R30–R120 (DIN EN 13381-8 / 13501-2); Schichtdicke exakt und dokumentiert.

**Stichwörter:** Brandschutzbeschichtung, Dämmschichtbildner, Intumeszenz, Kohlenstoffschaum, Ammoniumpolyphosphat, Pentaerythrit, Melamin, Feuerwiderstand, Profilfaktor, kritische Stahltemperatur
*Quellen: DIN EN 13381-8; DIN EN 13501-2; DIN 4102-2*

## Übungsblatt Ü-138 — Musterlösungen

**Frage 1** (Verständnis, 8 Punkte)
Erklären Sie das Wirkprinzip eines Dämmschichtbildners und nennen Sie die drei reaktiven Bestandteile.

**Wirkprinzip:** Bei Hitze schäumt die Schicht um ein Vielfaches auf (Intumeszenz) — ausgelöst von der Zersetzung des Ammoniumpolyphosphats ab etwa 250 bis 300 °C, der genaue Beginn ist systemabhängig — und bildet einen porösen Kohlenstoffschaum, der als Wärmedämmung wirkt und den Stahl vor schneller Erwärmung schützt.
**Säurespender:** z. B. Ammoniumpolyphosphat — liefert Polyphosphorsäure.
**Kohlenstoffbildner:** z. B. Pentaerythrit — bildet das Kohlenstoffgerüst.
**Treibmittel:** z. B. Melamin — bläht die Schicht durch Gasabspaltung auf.
*Bewertung: Das Aufschäumen zum dämmenden Kohlenstoffschaum und das Wirktrio Säurespender/Kohlenstoffbildner/Treibmittel werden korrekt genannt.*

**Frage 2** (Berechnung, 8 Punkte)
Ein Dämmschichtbildner wird 1,5 mm dick aufgetragen und schäumt im Brandfall auf das 40-fache seiner Dicke auf. Wie dick ist die entstehende Dämmschicht?

**Ansatz:** Dämmschichtdicke = Trockenschichtdicke · Aufschäumfaktor
**Rechnung:** = 1,5 mm · 40 = 60 mm
**Antwortsatz:** Die Dämmschicht wird rund 60 mm dick.
**Hinweis:** Für diese Ausdehnung muss bei der Planung genügend Platz vorhanden sein.
*Bewertung: Der Aufschäumfaktor wird korrekt angewandt und der Platzbedarf praxisgerecht ergänzt.*

**Frage 3** (Anwendung, 6 Punkte)
Wovon hängt die erforderliche Trockenschichtdicke einer Brandschutzbeschichtung ab, und warum darf nur geschultes Personal sie auftragen?

**Einflussgrößen:** Von der geforderten Feuerwiderstandsdauer (R30–R120), der kritischen Stahltemperatur und dem Profilfaktor (Oberfläche/Volumen) des Bauteils.
**Schulung:** Die Schutzwirkung im Brandfall hängt unmittelbar von der exakt eingehaltenen Schichtdicke und dem zugelassenen Systemaufbau ab.
**Dokumentation:** Nass- und Trockenschichtdicke messen und protokollieren; Zulassung beachten.
*Bewertung: Die Einflussgrößen auf die Schichtdicke und die sicherheitskritische Bedeutung der korrekten Ausführung werden erkannt.*

# L-139 · Antistatische und leitfähige Beschichtungen

*ESD-Schutz und Explosionsschutz durch Ladungsableitung*

**Prüfungsteil 1** · A 9

Antistatische und leitfähige Beschichtungen leiten elektrostatische Ladungen kontrolliert zur Erde ab. Sie schützen empfindliche Elektronik (ESD) und verhindern in explosionsgefährdeten Bereichen zündfähige Funken.

## Aufgabe

Reibung, Begehen oder vorbeistreichende Luft laden Oberflächen elektrostatisch auf. Leitfähige/ableitfähige Beschichtungen führen diese Ladung kontrolliert zur Erde. Zwei Einsatzfelder: ESD-Schutz (Elektronik/Halbleiter in einer EPA — Electrostatic Protected Area) und Explosionsschutz (Ex-Zonen, um zündfähige Funken zu vermeiden). Der Begriff „antistatisch“ wird je nach Norm und Anwendung weiter gefasst.

## Widerstandsbereiche

- isolierend: $10^{10}$–$10^{14}$ Ω — leitet praktisch nicht ab.
- ableitfähig (dissipativ): $10^{5}$–$10^{9}$ Ω — kontrollierte, langsame Ableitung; schützt Personen und Bauteile.
- leitfähig: unter etwa $10^{5}$ Ω — schnelle Ableitung.

Diese Dekaden sind die in der Beschichtungs- und Bodenpraxis übliche Orientierung, keine einheitliche Normklassifikation. Für den Lacklaboranten in Deutschland sind zwei Regelwerke maßgeblich: Die TRGS 727 zieht die Grenzen bei $10^{4}$ Ω (leitfähig) und $10^{9}$ Ω (ableitfähig) und nennt einen Gegenstand elektrostatisch geerdet, wenn sein Ableitwiderstand höchstens $10^{6}$ Ω beträgt, eine Person bei höchstens $10^{8}$ Ω. DIN EN IEC 61340-5-1 klassifiziert Beschichtungsmaterialien nicht allgemein in leitfähig, ableitfähig und isolierend. Sie ist eine Anforderungsnorm: Sie legt fest, was ESD-Schutzelemente wie Arbeitsflächen und Bodenbeläge leisten müssen, und verlangt dort einen Widerstand zum Erdungspunkt unter $1 \cdot 10^{9}$ Ω. Daneben klassifiziert ANSI/ESD S541 die Widerstandseigenschaften von ESD-Schutzverpackungsmaterialien: leitfähig unter $10^{4}$ Ω, ableitfähig von $10^{4}$ bis unter $10^{11}$ Ω, isolierend ab $10^{11}$ Ω. Diese Einteilung gilt für Verpackungen und ist keine allgemeine Klassifizierung von Bodenbeschichtungen. Maßgeblich ist deshalb immer das Regelwerk, nach dem geprüft wird — nicht die Dekadentabelle.

## Aufbau und Leitfähigmachung

Die Leitfähigkeit entsteht durch leitfähige Füllstoffe wie Leitruß, Graphit, Metallpartikel oder Kohlenstoff-Nanoröhren. Häufig wird ein Leitlack als leitfähige Zwischenschicht unter eine ableitfähige Deckschicht gelegt und über Kupferbänder geerdet. Es gibt auch ableitfähige Pulverlacke, etwa zur Verringerung der Staubanziehung.

## Prüfung und Normen

Gemessen wird der Erd-/Ableitwiderstand (z. B. mit der Dreifußelektrode); ergänzend wird im Walking-Test die Personenaufladung (Mensch-Schuh-Boden-System) nach dem jeweils anzuwendenden Prüfverfahren bewertet; konkrete Grenzwerte sind norm- und anwendungsabhängig. Maßgebliche Normen: DIN EN IEC 61340-5-1 (ESD-Schutz, Systemwiderstand unter $10^{9}$ Ω), DIN EN 61340-4-5 (Mensch-Schuh-Boden) und die TRGS 727 (Vermeidung von Zündgefahren im Explosionsschutz).

## Umwelt und Sicherheit

Die korrekte, dauerhafte Erdung ist sicherheitskritisch — für ESD- wie für Explosionsschutz. Der Erd- bzw. Ableitwiderstand ist regelmäßig nachzuprüfen, da er mit Alterung und Verschmutzung steigt. Leitfähige Stäube beim Verarbeiten absaugen.

**Merksatz**

Ableitfähig = $10^5$–$10^9$ Ω (kontrolliert), isolierend >$10^{10}$, leitfähig <$10^5$ — Praxiseinteilung, kein Normwert: Maßgeblich sind in Deutschland die TRGS 727 (Ex-Schutz; Grenzen bei $10^4$ und $10^9$ Ω) und DIN EN IEC 61340-5-1 (ESD) — eine Anforderungsnorm, die für Boden und Arbeitsfläche unter $1 \cdot 10^9$ Ω zum Erdungspunkt fordert. ANSI/ESD S541 mit $10^4$ und $10^{11}$ Ω gilt für ESD-Schutzverpackungen, nicht für Bodenbeschichtungen. Einsatz: ESD-Schutz + Explosionsschutz. Leitruß/Leitlack + Erdung. Grenzwerte für die Personenaufladung sind norm- und anwendungsabhängig.

**Stichwörter:** antistatisch, ableitfähig, leitfähige Beschichtung, ESD-Schutz, Explosionsschutz, Ableitwiderstand, Leitruß, Leitlack, DIN EN 61340-5-1, TRGS 727

*Quellen: DIN EN IEC 61340-5-1; TRGS 727; DIN EN 61340-4-5; ANSI/ESD S541*

## Übungsblatt Ü-139 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Unterscheiden Sie isolierende, ableitfähige und leitfähige Beschichtungen und nennen Sie die zwei Haupteinsatzfelder.

**isolierend:** $10^{10}$–$10^{14}$ Ω — leitet praktisch keine Ladung ab.
**ableitfähig:** $10^5$–$10^9$ Ω — kontrollierte, langsame Ableitung; schützt Personen und Bauteile.
**leitfähig:** unter etwa $10^5$ Ω — schnelle Ableitung.
**Einordnung:** Diese Dekaden sind die in der Beschichtungs- und Bodenpraxis übliche Einteilung und kein Normwert: Maßgeblich sind in Deutschland die TRGS 727, die die Grenzen bei $10^4$ und $10^9$ Ω zieht, und DIN EN IEC 61340-5-1 — eine Anforderungsnorm, die Beschichtungsmaterialien nicht allgemein klassifiziert, sondern für Boden und Arbeitsfläche einen Widerstand unter $1 \cdot 10^9$ Ω zum Erdungspunkt fordert. ANSI/ESD S541 mit $10^4$ und $10^{11}$ Ω klassifiziert ESD-Schutzverpackungsmaterialien und gilt nicht für Bodenbeschichtungen.
**Einsatzfelder:** ESD-Schutz (empfindliche Elektronik in einer EPA) und Explosionsschutz (Ex-Zonen, Funken vermeiden).
*Bewertung: Die drei Widerstandsbereiche und beide Einsatzfelder werden korrekt zugeordnet.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**

Bei der Prüfung eines ESD-Bodens wird eine Spannung von 100 V angelegt; es fließt ein Ableitstrom von 5 µA. Berechnen Sie den Ableitwiderstand und ordnen Sie ihn ein.

**Ansatz:** $R = U / I$
**Rechnung:** $R = 100\ V / 5 \cdot 10^{-6}\ A = 2 \cdot 10^7\ \Omega$
**Einordnung:** $2 \cdot 10^7$ Ω liegt im ableitfähigen Bereich ($10^5$–$10^9$ Ω) und unter dem Grenzwert von $10^9$ Ω.
**Antwortsatz:** Der Boden ist mit $2 \cdot 10^7$ Ω ableitfähig und liegt im vorgegebenen Bereich.
*Bewertung: Das ohmsche Gesetz wird korrekt angewandt und das Ergebnis richtig in den ableitfähigen Bereich eingeordnet.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**

In einer Lösemittel-Abfüllung (Ex-Zone) soll der Boden beschichtet werden. Welche Beschichtung wählen Sie und was ist zu beachten?

**Auswahl:** Eine ableitfähige Bodenbeschichtung, damit keine zündfähige elektrostatische Aufladung entsteht.
**Erdung:** Über einen Leitlack und Kupferbänder sicher erden; Ableitwiderstand im geforderten Bereich (TRGS 727).
**Kontrolle:** Regelmäßig Ableitwiderstand und Personenaufladung (Walking-Test) prüfen, da der Wert mit Alterung steigt.
*Bewertung: Die Auswahl passt zum Explosionsschutz und die sicherheitskritische Erdung samt Kontrolle wird benannt.*

Kapitel 11

# Druckfarben

# L-140 · Aufbau einer Druckfarbe

*Farbmittel, Bindemittel, Träger und Additive — und ihr Zusammenspiel*

**Wahlqualifikation** · B 11

Nicht der einzelne Rohstoff entscheidet über die Druckqualität, sondern das Zusammenspiel aus Rezeptur, Herstellung, Druckverfahren, Bedruckstoff und Trocknung/Härtung.

## Abgrenzung zu Lacken

Druckfarben sind chemisch mit Lacken verwandt, erfüllen aber eine zusätzliche Aufgabe: Sie müssen im Druckprozess kontrolliert dosiert, übertragen und auf dem Bedruckstoff zu einem funktionierenden Druckbild verfestigt werden. Im Gegensatz zu Lacken, die meist deckend oder schutzgebend aufgetragen werden, sind Druckfarben oft transparenter und werden in extrem dünnen Schichten verarbeitet.

## Die vier Komponentengruppen

Vereinfacht: Druckfarbe = Farbmittel + Bindemittelsystem/Vehicle + Träger (flüchtige oder reaktive Bestandteile) + Additive. Nicht jedes System enthält alle Gruppen in gleicher Form.

Farbmittel | Aufgabe: Farbe, Transparenz, Deckvermögen | Typische Beispiele: Pigmente (organisch, anorganisch); bei bestimmten Inkjet-Systemen auch Farbstoffe
Bindemittel/Vehicle | Pigment benetzen, transportieren und nach der Verfestigung im Film binden | Harze, Öle/Firnisse, Polymerbindemittel
Wasser/Lösemittel/Reaktivverdünner | Verarbeitung und Einstellung des Fließverhaltens | Wasser, Alkohole, Ester, Glycolether, Acrylat-Monomere — systemabhängig
Additive | Gezielte Verbesserung einzelner Eigenschaften | Dispergiermittel, Entschäumer, Wachse, Netzmittel, Sikkative (nur bei ox. Trocknung)

## Typische Schichtdicken je Verfahren

Die geringe Schichtdicke der Druckfarben hat direkte Auswirkungen auf Pigmentierung, Farbstärke und Trocknungsgeschwindigkeit.

Offset | Nassschichtdicke im Druck: 1–3 µm | Trockenfilm nahezu gleich (bei Coldset und Bogenoffset; Heatset verliert flüchtige Mineralölanteile)
Flexo | 1–5 µm je nach Aniloxvolumen und Motiv
Tiefdruck | 1–8 µm je nach Näpfchengeometrie
Siebdruck | 15–100 µm, bei Spezialanwendungen (z. B. Textil-Plastisol) bis 200 µm
Inkjet | 1–3 µm (Trockenfilm; Tropfenvolumen 1–80 pL)
Toner/Elektrofotografie | 5–15 µm Schichtdicke auf dem Druckbild

Vergleich zu Lacken: Flüssiglacke werden meist mit 30–200 µm Nassschichtdicke aufgetragen. Die dünnschichtigen Druckverfahren — Offset, Flexo, Tiefdruck, Inkjet (1–8 µm) — liegen damit ein bis zwei Größenordnungen darunter; Nur der Siebdruck (15–100 µm, im Sonderfall bis 200 µm) erreicht Lackniveau.

### Für den Lacklaboranten entscheidend

Pigment und Bindemittel müssen zueinander passen: Benetzung und Stabilisierung sind Voraussetzung für eine gute Dispersion.
Die Farbe muss im jeweiligen Druckwerk das erforderliche Fließ- und Übertragungsverhalten besitzen.
Der Farbfilm muss nach der Trocknung/Härtung die geforderte Haftung, Abriebfestigkeit und Beständigkeit erreichen.
Eine Rohstoffänderung kann mehrere Eigenschaften gleichzeitig verändern.
Die geringe Schichtdicke (oft < 5 µm) erfordert eine besonders gute Dispersion und Farbstärke: was in dickerer Schicht noch tolerierbar wäre, kann im Druck als Farbtonabweichung oder Weißschleier sichtbar werden. Der Dispergiergrad wird im Labor mit dem Grindometer (DIN EN ISO 1524) grob und über Partikelgrößenmessung (z. B. Laserbeugung) genau kontrolliert; kleine Primärpartikel garantieren keine agglomeratfreie Dispersion.

**Merksatz**

Nicht der einzelne Rohstoff entscheidet über die Druckqualität, sondern das Zusammenspiel aus Rezeptur, Herstellung, Druckverfahren, Bedruckstoff und Trocknung/Härtung.

**Stichwörter:** Druckfarbe, Farbmittel, Pigment, Bindemittel, Vehicle, Firnis, Additive, Reaktive Komponenten, Lösemittel, Träger, Dispersion, Benetzung, Schichtdicke, µm
*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; ISO 12644; DIN EN ISO 1524; EuPIA — Leitlinien der European Printing Ink Association*

---

## Übungsblatt Ü-140 — Musterlösungen

**Frage 1** (Verständnis, 8 Punkte)
Nennen Sie die vier Komponentengruppen einer Druckfarbe mit ihrer jeweiligen Funktion und geben Sie je ein typisches Beispiel an.

**Farbmittel:** Pigmente (organisch, anorganisch) oder Farbstoffe (z. B. bestimmte Inkjet): geben Farbe, Deckkraft und Transparenz.
**Bindemittel/Vehicle:** Harze, Öle/Firnisse, Polymere: benetzen das Pigment, transportieren es und bilden nach der Trocknung/Härtung den Farbfilm.
**Träger/flüchtige Bestandteile:** Lösemittel, Wasser, Reaktivverdünner: ermöglichen Verarbeitung und Einstellung des Fließverhaltens; werden bei physikalischer Trocknung entfernt oder bei UV/ESH in den Film eingebaut.
**Additive:** Dispergiermittel, Entschäumer, Wachse, Netzmittel, Sikkative: gezielte Optimierung einzelner Eigenschaften.
*Bewertung: Alle vier Komponentengruppen mit Funktion und Beispiel werden korrekt genannt. Der Unterschied zwischen flüchtigen und nicht-flüchtigen Bestandteilen sowie reaktiven Komponenten (UV) erhöht die Qualität der Antwort.*

**Frage 2** (Berechnung, 9 Punkte)
Eine Offsetfarbe wird mit 1,5 g/m² auf Papier übertragen (Dichte 1,1 g/cm³, kein flüchtiger Anteil). a) Welche Schichtdicke ergibt sich? b) Vergleichen Sie das Ergebnis mit einer typischen Siebdruckschicht von 30 µm.

**a) Volumen je m²:** $V = m / \rho = 1{,}5\ g / 1{,}1\ g/cm^3 = 1{,}36\ cm^3/m^2$
**a) Schichtdicke:** $1\ m^2 = 10\,000\ cm^2 \rightarrow d = 1{,}36 / 10\,000\ cm = 0{,}000136\ cm = 1{,}36\ \mu m$
**a) Antwortsatz:** Die Offsetschicht beträgt ca. 1,4 µm — typisch für Offsetdruck (1–3 µm).
**b) Vergleich:** 30 µm (Siebdruck) : 1,36 µm (Offset, ungerundet) ≈ Faktor 22. Siebdruckschichten sind damit rund 20-mal dicker. Konsequenz: Siebdruckfarbe braucht entsprechend mehr Material, aber auch weniger Farbstärke je Volumeneinheit.
*Bewertung: Umrechnung Masse → Volumen → Schichtdicke korrekt; Vergleich Siebdruck/Offset mit Faktor und sachlicher Folgerung.*

**Frage 3** **(Anwendung, 7 Punkte)**

Ein Pigment mit sehr kleiner Primärpartikelgröße zeigt im Druckbild unerwartet geringe Farbstärke. Was ist die wahrscheinliche Ursache und was prüfen Sie?

**Wahrscheinliche Ursache:** Das Pigment liegt in Form von Agglomeraten vor, nicht als Primärpartikel. Kleine Primärpartikel bedeuten nicht automatisch gute Dispersion.

**Prüfung:** Grindometer nach ISO 1524 zur Grobkontrolle; besser: Partikelgrößenmessung (Laserbeugung, DLS) zur Bestimmung der Agglomeratverteilung.

**Abhilfe:** Dispergierparameter (Zeit, Scherung, Dispergiermittel) anpassen; ggf. Rezeptur überprüfen.

*Bewertung: Die Unterscheidung Primärpartikelgröße ≠ Dispergiergrad/Agglomerat wird korrekt hergestellt und eine gezielte Prüfung benannt.*

# L-141 · Herstellung: vom Ansatz zur fertigen Druckfarbe

*Ansatz, Dispergieren, Let-down, Einstellen, Filtrieren — und die typischen Fehlerquellen*

**Wahlqualifikation** · B 11

Der Herstellungsweg ist für den Laboranten wichtiger als eine reine Aufzählung von Aggregaten: Ansatz → Vormischen/Benetzen → Dispergieren → Fertigstellen (Let-down) → Einstellen → Filtrieren → Prüfen.

## Die Herstellungsschritte im Überblick

Ansatz | Was passiert: Rohstoffe werden in definierter Reihenfolge eingewogen und zusammengeführt | Typische Kontrolle: Einwaage, Reihenfolge, Temperatur
Vormischen | Pigment wird mit Vehicle/Medium und ggf. Dispergiermittel benetzt | Homogenität, Klumpenfreiheit
Dispergieren | Agglomerate werden mechanisch aufgeschlossen und stabilisiert | Feinheit, Farbton, Temperatur
Let-down | Weitere Bindemittel-/Lösemittel-/Additivanteile werden eingearbeitet | Viskosität, Farbton, Farbstärke
Einstellen | Farbe wird auf Zielwerte gebracht (Farbton, Farbstärke, Viskosität/Rheologie) | Labormessung gegen Standard (Feinheit: Grindometer; Viskosität pastöser Farben: Fallstabviskosimeter nach ISO 12644; Dichte)
Filtrieren | Grobpartikel und Fremdteile werden entfernt, sofern das System es verlangt | Filterrückstand, Druckverlust
Freigabe | Laborvergleich gegen Standard und Spezifikation | Gesamtprüfplan vor Abfüllung

## Dispergieren verstehen

Pigmentagglomerat → Benetzung → Aufschluss durch Scherung → Verteilung → Stabilisierung.

Einflussfaktoren auf die Dispergierqualität:
Pigmentart und Oberflächenchemie: Bestimmen den Dispergiermittel- und Bindemittelbedarf.
Dispergiermittel: Menge und Typ müssen auf Pigment und Bindemittel abgestimmt sein.
Feststoffgehalt: Zu hoch → Viskosität zu hoch, Aggregatbildung; zu niedrig → ineffizient, Farbstärke zu gering.
Scherung und Zeit: Nicht „möglichst viel Scherung“, sondern ausreichend und reproduzierbar. Zu viel Scherung kann das System schädigen.
Temperatur: Beeinflusst Viskosität und Stabilität während des Dispergierens; kontrolliert halten und dokumentieren.

## Geräte — abhängig vom Farbsystem

Dissolver (Rührwerksdispergierer): häufig für Vormischen und Vorbenetzen; geeignet für mittelviskose Systeme.
Dreiwalzenstuhl: klassisch für hochviskose Pasten, insbesondere Offsetfarben und Pastenkonzentrate. Gute Kontrolle; aber langsam und arbeitsintensiv.
Perlmühle/Rührwerkskugelmühle: geschlossenes Dispergieren für geeignete, pumpbare Systeme. Hoher Durchsatz. Mahlkörperverschleiß und Kontamination beachten.
Hochdruckhomogenisator: für sehr feine Dispersionen, z. B. bestimmte Inkjet-Tinten.

Grundregel: Das Aggregat wird durch die Pigmentkonzentration, das Bindemittelsystem und die geforderte Feinheit bestimmt — nicht umgekehrt.

### Typische Fehler und ihre Ursachen

Zu geringe Farbstärke nach Dispergierung | Mögliche Ursachen: unzureichende Benetzung, zu kurze Mahldauer, falscher Dispergiermitteltyp oder -menge, Flockulation nach der Mahlung
Farbtonabweichung | Mögliche Ursachen: Dispergiergrad, Schattierungspigment fehlt oder falsch dosiert, unterschiedliche Chargenqualität des Pigments
Feinheit außerhalb Spezifikation | Mögliche Ursachen: Mahlparameter (Zeit, Temperatur, Füllgrad), Aggregatverschleiß, Kontamination
Viskosität zu hoch oder inhomogen | Mögliche Ursachen: Temperatureffekte beim Dispergieren, Strukturaufbau nach Dispergierung, falscher Let-down

**Merksatz**

Ist die Farbe nach dem Mahlen farbstärker als der Standard, kann das an einer besseren Dispergierung liegen. Die Pigmentmenge muss deshalb nicht verändert werden; zuerst müssen Prozess- und Dispergierqualität geprüft werden.

**Stichwörter:** Herstellung, Dispergieren, Dissolver, Dreiwalzenstuhl, Perlmühle, Rührwerkskugelmühle, Let-down, Vormischen, Agglomerat, Scherung, Stabilisierung, Filtrieren, Ansatz, Farbstärke, Benetzung
*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; ISO 12644*

---

## Übungsblatt Ü-141 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**
Beschreiben Sie die Herstellungsschritte einer pastösen Offsetdruckfarbe vom Ansatz bis zur Freigabe. Welche Kontrollpunkte sind in der Produktion entscheidend?

**Schritte:** Ansatz (Einwaage, Reihenfolge) → Vormischen/Benetzen → Dispergieren (z. B. Dreiwalzenstuhl) → Let-down (Bindemittel, Additive) → Einstellen (Farbton, Farbstärke, Viskosität) → Filtrieren (falls nötig) → Freigabe (Laborvergleich).
**Kontrolle Dispergieren:** Feinheit (Grindometer), Farbton gegen Standard, Temperatur während Mahlung.
**Kontrolle Einstellen:** Viskosität (Fallstab ISO 12644), Farbton und Farbstärke gegen Standard, Dichte.
**Freigabe:** Vollständiger Prüfplan; keine Freigabe ohne Laborvergleich.
*Bewertung: Alle Schritte in richtiger Reihenfolge mit den zentralen Kontrollpunkten.*

**Frage 2** **(Berechnung, 9 Punkte)**
Eine lösemittelbasierte Flexodruckfarbe hat 38 % Festkörperanteil und soll auf 30 % verdünnt werden. Wie viel Lösemittel (in kg) ist je 100 kg Farbe nötig?

**Festkörper konstant:** 100 kg · 0,38 = 38 kg Festkörper (bleibt beim Verdünnen unveränderlich)
**Gesamtmasse nach Verdünnung:** 38 kg sollen 30 % der Gesamtmasse sein: m(ges) = 38 / 0,30 = 126,7 kg
**Lösemittelmenge:** m(LM) = 126,7 − 100 = 26,7 kg
**Antwortsatz:** Je 100 kg Farbe werden ca. 26,7 kg Lösemittel zugegeben.
*Bewertung: Festkörper als konstante Bezugsgröße korrekt erkannt und Verdünnermenge über Zielkonzentration bestimmt.*

**Frage 3** **(Anwendung, 7 Punkte)**
Nach dem Mahlen auf dem Dreiwalzenstuhl ist die Farbe farbstärker als der Standard, obwohl die Rohstoffmengen korrekt eingewogen wurden. Was ist die wahrscheinlichste Ursache und was tun Sie?

**Ursache:** Eine bessere Dispergierung (feinere Verteilung des Pigments) erhöht die wirksame Oberfläche und damit die Farbstärke — ohne Änderung der Pigmentmenge.
**Konsequenz:** Die Pigmentmenge nicht reduzieren — zuerst den Dispergier- und Mahlprozess kontrollieren (Parameter, Walzenspalt, Temperatur).
**Maßnahme:** Feinheit prüfen; Mahlparameter dokumentieren und Reproduzierbarkeit sicherstellen; Standard unter gleichen Bedingungen herstellen.
*Bewertung: Die Ursache (bessere Dispergierung → höhere Farbstärke) wird korrekt erkannt und die falsche Reaktion (Pigmentmenge reduzieren) vermieden.*

# L-142 · Feinheit, Agglomerate und Rheologie

*Grindometer, ISO 1524:2020, Viskositätsbereiche und die wichtigsten Fließkenngrößen*

**Wahlqualifikation** · B 11

Die Feinheit der Dispersion beschreibt, ob noch größere Partikel/Agglomerate vorhanden sind — nicht die Primärpartikelgröße. Rheologie beschreibt das Fließ- und Verformungsverhalten; für den Lacklaboranten sind Viskosität, strukturviskoses Verhalten, Fließgrenze und Thixotropie wichtiger als eine rein mathematische Beschreibung.

## Feinheit ≠ Teilchengröße der Primärpartikel

Ein Pigment kann aus sehr kleinen Primärpartikeln bestehen und trotzdem als größere Agglomerate vorliegen. Genau diese Agglomerate können Farbton, Glanz, Filtrierbarkeit oder — bei Inkjet — die Düsenstabilität beeinflussen.

Grindometer (Hegman-Lehre): Praktische Vergleichsprüfung nach ISO 1524:2020. In einer keilförmigen Rille mit definierter Tiefe wird die Probe abgezogen; die Stelle, an der erste Körner oder Streifen erscheinen, gibt den Feinheitswert an. Schnell, robust, im Labor und Betrieb etabliert.

Grenzen des Grindometers: Es liefert nur die grobe Obergrenze der Partikelgröße, keine vollständige Verteilung. Für schuppenförmige Pigmente ist die Methode eingeschränkt anwendbar.

Moderne Ergänzungen: Laserbeugung für die Volumenverteilung; dynamische Lichtstreuung (DLS/PCS) für sehr feine Partikel; Mikroskopie für Form und Struktur.

## Rheologie — die wichtigsten Begriffe

Viskosität | Widerstand gegen Fließen; Einheit Pa·s oder mPa·s — die kinematische Viskosität ist $\nu = \eta/\rho$ (dynamische Viskosität geteilt durch Dichte), Einheit $mm^2/s$; genau diese liefern die Auslaufbecher-Umrechnungen | Je höher, desto zähflüssiger
Strukturviskosität | Scheinbare Viskosität sinkt bei steigender Scherrate (Scherverdünnung) | Typisch für pigmentierte Druckfarben und Lacke
Fließgrenze | Unterhalb einer bestimmten Beanspruchung fließt das Material nicht bzw. nur sehr wenig | Wichtig für Standfestigkeit und Siebdruck
Thixotropie | Zeitabhängige Abnahme der Struktur unter Scherung; Strukturaufbau in Ruhe | Wichtig für Verlauf und Standfestigkeit

Messmethoden:
Fallstab-Viskosimeter (ISO 12644): Für hochviskose Druckfarben-Pasten (Offset). Messbereich ca. 2–200 Pa·s.
Auslaufbecher (ISO 2431; die frühere DIN 53211 ist zurückgezogen, ihre Becher sind mit den ISO-Bechern nicht deckungsgleich): Für niedrig- bis mittelviskose Systeme. Liefert Auslaufzeit in Sekunden — NICHT direkt in mPa·s umrechenbar (nur Richtwert).
Rotationsviskosimeter: Absolutmessung; für strukturviskose und thixotrope Systeme geeignet; kann Fließkurve aufnehmen.

### Typische Viskositätsbereiche je Druckverfahren

Die Viskosität ist das wichtigste rheologische Kennzeichen einer Druckfarbe. Sie variiert je nach Verfahren um mehrere Größenordnungen.

Offsetfarbe (pastös) | Orientierungswerte, methoden- und temperaturgebunden: oxidativ trocknende und UV-Offsetfarben etwa 40–100 Pa·s, Heatset etwa 20–75 Pa·s, Coldset etwa 3–6 Pa·s (siehe L-145) | Messmethode: Fallstab-Viskosimeter (ISO 12644) | Anmerkung: temperaturabhängig; Tackmessung (Inkometer) ergänzend
Flexodruckfarbe | Typisch: 50–300 mPa·s | Messmethode: Auslaufbecher (DIN 4 oder Ford-Becher Nr. 4) oder Rotationsviskosimeter | Auslaufzeit DIN 4 (zurückgezogene DIN 53211, 20 °C): ca. 17–65 s
Tiefdruckfarbe | Typisch: 50–150 mPa·s | Messmethode: Auslaufbecher | Auslaufzeit DIN 4: ca. 17–35 s
Siebdruckfarbe | Typisch: 1–100 Pa·s (systemabhängig) | Messmethode: Rotationsviskosimeter (Scherkurve) | Fließgrenze und Thixotropie entscheidend
Inkjet-Tinte | Typisch: 2–15 mPa·s | Messmethode: Kapillar- oder Rotationsviskosimeter; stark temperaturabhängig | Im Druckkopf oft 40–60 °C
UV-Druckfarbe | Je nach Verfahren wie das entsprechende Basisverfahren | UV-Offset: pastös; UV-Flexo: niedrigviskos

Hinweis: Bei niedrigviskosen Systemen immer Temperatur angeben — 10 K Temperaturunterschied können die Viskosität erheblich verändern.

**Merksatz**

Ein Siebdrucksystem soll unter Rakelschub fließen, nach dem Druck aber nicht unkontrolliert verlaufen. Das ist ein typisches Beispiel dafür, warum das Fließverhalten genauso wichtig ist wie der reine Feststoffgehalt — und warum ein einzelner Auslaufbecher-Wert für strukturviskose Systeme nicht ausreicht.

**Stichwörter:** Feinheit, Grindometer, Hegman-Lehre, ISO 1524, Agglomerat, Primärpartikel, Rheologie, Viskosität, Strukturviskosität, Fließgrenze, Thixotropie, Auslaufbecher, Fallstab, ISO 12644, Rotationsviskosimeter, Pa·s, mPa·s
*Quellen: DIN EN ISO 1524; ISO 12644; DIN EN ISO 2431; Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie*

## Übungsblatt Ü-142 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Erklären Sie den Unterschied zwischen Primärpartikelgröße und Dispergiergrad. Wozu dient das Grindometer, und was kann es nicht leisten?

**Primärpartikelgröße:** Die kleinste Einheit des Pigments — durch die Synthese bestimmt, Angabe in nm oder µm (z. B. aus elektronenmikroskopischen Aufnahmen). Ein D50-Wert aus Laserbeugung oder DLS ist dagegen der Median der gemessenen Verteilung in der Probe: Er erfasst Agglomerate mit und ist nicht automatisch die Primärpartikelgröße.
**Dispergiergrad:** Beschreibt, wie weit die Agglomerate aufgeschlossen sind. Ein kleines Primärpartikel bedeutet nicht automatisch eine gute Dispersion.
**Grindometer:** Keilförmige Rille; zeigt die Stelle, an der erste Körner/Streifen erscheinen → Grobkontrolle der Agglomeratgröße.
**Grenzen:** Liefert nur eine Obergrenze, keine vollständige Verteilung. Für schuppenförmige Pigmente eingeschränkt; moderne Methoden (Laserbeugung, DLS) sind präziser.
*Bewertung: Primärpartikelgröße und Dispergiergrad werden klar getrennt; Grindometer mit Funktion und Grenzen korrekt beschrieben.*

**Frage 2** **(Berechnung, 9 Punkte)**

Eine Flexodruckfarbe hat die dynamische Viskosität $\eta = 120$ mPa·s und die Dichte $\rho = 1{,}05$ g/cm³. a) Berechnen Sie die kinematische Viskosität in mm²/s. b) Ist die Farbe für Flexodruck in einem typischen Bereich?

**a) Einheiten:** $\eta = 120$ mPa·s = 0,120 Pa·s; $\rho = 1{,}05$ g/cm³ = 1050 kg/m³

**a) Ansatz:** $\nu = \eta / \rho$

**a) Rechnung:** $\nu = 0{,}120$ Pa·s / 1050 kg/m³ = $1{,}143 \cdot 10^{-4}$ m²/s

**a) Umrechnung:** $1{,}143 \cdot 10^{-4}$ m²/s · $10^{6}$ mm²/m² = 114,3 mm²/s

**b) Einordnung:** Typischer Flexo-Bereich: 50–300 mPa·s. 120 mPa·s liegt gut im Bereich. In Praxis immer Temperatur angeben.

*Bewertung: Einheiten korrekt umgerechnet, Rechnung sauber geführt; Einordnung in Flexo-Viskositätsbereich.*

**Frage 3** **(Anwendung, 7 Punkte)**

Warum genügt für eine Siebdruckfarbe ein Auslaufbecher zur Viskositätskontrolle nicht, und was setzen Sie stattdessen ein?

**Problem Auslaufbecher:** Liefert nur einen einzelnen Wert bei einer bestimmten Scherung; für annähernd newtonsche Flüssigkeiten konzipiert.

**Problem Siebdruck:** Siebdruckfarben sind strukturviskos und thixotrop — ihre Viskosität hängt von Scherrate und Zeit ab. Ein einzelner Auslaufwert bildet das nicht ab.

**Lösung:** Rotationsviskosimeter; Fließkurve über einen Schergeschwindigkeitsbereich aufnehmen; Thixotropie prüfen (Auf- und Abwärtssweep).

*Bewertung: Ungeeignetheit des Auslaufbechers für strukturviskose Systeme begründet; Rotationsviskosimeter als korrekte Methode benannt.*

# L-143 · Trocknung und Härtung von Druckfarben

*Wegschlagen, Verdunsten, Oxidation, UV, ESH, thermisch — und die Unterschiede im Detail*

**Wahlqualifikation** · B 11

Oberflächlich trocken bedeutet nicht automatisch vollständig verfestigt. Schichtdicke, Temperatur, Substrat, Sauerstoff, Strahlungsdosis, Pigmentierung und Rezeptur können die Endhärtung beeinflussen.

## Trocknungs- und Härtungsmechanismen im Überblick

Wegschlagen | Prinzip: Flüssige Bestandteile dringen in einen saugfähigen Bedruckstoff ein | Typische Beispiele: Coldset-Offset auf Zeitungspapier, erste Trocknungsphase bei Bogenoffset

Verdunstung | Wasser oder Lösemittel verlassen den Farbfilm; Trocknungsgeschwindigkeit abhängig von Siedepunkt, Dampfdruck, Luftführung und Temperatur | Flexo, Tiefdruck, wasserbasierte Systeme, Heatset-Rollenoffset (flüchtige Mineralölanteile verdunsten im Heißlufttrockner; die Trocknerluft liegt bei rund 200–300 °C, die Papierbahn erreicht dabei etwa 110–140 °C)

Oxidative Trocknung | Luftsauerstoff führt zu chemischer Vernetzung; Sikkative katalysieren; dauert Stunden bis Tage | oxidativ trocknende Bogenoffsetfarben

UV-Härtung | Photoinitiator erzeugt unter UV-Strahlung reaktive Spezies → Polymerisation/Vernetzung. UV-Härtung funktioniert, wenn die UV-Quelle Strahlung im passenden Absorptionsbereich des Photoinitiators liefert. Typische Strahlungsdosis: 60–200 mJ/cm² je Durchgang (Vertiefung: Quecksilberstrahler breitbandig etwa 200–400 nm, UV-LEDs nur bei 365 bis 405 nm) | UV-Offset, UV-Flexo, UV-Sieb

Elektronenstrahl (ESH/EB) | Energiereiche Elektronen initiieren die Reaktion direkt. Kein Photoinitiator erforderlich. Strahlung dringt tiefer ein als UV → Vorteil bei dickeren Schichten. Die Polymerisation verläuft ebenfalls radikalisch und wird durch Luftsauerstoff eher stärker gehemmt als bei UV; EB-Anlagen arbeiten deshalb regelmäßig unter Stickstoff-Inertisierung (Restsauerstoff typischerweise unter 200 ppm) | ESH-Druckfarben

Thermische Fixierung | Bindemittel wird durch Wärme erweicht/aufgeschmolzen und beim Abkühlen fixiert. Typisch: 150–200 °C bei sehr kurzer Verweilzeit im Fixierspalt (Größenordnung Millisekunden) | Trockentoner-Systeme

## UV-Härtung: Einflussfaktoren im Detail

Strahlungsquelle: Quecksilberdampflampe (breites Spektrum) oder UV-LED (definierte Wellenlänge, meist 365/385/395/405 nm). LED benötigt auf Wellenlänge abgestimmten Photoinitiator.

Strahlungsdosis: Zu geringe Dosis → Unterhärtung (klebrig, abriebempfindlich); zu hohe Dosis → Übervernetzung, Versprödung. Prüfung: MEK-Wisch-Test als Orientierung, besser Abrieb-/Beständigkeitstest.

Sauerstoffinhibierung: Sauerstoff in der Luft fängt Radikale ab → Oberfläche trocknet schlechter als die Tiefe. Abhilfe: Inertgas ($N_2$), höhere Dosis, Sauerstoff-tolerante Photoinitiatoren.

Pigmentierung: Pigmente absorbieren oder streuen UV-Strahlung. Dunkle oder UV-absorbierende Pigmente (z. B. Rußschwarz) erschweren die Tiefenhärtung erheblich; die Schichtdicke ist entsprechend anzupassen.

Schichtdicke: Die Strahlung wird auf dem Weg durch den Film abgeschwächt (Lambert-Beer) — mit zunehmender Schichtdicke kommt an der Unterseite immer weniger Energie an. Kritisch ist deshalb die Tiefenhärtung: Dickere Schichten brauchen eine höhere Dosis, mehrere Durchgänge oder eine Aufteilung in dünnere Lagen.

### Wichtige Unterscheidung

Wie weit ein berührtrockener Film tatsächlich verfestigt ist, zeigen diese Beispiele:
— Bogenoffset: nach 30 min weggeschlagen, aber noch nicht scheuerfest — oxidative Härtung dauert Stunden.
— UV-Siebdruck mit dunkler Farbe: Oberfläche gehärtet, Farbkörper darunter noch reaktiv.
— Flexo wasserbasiert: bei hoher Luftfeuchtigkeit verlangsamt sich die Trocknung merklich.

**Merksatz**

Trocknung/Härtung immer unter definierten Bedingungen prüfen: Temperatur, Zeit, Schichtdicke, Substrat und Prüfmethode dokumentieren. Ein Zahlenwert ohne Messbedingungen ist nicht reproduzierbar.

**Stichwörter:** Trocknung, Härtung, Wegschlagen, Verdunstung, oxidative Trocknung, UV-Härtung, Elektronenstrahl, ESH, EB, thermische Fixierung, Photoinitiator, Sauerstoffinhibierung, Schichtdicke, Strahlungsdosis, mJ/cm², UV-LED
*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie*

## Übungsblatt Ü-143 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**
Ordnen Sie folgenden Druckverfahren ihren Haupttrocknungsmechanismus zu und begründen Sie kurz: a) Coldset-Offsetdruck auf Zeitungspapier; b) Heatset-Rollendruck; c) UV-Flexodruck auf Folie; d) lösemittelbasierter Tiefdruck.

**a) Coldset:** Überwiegend Wegschlagen: flüssige Bestandteile dringen ins saugende Zeitungspapier ein; kein Trockner.
**b) Heatset:** Verdunstung: flüchtige Mineralölanteile werden im Heißlufttrockner (Bahntemperatur ca. 110–140 °C) ausgetrieben, dann Abkühlung.
**c) UV-Flexo:** Strahlungshärtung: Photoinitiator aktiviert durch UV → Polymerisation/Vernetzung; sofort druckfertig; kein flüchtiger Anteil.
**d) LM-Tiefdruck:** Verdunstung: schnellflüchtige Lösemittel verlassen den Film im Trockenkanal.
*Bewertung: Alle vier Mechanismen korrekt zugeordnet und kurz begründet.*

**Frage 2** **(Berechnung, 9 Punkte)**
Eine UV-Siebdruckfarbe wird mit 25 µm Nassschichtdicke und einem Volumenfestkörper von 98 % gedruckt. a) Wie dick ist der Trockenfilm? b) Eine UV-LED liefert 180 mW/cm² bei einer Belichtungszeit von 0,8 s. Welche Dosis ergibt sich, und liegt sie im typischen Bereich?

**a) Trockenfilm:** TSD = NSD · VFK/100 = 25 µm · 0,98 = 24,5 µm
**a) Anmerkung:** UV-Farben sind nahezu lösemittelfrei (100-%-Systeme), daher Trockenfilm ≈ Nassschicht.
**b) Dosis:** Dosis = Bestrahlungsstärke · Zeit = 180 mW/cm² · 0,8 s = 144 mJ/cm²
**b) Einordnung:** 144 mJ/cm² liegt im typischen Bereich für UV-Härtung (60–200 mJ/cm² je Durchgang). Ob das ausreicht, hängt von Pigment, Photoinitiator und Schichtdicke ab.
*Bewertung: Trockenschichtdicke korrekt berechnet; Dosisberechnung sauber (mW/cm² · s = mJ/cm²) und in typischen Bereich eingeordnet.*

**Frage 3** **(Anwendung, 7 Punkte)**

Ein UV-Siebdruck mit schwarzer Farbe auf Folie ist nach dem Strahler nicht vollständig durchgehärtet. Nennen Sie drei mögliche Ursachen und je eine Gegenmaßnahme.

**Ursache 1: Rußschwarz:** Ruß absorbiert UV-Strahlung stark und verhindert die Tiefenhärtung. Maßnahme: Dosis erhöhen, UV-transparenteres Schwarz oder auf langwellig absorbierende Photoinitiatoren umstellen (z. B. Acylphosphinoxide, wirksam bis etwa 400 nm) — in diesem Fenster ist Ruß noch am ehesten durchlässig.

**Ursache 2: Schichtdicke:** Siebdruck trägt im Vergleich zu anderen Druckverfahren dicke Schichten auf (15–100 µm); UV-Strahlung dringt bei dunkler Farbe nicht bis zum Grund vor. Maßnahme: Schichtdicke reduzieren oder Dosis/Anzahl Durchgänge erhöhen.

**Ursache 3: Sauerstoffinhibierung:** Luftsauerstoff fängt Radikale ab und hemmt die Oberflächenhärtung. Maßnahme: Inertgasatmosphäre ($N_2$) oder geeigneten Photoinitiator wählen.

*Bewertung: Drei sachlich korrekte Ursachen (Pigment, Schichtdicke, Sauerstoff) mit je einer Gegenmaßnahme benannt.*

# L-144 · Druckverfahren im Überblick

*Offset, Flexo, Tiefdruck, Siebdruck, Inkjet, Elektrofotografie — Viskositäten, Schichtdicken und Anforderungen*

**Wahlqualifikation** · B 11

Jedes Druckverfahren stellt andere Anforderungen an Viskosität, Schichtdicke, Trocknungsmechanismus und Bedruckstoff. Der Bedruckstoff ist kein neutraler Untergrund — er ist Teil des Systems.

## Verfahrensvergleich mit typischen Kennwerten

Die folgende Tabelle gibt Richtwerte. Tatsächliche Werte hängen von Rezeptur, Maschinentyp, Substrat und Druckgeschwindigkeit ab.

Offset | Viskosität: pastös; Orientierungswerte 40–100 Pa·s (oxidativ trocknend und UV), Heatset 20–75 Pa·s, Coldset 3–6 Pa·s (siehe L-142, L-145) | Schichtdicke: 1–3 µm | Trocknung/Härtung: Wegschlagen, Oxidation, Heatset oder UV | Typische Substrate: Papier, Karton
Flexo | 50–300 mPa·s (niedrigviskos) | 1–5 µm | Verdunstung (LM/Wasser) oder UV | Papier, Karton, Folie, Well-/Vollpappe
Tiefdruck | 50–150 mPa·s (niedrigviskos) | 1–8 µm | Verdunstung | Folie, Papier, Aluminiumlaminat (Verpackung)
Siebdruck | 1–100 Pa·s (systemabhängig) | 15–100 µm | Verdunstung, UV oder thermisch | Textil, Glas, Metall, Kunststoff, Elektronik
Inkjet | 2–15 mPa·s (sehr niedrigviskos) | 1–3 µm | Verdunstung, UV oder thermisch | Papier, Folie, Textil, Keramik (breites Spektrum)
Elektrofotografie/Toner | Toner als Feststoff; bei Flüssigtoner: Trägerlösung | 5–15 µm | Thermische Fixierung | Papier, Karton; begrenzt Folie

## Was diese Unterschiede für den Laboranten bedeuten

Viskositätsmessung: Für Offset (pastös) wird der Fallstab nach ISO 12644 eingesetzt. Für Flexo und Tief reicht oft ein Auslaufbecher (DIN 4), für Siebdruck ist ein Rotationsviskosimeter mit Fließkurve besser geeignet. Inkjet-Tinten verlangen temperaturgenaue Kapillarmessungen.

Schichtdicken-Konsequenz: Eine Druckfarbe mit zu geringer Farbstärke kann auf 1–3 µm kein ausreichendes Druckbild liefern. Deshalb sind Farbstärke und Dispergierqualität wichtiger als bei Lacken.

Trocknungsanlage: Verdunstungssysteme brauchen Trockenkanal, UV-Systeme Strahler, thermische Systeme eine Fixiereinheit. Die Farbe muss zur Anlage passen — nicht umgekehrt.

**Merksatz**

Papier und Karton können Flüssigkeit aufnehmen; Folien, Metall und Glas sind überwiegend nicht saugend. PE und PP besitzen eine niedrige Oberflächenenergie.
Deshalb sind Benetzung, Vorbehandlung und Bindemittelauswahl besonders wichtig. Corona, Plasma oder Beflammung können die Oberfläche aktivieren; die Wirksamkeit nimmt mit der Zeit ab und muss geprüft werden (Prüftinten/Dyne-Level).

**Stichwörter:** Offset, Flexo, Tiefdruck, Siebdruck, Inkjet, Elektrofotografie, Toner, Bedruckstoff, Viskosität, Schichtdicke, Tack, Aniloxwalze, Benetzung, Vorbehandlung, Corona, Plasma, Beflammung, Pa·s, mPa·s, µm

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; ISO 12644*

## Übungsblatt Ü-144 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Ordnen Sie folgende Viskositätsbereiche den Druckverfahren zu und begründen Sie, warum diese Unterschiede bestehen: a) 2–15 mPa·s; b) 50–300 mPa·s; c) 40–100 Pa·s; d) 1–100 Pa·s.

**a) 2–15 mPa·s:** Inkjet: extrem niedrig, damit sich aus feinen Düsen (10–100 µm) saubere Tropfen bilden.

**b) 50–300 mPa·s:** Flexo: niedrigviskos für die Anilox-Dosierung, Kontrolle mit dem Auslaufbecher. Der Tiefdruck liegt mit 50–150 mPa·s im unteren Teil dieses Bereichs.

**c) 40–100 Pa·s:** Offset (pastös), oxidativ trocknende und UV-Farben: hohe Viskosität für das Walzensystem; Tack entscheidend; Fallstab-Messung. Heatset liegt mit etwa 20–75 Pa·s darunter, Coldset mit etwa 3–6 Pa·s deutlich darunter.

**d) 1–100 Pa·s:** Siebdruck: breite Spanne je nach System. Der Bereich überschneidet sich mit dem Offset — unterscheiden lässt sich der Siebdruck an der ausgeprägten Strukturviskosität und Thixotropie, die für Rakeln und Standfestigkeit gebraucht wird.

*Bewertung: Alle vier Bereiche korrekt zugeordnet und mit einem sachlichen Grund für den jeweiligen Bereich versehen.*

**Frage 2** **(Verständnis, 6 Punkte)**

Warum ist der Bedruckstoff bei Druckfarben kein neutraler Untergrund, sondern Teil des Systems?

**Saugfähigkeit:** Papier nimmt Flüssigkeit auf (Wegschlagen); Folie nicht. Das verändert Trocknungsgeschwindigkeit und Filmbildung.

**Oberflächenenergie:** Niedrige Oberflächenenergie (PE/PP) verhindert Benetzung; Vorbehandlung (Corona) notwendig.

**Haftung:** Bindemittel und Substrat müssen chemisch und physikalisch kompatibel sein.

*Bewertung: Saugfähigkeit, Oberflächenenergie und Haftung als substratspezifische Einflüsse benannt.*

**Frage 3** **(Anwendung, 8 Punkte)**

Ein Verpackungshersteller will von lösemittelbasiertem Tiefdruck auf Flexodruck (wasserbasiert) umstellen. Welche Veränderungen ergeben sich für Druckfarbe, Anlage und Substrat?

**Druckfarbe:** Lösemittelhaltig → wässrig: anderes Bindemittel, pH-Steuerung, Viskositätsverhalten bei Verdunstung von Wasser (langsamer als LM).

**Anlage:** Tiefdruck: Näpfchenzylinder, Rakel → Flexo: Aniloxwalze, Klischee. Trocknungszeit/Kapazität muss angepasst werden.

**Substrat:** Substrat muss Wasseraufnahme tolerieren; Folien (PE/PP) erfordern weiterhin Vorbehandlung. Haftungstest auf dem neuen System nötig.

**Compliance:** Wechsel des Farbsystems erfordert erneute Compliance-Prüfung bei Lebensmittelverpackungen.

*Bewertung: Farbe, Anlage und Substrat werden angesprochen; ein Hinweis auf erneute Eignungs- und Konformitätsprüfung (z. B. Lebensmittelverpackung) ist eine Zusatzleistung; der Systemwechsel als Gesamtproblem erkannt.*

# L-145 · Offsetdruckfarben

*Pastös, zügig, Farb-Wasser-Balance und die drei Trocknungsvarianten*

**Wahlqualifikation** · B 11

Offsetfarben sind pastöse Druckfarben; als methoden- und temperaturgebundene Orientierungswerte gelten für oxidativ trocknende Bogenoffset- und UV-Offsetfarben etwa 40–100 Pa·s, für Heatset etwa 20–75 Pa·s und für Coldset etwa 3–6 Pa·s. Der Tack beschreibt vereinfacht die Zügigkeit bzw. die beim Spalten des Farbfilms auftretende Kraft. Er muss auf Maschine, Geschwindigkeit und Bedruckstoff abgestimmt sein.

## Kennwerte: Viskosität und Schichtdicke

Viskosität: Offsetfarben sind pastöse Systeme. Innerhalb des Offsets liegen Bogenoffsetfarben tendenziell am oberen Ende von Viskosität und Tack, Coldset-Zeitungsfarben am unteren — letztere müssen rasch in das saugende Zeitungspapier wegschlagen und dürfen das ungestrichene Papier nicht rupfen. Das ist eine Tendenz, keine feste Rangfolge: Als Orientierungswerte werden für oxidativ trocknende und UV-Offsetfarben etwa 40–100 Pa·s genannt, für Heatset etwa 20–75 Pa·s und für Coldset etwa 3–6 Pa·s. Die Werte hängen von Farbtyp, Temperatur, Scherung und Messmethode ab und sind nur mit diesen Angaben vergleichbar. Gemessen wird mit dem Fallstab-Viskosimeter nach ISO 12644 (Messbereich ca. 2–200 Pa·s).

Tack (Zügigkeit): Wird mit dem Inkometer (Tackmeter) gemessen. Typische Werte für Bogenoffset: 5–20 Tack-Einheiten (geräteabhängig). Bei Mehrfarbendruck ist die Tack-Abstufung entscheidend: Erste Farbe höchster Tack, folgende Farben absteigend.

Schichtdicke: Im Druckwerk werden Offsetfarben zu einem sehr dünnen Film ausgewalzt und übertragen. Typische Nassschichtdicke im Druck: 1–3 µm. Trockenfilm nahezu gleich (kein flüchtiger Anteil bei pastösen Coldset/Bogenoffset-Systemen).

## Tack — Ursache und Wirkung

Tack zu hoch | Typische Folge: höhere Belastung des Bedruckstoffs; Rupfen/Picking (Herausreißen von Fasern oder Beschichtungspartikeln) kann auftreten
Tack zu niedrig | Ungünstige Farbübertragung und möglicherweise schwächeres, unschärferes Druckbild
Falsche Tack-Abstufung in Mehrfarbendruck | Probleme bei Farbübertragung und Überdruck — bereits gedruckte Farbe wird vom Gummituch des folgenden Druckwerks wieder abgehoben (Rückspalten)

Beeinflussung des Tack: Bindemittelstruktur, Viskosität, Lösemittelanteil (Mineralöl/Pflanzenöl), Temperatur und Druckgeschwindigkeit.

## Feuchtmittel und Farb-Wasser-Balance

Die nichtdruckenden Bereiche der Druckform müssen Feuchtmittel annehmen. Die Druckfarbe muss deshalb eine kontrollierte Wechselwirkung mit Wasser besitzen.

Ziel: kein beliebig hohes Emulgieren, sondern ein stabiles Farb-Wasser-Gleichgewicht (typisch: 15–25 % Wasseraufnahme in der Farbe — systemabhängig).

Problem zu hoher Emulgierung: Die Farb-Wasser-Balance verschiebt sich — Farbkraft sinkt, Tonen (Schleierbildung) oder Schmieren kann auftreten, der Tack verändert sich, die Trocknung ist gestört.

### Offset-Trocknung: drei Varianten

Coldset | Überwiegend Wegschlagen in saugfähiges Papier (z. B. Zeitungsdruck); kein Trockner; Farbe bleibt abriebempfindlich

Bogenoffset | Wegschlagen + oxidative Vernetzung durch Sikkative; bei Bedarf Bepuderung gegen Ablegen im Stapel; vollständige Scheuerfestigkeit nach Stunden

Heatset | Flüchtige Mineralölanteile werden im Heißlufttrockner ausgetrieben (Trocknerluft rund 200–300 °C, die Papierbahn erreicht dabei etwa 110–140 °C); anschließend Kühlwalzen und weitere Verfestigung; hohe Druckgeschwindigkeit möglich

**Merksatz**

Puder beim Bogenoffset mindert das Ablegen frischer Farbe im Stapel — ersetzt aber keine korrekt eingestellte Farbe und keinen passenden Trocknungsweg. Puder kann Weiterverarbeitungsprozesse (Lackieren, Kaschieren) beeinflussen.

**Stichwörter:** Offsetfarbe, pastös, Tack, Zügigkeit, Rupfen, Picking, Feuchtmittel, Emulgierung, Farb-Wasser-Balance, Coldset, Bogenoffset, Heatset, oxidative Trocknung, Pudern, Wegschlagen, ISO 12644, Inkometer, Pa·s, µm, Schichtdicke

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; ISO 12644*

---

## Übungsblatt Ü-145 — Musterlösungen

**Frage 1** (Verständnis, 8 Punkte)

Was versteht man unter Tack (Zügigkeit) bei Offsetfarben, welche Folgen haben zu hoher und zu niedriger Tack, und wie wird er gemessen?

**Definition:** Tack beschreibt vereinfacht die Kraft, die beim Spalten des Farbfilms zwischen Walzen auftritt — vergleichbar mit Klebrigkeit unter dynamischer Beanspruchung.

**Zu hoch:** Erhöhte Belastung des Bedruckstoffs → Rupfen/Picking (Herausreißen von Fasern oder Beschichtung).

**Zu niedrig:** Schlechte Farbübertragung, schwächeres oder unscharfes Druckbild.

**Messung:** Inkometer (Tackmeter); Wert ist geräte- und temperaturabhängig; typisch 5–20 Einheiten für Bogenoffset. Mehrfarbendruck: Tack absteigend von erster zu letzter Farbe.

*Bewertung: Definition, Fehlerbilder und Messmethode korrekt.*

**Frage 2** (Verständnis, 7 Punkte)

Erklären Sie die drei Trocknungsvarianten im Offsetdruck (Coldset, Bogenoffset, Heatset) und ordnen Sie ihnen typische Substrate und Anwendungsfelder zu.

**Coldset:** Wegschlagen in saugendes Papier; kein Trockner. Substrat: Zeitungspapier. Anwendung: Tageszeitungen.

**Bogenoffset:** Wegschlagen + oxidative Trocknung (Sikkative); langsam (Stunden bis vollständig). Substrat: gestrichenes Papier, Karton. Anwendung: Akzidenz, Verpackung.

**Heatset:** Verdunstung flüchtiger Ölanteile im Heißlufttrockner. Schnell und wirtschaftlich bei hohen Auflagen. Substrat: gestrichenes Rollendruckpapier. Anwendung: Zeitschriften, Kataloge.

*Bewertung: Drei Mechanismen mit Substrat und Anwendung korrekt zugeordnet.*

**Frage 3** (Berechnung, 9 Punkte)

Eine Bogenoffsetfarbe (Dichte 1,05 g/cm³) wird mit 1,8 g/m² auf gestrichenem Papier gedruckt. a) Berechnen Sie die Nassschichtdicke in µm. b) Der Tack-Wert der Farbe beträgt 14 (Inkometer, 30 °C). Bei 35 °C sinkt er auf 11. Erklären Sie, warum Temperatur den Tack beeinflusst.

**a) Schichtdicke:** V = 1,8 g / 1,05 g/cm³ = 1,71 cm³/m²; 1 m² = 10 000 cm² → d = 0,000171 cm = 1,71 µm

**a) Antwortsatz:** Schichtdicke ca. 1,7 µm — typischer Bereich Bogenoffset (1–3 µm).

**b) Temperatur:** Steigende Temperatur senkt die Viskosität der Farbe. Geringere Viskosität → geringerer Widerstand beim Filmspaltung → niedrigerer Tack-Wert.

**b) Praxisfolge:** Maschinen- und Druckraumtemperatur müssen deshalb bei der Tack-Einstellung berücksichtigt werden.

*Bewertung: Schichtdickenberechnung korrekt; Temperatureinfluss auf Tack über Viskosität erklärt.*

# L-146 · Flexo- und Tiefdruckfarben

*Niedrigviskos, schnell verdunstend — Viskositätswerte, Aniloxwalze, Näpfchen und Lösemittelführung*

**Wahlqualifikation** · B 11

Bei niedrigviskosen Druckfarben niemals nur die Viskosität betrachten. Temperatur, Lösemittel-/Wassergehalt, Druckgeschwindigkeit, Anilox/Rakel und Substrat bestimmen gemeinsam das Ergebnis.

## Flexodruck: Verfahren und Farbkennwerte

Verfahrensprinzip: Die Aniloxwalze nimmt Farbe aus dem Farbwerk auf und dosiert sie über ihre Näpfchen. Die flexible Druckplatte (Klischee) überträgt die Farbe auf den Bedruckstoff. Das übertragene Farbvolumen hängt vom Anilox-Volumen (Näpfchengeometrie) ab.

Typische Viskosität Flexo: 50–300 mPa·s bei Raumtemperatur.
Messmethode: Auslaufbecher. Genormt ist heute der ISO-Becher Nr. 4 nach DIN EN ISO 2431 bei (23,0 ± 0,5) °C (für die dickeren Flexofarben der ISO-Becher Nr. 5); in der Druckerei wird daneben noch häufig der DIN-4-Becher der 1996 zurückgezogenen DIN 53211 benutzt. Beide sind trotz 4 mm Düsenweite nicht deckungsgleich: Die Bechergeometrien unterscheiden sich, und Hersteller wie Normen weisen ausdrücklich darauf hin, dass sich die Auslaufzeiten nicht ohne Weiteres ineinander umrechnen lassen. Jeder Viskositätswert ist deshalb nur mit Becher, Norm und Temperatur zusammen brauchbar. Die gerätespezifischen Näherungsgleichungen (DIN 4: $\nu = 4{,}57 \cdot t - 452/t$; ISO-Becher 4: $\nu = 1{,}37 \cdot t - 200/t$) gelten jeweils nur für den eigenen Becher und dienen der Umrechnung Auslaufzeit ↔ kinematische Viskosität — nicht dem Vergleich zweier Becher miteinander. Typische Auslaufzeiten im DIN-4-Becher (20 °C): 17–65 s. Das entspricht bei DIN 4 vereinfacht ca. 50–300 mPa·s (unterhalb von etwa 20 s arbeitet der Becher am Rand seines Gültigkeitsbereichs) — aber: Umrechnung ist nur Richtwert; strukturviskose Systeme erfordern Rotationsviskosimeter.

Typische Schichtdicke Flexo: 1–5 µm (Nassschichtdicke; Trockenfilm je nach flüchtigem Anteil kleiner).

Substrate: Wellpappe, Karton, Folie, Aluminiumverbund, Papier.

## Tiefdruck: Verfahren und Farbkennwerte

Verfahrensprinzip: Die gravierten Näpfchen des Tiefdruckzylinders werden mit Farbe gefüllt. Das Rakel streift überschüssige Farbe ab; die in den Näpfchen verbleibende Farbe wird auf den Bedruckstoff übertragen. Der Kontaktdruck erfolgt über ein Andruckwerk.

Typische Viskosität Tiefdruck: 50–150 mPa·s bei Raumtemperatur.
Auslaufbecher DIN 4 (aus der zurückgezogenen DIN 53211, 20 °C): typisch 17–35 s — das entspricht den oben genannten 50–150 mPa·s (zum Unterschied zum ISO-Becher Nr. 4 siehe Flexodruck).

Typische Schichtdicke Tiefdruck: 1–8 µm (abhängig von Näpfchentiefe und -volumen; Tiefdruckzylinder kann für Schichtdicken optimiert graviert werden).

Substrate: Folie (PE, PP, PET), Papier, Aluminium-Verbunde — typisch für Verpackungstiefdruck bei hohen Auflagen.

### Verdunstung — Ursache und Wirkung

Zu schnelle Verdunstung: Verlauf, Benetzung und Übertragung können beeinträchtigt werden; eingetrocknete Farbe in Näpfchen oder Düsen möglich.
Zu langsame Verdunstung: Restlösemittel im Farbfilm kann zu Blocken, Geruchs- oder Haftungsproblemen führen.
Viskositätsänderung durch Verdunstung: Mit steigendem Lösemittelverlust steigt die Viskosität — Dosierung und Druckbild verändern sich. Deshalb: Viskosität im Druckbetrieb kontrollieren und nachstellen.
Wasserbasierte Systeme: Wasserabgabe hängt stark von Luftfeuchtigkeit, Temperatur und Luftführung im Trockner ab.

**Merksatz**

Bei niedrigviskosen Druckfarben niemals nur die Viskosität betrachten. Temperatur, Lösemittel-/Wassergehalt, Druckgeschwindigkeit, Anilox/Rakel-Geometrie und Substrat können gemeinsam das Ergebnis bestimmen. Immer Temperatur bei Viskositätsmessung angeben.

**Stichwörter:** Flexodruck, Tiefdruck, Aniloxwalze, Näpfchen, Rakel, Verdunstung, Lösemittel, Viskosität, wasserbasiert, Druckplatte, Klischee, niedrigviskos, Blocken, Restlösemittel, mPa·s, Schichtdicke, µm, Auslaufbecher, DIN 4

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; DIN EN ISO 2431*

---

## Übungsblatt Ü-146 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Vergleichen Sie Flexo- und Tiefdruck hinsichtlich Druckform, Farbübertragung, typischer Viskosität und Schichtdicke.

**Flexo — Druckform:** Flexible Photopolymerplatte (Klischee); Hochdruck. Aniloxwalze dosiert die Farbe.
**Flexo — Viskosität/Schichtdicke:** 50–300 mPa·s; Schichtdicke 1–5 µm.
**Tiefdruck — Druckform:** Verkupferter Stahlzylinder — die Näpfchen werden in die Kupferschicht graviert oder geätzt, anschließend wird verchromt (Tiefdruckform); vertieftes Druckprinzip.
**Tiefdruck — Viskosität/Schichtdicke:** 50–150 mPa·s; Schichtdicke 1–8 µm (durch Näpfchengeometrie einstellbar).
**Gemeinsam:** Beide niedrigviskos; Trocknung überwiegend durch Verdunstung (LM oder Wasser) oder UV.
*Bewertung: Druckform, Viskosität und Schichtdicke für beide Verfahren korrekt; Gemeinsamkeiten genannt.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**

Eine Flexofarbe soll von 200 mPa·s auf 120 mPa·s eingestellt werden. 100 kg Farbe werden mit einem Lösemittel (η ≈ 1,5 mPa·s) verdünnt. Schätzen Sie (vereinfacht linear): wie viel Lösemittel ist nötig? Was ist bei dieser Näherung zu beachten?

**Ansatz linear:** Zielanteil LM x: η(ziel) ≈ η(farbe) · (1−x) + η(LM) · x
**Rechnung:** 120 ≈ 200 · (1−x) + 1,5 · x → 120 = 200 − 198,5x → x = 80/198,5 ≈ 0,403
**Lösemittelanteil der Mischung:** x ≈ 0,403, das Lösemittel macht also rund 40 % der fertigen Mischung aus.
**Lösemittelmenge je 100 kg Farbe:** Gefragt ist die Zugabe zu 100 kg Farbe, nicht der Anteil an der Mischung: m(LM) = 100 kg · x / (1 − x) = 100 · 0,403 / 0,597 ≈ 67,5 kg.
**Einschränkung:** Die lineare Näherung überschätzt den Lösemittelbedarf drastisch — real fällt die Viskosität annähernd exponentiell mit dem Lösemittelanteil (logarithmische Mischungsregel: hier nur rund 10 % Lösemittel, also etwa 12 kg). Der lineare Wert ist nur eine obere Abschätzung; tatsächliche Zugabe immer schrittweise im Labor einstellen und nachmessen. Temperatur angeben.
*Bewertung: Lineare Näherung angewendet; Einschränkung (Nichtlinearität, Messnotwendigkeit) korrekt genannt.*

**Frage 3** **(Anwendung, 8 Punkte)**

Eine PE-Folie soll mit einer wasserbasierten Flexofarbe bedruckt werden. Die Farbe haftet schlecht und perlt ab. Beschreiben Sie Ursache und Maßnahmen.

**Ursache:** PE hat eine niedrige Oberflächenenergie (ca. 30–33 mN/m). Wässrige Farben (Oberflächenspannung ca. 40 mN/m) können die Oberfläche nicht benetzen.

**Messung:** Oberflächenenergie mit Prüftinten (Dyne-Test) bestimmen; Zielwert nach Vorbehandlung ≥ 38–42 mN/m.

**Maßnahmen:** Corona-Behandlung oder Beflammung der Folie erhöht Oberflächenenergie; Effekt lässt mit Zeit nach — möglichst kurz nach Behandlung bedrucken.

**Farbe:** Netzmittel in der Farbe können Oberflächenspannung senken, ersetzen aber keine Substratvorbehandlung.

*Bewertung: Niedrige Oberflächenenergie als Ursache; Vorbehandlung, Dyne-Test und zeitlicher Aspekt genannt.*

# L-147 · UV- und Elektronenstrahl-Druckfarben

*Strahlungshärtend, lösemittelfrei — Photoinitiator, Sauerstoff, Schichtdicken und Arbeitsschutz*

**Wahlqualifikation** · B 11

UV-Farben enthalten reaktive Oligomere/Harze, Reaktivverdünner, Pigmente, Additive und Photoinitiatoren. Bei ESH/EB wird die Energie durch Elektronen eingebracht — kein Photoinitiator erforderlich, die Sauerstoffinhibierung bleibt jedoch bestehen und wird durch Inertisierung mit Stickstoff beherrscht.

## Härtungsmechanismus vereinfacht

UV: UV-Härtung funktioniert, wenn die UV-Quelle Strahlung im passenden Absorptionsbereich des Photoinitiators liefert. Der aktivierte Photoinitiator startet die Polymerisation → reaktive Radikale → Polymerisation/Vernetzung der Acrylat-Monomere und -Oligomere → fester, vernetzter Film. (Kationisch härtende UV-Systeme arbeiten mit Epoxiden oder Vinylethern, nicht mit Acrylaten.)

ESH/EB: Energiereiche Elektronen (Beschleunigungsspannung rund 80–300 kV; kompakte Inline-Aggregate für schmale Bahnen im unteren, breite Bahnen und dickere Schichten im oberen Bereich) → direkte Ionisation → Vernetzungsreaktion ohne Photoinitiator. Tieferes Eindringen in dickere Schichten als UV-Strahlung. Die Sauerstoffinhibierung ist bei ESH nicht geringer, sondern eher ausgeprägter als bei UV; EB-Anlagen werden deshalb unter Stickstoff betrieben (Restsauerstoff typischerweise unter 200 ppm).

Typische Strahlungsquellen UV: Quecksilberdampflampe (Hg, breites UV-Spektrum, etwa 200–400 nm); UV-LED (z. B. 365, 385, 395, 405 nm — definierte Wellenlänge; PI muss abgestimmt sein; 405-nm-LED reichen knapp in den violetten Bereich und brauchen langwellig absorbierende Photoinitiatoren).

## Typische Schichtdicken und Viskositäten

UV-Druckfarben passen ihre Viskosität dem zugrundeliegenden Druckverfahren an:

UV-Offset | Viskosität: etwa 40–100 Pa·s (pastös, im Bereich konventioneller Offsetfarben; methoden- und temperaturabhängig) | Schichtdicke: 1–3 µm
UV-Flexo | 50–300 mPa·s (niedrigviskos wie konventioneller Flexo) | 1–5 µm
UV-Siebdruck | 1–50 Pa·s (systemabhängig) | 15–60 µm
UV-Inkjet | 5–20 mPa·s (bei Druckkopftemperatur) | 1–3 µm

Hinweis: Bei UV-Inkjet ist die Viskosität bei der Drucktemperatur (oft 40–60 °C im Druckkopf) entscheidend, nicht bei Raumtemperatur.

## Einflussfaktoren auf die Härtung

Strahlungsdosis | Zu geringe Dosis → Unterhärtung (klebrig, abriebempfindlich); typisch 60–200 mJ/cm² pro Durchgang je nach System und Farbe
Pigment/Farbton | Pigmente können Strahlung absorbieren oder streuen; besonders kritisch: Rußschwarz und UV-absorbierende Pigmente
Schichtdicke | Dickere Schichten sind schwieriger vollständig durchzuhärten; UV-Strahlung dringt nur begrenzt tief ein
Sauerstoff | Hemmt bei radikalischen UV-Systemen die Oberflächenhärtung (Sauerstoffinhibierung); Abhilfe: Inertgas ($N_2$), höhere Dosis oder PI-Auswahl
Photoinitiator | Art (Absorptionsspektrum) und Konzentration müssen auf Lichtquelle und Pigment abgestimmt sein
Substrat/Formulierung | Haftung und Endbeständigkeit sind systemabhängig; auf nichtsaugenden Substraten besonders wichtig

### Arbeitsschutz

Reaktive Acrylatbestandteile (Monomere, Oligomere): können hautreizend und sensibilisierend wirken. Einmal sensibilisiert, kann auch geringste Exposition Reaktionen auslösen. Deshalb: Schutzhandschuhe aus geeignetem Material, geschlossene Arbeitsweise, Sicherheitsdatenblatt und Betriebsanweisung beachten.

UV-Strahlung: UV-Strahler sind Gefahrenquellen für Augen und Haut. Strahler nur in abgeschirmten Anlagen betreiben. Bei Laborversuchen mit UV-Lampe: UV-Schutzbrille!

ESH-Anlage: Hochspannung und ionisierende Strahlung erfordern besondere Sicherheitsmaßnahmen und Fachpersonal.

Lebensmittelverpackung: Nicht umgesetzte Photoinitiatoren, deren Spaltprodukte und Restmonomere können in das Füllgut migrieren. Abhilfe: Low-Migration-UV-Farben mit polymeren bzw. hochmolekularen Photoinitiatoren, vollständige Durchhärtung, Barriereschichten — oder ESH, das ganz ohne Photoinitiator auskommt (Details in L-149).

**Merksatz**

UV- und Elektronenstrahlfarben härten durch Polymerisation, nicht durch Verdunsten — daher praktisch lösemittelfrei und in Sekunden fertig. UV braucht einen Photoinitiator und kämpft an der Oberfläche gegen die Sauerstoffinhibierung; ESH bringt die Energie direkt über Elektronen ein und kommt ohne Photoinitiator aus — die Sauerstoffinhibierung bleibt jedoch bestehen und wird durch Stickstoff-Inertisierung beherrscht. Die Durchhärtung hängt an Dosis und Schichtdicke: Pigmente und Weißdeckung bremsen die Tiefenhärtung. Die Gefahr steckt im unvernetzten Zustand — ungehärtete Reaktivverdünner sind reizend und sensibilisierend, der ausgehärtete Film ist es nicht.

**Stichwörter:** UV-Druckfarbe, ESH, EB, Elektronenstrahl, Photoinitiator, Reaktivverdünner, Oligomer, Polymerisation, Vernetzung, Sauerstoffinhibierung, Sauerstoff, Hautschutz, Acrylat, Schichtdicke, Strahlungsdosis, mJ/cm², UV-LED, Hg-Lampe, Pa·s, mPa·s, µm

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie*

## Übungsblatt Ü-147 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Vergleichen Sie die Härtung von UV-Farben und ESH-Farben: Gemeinsamkeiten, Unterschiede und je einen Vorteil jedes Verfahrens.

**Gemeinsamkeit:** Beide bestehen aus reaktiven Monomeren/Oligomeren; keine oder kaum flüchtige Bestandteile (100-%-Systeme); schnelle Härtung durch Strahlung.
**UV:** Photoinitiator nötig: UV-Härtung funktioniert, wenn die UV-Quelle Strahlung im passenden Absorptionsbereich des Photoinitiators liefert; der aktivierte Photoinitiator startet die Polymerisation (Quecksilberstrahler etwa 200–400 nm, UV-LEDs nur 365 bis 405 nm). Vorteil: weit verbreitete Technologie, flexible Quellenwahl (Hg, LED).
**ESH:** Energiereiche Elektronen; kein Photoinitiator. Vorteil: tieferes Eindringen in dicke Schichten; Härtung auch unter UV-absorbierenden Pigmenten. Zu beachten: Die Stickstoff-Inertisierung ist bei ESH nicht optional, sondern Voraussetzung für die Durchhärtung.
**Compliance:** Kein Photoinitiator bei ESH → geringeres Migrationsrisiko durch PI-Fragmente, relevant für Lebensmittelverpackungen.
*Bewertung: Gemeinsamkeiten, Unterschiede (PI vs. Elektronen) und je ein sachlicher Vorteil.*

**Frage 2** **(Verständnis, 6 Punkte)**

Nennen Sie drei Vorteile von UV/ESH-Druckfarben gegenüber verdunstungstrocknenden Systemen — und einen Nachteil.

**Vorteil 1:** Sofort weiterverarbeitbar — kein Warten auf Verdunstung oder Oxidation.
**Vorteil 2:** Kein flüchtiger organischer Anteil (VOC) → geringere Emissionen.
**Vorteil 3:** Hohe Scheuer- und Chemikalienbeständigkeit; auch auf nichtsaugenden Substraten.
**Nachteil:** Reaktive Acrylate sind sensibilisierend; Arbeitsschutz erhöht; UV-Anlage und Strahler als Investition; Compliance-Anforderungen bei Lebensmittelkontakt.
*Bewertung: Drei sachliche Vorteile und ein realer Nachteil.*

**Frage 3** **(Anwendung, 8 Punkte)**

Für einen UV-Offset-Druck auf Lebensmittelkarton wird eine neue schwarze, photoinitiatorhaltige Farbe geprüft. Was sind die Compliance-Risiken und welche Alternativen bestehen?

**Compliance-Risiko PI:** Nicht vollständig umgesetzte Photoinitiatoren und deren Spaltprodukte können in den Karton und ins Lebensmittel migrieren (PI-Fragmente → toxikologisch relevant).
**Compliance-Risiko Pigment:** Rußschwarz erschwert UV-Tiefenhärtung → Unterhärtung → erhöhte Restmonomer-/PI-Migration.
**Maßnahme 1:** Low-Migration-UV-Farbe mit polymeren oder hochmolekularen Photoinitiatoren und migrationsdichten Rezepturen verwenden.
**Maßnahme 2:** ESH als Alternative: kein Photoinitiator, tieferes Eindringen, auch bei dunklen Pigmenten.
**Maßnahme 3:** Barriereschicht zwischen Druckfarbe und Kontaktfläche.
*Bewertung: PI-Migration und Unterhärtungsrisiko bei Rußschwarz werden erkannt; Low-Migration und ESH als Alternativen genannt.*

# L-148 · Siebdruck, Inkjet und Toner

*Hohe Schichtdicken, Tropfengenauigkeit und elektrofotografische Systeme — Viskositäten, Schichtdicken, Prüfung*

**Wahlqualifikation** · B 11

Siebdruck, Inkjet und Toner sind drei sehr unterschiedliche Systeme. Gemeinsam ist ihnen, dass Rheologie, Partikelgröße und Substratanpassung entscheidend für das Druckergebnis sind.

## Siebdruckfarben

Verfahrensprinzip: Die Farbe wird mit einem Rakel durch die offenen Bereiche des Siebs (Schablone) auf den Bedruckstoff gedrückt. Hohe Schichtdicken sind typisch.

Viskosität: 1–100 Pa·s je nach System (lösemittelbasiert, wasserbasiert, UV, Plastisol). Messung: Rotationsviskosimeter (Fließkurve), nicht Auslaufbecher.
Schichtdicke: 15–100 µm Nassschichtdicke; bei Textil-Plastisol bis ca. 200 µm; Trockenfilm je nach flüchtigem Anteil kleiner. Zum Vergleich: 20-fach dicker als Offset.

Rheologieanforderung: Die Farbe muss unter Rakelschub ausreichend fließen, nach dem Auftrag aber nicht unkontrolliert verlaufen. Diesen scheinbaren Widerspruch löst strukturviskoses (fließt unter Scherung) bis thixotropes Verhalten mit Fließgrenze (steht in Ruhe).

Verfestigungswege: Lösemittelbasiert → Verdunstung; Wasserbasiert → Verdunstung/Wasserabgabe; UV → Strahlungshärtung; Textil-Plastisol → thermische Gelierung/Fixierung (ca. 150–180 °C).

Substrate: Glas, Metall, Kunststoff, Textilien, Leiterplatten — breites Spektrum mit sehr unterschiedlichen Haftungsanforderungen.

## Inkjet-Tinten

Verfahrensprinzip: Tinten werden ohne Druckform in Tropfen von 1–80 pL aus Düsen ausgestoßen. Kein Kontakt zwischen Druckkopf und Substrat.

Viskosität: 2–15 mPa·s bei Betriebstemperatur (im Druckkopf oft 40–60 °C). Stark temperaturabhängig — Angabe ohne Temperatur ist wertlos.
Schichtdicke: 1–3 µm Trockenfilm (je nach Tintensystem und Motiv).

Anforderungen an die Tinte:
Partikelgröße: Als Faustregel darf das größte Agglomerat höchstens etwa 1/50 bis 1/100 des Düsendurchmessers erreichen — bei einer 20-µm-Düse also rund 0,2 bis 0,4 µm; D99-Wert entscheidend, nicht nur D50.
Oberflächenspannung: Typisch 25–40 mN/m; beeinflusst Tropfenabriss und Benetzung des Substrats.
pH: Bei wässrigen Systemen 7,5–9 (Kopfmaterial-Verträglichkeit, Pigmentstabilität).
Lagerstabilität: Kein Absetzen, Agglomerieren oder Gelieren über Lagerdauer.

Tintentypen nach Trocknung:
Wässrig | Verdunstung und Absorption | Papier, beschichtete Substrate
Eco-Solvent | Verdunstung | Folien, Außenwerbung
UV-Inkjet | Strahlungshärtung | Nichtsaugende Substrate (Folie, Holz, Keramik)
Thermisch-sublimierend | Sublimation bei Übertragung | Textil, Sport
Latex | thermische Fixierung | Folien, Textil

### Toner und elektrofotografischer Digitaldruck

Verfahrensprinzip: Toner ist ein feines Partikelsystem. Bildentstehung beruht auf elektrischen Ladungen und Photoleitern.

Bildentstehungsschritte:
Aufladen | Corona bzw. Ladewalze laden die Fotoleitertrommel gleichmäßig elektrostatisch auf
Belichten | Laser/LED schreiben ein latentes elektrostatisches Bild auf die Fotoleitertrommel
Entwickeln | Geladene Tonerpartikel lagern sich entsprechend dem Ladungsbild an
Übertragen | Toner wird auf den Bedruckstoff übertragen
Fixieren | Thermoplastisches Harz schmilzt unter Hitze und Druck; kühlt zum festen Film ab

Schichtdicke: 5–15 µm (abhängig von Toner und Bedeckungsgrad).

Typische Tonerbestandteile: Thermoplastisches Harz (Polyester, Styrolacrylat); Pigment/Farbmittel; Ladungssteuermittel; Wachse.

Laborrelevante Prüfungen:
— Partikelgrößenverteilung und D50
— Ladungsverhalten (Triboelektrizität)
— Fixierungsqualität und Abriebfestigkeit
— Druckbild, Glanz und Farbton
— Agglomerationsneigung bei Lagerung (Blocktest)

**Merksatz**

Drei Systeme, drei Rheologien: Siebdruck arbeitet hochviskos und strukturviskos für große Schichtdicken, Inkjet niedrigviskos und eng toleriert für tropfengenaue Dosierung, Toner ganz ohne flüssige Phase. Bei Inkjet ist die Partikelgröße kein Feinheitswert, sondern ein Düsenkriterium — Agglomerate verstopfen. Über das Druckergebnis entscheiden Rheologie, Partikelgröße und Substratanpassung, nicht die Farbstärke allein.

**Stichwörter:** Siebdruck, Inkjet, Toner, Elektrofotografie, Plastisol, Rakel, Strukturviskosität, Thixotropie, Düse, Tropfenbildung, D50, D99, Partikelgröße, Filtration, Jetting, Ladungssteuermittel, Fotoleiter, Fixierung, mPa·s, Pa·s, µm, Schichtdicke
*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie*

## Übungsblatt Ü-148 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**
Warum muss eine Siebdruckfarbe strukturviskos-thixotrop sein? Erklären Sie den Zusammenhang zwischen Fließverhalten und den zwei Phasen des Siebdrucks.

**Phase 1 — Rakeln:** Unter Rakelschub (hohe Scherrate) sinkt die Viskosität: Die Farbe fließt durch die offenen Siebmaschen auf das Substrat.
**Phase 2 — nach Druck:** Nach dem Rakeln kehrt die Struktur zurück (Thixotropie): Viskosität steigt wieder → Farbe verläuft nicht, Kanten bleiben scharf.
**Fließgrenze:** Oberhalb der Fließgrenze fließt die Farbe; darunter steht sie — wichtig für scharfe Druckbilder und kein unkontrolliertes Verlaufen.
**Konsequenz:** Ein rein newtonsches System würde entweder nicht durch das Sieb fließen oder unkontrolliert verlaufen.
*Bewertung: Das Zusammenspiel der zwei Phasen (Rakeln/Ruhe) mit Strukturviskosität und Thixotropie wird korrekt erklärt.*

**Frage 2** **(Verständnis, 7 Punkte)**

Beschreiben Sie die fünf Schritte des elektrofotografischen Prozesses und nennen Sie zwei Tonerbestandteile mit ihrer Funktion.

**Aufladen:** Corona bzw. Ladewalze laden die Fotoleitertrommel gleichmäßig elektrostatisch auf.
**Belichten:** Laser/LED schreiben latentes Ladungsbild auf Fotoleitertrommel.
**Entwickeln:** Geladene Tonerpartikel lagern sich am Ladungsbild an.
**Übertragen:** Toner wird elektrostatisch auf Bedruckstoff übertragen.
**Fixieren:** Wärme + Druck: thermoplastisches Harz (Polyester) schmilzt und verankert Bild.
**Tonerbestandteile:** Harz (Filmbildner/Fixierung); Pigment (Farbe); Ladungssteuermittel (Triboelektrizität); Wachs (Fixierhilfe, Offset-Verhinderung an Fixiererwalze).
*Bewertung: Fünf Schritte korrekt; zwei Tonerbestandteile mit Funktion.*

**Frage 3** **(Berechnung, 9 Punkte)**

Ein Inkjet-Druckkopf setzt Tropfen von 10 pL bei 720 × 720 dpi. Berechnen Sie für 1 m² Vollflächendruck: a) Tropfenzahl; b) Tintenvolumen in mL; c) Schichtdicke, wenn die Tintendichte 1,05 g/cm³ und der Festkörper (Volumenanteil) 35 % beträgt.

**a) Tropfen/in²:** 720 · 720 = 518 400 Tropfen/in²
**a) in² je m²:** 1 in = 2,54 cm; 1 in² = 6,4516 cm²; 1 m² = 10 000 cm² → 10 000 / 6,4516 ≈ 1 550 in²/m²
**a) Tropfen/m²:** 518 400 · 1 550 ≈ 8,04 · $10^8$ Tropfen/m²
**b) Volumen:** V = 8,04 · $10^8$ · 10 pL = 8,04 · $10^9$ pL = 8,04 mL/m²
**c) Nassschicht:** Masse = V · ρ = 8,04 cm³/m² · 1,05 g/cm³ = 8,44 g/m²; d(nass) = 8,04 cm³/10 000 cm² = 0,804 · $10^{-3}$ cm ≈ 8 µm
**c) Trockenfilm:** TSD = 8 µm · 0,35 = 2,8 µm — typisch für Inkjet-Trockenfilm.
*Bewertung: Tropfen → Volumen → Nassschicht → Trockenfilm sauber gekettet; Einheiten (pL, in², mL, µm) korrekt.*

# L-149 · Bedruckstoffe, QK, Compliance und Arbeitsschutz

*Haftung, Qualitätskontrolle, Prüfmethoden, Lebensmittelkontakt und Sicherheit*

**Wahlqualifikation** · B 11

Bei einer Rezepturänderung nicht nur den Farbton prüfen. Für Verpackungsanwendungen können Rohstoffwechsel, Härtungsgrad, Reststoffe und NIAS das Compliance-Risiko verändern.

## Bedruckstoff, Benetzung und Haftung

Die Druckfarbe endet nicht am Farbfilm: Das Substrat bestimmt mit, ob Benetzung, Trocknung und Haftung funktionieren.

Substrat | Typische Herausforderung | Prüfung/Lösung:
Papier/Karton | Saugfähigkeit, Oberflächenstruktur, Wegschlagen → Bindemittel muss zur Saugfähigkeit passen
PE/PP | Niedrige Oberflächenenergie → Corona-/Plasma-/Beflammungsbehandlung; Dyne-Kontrolle
PET | Je nach Oberfläche gute bis anspruchsvolle Haftung; Behandlungsgrad und Bindemittelauswahl beachten
Metall | Benetzung, Haftung, Vorbehandlung (entfetten), Flexibilität des Films
Glas | Sehr geringe Oberflächenrauheit; Haftung und Reinigung besonders wichtig; ggf. Primer
Textil | Penetration, Griff, Waschbeständigkeit und Fixierung

Benetzung: Spreitung einer Flüssigkeit auf einer Oberfläche hängt von Oberflächenspannung der Farbe, Oberflächenenergie des Substrats, Temperatur und Kontamination ab.
Fehlerbild: Schlechte Benetzung → Krater, Fehlstellen, ungleichmäßiger Farbauftrag. Ursache kann Farbe, Substrat oder Kontamination sein — nicht sofort die Rezeptur ändern.

## Qualitätskontrolle — die Labor-Schleife

Die wichtigste Arbeitsweise im Labor: Abweichung → mögliche Ursache eingrenzen → gezielte Prüfung → Maßnahme → Kontrollprüfung.

Abweichung | Typische Ursachen | Erste Prüfung:
Farbtonabweichung | Pigment, Dispergierung, Dosierung, Schichtdicke, Substrat | Farbmessung, Vergleichsaufzug, Feinheit
Zu geringe Farbstärke | Pigment, Dispergierung, falsches Vehicle | Farbstärkevergleich, Dispersion prüfen
Schlechte Haftung | Substrat, Benetzung, Vorbehandlung, Bindemittel, Härtung | Haftungs-/Abriebtest, Gitterschnitt (ISO 2409)
Zu langsame Trocknung | Lösemittel/Wasser, Bindemittel, Temperatur, Schichtdicke | Trocknungs-/Wischprüfung
Streifen/Grobteile | Dispergierung, Kontamination | Feinheit (ISO 1524), Filterrückstand
Krater/Fehlstellen | Kontamination, Benetzung | Aufzugsvergleich, Oberflächenspannung prüfen
UV-Unterhärtung | Dosis, Pigment, Schichtdicke, Photoinitiator, Sauerstoff | Abrieb, MEK-Wischtest
Blocken | Restklebrigkeit, Trocknung | Blockprüfung, Trocknungszustand

Dokumentieren: Temperatur, Messgerät, Methode, Substrat, Schichtdicke, Zeitpunkt nach Herstellung/Auftrag und Standard immer festhalten.

## Prüfmethoden und Normbezüge

Wozu im Druckfarbenlabor: Feinheit entscheidet über Druckbild und Düsen-/Rasterverhalten, Viskosität und Tack über Farbübertragung und Rupfen, Gitterschnitt über die Haftung auf dem Bedruckstoff — jede Methode beantwortet eine konkrete Frage aus der Produktion.

Normen werden als Orientierung genannt. Für eine reale Spezifikation muss immer geprüft werden, ob die Methode für das jeweilige Druckfarbensystem geeignet ist.

Feinheit der Mahlung | ISO 1524:2020 | Für Farben, Lacke und Druckfarben; schuppenförmige Pigmente eingeschränkt
Paste-Viskosität | ISO 12644:1996 | Fallstab; Anwendungsbereich ca. 2–200 Pa·s; für pastöse Druckfarben
Auslaufzeit | ISO 2431:2019 | Auslaufbecher; Fließzeit in Sekunden; Umrechnung in mPa·s nur als Richtwert für newtonsche Systeme
Gitterschnitt | ISO 2409:2020 | Widerstand gegen Ablösung; keine direkte quantitative Haftfestigkeitsmessung
Tack | kein gültiger internationaler Normbezug (ASTM D4361 wurde 2019 zurückgezogen); Verfahren nach Angabe des Geräteherstellers | Inkometer; Wert geräte- und temperaturabhängig; immer Bedingungen angeben

Für Druckfarben außerdem praxisrelevant: Farbton/Farbstärke, Dichte, Feinheit, Rheologie, Trocknung/Härtung, Haftung/Abrieb, Lagerstabilität, Filtrierbarkeit (Inkjet).

## Lebensmittelkontakt und Compliance

Bei Lebensmittelverpackungen reicht die Aussage „geeignete Druckfarbe“ nicht aus. Die Eignung hängt vom gesamten Verpackungsaufbau und der vorgesehenen Anwendung ab.

Migration: Übergang von Stoffen aus dem Verpackungsaufbau ins Lebensmittel. Einflussgrößen: Stoffeigenschaften (Molekülgröße, Polarität), Konzentration, Kontaktzeit, Temperatur, Schichtaufbau und Barrierewirkung.

NIAS: Non-Intentionally Added Substances — Reaktions-, Abbau- oder Verunreinigungsprodukte, nicht als Rohstoff dosiert, aber vorhanden.

MOSH/MOAH: Mineralölkohlenwasserstoffe; relevant bei Papier/Karton und Recyclingfasern. Eine mineralölfreie oder pflanzenölbasierte Formulierung ist keine automatische Freigabe für Lebensmittelkontakt.

EuPIA-Kontext: Die frühere EuPIA Exclusion Policy wurde 2026 durch die EuPIA Charter on Raw Material Selection and Exclusion ersetzt. Die EuPIA GMP liegt seit November 2025 in der 5. Version vor. Beides sind Branchenleitlinien — kein Ersatz für gesetzliche Anforderungen.

### Arbeitsschutz bei Druckfarben

Druckfarben können je nach System Lösemittel, reaktive Monomere, Pigmente, Additive oder andere Gefahrstoffe enthalten. Konkrete Gefährdung immer anhand des aktuellen Sicherheitsdatenblatts und der betrieblichen Gefährdungsbeurteilung bewerten.

System | Besonders beachten:
Lösemittelhaltig | Einatmen, Hautkontakt, Brand-/Explosionsschutz, Absaugung, Ex-Schutz
UV/ESH | Reaktive Acrylate (sensibilisierend); UV-Strahlung; Hochspannung/Elektronen bei ESH
Wasserbasiert | Konservierungsmittel, Amine/pH; Aerosole systemabhängig
Pigmenthaltig | Staubbildung beim Umgang mit Pulverrohstoffen — Feinstaubmaske!
Inkjet | Sehr feine Partikel; Gefahrstoffprofil systemabhängig

Grundregel: Schutzmaßnahmen nicht aus einem allgemeinen Rezeptbuch ableiten. Sicherheitsdatenblatt, Betriebsanweisung, Gefährdungsbeurteilung und betriebliche Vorgaben haben Vorrang.

**Merksatz**

Haftung beginnt bei der Benetzung: Die Oberflächenenergie des Bedruckstoffs muss über der Oberflächenspannung der Farbe liegen — sonst hilft keine Rezepturkosmetik. Bei einer Rezepturänderung ist der Farbton die einfachste Prüfung, nicht die wichtigste; über die Verpackungstauglichkeit entscheiden Härtung, Reststoffe und NIAS. Compliance für Lebensmittelkontakt ist eine Aussage über das gesamte Verpackungssystem, nicht über einen einzelnen Rohstoff.

**Stichwörter:** Bedruckstoff, Haftung, Benetzung, Krater, Qualitätskontrolle, Labor-Schleife, ISO 1524, ISO 12644, ISO 2431, ISO 2409, Auslaufbecher, Viskosität, Migration, NIAS, EuPIA — Leitlinien der European Printing Ink Association, GMP, MOSH, MOAH, Lebensmittelkontakt, Compliance, Lösemittel, Arbeitsschutz, Sicherheitsdatenblatt, UV-Acrylat, Gefährdungsbeurteilung
*Quellen: DIN EN ISO 1524; ISO 12644; DIN EN ISO 2431; DIN EN ISO 2409; EuPIA Exclusion Policy / Charter (Fassung 2026); EuPIA Good Manufacturing Practice (GMP), 5. Fassung 2025; Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie*

## Übungsblatt Ü-149 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**
Ein Unternehmen wechselt das Pigment in einer wasserbasierten Flexofarbe für Tiefkühlverpackungen. Was muss vor der Freigabe der neuen Rezeptur geprüft werden?

**Farbton und Farbstärke:** Pigmentwechsel kann Farbton, Farbstärke und Transparenz verändern — Vergleich gegen Standard.
**Dispergierung/Stabilität:** Neues Pigment erfordert ggf. angepasstes Dispergiermittel, andere Mahlparameter, andere Lagerstabilität.
**Haftung und Beständigkeit:** Tiefkühlverpackung → Haftung bei −18 °C; Flexibilität des Films (kalt-brüchig?); Kratzfestigkeit.
**Migration/Compliance:** Neues Pigment kann neue NIAS, andere Reinheitsspezifikation oder andere Migrationseigenschaften mitbringen — vollständige Compliance-Prüfung nötig.
**Viskosität:** Neues Pigment → ggf. andere Rheologie und Viskosität im Flexodruck.
*Bewertung: Farbton, Dispersion, Haftung/Beständigkeit, Compliance und Viskosität werden als Prüfpunkte benannt.*

**Frage 2** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Ein Rohstofflieferant bietet ein günstigeres Bindemittel an, das laut Sicherheitsdatenblatt für Druckfarben geeignet ist. Die Farbe ist für eine Lebensmittelkarton-Verpackung. Erklären Sie, warum „geeignet für Druckfarben“ allein keine ausreichende Aussage ist.

**Migration:** Jeder Rohstoff kann Bestandteile migrieren lassen — auch wenn er technisch gut funktioniert. Migration hängt von Molekülgröße, Konzentration und Verpackungsaufbau ab.

**NIAS:** Das neue Bindemittel kann andere NIAS mitbringen (Reaktions-, Abbau- oder Verunreinigungsprodukte), die nicht im Sicherheitsdatenblatt stehen.

**Gesamtaufbau:** Die Compliance bezieht sich auf den gesamten Verpackungsaufbau — Druckfarbe, Barriereschicht, Beschichtung, Substrat. Ein einzelner Rohstoff kann nicht isoliert bewertet werden.

**EuPIA/Gesetz:** EuPIA GMP und gesetzliche Anforderungen verlangen, dass der Rohstoff auch im konkreten Anwendungszusammenhang (Migration, Endprodukt) bewertet wird.

*Bewertung: Migration, NIAS, Gesamtaufbau und regulatorische Bewertung werden als Gründe genannt.*

**Frage 3** **(Anwendung, 8 Punkte)**

Eine UV-Siebdruckfarbe auf Glas zeigt nach dem Druck schlechte Haftung und Kraterbildung. Beschreiben Sie eine systematische Fehlersuche nach der Labor-Schleife.

**Abweichung:** Schlechte Haftung + Krater auf Glas.

**Mögliche Ursachen Haftung:** Bindemittel nicht für Glas geeignet; Glasoberfläche nicht ausreichend gereinigt/vorbehandelt; Härtung unvollständig.

**Mögliche Ursachen Krater:** Kontamination (Öl, Trennmittel, Fingerabdruck); zu hohe Oberflächenspannung der Farbe; Siliconkontamination.

**Prüfung:** Glas reinigen, erneut bedrucken → Haftung? UV-Dosis prüfen (MEK-Test); Oberflächenenergie Glas messen; Kraterspur vergrößern (Mikroskop).

**Maßnahme:** Glasreinigung optimieren; Primer testen; Farbe auf Kraterneigung prüfen (kein Siliconadditiv ohne Prüfung).

*Bewertung: Abweichung, getrennte Ursachensuche für Haftung und Krater, gezielte Prüfung und Maßnahme nach Labor-Schleife.*

Kapitel 12

# Prüf- und Messtechnik

# L-150 · pH-Wert, Leitfähigkeit und MEQ

*Wichtige Kenngrößen wässriger Lacksysteme*

**Prüfungsteil 1** · A 7.1 · A 7.2

Bei wässrigen Systemen sind pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit und der MEQ-Wert (Neutralisationsmittel je 100 g Festkörper) zentrale Kenngrößen für Stabilität und Applikation.

## pH-Wert

Der pH-Wert ist der negative dekadische Logarithmus der $H^+$-Aktivität; in verdünnten Lösungen darf man näherungsweise mit der $H^+$-Konzentration rechnen. Er beeinflusst bei vielen wässrigen Bindemittelsystemen Neutralisation, Ladungszustand, Stabilität und Applikation; die Bedeutung ist systemabhängig. Gemessen wird mit der Glaselektrode; in pigmentierten Lacken ist die Messung durch Beläge auf der Elektrode fehleranfällig — Elektrode reinigen und kalibrieren. pH-Papier dient nur als grober Anhalt.

## MEQ-Wert

Der MEQ-Wert gibt die Milliäquivalente an Säure oder Base je 100 g Lackfestkörper an — also die Menge des eingesetzten Neutralisationsmittels — und ergänzt damit den pH-Wert; beide Kennwerte beantworten unterschiedliche Fragen. Weil er nicht vom Zustand einer Elektrode abhängt, ist er für den Chargenvergleich reproduzierbarer und aussagekräftiger als der pH-Wert allein. Bestimmt wird er durch Titration.

## Rechenweg

```
MEQ = V · 1000 / (m_Lack · nfA)
   V      = Verbrauch an Maßlösung, 0,1 mol/l einwertige Säure bzw. Base [ml]
   m_Lack = eingewogene Lackmenge [g]
   nfA    = nichtflüchtiger Anteil (Festkörper) [%]

Ergebnis: Milliäquivalente je 100 g Festkörper
```

## Elektrische Leitfähigkeit

Die Leitfähigkeit ist ein Maß für gelöste Ionen (in µS/cm). Sie ist besonders bei Elektrotauchlacken und Wasserlacken wichtig: eine erhöhte Leitfähigkeit kann auf erhöhten Ionengehalt, Neutralisationsmittel oder Verunreinigungen hinweisen; ihre Bedeutung für Stabilität und Flockulation muss systemspezifisch bewertet werden.

## Umwelt und Sicherheit

Neutralisationsamine riechen und können reizen — gut lüften, Hautkontakt meiden. Wässrige Reste nicht ungeklärt einleiten; als Indirekteinleiter gelten Grenzwerte. Elektroden pfleglich behandeln und regelmäßig kalibrieren.

**Merksatz**

pH = $H^+$-Aktivität (Glaselektrode) — Momentaufnahme; MEQ = Neutralisationsmittel je 100 g Festkörper (Titration) — mengenbezogen und vom Messaufbau unabhängiger; beide ergänzen sich. Leitfähigkeit (µS/cm) = gelöste Ionen; hoher Wert kann auf Instabilität hinweisen (systemabhängig zu bewerten).

**Stichwörter:** pH-Wert, Glaselektrode, MEQ-Wert, Neutralisationsmittel, Titration, Leitfähigkeit, Elektrotauchlack, Wasserlack, Indirekteinleiter

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie*

## Übungsblatt Ü-150 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Warum ist der MEQ-Wert bei Wasserlacken aussagekräftiger als der pH-Wert allein?

**pH-Wert:** Der pH-Wert gibt nur die momentane $H^+$-Aktivität an und ist in pigmentierten Systemen oft schwer zuverlässig zu messen.

**MEQ-Wert:** Der MEQ-Wert erfasst die tatsächlich eingesetzte Menge an Neutralisationsmittel je 100 g Festkörper.

**Vorteil:** Damit ist er ein direktes Maß für den Neutralisationsgrad und besser reproduzierbar als der pH-Wert.

**Praxis:** Über den MEQ-Wert lassen sich Chargen und Stabilität zuverlässiger vergleichen.

*Bewertung: Der Unterschied zwischen Aktivität (pH) und Menge (MEQ) wird als Kern der besseren Aussagekraft benannt.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**

Zur MEQ-Bestimmung werden 5,00 g Lack (nfA = 40 %) titriert; verbraucht werden 3,0 ml Salzsäure, 0,1 mol/l. Berechnen Sie den MEQ-Wert.

**Gegeben:** m_Lack = 5,00 g; nfA = 40 %; V = 3,0 ml (0,1 M)

**Ansatz:** MEQ = V · 1000 / (m_Lack · nfA)

**Rechnung:** MEQ = 3,0 · 1000 / (5,00 · 40) = 3000 / 200 = 15

**Antwortsatz:** Der MEQ-Wert beträgt 15 Milliäquivalente Säure je 100 g Festkörper.

*Bewertung: Die Formel wird richtig angewandt und das Ergebnis mit korrekter Einheit (meq je 100 g Festkörper) angegeben.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**

Ein Wasserlack wird bei der Eingangskontrolle mit stark erhöhter Leitfähigkeit gemessen. Wie deuten Sie das und was ist zu befürchten?

**Deutung:** Eine hohe Leitfähigkeit zeigt viele gelöste Ionen — etwa zu viel Neutralisationsmittel oder Salz-/Verunreinigungseintrag.

**Risiko:** Das kann die Dispersionsstabilität herabsetzen und Flockulation begünstigen; bei Elektrotauchlacken wird die Abscheidung gestört.

**Maßnahme:** Charge zurückstellen, pH- und MEQ-Wert prüfen, mit Sollwerten vergleichen und Ursache (Rohstoff, Wasserqualität) klären.

*Bewertung: Die erhöhte Leitfähigkeit wird korrekt auf Ionengehalt zurückgeführt und mit Stabilitätsrisiko und Prüfschritten verknüpft.*

# L-151 · Analytik flüssiger Rohstoffe

*Siedeverhalten, Verdunstungszahl, Dichte, Brechzahl, GC, Farbzahl, Auslaufviskosität, Festkörper*

**Prüfungsteil 1** · A 7.1

Lösemittel und flüssige Rohstoffe werden über Siedeverhalten, Verdunstungszahl, Dichte, Brechzahl, Farbzahl und Gaschromatographie auf Identität, Reinheit und Verarbeitungsverhalten geprüft; bei flüssigen Lacken kommen Auslaufviskosität (ISO 2431) und Festkörpergehalt (ISO 3251) als einfache Routinekenngrößen dazu.

## Siedeverhalten

Die Siedeanalyse (Destillation) trennt ein Lösemittelgemisch nach dem Siedebereich in leicht-, mittel- und schwerflüchtige Anteile auf. Der Verlauf der Temperatur-Siedekurve kennzeichnet die Zusammensetzung und beeinflusst Verdunstung, Verlauf und Lösemittelretention im Film.

## Verdunstungszahl

Die Verdunstungszahl VD (DIN 53170) gibt an, wie viel langsamer ein Lösemittel verdunstet als Diethylether (VD_Ether = 1). Einteilung: leichtflüchtig VD < 10, mittelflüchtig 10–35, schwerflüchtig 35–50, sehr schwerflüchtig > 50. Die VD ist ein wichtiger Hinweis auf das Verdunstungsverhalten und kann Trocknungsgeschwindigkeit, Verlauf und die Neigung zu Läufern beeinflussen; die tatsächliche Wirkung hängt vom Lösemittelgemisch und der Formulierung ab.

## Dichte und Brechzahl

Die Dichte wird mit dem Pyknometer (Wägefläschchen mit exakt definiertem Volumen: aus der Wasserfüllung folgt das Volumen über $V = m(\text{Wasser})/\rho(\text{Wasser})$, danach gilt $\rho(\text{Probe}) = m(\text{Probe})/V$ bzw. $\rho(\text{Probe}) = (m(\text{Probe})/m(\text{Wasser})) \cdot \rho(\text{Wasser})$) oder dem Biegeschwinger bestimmt, die Brechzahl mit dem Refraktometer. Beide sind schnelle Vergleichskennzahlen für Identitäts- und Eingangskontrollen; für eine belastbare Reinheitsprüfung sind je nach Rohstoff weitere Analysen erforderlich.

## Zusammensetzung und Farbzahl

- Gaschromatographie (GC) — trennt und identifiziert die Bestandteile eines Lösemittelgemischs und erfasst Verunreinigungen.
- Farbzahl klarer Flüssigkeiten — Gardner-Farbzahl bzw. Hazen/APHA (Platin-Cobalt) und die Iodfarbzahl geben unerwünschte Verfärbungen an; wichtig bei Harzlösungen und Klarlacken.

## Umwelt und Sicherheit

Bei allen Prüfungen Lösemitteldämpfe und Flammpunkt beachten (Absaugung, geschlossene Systeme). Reste als Sonderabfall entsorgen. Bevorzugt lösemittelarme bzw. VOC-arme Rohstoffe einsetzen und die Emissionen niedrig halten.

## Viskositätsmessung: Auslaufbecher (ISO 2431)

Das meistgenutzte Viskositätsmessgerät im Lacklabor: Der Auslaufbecher (ISO 2431) misst die Zeit in Sekunden, die eine definierte Lackmenge braucht, um durch eine kalibrierte Öffnung auszulaufen. Genormt sind ISO-Becher mit 3, 4, 5 und 6 mm Düsendurchmesser. Der früher übliche DIN-4-Becher stammt aus der 1996 zurückgezogenen DIN 53211, der Ford-Becher 4 aus ASTM D1200 — beide sind keine ISO-2431-Becher und liefern andere Werte. Volumen: 100 mL. Messung: Lack bei 23 °C temperieren, Düse mit dem Finger verschließen, befüllen, Finger lösen und die Zeit bis zum Abreißen des Strahls stoppen. Die Düse ist so zu wählen, dass die Auslaufzeit im gültigen Bereich von 30 bis 100 s liegt — darunter wird die Strömung turbulent. Typisch sind für einen verarbeitungsfähigen Spritzlack 30–45 s und für einen Streichlack 45–90 s. Wichtig: Unterschiedliche Bechertypen und Düsengrößen liefern nicht vergleichbare Werte — Becher und Düse immer angeben.

### Festkörperbestimmung (ISO 3251) — Messparameter

Die Festkörperbestimmung nach ISO 3251 erfolgt gravimetrisch: Einwaage 1,0 g ± 0,1 g auf ein flaches Aluminiumschälchen mit einem Bodendurchmesser von (75 ± 5) mm — ein Toleranzfeld und kein Mindestmaß, weil die Flächenbelegung (Probenmasse je Fläche) den Messwert beeinflusst. Standardbedingungen: 105 °C / 60 Minuten für die meisten lösemittelhaltigen Lacke; 125 °C / 60 Minuten für hochsiedende Systeme (z. B. manche Alkydharz-Einbrennlacke). Typische Festkörperwerte: Alkydharz-Lufttrockner 45–60 %, 2K-PUR-Lack 50–70 %, wasserbasierter Industrielack 35–50 % (ein wässriger Automobil-Basislack liegt mit rund 15–25 % deutlich darunter). Achtung: Der Festkörperwert ist temperaturabhängig — bei unterschiedlichen Bedingungen sind die Werte nicht direkt vergleichbar (ISO 3251-Festkörper ≠ Einbrennrückstand).

**Merksatz**

Siedeanalyse = Flüchtigkeitsprofil; VD = Verdunstung relativ zu Ether (klein = schnell); Dichte/Brechzahl = Identität; GC = Zusammensetzung; Gardner/Hazen/Iod = Farbzahl. Auslaufbecher nach ISO 2431 (Düsen 3/4/5/6 mm, 23 °C, gültig 30–100 s): Viskosität in Sekunden; DIN-4- und Ford-4-Becher sind eigene, nicht deckungsgleiche Bechertypen — Becher, Norm und Temperatur immer angeben. Festkörper ISO 3251: 1 g Einwaage, 105 °C / 60 min Standard.

**Stichwörter:** Siedebereich, Siedeanalyse, Verdunstungszahl, VD, Dichte, Pyknometer, Brechzahl, Gaschromatographie, Farbzahl, Gardner, Hazen, Auslaufbecher, ISO 2431, Auslaufzeit, Festkörpergehalt, ISO 3251

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; DIN 53170; ASTM D1200; ISO 2431; ISO 3251*

---

## Übungsblatt Ü-151 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Welche Kennzahlen prüfen Sie an einem angelieferten Lösemittel und was sagen sie aus?

**Siedeverhalten:** Siedeanalyse zeigt das Flüchtigkeitsprofil (leicht/mittel/schwer) und damit Verdunstung und Verlauf.

**Verdunstungszahl:** VD gibt die Verdunstung relativ zu Diethylether an — klein bedeutet schnell flüchtig.

**Dichte und Brechzahl:** Schnelle Vergleichskennzahlen für Identitäts- und Eingangskontrolle; für eine belastbare Reinheitsprüfung braucht es je nach Rohstoff weitere Analysen.

**GC und Farbzahl:** Die Gaschromatographie erfasst die Zusammensetzung; die Farbzahl (Gardner/Hazen/Iod) zeigt unerwünschte Verfärbung.

*Bewertung: Die Kennzahlen werden mit ihrer jeweiligen Aussage verknüpft und nicht nur aufgezählt.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**

Ein Pyknometer wiegt leer 25,00 g, mit Wasser 74,80 g und mit einem Lack 84,60 g (alle bei 20 °C, ρ_Wasser = 0,9982 g/cm³). Berechnen Sie die Dichte des Lacks.

**Masse Wasser:** m_W = 74,80 g − 25,00 g = 49,80 g

**Masse Lack:** m_L = 84,60 g − 25,00 g = 59,60 g

**Ansatz:** ρ_L = (m_L / m_W) · ρ_Wasser

**Rechnung:** ρ_L = (59,60 g / 49,80 g) · 0,9982 g/cm³ = 1,1968 · 0,9982 g/cm³ = 1,195 g/cm³

**Antwortsatz:** Die Dichte des Lacks beträgt rund 1,195 g/cm³.

*Bewertung: Das Pyknometerprinzip (Vergleich über gleiches Volumen) wird korrekt angewandt und die Wasserdichte einbezogen.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**

Ein Decklack läuft in der Produktion trotz gleicher Rezeptur plötzlich stärker. Wie kann die Lösemittelanalytik helfen, die Ursache zu finden?

**Verdacht:** Ein zu langsam verdunstendes bzw. verändertes Lösemittelgemisch hält den Film länger flüssig und begünstigt Läufer.
**Prüfung:** Siedeanalyse und Verdunstungszahl vergleichen; GC auf abweichende Zusammensetzung prüfen.
**Schluss:** Weicht das Flüchtigkeitsprofil ab (mehr Schwerflüchter), kann das die stärkere Läuferbildung erklären; Ursache und Ausmaß sind mit weiteren Prozess- und Lackdaten zu bestätigen — bei Bestätigung Charge sperren und Lieferung reklamieren.

*Bewertung: Die Antwort stellt eine prüfbare Hypothese auf und ordnet die passenden Analysenmethoden gezielt zu.*

# L-152 · Qualitativer Eisennachweis

*Eisen(III) sichtbar machen: Thiocyanat und Berliner Blau*

**Prüfungsteil 1** · A 7.1

Eisen(III) lässt sich qualitativ einfach nachweisen: mit Thiocyanat als blutrotes Eisen(III)-thiocyanat oder mit Hexacyanoferrat als tiefblaues Berliner Blau.

## Warum Nachweisreaktionen

In der Lackanalytik muss man oft qualitativ feststellen, welche Ionen ein Rohstoff oder ein Rückstand enthält — etwa Eisen aus Eisenoxidpigmenten oder aus Korrosion. Für den Nachweis wird die Probe zunächst gelöst; störende Ionen werden möglichst abgetrennt, damit sie die Nachweisreaktion nicht verfälschen.

## Nachweis mit Thiocyanat

Versetzt man eine schwach salzsaure Lösung mit Ammonium- oder Kaliumthiocyanat, bildet Eisen(III) einen tiefroten, blutroten Eisen(III)-thiocyanato-Komplex. Die Reaktion ist empfindlich: Unter geeigneten Bedingungen zeigt bereits ein geringer Eisen(III)-Gehalt eine deutliche Rotfärbung; Empfindlichkeit und Sichtbarkeit hängen von Matrix und Versuchsbedingungen ab.

## Nachweis als Berliner Blau

Alternativ versetzt man die schwach salzsaure Lösung mit einer Kaliumhexacyanoferrat(II)-Lösung. Eisen(III) kann dabei einen tiefblauen Niederschlag, das Berliner Blau, bilden; Bildung und Intensität hängen von pH, Konzentration und Störionen ab. Unter geeigneten Bedingungen ist dieser Nachweis empfindlich und gut sichtbar.

## Die Reaktionsgleichungen

```
Thiocyanat-Nachweis (Komplexbildung):
Fe³⁺ + SCN⁻ ⇌ [Fe(SCN)]²⁺  (blutrot; bei Überschuss weitere Thiocyanato-Komplexe)

Berliner Blau (Fällung, vereinfacht):
4 Fe³⁺ + 3 [Fe(CN)₆]⁴⁻ → Fe₄[Fe(CN)₆]₃↓ (unlösliches Berliner Blau)
Mit K⁺-Überschuss entsteht die lösliche Form KFe[Fe(CN)₆].
```

## Qualitativ, nicht quantitativ

Solche Tüpfel- oder Reagenzglasnachweise sind schnelle qualitative Prüfungen: Sie zeigen, ob ein Ion vorhanden ist, nicht wie viel. Für die Menge nutzt man Titrationen oder instrumentelle Verfahren. Eisenoxidpigmente in Rot, Gelb und Schwarz sind ein typischer Anlass, Eisen im Labor nachzuweisen.

## Umwelt und Sicherheit

Beide Reagenzien sind kein Routinegut: Kaliumthiocyanat ist gesundheitsschädlich beim Verschlucken, Kaliumhexacyanoferrat(II) ist als solches zwar wenig giftig, setzt aber mit starken Säuren Cyanwasserstoff (Blausäure) frei. Deshalb gilt: den Nachweis nur schwach angesäuert und im Abzug durchführen, niemals konzentrierte Säure zugeben und die Ansätze nicht mit Säureabfällen zusammenschütten.

Entsorgung getrennt als cyanidhaltiger Abfall nach Betriebsanweisung — nicht in den Ausguss. Vor jeder Nachweisreaktion das Sicherheitsdatenblatt und die Betriebsanweisung nach GefStoffV heranziehen; Schutzbrille und Handschuhe sind Pflicht.

**Merksatz**

Eisen(III) qualitativ: mit Thiocyanat blutroter Eisen(III)-thiocyanato-Komplex, mit Hexacyanoferrat(II) tiefblaues Berliner Blau. Beide Reaktionen sind empfindlich und zeigen Anwesenheit, nicht Menge.

**Stichwörter:** Eisennachweis, Eisen(III), Thiocyanat, Eisenthiocyanat, Berliner Blau, Hexacyanoferrat, qualitativer Nachweis, Nachweisreaktion, Eisenoxidpigment, Analytik, Cyanwasserstoff, Abzug, Entsorgung

## Übungsblatt Ü-152 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Beschreiben Sie zwei qualitative Nachweise für Eisen(III) und die jeweils beobachtete Färbung.

**Thiocyanat:** Mit Ammonium-/Kaliumthiocyanat bildet Eisen(III) einen blutroten Eisen(III)-thiocyanato-Komplex (dominant $[Fe(SCN)]^{2+}$, bei Überschuss weitere).

**Berliner Blau:** Mit Kaliumhexacyanoferrat(II) bildet Eisen(III) einen tiefblauen Niederschlag (Berliner Blau).

**Gemeinsam:** Beide Reaktionen laufen in schwach salzsaurer Lösung und sind sehr empfindlich.

*Bewertung: Beide Nachweise werden mit dem richtigen Reagenz und der korrekten Färbung genannt.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**

Eine gelöste Probe enthält 0,0012 mol Eisen(III). Bei der Fällung als unlösliches Berliner Blau, $Fe_4[Fe(CN)_6]_3$: Wie viel mol Hexacyanoferrat(II) werden gebunden, und welcher Masse Kaliumhexacyanoferrat(II) $K_4[Fe(CN)_6]$ (M = 368,3 g/mol) entspricht das?

**Stöchiometrie:** $4\ Fe^{3+} + 3\ [Fe(CN)_6]^{4-} \rightarrow Fe_4[Fe(CN)_6]_3$, also 3 mol Hexacyanoferrat(II) je 4 mol $Fe^{3+}$

**Stoffmenge:** $n([Fe(CN)_6]^{4-}) = 3/4 \cdot 0{,}0012\ mol = 0{,}0009\ mol$

**Masse:** $m(K_4[Fe(CN)_6]) = n \cdot M = 0{,}0009\ mol \cdot 368{,}3\ g/mol \approx 0{,}33\ g$ (M bezogen auf das eingesetzte Kaliumsalz, nicht auf das freie Hexacyanoferrat(II)-Ion)

*Bewertung: Die 4:3-Stöchiometrie des Berliner Blaus wird korrekt angesetzt (3/4 der Stoffmenge $Fe^{3+}$) und über Stoffmenge mal molare Masse in die Masse umgerechnet.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**

Warum ist ein solcher Farbnachweis nur qualitativ und nicht quantitativ?

**Aussage:** Die Färbung zeigt nur, dass Eisen(III) vorhanden ist, nicht wie viel.

**Quantitativ:** Für die Menge braucht es eine Titration oder ein instrumentelles Verfahren (z. B. Photometrie).

**Nutzen:** Der qualitative Nachweis ist schnell und dient der ersten Identifikation.

*Bewertung: Die Antwort grenzt die qualitative Anwesenheitsaussage klar von einer Mengenbestimmung ab.*

# L-153 · Verlauf, Ablaufneigung und Trocknung — Prüfung

*Erscheinungsbild und Trocknungsverlauf nach dem Auftrag*

**Prüfungsteil 1** · A 7.1

Nach der Applikation entscheiden Verlauf, Ablaufneigung und Trocknungsverlauf über ein glattes, fehlerfreies Aussehen und die Weiterverarbeitbarkeit. Sie werden mit einfachen, praxisnahen Verfahren geprüft.

## Verlauf

Verlauf ist die Fähigkeit des noch flüssigen Films, Unebenheiten wie Pinselstriche oder Spritzstruktur selbsttätig auszugleichen. Geprüft wird z. B. mit einem Verlaufprüfrakel, das Streifen unterschiedlicher Nassschichtdicke nebeneinander zieht; man beurteilt, ab welcher Nassschichtdicke die Streifen zu einer glatten, geschlossenen Fläche zusammenfließen.

## Ablaufneigung

An senkrechten Flächen können Läufer, Gardinen und Nasen entstehen (Ablaufen, „sagging“). Ein Ablauf-Prüfrakel trägt Streifen zunehmender Dicke auf; die Platte wird senkrecht gestellt, und man liest ab, ab welcher Schichtdicke die Läufer auftreten. Guter Verlauf und geringe Ablaufneigung stellen häufig einen rheologischen Zielkonflikt dar — die Rheologie (Strukturviskosität/Thixotropie) muss beides ausbalancieren.

## Trockenzeit und Trockengrad

Der Trockengrad (DIN EN ISO 9117-5, abgewandeltes Bandow-Wolff-Verfahren) beschreibt Stufen von staubtrocken über grifffest bis durchgetrocknet. Ein Trockenzeit-Rekorder nach DIN EN ISO 9117-4 (halbkugelig abgerundete Nadeln, die ein langsam laufender Schlitten über feststehende Glasstreifen zieht) zeichnet den zeitlichen Verlauf der Trocknung auf und macht die einzelnen Stadien sichtbar.

## Trocknungsphasen mit typischen Zeiten (Normenreihe ISO 9117)

Die Normenreihe ISO 9117 beschreibt Prüfverfahren zum Trocknungsverhalten — u. a. ISO 9117-1 (Prüfung der Durchtrocknung), ISO 9117-3 (Prüfung der Oberflächentrocknung mit Glasperlen), ISO 9117-4 (Prüfung mit einem mechanischen Rekorder — das Trockenzeitrekorder-Verfahren) und ISO 9117-5 (abgewandeltes Bandow-Wolff-Verfahren). Für die Praxis lassen sich daraus vier Trocknungsstadien beschreiben:

Phase 1 — Staubtrocken (Glasperlen-Test nach ISO 9117-3: aufgestreute Glasperlen lassen sich rückstandsfrei abkehren; die Oberfläche wird nicht berührt): Alkydharzlack 30–60 min, 2K-PUR-Klarlack 15–30 min
Phase 2 — Klebfrei, oberflächentrocken (Papiertest: Papier haftet nicht): Alkydharzlack 2–4 h, 2K-PUR 45–90 min
Phase 3 — Durchgetrocknet (Daumendruck ohne Abdruck): Alkydharzlack 24 h, 2K-PUR 24–48 h
Phase 4 — Endfestigkeit (volle technische Eigenschaften): Alkydharzlack 3–7 Tage (Oxidationsvernetzung), 2K-PUR etwa 7 Tage (typischer Richtwert, rezeptur- und temperaturabhängig)

Die Trockengradstufe grifffest (handhabungsfest, siehe L-69) liegt zwischen Phase 2 und Phase 3: Das Teil lässt sich anfassen, wenden und stapeln, ohne Abdrücke, ist aber noch nicht durchgetrocknet.

Bedingungen: 23 °C / 50 % r. F. nach ISO 554. Abweichungen von Temperatur und Luftfeuchte beeinflussen alle Phasen — deshalb Prüfbedingungen dokumentieren.

### Nass-Schichtdicke

Die Nass-Schichtdicke wird direkt nach dem Auftrag mit einem Schichtdickenkamm (Zähne unterschiedlicher Länge) oder einem Messrad bestimmt; sie ist eine wichtige Einflussgröße für die spätere Trockenschichtdicke, die zusätzlich von Volumenfestkörper, Schrumpfung und Applikationsbedingungen abhängt. Als Faustformel gilt: Trockenschichtdicke TSD = Nassschichtdicke NSD · Volumenfestkörper VFK / 100 (ausführlich in L-154). So lässt sich frühzeitig steuern, bevor der Film antrocknet.

### Umwelt und Sicherheit

Beim Trocknen frei werdende Lösemitteldämpfe absaugen (Flammpunkt, Ex-Schutz beachten). Prüfrakel und Bleche lösemittelarm reinigen und Reste als Sonderabfall entsorgen.

**Merksatz**

Verlauf glättet, Ablaufneigung erzeugt Läufer — beides steht häufig im Zielkonflikt und wird über die Rheologie ausbalanciert. Trockengrad (DIN EN ISO 9117-5) = Stufen bis durchgetrocknet; Praxis-Phasenfolge (Prüfverfahren in der Reihe ISO 9117): staubtrocken → klebfrei → grifffest → durchgetrocknet → Endfestigkeit (Alkyd: 30–60 min / 2–4 h / 24 h / 3–7 d; 2K-PUR: 15–30 min / 45–90 min / 24–48 h / etwa 7 d); die Trockengradstufe grifffest liegt zwischen klebfrei und durchgetrocknet (siehe L-69). Nass-Schichtdicke mit Kamm/Rad steuern.

**Stichwörter:** Verlauf, Ablaufneigung, Läufer, sagging, Verlaufprüfrakel, Trockengrad, DIN EN ISO 9117-5, Trockenzeit-Rekorder, Nassschichtdicke, Schichtdickenkamm

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; DIN EN ISO 9117-5; ISO 554; ISO 9117-1; ISO 9117-3; ISO 9117-4*

---

## Übungsblatt Ü-153 — Musterlösungen

**Frage 1** (Verständnis, 8 Punkte)

Erklären Sie, warum Verlauf und Ablaufneigung gegenläufig sind und wie man beide ausbalanciert.

**Verlauf:** Ein niedrigviskoser, länger flüssiger Film gleicht Unebenheiten gut aus — guter Verlauf.
**Ablaufneigung:** Eine zu niedrige Standfestigkeit im Ruhezustand kann an senkrechten Flächen Läufer und Gardinen begünstigen.
**Zielkonflikt:** Guter Verlauf und geringe Ablaufneigung stellen gegensätzliche Anforderungen an die Viskosität.
**Lösung:** Strukturviskoses/thixotropes Verhalten: dünnflüssig unter Scherung (Verlauf), rasch wieder standfest in Ruhe (kein Ablaufen).
*Bewertung: Der Zielkonflikt wird über die Viskosität erklärt und die Thixotropie als Lösung erkannt.*

**Frage 2** (Berechnung, 8 Punkte)

Eine Trockenschichtdicke von 50 µm ist gefordert. Der Lack hat einen Volumenfestkörper von 45 %. Welche Nass-Schichtdicke müssen Sie auftragen?

**Ansatz:** TSD = NSD · VFK / 100 → NSD = TSD · 100 / VFK
**Rechnung:** NSD = 50 µm · 100 / 45 = 111,1 µm
**Antwortsatz:** Es sind rund 111 µm nass aufzutragen, um 50 µm trocken zu erreichen.
**Kontrolle:** Mit dem Schichtdickenkamm direkt nach dem Auftrag prüfen.
*Bewertung: Die Formel wird korrekt umgestellt und das Ergebnis praxisnah auf die Nassmessung bezogen.*

**Frage 3** (Anwendung, 6 Punkte)

Ein Decklack zeigt an senkrechten Flächen Läufer, auf waagerechten aber guten Verlauf. Wie prüfen und beheben Sie das?

**Prüfung:** Ablaufprüfung mit dem Prüfrakel: ab welcher Schichtdicke treten Läufer auf? Nass-Schichtdicke am Bauteil kontrollieren.
**Ursache:** Zu hohe Nassschichtdicke und/oder zu geringe Standfestigkeit (zu wenig Thixotropie).
**Abhilfe:** Schichtdicke reduzieren und/oder die Rheologie über Additive standfester einstellen.
*Bewertung: Die Antwort verbindet die passende Prüfung mit Ursache und konkreter Abhilfe.*

# L-154 · Schichtdickenmessung

*Nass, zerstörungsfrei trocken und zerstörend*

**Prüfungsteil 1** · A 7.1

Die Schichtdicke ist eine der wichtigsten Kenngrößen einer Beschichtung. Sie wird nass, trocken zerstörungsfrei oder zerstörend gemessen — je nach Untergrund mit unterschiedlichen Verfahren.

## Nass-Schichtdicke

Direkt nach dem Auftrag misst man die Nass-Schichtdicke mit einem Schichtdickenkamm oder einem Messrad. Das erlaubt, die spätere Trockenschichtdicke frühzeitig einzustellen und Nacharbeit zu vermeiden.

## Zerstörungsfreie Verfahren (trocken)

- magnetinduktiv — für nichtmagnetische Schichten auf Eisen/Stahl.
- Wirbelstrom — für nichtleitende Schichten auf Nichteisenmetallen (z. B. Aluminium).
- Beta-Rückstreuung und Röntgenfluoreszenz — strahlungsbasiert, auch für sehr dünne oder mehrlagige Systeme geeignet.

Diese zerstörungsfreien Verfahren arbeiten ohne mechanisches Beschädigen der Beschichtung — magnetinduktiv, Wirbelstrom und Beta-Rückstreuung berührend (Sonde bzw. Messblende wird aufgesetzt), Röntgenfluoreszenz üblicherweise berührungslos — und eignen sich für schnelle Serienkontrollen.

## Zerstörende Verfahren

Beim Keilschnitt (Paint Inspection Gauge) wird ein V-förmiger Schnitt bis zum Untergrund gelegt und unter dem Mikroskop vermessen. Beim Querschliff wird die Probe senkrecht angeschliffen und die Schicht lichtmikroskopisch ausgemessen. Beide Verfahren können eine direkte Beurteilung des Schichtaufbaus ermöglichen, zerstören dabei aber die Beschichtung; die Messunsicherheit hängt von Schnittqualität, Optik und Auswertung ab.

## Zusammenhang nass/trocken

```
Trockenschichtdicke aus Nassschichtdicke:   TSD = NSD · VFK / 100
   NSD = Nass-Schichtdicke [µm]
   VFK = Volumenfestkörper [%]

Umgestellt liefert das die nötige Nass-Schichtdicke für eine Ziel-Trockenschichtdicke.
```

## Umwelt und Sicherheit

Bei strahlungsbasierten Geräten (Beta, Röntgen) den Strahlenschutz und die Gerätevorschriften beachten. Prüfbleche und Schliffreste sachgerecht entsorgen; Reinigung lösemittelarm.

**Merksatz**

Nass: Kamm/Rad. Trocken zerstörungsfrei: magnetinduktiv (auf Stahl), Wirbelstrom (auf NE-Metall), Beta/Röntgen. Zerstörend: Keilschnitt, Querschliff. TSD = NSD · VFK / 100.

**Stichwörter:** Schichtdickenmessung, Nassschichtdicke, magnetinduktiv, Wirbelstrom, Beta-Rückstreuung, Röntgenfluoreszenz, Keilschnitt, Querschliff, Volumenfestkörper

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie*

## Übungsblatt Ü-154 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Welche Verfahren zur Trockenschichtdickenmessung kennen Sie und wofür eignen sie sich?

**magnetinduktiv:** Für nichtmagnetische Schichten auf Eisen/Stahl.
**Wirbelstrom:** Für nichtleitende Schichten auf Nichteisenmetallen (z. B. Aluminium).
**Beta/Röntgen:** Strahlungsbasiert, auch für sehr dünne oder mehrlagige Systeme.
**zerstörend:** Keilschnitt und Querschliff — zeigen den Schichtaufbau direkt, zerstören aber die Schicht; die Genauigkeit hängt von Schnittqualität und Auswertung ab (Querschliff genauer als Keilschnitt).
*Bewertung: Die Verfahren werden mit dem passenden Untergrund bzw. Einsatzzweck verknüpft.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**

Ein Lack mit einem Volumenfestkörper von 60 % wird mit 150 µm nass aufgetragen. Berechnen Sie die Trockenschichtdicke.

**Ansatz:** TSD = NSD · VFK / 100
**Rechnung:** TSD = 150 µm · 60 / 100 = 90 µm
**Antwortsatz:** Die Trockenschichtdicke beträgt 90 µm.
**Kontrolle:** Trocken zerstörungsfrei nachmessen (z. B. magnetinduktiv auf Stahl).
*Bewertung: Die Berechnung ist korrekt und wird um die passende zerstörungsfreie Kontrollmessung ergänzt.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**

Sie sollen die Trockenschichtdicke eines Pulverlacks auf einem Aluminiumprofil zerstörungsfrei messen. Welches Verfahren wählen Sie und warum?

**Untergrund:** Aluminium ist ein Nichteisenmetall und nicht magnetisch.
**Verfahren:** Das Wirbelstromverfahren, das für nichtleitende Schichten auf NE-Metallen ausgelegt ist.
**Nicht geeignet:** Das magnetinduktive Verfahren funktioniert nur auf Eisen/Stahl.
*Bewertung: Die Wahl wird korrekt aus den Eigenschaften des Untergrunds abgeleitet.*

# L-155 · Glanz, Haze und Oberflächen-Erscheinungsbild

*Reflektometer, Goniophotometer und Rauheit*

**Prüfungsteil 1** · A 7.1 · B 13

Glanz, Glanzschleier (Haze), Bildschärfe (DOI) und Struktur (Orangenhaut) beschreiben das Erscheinungsbild einer Oberfläche. Gemessen werden sie mit dafür geeigneten Verfahren — Glanz mit dem Reflektometer, Haze und DOI mit eigenen Messsystemen, Flop bzw. Winkelabhängigkeit goniospektrophotometrisch, die Feinrauheit über die Rauheitsmessung und die Welligkeit (Orangenhaut) über die Struktur- bzw. Welligkeitsmessung.

## Glanzmessung

Der Glanz wird mit dem Reflektometer nach DIN EN ISO 2813 unter festen Messwinkeln bestimmt: gemessen wird zuerst unter 60°; liegt der Wert über 70 GE, wechselt man auf 20° (bessere Auflösung im Hochglanzbereich), unter 10 GE auf 85° (Mattbereich). Angegeben wird der Wert in Glanzeinheiten (GE), bezogen auf einen Standard.

## Haze und Bildschärfe

Der Glanzschleier (Haze) ist ein milchiger Schleier nahe der Spiegelreflexion, der den Glanz „stumpf“ wirken lässt. Die Bildschärfe (DOI, distinctness of image) bewertet, wie scharf sich Objekte in der Oberfläche spiegeln. Orangenhaut („orange peel“) ist eine wellige Struktur, die den Verlauf stört.

## Metallic-Effekt und Flop

Bei Effektlacken misst ein Goniophotometer die Helligkeit unter mehreren Betrachtungswinkeln. Der Hell-Dunkel-Wechsel beim Kippen ist der Flop; er wird über einen Flop-Faktor beschrieben und ist für die Beurteilung von Metallic- und Perlglanzlacken wichtig.

## Rauheit

Die Oberflächenrauheit kann mit Tastschnitt- oder geeigneten optischen Verfahren erfasst werden; das Messverfahren muss zur Strukturgröße und Oberfläche passen. Gebräuchliche Kennwerte sind der arithmetische Mittenrauwert Ra und die gemittelte Rautiefe Rz. Feine Rauheit beeinflusst Glanz und Haptik. Ra und Rz erfassen nur diese Feinrauheit; die Welligkeit der Orangenhaut liegt im Millimeterbereich und wird mit Struktur- bzw. Welligkeitsmessgeräten beurteilt (Kennwerte Longwave und Shortwave); dieselben Geräte liefern häufig zusätzlich einen DOI-Wert.

## Mattierungsmittel und wie sie wirken

Hoher Glanz entsteht, wenn die Oberfläche glatt ist und das Licht gerichtet (spiegelnd) reflektiert. Mattierungsmittel erzeugen gezielt das Gegenteil: Es sind feinste Teilchen — meist gefällte oder pyrogene Kieselsäure, manchmal Wachse —, die eine mikroskopische Rauheit an der Filmoberfläche bilden. An dieser Rauheit wird das Licht diffus in viele Richtungen gestreut statt gerichtet reflektiert, und der Glanz sinkt. Eine höhere bzw. gröbere Mattierungsmittelkonzentration kann den Glanz reduzieren; der Effekt hängt außerdem von Partikelgröße, Brechungsindex, Oberflächenstruktur, Bindemittel und Schichtdicke ab und verläuft nicht zwangsläufig linear. Damit die Rauheit an der Oberfläche entsteht und nicht im Film versinkt, müssen Teilchengröße und Schichtdicke zusammenpassen.

## Umwelt und Sicherheit

Die optischen Messgeräte sind empfindlich — pfleglich behandeln und nur lösemittelarm reinigen. Prüfmuster sachgerecht lagern und entsorgen.

**Merksatz**

Glanz: Reflektometer 20°/60°/85° in GE. Haze = Schleier nahe der Spiegelung; DOI = Abbildungsschärfe; Orangenhaut = Welligkeit. Flop = Winkelabhängigkeit bei Metallic (Goniophotometer). Feinrauheit: Ra, Rz; Welligkeit und Orangenhaut: Struktur- bzw. Welligkeitsmessung.

## Übungsblatt Ü-155 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**
Welche Messwinkel nutzt das Reflektometer zur Glanzmessung und wann setzt man welchen ein?
**60°:** Universeller Messwinkel für mittlere Glanzgrade.
**20°:** Für hochglänzende Oberflächen — bessere Auflösung im oberen Glanzbereich.
**85°:** Für matte Oberflächen — bessere Auflösung im unteren Glanzbereich.
**Einheit:** Der Glanz wird in Glanzeinheiten (GE) gegen einen Standard angegeben.
*Bewertung: Die drei Winkel werden korrekt den Glanzbereichen zugeordnet und die Einheit genannt.*

**Frage 2** **(Anwendung, 8 Punkte)**
Ein Hochglanz-Decklack wirkt trotz hohem 20°-Glanzwert „stumpf“ und die Spiegelung ist unscharf. Wie erklären Sie das und was messen Sie zusätzlich?
**Haze:** Ein hoher Glanzschleier (Haze) legt sich als milchiger Schleier über die Spiegelung und lässt sie stumpf wirken.
**DOI:** Die unscharfe Spiegelung deutet auf eine geringe Bildschärfe (DOI) hin.
**Messung:** Zusätzlich Haze und DOI messen; ggf. Orangenhaut/Rauheit prüfen.
**Ursachen:** Feine Oberflächenstörungen, Verlauf oder Dispergierung prüfen.
*Bewertung: Die Antwort trennt Glanz von Haze und DOI und benennt die passenden Zusatzmessungen.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**
Warum genügt bei einem Metallic-Lack eine einzige Glanzmessung nicht?
**Winkelabhängigkeit:** Effektlacke ändern Helligkeit und Aussehen je nach Betrachtungswinkel.
**Flop:** Dieser Hell-Dunkel-Wechsel (Flop) wird erst durch Messung unter mehreren Winkeln erfasst.
**Gerät:** Dafür dient ein Goniophotometer; der Flop-Faktor beschreibt die Winkelabhängigkeit.
*Bewertung: Die Winkelabhängigkeit von Effektlacken und der Nutzen des Goniophotometers werden erkannt.*

# L-156 · Haftfestigkeit und Verformbarkeit — Prüfung

*Gitterschnitt, Stirnabzug, Tiefung und Dornbiegung*

**Prüfungsteil 1** · A 7.1

Haftung und Verformbarkeit entscheiden, ob eine Beschichtung hält und Verformungen des Untergrunds mitmacht. Standardtests sind Gitterschnitt, Stirnabzug, Tiefung und Dornbiegung.

## Haftfestigkeit

Beim Gitterschnitt (DIN EN ISO 2409) wird ein Gitter in die Schicht geschnitten; die Klassifizierung erfolgt in Gt-Klassen von Gt 0 (kein Abplatzen) bis Gt 5 (starkes Abplatzen), oft mit Klebeband abgezogen (Tesa-Abriss). Der Stirnabzug bzw. Abreißversuch (DIN EN ISO 4624, pull-off) klebt einen Prüfstempel auf und zieht ihn senkrecht ab; die Abreißkraft je Fläche ist ein Absolutwert.

## Wichtige Abgrenzung: Gitterschnitt ≠ Haftfestigkeit

Prüfungsfalle Nr. 1: Der Gitterschnitt (ISO 2409) liefert nur einen Haftwiderstandsindex (Gt 0–5), also eine Relativbewertung — keinen quantitativen Absolutwert der Haftfestigkeit in N/mm². Typische Spezifikationsgrenze: Gt ≤ 1 oder Gt ≤ 2. Wer eine Haftfestigkeit in N/mm² braucht, muss die Pull-off-Prüfung (ISO 4624) wählen: Abreißkraft [N] ÷ Stempelfläche [mm²] = Haftfestigkeit [N/mm²]. Typische Werte: Industrielack auf Stahl ≥ 5 N/mm²; Anforderung je nach Norm und Anwendung unterschiedlich.

## Verformbarkeit

Bei der Tiefung nach Erichsen (DIN EN ISO 1520) drückt ein Stempel das lackierte Blech von hinten durch, bis Riss oder Abplatzen auftritt. Beim Dornbiegetest (DIN EN ISO 1519) wird das Blech über einen Dorn gebogen; ein kleinerer Dorndurchmesser bedeutet eine stärkere Biegebeanspruchung und damit eine strengere Prüfung.

## Schnelle Stoßverformung

Die Steinschlagprüfung (z. B. Multischlag mit Stahlschrot) schießt harte Körper auf die lackierte Fläche; beurteilt wird das Schadensbild. Diese schnelle Stoßbelastung ist besonders für Automobillacke praxisrelevant und ergänzt die langsame Verformungsprüfung.

## Aussagekraft

Haftung und Verformbarkeit sind unterschiedliche Eigenschaften und sollten getrennt geprüft werden; ein einzelner Test genügt selten. Untergrund, Schichtdicke und Vernetzungsgrad beeinflussen das Ergebnis stark — daher mehrere Verfahren kombinieren und unter definierten Bedingungen prüfen.

## Umwelt und Sicherheit

Bei Steinschlag- und Stoßprüfungen Splitter- und Augenschutz tragen. Klebstoff- und Prüfmittelreste sowie beschichtete Prüfbleche sachgerecht entsorgen.

**Merksatz**

Haftung: Gitterschnitt Gt 0–5 (DIN EN ISO 2409), Stirnabzug/pull-off = Absolutwert. Verformung: Tiefung (Erichsen), Dornbiegung. Steinschlag = schnelle Stoßbelastung. Mehrere Tests kombinieren.

**Stichwörter:** Haftfestigkeit, Gitterschnitt, Tesa-Abriss, Stirnabzug, pull-off, Tiefung, Erichsen, Dornbiegetest, Steinschlag, Verformbarkeit

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; DIN EN ISO 2409; DIN EN ISO 1519; DIN EN ISO 1520; DIN EN ISO 4624*

## Übungsblatt Ü-156 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Beschreiben Sie den Gitterschnitt und den Stirnabzug zur Haftungsprüfung.

**Gitterschnitt:** Ein Gitter wird in die Schicht geschnitten; Klassifizierung in Gt-Klassen von Gt 0 (kein Abplatzen) bis Gt 5 (starkes Abplatzen), oft mit Klebeband abgezogen.

**Stirnabzug:** Ein Prüfstempel wird aufgeklebt und senkrecht abgezogen; die Abreißkraft je Fläche ist ein Absolutwert (pull-off).

**Unterschied:** Der Gitterschnitt liefert eine Kennzahl-Skala, der Stirnabzug einen quantitativen Spannungswert.

**Norm:** Gitterschnitt nach DIN EN ISO 2409, Stirnabzug nach DIN EN ISO 4624.

*Bewertung: Beide Verfahren werden korrekt beschrieben und als qualitativ bzw. quantitativ unterschieden.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**

Beim Stirnabzug reißt ein Prüfstempel mit 20 mm Durchmesser bei einer Kraft von 450 N ab. Berechnen Sie die Abreißspannung (Haftfestigkeit) in MPa.

**Fläche:** $A = \pi/4 \cdot d^2 = \pi/4 \cdot (0{,}020\ \text{m})^2 = 3{,}14 \cdot 10^{-4}\ \text{m}^2$

**Ansatz:** $\sigma = F / A$

**Rechnung:** $\sigma = 450\ \text{N} / 3{,}14 \cdot 10^{-4}\ \text{m}^2 = 1{,}43 \cdot 10^{6}\ \text{Pa}$

**Umrechnung:** $1{,}43 \cdot 10^{6}\ \text{Pa} = 1{,}43\ \text{MPa}$

**Antwortsatz:** Die rechnerische Spannung beträgt bei 20 mm Stempeldurchmesser und 450 N etwa 1,43 MPa (= 1,43 N/mm²) — gemessen an den typischen Werten für Industrielacke auf Stahl (≥ 5 N/mm²) ist das wenig; die Anforderung ist allerdings je nach Norm und Anwendung unterschiedlich, und das Bruchbild (adhäsiv, kohäsiv oder Klebstoffbruch) ist zusätzlich zu bewerten.

*Bewertung: Die Stempelfläche wird korrekt berechnet und die Spannung sauber in MPa umgerechnet.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**

Ein Autolack soll auf Verformbarkeit und Steinschlagfestigkeit geprüft werden. Welche Tests wählen Sie und warum kombinieren Sie sie?

**Verformbarkeit:** Tiefung nach Erichsen und/oder Dornbiegetest — langsame Verformung.

**Steinschlag:** Multischlag-/Steinschlagprüfung — schnelle Stoßbelastung, praxisnah für Fahrzeuge.

**Kombination:** Langsame und schnelle Beanspruchung wirken unterschiedlich; erst zusammen ergibt sich ein vollständiges Bild.

*Bewertung: Die Auswahl passt zur Beanspruchung und die Kombination langsam/schnell wird begründet.*

# L-157 · Härte- und Abriebprüfung von Lackfilmen

*Pendeldämpfung, Ritz-/Eindringhärte und Scheuerprüfung*

**Prüfungsteil 1** · A 7.1

Die Härte eines Lackfilms wird über Pendeldämpfung, Ritz- und Bleistifthärte sowie Eindringhärte geprüft; die Abriebfestigkeit über Scheuer- und Sandstrahltests.

## Pendeldämpfung

Die Pendelhärte (nach König oder Persoz, DIN EN ISO 1522) misst, wie schnell ein auf dem Film aufliegendes Pendel ausschwingt: Bei der Pendeldämpfung entspricht eine geringere Dämpfung im gewählten Prüfaufbau typischerweise einer höheren Filmhärte. Angegeben wird die Zahl der Schwingungen oder die Zeit. Die Messgröße ist stark von Untergrund, Schichtdicke und Prüfbedingungen abhängig; „je härter“ darf nicht als universelle Materialrelation gelesen werden.

## König-Pendel vs. Persoz-Pendel — nicht austauschbar

Prüfungsfalle Nr. 2: Die Werte sind NICHT austauschbar — König und Persoz sind verschiedene Prüfgeräte mit unterschiedlichem Prüfaufbau:

König-Pendel: Pendelmasse 200 g, zwei Auflagekugeln von 5 mm Durchmesser, Startausschlag 6°, Grenzausschlag 3° (beidseitig), Prüfzeit = Sekunden bis auf 3° abgeschwungen. Typische Werte: physikalisch trocknender Klarlack ~80–120 s, vollständig ausgehärteter 2K-PUR-Klarlack ~150–200 s, Einbrennlack ~180–200 s; zum Vergleich ergibt die polierte Glasplatte als Kalibrierreferenz 250 s, was Lackfilme praktisch nicht erreichen.

Persoz-Pendel: Pendelmasse 500 g, zwei Auflagekugeln von 8 mm Durchmesser, Startausschlag 12°, Grenzausschlag 4° (beidseitig), Prüfzeit = Sekunden bis auf 4° abgeschwungen. Zum Vergleich ergibt die polierte Glasplatte hier rund 420–430 s — die Werte liegen also systematisch anders als die König-Werte und lassen sich nicht ineinander umrechnen.

Temperaturempfindlichkeit: Die Pendeldämpfung hängt stark von der Temperatur ab, besonders nahe der Glasübergangstemperatur des Films. Deshalb Prüfraum eng temperieren: Für Beschichtungsstoffe gilt das Prüfklima (23 ± 2) °C und (50 ± 5) % relative Luftfeuchte nach DIN EN 23270 (ISO 3270). Temperatur und Luftfeuchte gehören zu jeder Pendelhärteangabe dazu.

In Spezifikationen immer angeben: König oder Persoz — der bloße Wert „150 s“ ohne Geräteangabe ist bedeutungslos.

## Ritz- und Bleistifthärte

Bei der Ritzhärte wird die Kraft bestimmt, ab der ein Stichel die Schicht durchschneidet. Bei der Bleistifthärte prüft man, mit welchem Bleistiftgrad (von weich B bis hart H bzw. 9H) die Schicht ohne bleibenden Ritz widersteht — eine einfache, vergleichende Prüfung des Widerstands gegen Ritzen bzw. Oberflächenverformung, kein allgemeines quantitatives Härtemaß und nicht mit mechanischer Härte gleichzusetzen.

## Eindringhärte

Die Buchholz-Härte (DIN EN ISO 2815) wertet die Länge eines Eindrucks aus. Die Mikro-/Universalhärte (Verfahren nach Fischer, DIN EN ISO 14577) erfasst Kraft und Eindringtiefe gleichzeitig und liefert so den elastischen und plastischen Anteil. Klassisch sind auch Knoop und Vickers.

## Abriebprüfung

Beim Scheuertest (z. B. Taber-Abraser) drehen Reibräder unter Last über die Schicht; gemessen wird der Masseverlust. Beim Sandstrahlabrieb bestimmt man die Sandmenge, die bis zum Durchrieb (Freiliegen des Untergrunds) auf die Schicht rieselt. Beide kennzeichnen die Verschleißfestigkeit.

### Umwelt und Sicherheit

Beim Abrieb entstehende Stäube absaugen und nicht einatmen. Prüfreste und abgeschliffenes Material sachgerecht entsorgen.

**Merksatz**

Pendeldämpfung: König (200 g, 5-mm-Kugeln, 6°→3°) und Persoz (500 g, 8-mm-Kugeln, 12°→4°) sind NICHT austauschbar — immer Gerät angeben. Typisch König: physikalisch trocknender Klarlack ~80–120 s, ausgehärteter 2K-PUR ~150–200 s. Bleistift-/Ritzhärte = einfache Betriebsprüfung. Universalhärte (Fischer) = elastisch + plastisch. Abrieb: Taber (Masseverlust), Sandstrahl (bis Durchrieb).

**Stichwörter:** Pendelhärte, König, Persoz, Ritzhärte, Bleistifthärte, Buchholz, Universalhärte, Knoop, Vickers, Taber-Abraser, Abriebfestigkeit

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; DIN EN ISO 1522; DIN EN ISO 14577; DIN EN ISO 2815; DIN EN 23270 (ISO 3270)*

## Übungsblatt Ü-157 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Wie funktioniert die Pendeldämpfung und was bedeutet ein längeres Ausschwingen?

**Prinzip:** Ein Pendel liegt auf dem Lackfilm auf; man misst, wie schnell seine Schwingung abklingt (Dämpfung).
**Aussage:** Je härter der Film, desto geringer die Dämpfung — das Pendel schwingt länger.
**Angabe:** In Schwingungen oder Sekunden (König bzw. Persoz, DIN EN ISO 1522).
**Einschränkung:** Das Ergebnis hängt stark von Untergrund und Schichtdicke ab.
*Bewertung: Prinzip und Deutung (länger = härter) sind korrekt, samt Einschränkung.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**

Bei der Buchholz-Prüfung wird eine Eindrucklänge von 1,25 mm gemessen. Die Buchholz-Härte ist als 100 geteilt durch die Eindrucklänge (in mm) definiert. Berechnen Sie den Wert.

**Ansatz:** Buchholz-Härte = 100 / Eindrucklänge [mm]
**Rechnung:** Buchholz-Härte = 100 / 1,25 = 80
**Antwortsatz:** Die Buchholz-Härte beträgt 80.
**Deutung:** Ein kürzerer Eindruck (härtere Schicht) ergibt einen höheren Wert.
*Bewertung: Die Definition wird korrekt angewandt und der Zusammenhang kurzer Eindruck = höhere Härte erkannt.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**

Zwei Klarlacke haben dieselbe Pendelhärte, verhalten sich beim Steinschlag aber sehr unterschiedlich. Wie kann das sein und wie prüfen Sie genauer?

**Erklärung:** Die Pendelhärte erfasst nur einen Aspekt; ein harter Film kann spröde sein und bei Schlag schlechter abschneiden.
**Zusatzprüfung:** Mikro-/Universalhärte (Fischer) trennt elastischen und plastischen Anteil; dazu Steinschlag- und Verformungsprüfung (Steinschlagprüfung siehe L-156).
**Schluss:** Härte allein sagt nichts über Elastizität/Zähigkeit — mehrere Kennwerte betrachten.
*Bewertung: Die Antwort erkennt, dass Härte und Zähigkeit verschiedene Eigenschaften sind, und wählt passende Zusatztests.*

# L-158 · Licht- und Wetterbeständigkeit — Prüfung

*Freibewitterung, Kurzbewitterung und Lichtechtheit*

**Prüfungsteil 1** · A 7.1

Die Beständigkeit gegen Licht und Wetter wird durch Freibewitterung, beschleunigte Geräteprüfungen (Xenon, UV) und Lichtechtheitsprüfung untersucht — bewertet über Glanz, Farbe, Kreidung und Rissbildung.

## Freibewitterung (natürlich)

Prüfmuster werden im Freien ausgelagert — an definierten Standorten wie Florida (feucht-heiß) oder Arizona (trocken, UV-stark); auch mitteleuropäische Auslagerungen, etwa in Industrie- oder Meeresklima, sind üblich. Das ist realitätsnah, aber langwierig (oft mehrere Jahre). Geregelt in DIN EN ISO 2810. Beurteilt werden Glanz- und Farbänderung, Kreidung sowie Riss- und Blasenbildung.

Damit Ergebnisse überhaupt vergleichbar sind, gehören die Randbedingungen in den Prüfbericht: Standort, Neigungswinkel und Ausrichtung des Bewitterungsstands, Auslagerungszeitraum, die aufgenommene Strahlungsdosis sowie die Temperatur der Prüffläche. Zwei Muster desselben Lacks an verschiedenen Standorten oder in verschiedenen Winkeln liefern verschiedene Ergebnisse — die Zahl allein sagt ohne diese Angaben nichts.

Mitausgelagert wird immer ein Referenzsystem mit bekanntem Verhalten, und ein unbelastetes Rückstellmuster bleibt im Dunkeln. Erst der Vergleich gegen beide macht aus einer Veränderung ein Ergebnis. Farbänderung und Vergilbung werden dabei nicht geschätzt, sondern als ΔE bzw. als Vergilbungszahl gemessen (siehe L-163, L-166).

## Kurzbewitterung (Geräte)

Geräte raffen die Belastung zeitlich (DIN EN ISO 16474): Xenon-Bogenlampen können das solare Spektrum im relevanten Bereich vergleichsweise gut simulieren (Teil 2), fluoreszierende UV-Lampen (QUV) sind preiswerter und UV-betont (Teil 3; die Lampe UVA-340 bildet das Sonnenlicht nach, UVB-313 erzeugt eine spektral deutlich härtere UV-Belastung als natürliches Sonnenlicht); Filterung und Prüfzyklus bestimmen die tatsächliche spektrale Belastung. Bestrahlung, Feuchte und Temperatur wechseln in Zyklen. Weil beschleunigte Prüfungen nie exakt der Natur entsprechen, muss die Korrelation zur Freibewitterung stets geprüft werden (Teil 1). Das Verhältnis von Freibewitterungszeit zu Geräteprüfzeit heißt Raffungsfaktor — er gilt immer nur für das System, für das die Korrelation belegt wurde.

## Kreidung und Lichtechtheit

Kreidung ist eine pulverförmige, abwischbare Oberflächenerscheinung: UV-Strahlung baut das Bindemittel an der Oberfläche ab und legt Pigmente und Füllstoffe frei. Die Lichtechtheit (Farbtonstabilität unter Licht) wird gegen die Blauwollskala beurteilt — acht Wollstreifen abgestufter Lichtempfindlichkeit als Vergleich.

## Bewertung der Schäden

Die sichtbaren Veränderungen werden nach DIN EN ISO 4628 in Kennzahlen aus Menge und Größe eingeteilt: Blasengrad (Teil 2), Rostgrad (Teil 3), Rissgrad (Teil 4) und Abblätterungsgrad (Teil 5); für die Kreidung gibt es eigene Verfahren (Teil 6 und 7). So werden Bewitterungsergebnisse vergleichbar und dokumentierbar.

## Umwelt und Sicherheit

Xenon- und UV-Lampen strahlen intensiv im UV — nie ungeschützt hineinsehen, die Geräte nur geschlossen betreiben. Bewitterte Prüfmuster sind Beschichtungsabfall und fachgerecht zu entsorgen.

**Merksatz**

Freibewitterung (Florida/Arizona, ISO 2810) = realitätsnah, aber langsam; Kurzbewitterung (Xenon/QUV/Weather-O-Meter, ISO 16474) = gerafft, Korrelation prüfen. Schäden werden nach ISO 4628 in Blasen-, Rost-, Riss- und Abblätterungsgrade eingeteilt; die Farbänderung als ΔE.

**Stichwörter:** Freibewitterung, Kurzbewitterung, Xenontest, QUV, Weather-O-Meter, Kreidung, Lichtechtheit, Blauwollskala, DIN EN ISO 16474, DIN EN ISO 2810, DIN EN ISO 4628, Bewitterungsstand, Strahlungsdosis, Rückstellmuster

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; DIN EN ISO 16474; DIN EN ISO 2810; DIN EN ISO 4628*

## Übungsblatt Ü-158 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Worin unterscheiden sich Freibewitterung und Kurzbewitterung, und worauf ist bei der Kurzbewitterung zu achten?

**Freibewitterung:** Auslagern im Freien (z. B. Florida, Arizona) — realitätsnah, aber langwierig.
**Kurzbewitterung:** Geräte (Xenon, QUV, Weather-O-Meter) raffen Bestrahlung, Feuchte und Temperatur zeitlich.
**Achtung:** Die Korrelation der beschleunigten Ergebnisse zur Freibewitterung muss geprüft/validiert werden.
**Beurteilung:** Glanz-/Farbänderung, Kreidung, Riss- und Blasenbildung bewerten.
*Bewertung: Der Unterschied und die notwendige Korrelationsprüfung werden klar benannt.*

**Frage 2** **(Verständnis, 6 Punkte)**

Nach welchem System werden die sichtbaren Schäden einer bewitterten Beschichtung bewertet, und wie wird die Farbänderung erfasst?

**Schadensbilder:** Nach DIN EN ISO 4628 in Kennzahlen aus Menge und Größe: Blasengrad (Teil 2), Rostgrad (Teil 3), Rissgrad (Teil 4), Abblätterungsgrad (Teil 5).
**Kreidung:** Kreidung wird nach eigenen Verfahren (DIN EN ISO 4628 Teil 6 und 7) beurteilt.
**Farbänderung:** Als Farbabstand ΔE gegenüber dem Ausgangszustand (CIELAB, siehe L-163); die Lichtechtheit zusätzlich gegen die Blauwollskala.
*Bewertung: Die Bewertung nach ISO 4628 sowie die ΔE- und Blauwollskala-Beurteilung werden korrekt zugeordnet.*

**Frage 3** **(Berechnung, 8 Punkte)**

Für ein bestimmtes Lacksystem wurde durch belegte Korrelation ermittelt: Eine Kurzbewitterung von 1000 h entspricht dort etwa 3 Jahren Freibewitterung. Berechnen Sie den Raffungsfaktor (1 Jahr = 8760 h) und beurteilen Sie, unter welcher Voraussetzung sich dieser Wert übertragen lässt.

**Freibewitterungszeit:** 3 Jahre = 3 · 8760 h = 26 280 h
**Ansatz:** Raffungsfaktor = Freibewitterungszeit / Prüfzeit
**Rechnung:** Raffungsfaktor = 26 280 h / 1000 h ≈ 26
**Beurteilung:** Die Prüfung ist rund 26-mal schneller; der Faktor gilt aber nur, wenn die Korrelation für dieses Lacksystem belegt ist.
*Bewertung: Der Raffungsfaktor wird korrekt berechnet und mit dem wichtigen Korrelationsvorbehalt eingeordnet.*

# L-159 · Korrosionsprüfung

*Salzsprühnebel, Kondenswasser, zyklische und $SO_2$-Tests*

**Prüfungsteil 1** · A 7.1

Der Korrosionsschutz beschichteter Metalle wird in künstlichen Atmosphären geprüft — Salzsprühnebel, Kondenswasser, zyklische Wechseltests und $SO_2$ — und über Unterrostung, Blasen und die Unterwanderung am Ritz bewertet.

## Salzsprühnebelprüfung

Nach DIN EN ISO 9227 werden die Prüfbleche in einer Kammer mit feinem Nebel aus Kochsalzlösung bei erhöhter Temperatur dauerbeansprucht. Drei Varianten: NSS (neutral), AASS (essigsauer) und CASS (kupferbeschleunigt essigsauer — die aggressivste Variante des Salzsprühnebels; die Aussagekraft hängt von Werkstoff und System ab). Geprüft wird meist an einem eingeritzten Blech; bewertet werden die Unterrostung am Ritz und die Blasenbildung in der Fläche. Der Dauer-Salzsprühnebel ist ein reiner Zeitraffer und korreliert nur begrenzt mit der Praxis.

## Kondenswasser- und $SO_2$-Prüfung

Die Kondenswasserprüfung (DIN EN ISO 6270) beansprucht die Muster in Konstant- oder Wechselklima mit hoher Feuchte und kann insbesondere Feuchteempfindlichkeit, Blasenbildung und Haftungsverlust sichtbar machen. Der Kesternich-Test setzt sie einer feuchten, $SO_2$-haltigen Atmosphäre aus und bildet Industrieluft und sauren Regen nach — heute DIN EN ISO 22479 (früher DIN 50018), in Zyklen zu je 24 Stunden.

## Zyklische Wechseltests

Zyklische Prüfungen kombinieren Salz, Feuchte und Trocknung (oft mit UV) im Wechsel und können bestimmte reale Belastungswechsel praxisnäher abbilden als kontinuierlicher Salzsprühnebel; die Aussagekraft ist anwendungsspezifisch. Grundnorm ist DIN EN ISO 11997-1; im Automobilbau gilt VDA 233-102 mit einem siebentägigen Prüfzyklus. Beide sind unterschiedliche zyklische Prüfprogramme — die Auswahl richtet sich nach Spezifikation und Anwendungsbereich.

## Bewertung der Proben

Wie bei der Bewitterung erfolgt die Auswertung nach DIN EN ISO 4628: Blasengrad (Teil 2), Rostgrad (Teil 3), Rissgrad (Teil 4) und Abblätterungsgrad (Teil 5), jeweils aus Menge und Größe. Zusätzlich wird die Unterwanderung — Enthaftung und Rost am Ritz — gemessen. Diese Prüfungen sind die Grundlage, mit der ein Beschichtungssystem für eine Korrosivitätskategorie und Schutzdauer qualifiziert wird (DIN EN ISO 12944-6 bzw. -9, siehe L-99).

## Umwelt und Sicherheit

Salznebel und vor allem $SO_2$ sind gesundheits- und umweltrelevant — nur in geschlossenen Prüfkammern mit Absaugung arbeiten. Prüflösungen und beschichtete Bleche fachgerecht entsorgen.

**Merksatz**

Salzsprühnebel (ISO 9227, NSS/AASS/CASS) am geritzten Blech, Kondenswasser (ISO 6270) und Kesternich/$SO_2$ (ISO 22479) prüfen einzelne Belastungen; zyklische Tests (ISO 11997, VDA 233-102) können bestimmte reale Belastungswechsel praxisnäher abbilden — die Aussagekraft ist anwendungsspezifisch. Bewertung nach ISO 4628 plus Ritzunterwanderung — Basis der Systemqualifikation nach ISO 12944.

**Stichwörter:** Salzsprühnebeltest, NSS, AASS, CASS, Kondenswasser, Kesternich, $SO_2$-Test, zyklische Korrosionsprüfung, VDA 233-102, Ritzunterwanderung, DIN EN ISO 9227, DIN EN ISO 4628

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; DIN EN ISO 9227; DIN EN ISO 6270; DIN EN ISO 11997; DIN EN ISO 22479; DIN EN ISO 4628; DIN EN ISO 12944-6*

## Übungsblatt Ü-159 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**
Warum korreliert der Dauer-Salzsprühnebeltest nur begrenzt mit der Praxis, und was bilden zyklische Tests besser ab?

**Salzsprühnebel:** Der Salzsprühnebeltest (DIN EN ISO 9227) belastet die Bleche dauerhaft und gleichförmig mit Salznebel — eine Belastung, die so in der Natur kaum auftritt.
**Praxis:** In der Praxis wechseln Nässe, Trocknung, Temperatur, UV und Salz ständig; der Wechsel zwischen Feuchte und Trocknung kann bei vielen Beschichtungssystemen relevante Schadensmechanismen beeinflussen — die Bedeutung ist system- und umgebungsabhängig.
**Zyklische Tests:** Zyklische Prüfungen (DIN EN ISO 11997-1, VDA 233-102) kombinieren diese Phasen im Wechsel und können reale Belastungswechsel praxisnäher abbilden; die Aussagekraft ist anwendungsspezifisch.
**Folge:** Ein System kann im Dauersprühnebel gut abschneiden und im Zyklustest dennoch versagen — deshalb schreiben viele Spezifikationen zyklische Prüfungen vor.
*Bewertung: Der Unterschied Dauer- gegen Wechselbelastung und die bessere Praxisnähe zyklischer Tests werden klar benannt.*

**Frage 2** **(Verständnis, 6 Punkte)**
Ordnen Sie die Korrosionsprüfungen der jeweils simulierten Belastung zu.

**Salznebel / Meeresatmosphäre:** Salzsprühnebeltest (DIN EN ISO 9227).
**Feuchte / Kondensation:** Kondenswasser-Klimatest (DIN EN ISO 6270).
**Industrieluft / saurer Regen:** Kesternich-Test mit $SO_2$ (DIN EN ISO 22479).
**Reale Wetterfolge:** Zyklischer Wechseltest (DIN EN ISO 11997-1, VDA 233-102).
*Bewertung: Jede Prüfung wird der passenden Belastung korrekt zugeordnet.*

**Frage 3** **(Anwendung, 8 Punkte)**
Ein Korrosionsschutzsystem für ein Küstenbauwerk (Kategorie C5) soll geprüft und für eine hohe Schutzdauer qualifiziert werden. Welche Prüfungen und welche Bewertung setzen Sie ein?

**Salzsprühnebel:** Salzsprühnebeltest (DIN EN ISO 9227, meist NSS) an geritzten Blechen — Unterrostung am Ritz und Blasenbildung.
**Zyklisch:** Zyklischer Wechseltest (DIN EN ISO 11997-1) mit Salz, Feuchte und Trocknung — praxisnäher als reiner Dauersprühnebel.
**Kondenswasser:** Kondenswasser-Klimatest (DIN EN ISO 6270) zur Feuchtebeanspruchung.
**Bewertung/Qualifikation:** Auswertung nach DIN EN ISO 4628 plus Ritzunterwanderung; die Qualifikation für C5 und hohe Schutzdauer erfolgt nach DIN EN ISO 12944-6 (siehe L-99).
*Bewertung: Die Auswahl passt zur Küsten- und C5-Beanspruchung, kombiniert Dauer- mit Wechselbelastung und nennt die Qualifikation nach ISO 12944.*

# L-160 · Vernetzungsverfolgung und thermische Analyse

*Topf-/Gelzeit, DSC/DTA, TMA und IR*

**Prüfungsteil 1** · A 7.1

Der Fortschritt der Vernetzung (Härtung) wird über Topf- und Gelzeit, thermische Analyse (DSC/DTA/TMA) und spektroskopische Verfolgung (IR) gemessen; auch die Pendeldämpfung dient als Vernetzungsmaß.

## Topfzeit und Gelzeit

Bei 2K-Systemen ist die Topfzeit die Verarbeitungszeit nach dem Mischen von Stamm- und Härterkomponente — als Kriterium dient meist ein bestimmter Viskositätsanstieg. Die Gelzeit ist die Zeit bis zum Gelieren, bei Pulver- und Reaktivsystemen bei definierter Temperatur gemessen. Topfzeit und Gelzeit liefern unterschiedliche, temperatur- und methodenabhängige Informationen zur Reaktivität bzw. zum Fortschritt der Vernetzung.

## Thermische Analyse

- DSC (Differential Scanning Calorimetry) — misst Wärmeströme und kann Reaktionswärmen sowie Übergänge wie die Glasübergangstemperatur (Tg) erfassen. Aus der Restenthalpie einer teilgehärteten Probe folgt der Aushärtegrad = $(\Delta H_0 - \Delta H(\text{Rest})) / \Delta H_0 \cdot 100\ \%$; die Auswertung von Tg als Vernetzungskennwert erfordert geeignete Messbedingungen und Vergleichswerte.
- DTA (Differenzthermoanalyse) — vergleicht die Probe mit einer Referenz.
- TMA (thermomechanische Analyse) — Ausdehnung und Erweichung über der Temperatur; die dynamische TMA erfasst das viskoelastische Verhalten.

## Spektroskopie und weitere Verfahren

Die IR-Spektroskopie verfolgt das Verschwinden reaktiver Gruppen (z. B. der NCO-Bande bei Polyurethanen) und zeigt so den Umsatz. Auch Dielektrizitäts-/Permittivitätsmessungen und die Pendeldämpfung eignen sich als Maß für den fortschreitenden Vernetzungsgrad.

## Bedeutung

Der Vernetzungsgrad beeinflusst Härte, Elastizität und viele Beständigkeitseigenschaften; zugleich wirken Polymerstruktur, Pigmentierung, Additive, Schichtaufbau und Alterung mit. Über- oder Untervernetzung — etwa durch ein falsches Härter-Verhältnis oder falsche Einbrennbedingungen — erkennt man an abweichenden Kennwerten (Härte, Beständigkeit, Tg).

## Umwelt und Sicherheit

Isocyanate (NCO) sind atemwegssensibilisierend — Atemschutz, Absaugung und Arbeitsplatzgrenzwerte beachten. Beim Einbrennen entstehende Abgase absaugen und behandeln.

**Merksatz**

Topfzeit = Verarbeitungszeit (2K); Gelzeit = bis zum Gelieren. DSC = Reaktion + Tg; TMA = Erweichung; IR = Umsatz (NCO-Bande). Vernetzungsgrad steuert Härte und Beständigkeit.

**Stichwörter:** Vernetzung, Topfzeit, Gelzeit, DSC, Glasübergangstemperatur, DTA, TMA, IR-Spektroskopie, Vernetzungsgrad

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie*

## Übungsblatt Ü-160 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Mit welchen Verfahren verfolgen Sie den Vernetzungsfortschritt eines Lacks?

**Topf-/Gelzeit:** Kennzeichnen die Reaktivität — Verarbeitungszeit (2K) bzw. Zeit bis zum Gelieren.
**DSC:** Kann Reaktionswärmen (Härtungsreaktion) und die Glasübergangstemperatur Tg erfassen; Auswertung und Probenzustand sind für die Interpretation entscheidend.
**TMA:** Zeigt Erweichung und viskoelastisches Verhalten über der Temperatur.
**IR-Spektroskopie:** Verfolgt den Umsatz reaktiver Gruppen (z. B. NCO-Bande).
**Pendeldämpfung:** Steigt der Härteverlauf über der Zeit an und läuft dann in ein Plateau, ist die Vernetzung weitgehend abgeschlossen — einfaches Verfahren ohne Spezialgerät (L-157).
**Dielektrizitätsmessung:** Verfolgt die Beweglichkeit der Ladungsträger im aushärtenden Film und damit indirekt den Vernetzungsfortschritt.
*Bewertung: Mehrere Verfahren werden korrekt mit ihrer jeweiligen Aussage verknüpft.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**

Ein völlig unvernetztes Harz zeigt in der DSC eine Reaktionsenthalpie von 250 J/g. Eine teilgehärtete Probe zeigt noch 25 J/g Restenthalpie. Berechnen Sie den Aushärtegrad.

**Ansatz:** Aushärtegrad = ($\Delta H_0 - \Delta H_Rest$) / $\Delta H_0 \cdot 100$ %
**Rechnung:** = (250 J/g − 25 J/g) / 250 J/g · 100 % = 225 / 250 · 100 % = 90,0 %
**Antwortsatz:** Der Aushärtegrad beträgt 90 %.
**Deutung:** 10 % der Reaktionsenthalpie sind noch offen — die Probe ist nahezu, aber nicht vollständig ausgehärtet.
*Bewertung: Das DSC-Prinzip (Restenthalpie = noch nicht umgesetzte Reaktion) wird korrekt in einen Aushärtegrad umgesetzt.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**

Ein 2K-PUR-Klarlack bleibt nach dem Einbrennen zu weich. Wie grenzen Sie die Ursache ein?

**Vernetzungsgrad:** Zu weich deutet auf Untervernetzung hin.
**Prüfung:** DSC (Restenthalpie/Tg) und IR (verbliebene NCO-Bande) zeigen, ob die Reaktion unvollständig ist.
**Ursachen:** Falsches Härter-Verhältnis, zu niedrige Einbrenntemperatur/-zeit oder Feuchteeinfluss prüfen und korrigieren.
*Bewertung: Die Antwort erkennt Untervernetzung, wählt passende Prüfungen und nennt plausible Ursachen.*

# L-161 · Lack- und Lackierschäden

*Schadensbilder, Ursachensuche und Analyseverfahren*

**Prüfungsteil 1** · A 7.1

Lack- und Lackierschäden werden systematisch nach Erscheinungsbild und Ursache analysiert. Moderne mikroskopische und spektroskopische Verfahren helfen bei der Ursachensuche.

## Schadensbilder und Ursachen

Typische Schäden sind Benetzungsstörungen (Krater), Kocher/Blasen, Läufer und Runzeln, Schleifriefen, Farbtonabweichung sowie Stippen (Agglomerate, Gelteilchen) und Schmutz- bzw. Staubeinschlüsse. Mögliche Ursachen sind z. B. zu hohe Oberflächenspannung, zu nasses Lackieren oder eine unsaubere Spritzpistole.

## Systematische Ursachensuche

Zunächst das Schadensbild genau beschreiben, dann mögliche Ursachen eingrenzen (Material, Untergrund, Applikation, Umgebungsbedingungen) und Prozessdaten, Referenzmuster sowie die Verarbeitungshistorie einbeziehen. Oft ist es schwer, eindeutig zuzuordnen, ob Hersteller oder Verarbeiter die Verantwortung trägt.

## Analyseverfahren

- Auflichtmikroskopie und Querschliff — Schichtaufbau, Schichtdicken, Einschlüsse.
- FTIR-Mikroskopie — kann chemische Informationen gezielt aus mikroskopischen Bereichen bzw. Fehlstellen liefern (identifiziert nicht zwangsläufig jede unbekannte Substanz eindeutig; Spektrum, Datenbank und Matrix müssen berücksichtigt werden).
- REM/EDX liefert Struktur- und Elementinformationen; Laser-Mikrosonde (LAMMA) kann je nach Verfahren und Messbedingungen zusätzlich massenspektrometrische Informationen liefern.

## Vorbeugung

Saubere, gut vorbehandelte Untergründe, richtige Applikations- und Trocknungsbedingungen, sorgfältige Eingangskontrolle der Rohstoffe und Rückstellmuster verringern Schäden und erleichtern später die Ursachenklärung.

## Umwelt und Sicherheit

Bei der Probenpräparation (Schleifen, Schneiden) Staub- und Splitterschutz tragen. Reinigungslösemittel sparsam einsetzen und Reste als Sonderabfall entsorgen.

**Merksatz**

Schaden liegt im Material, Untergrund oder in der Verarbeitung. Erst Bild beschreiben, dann Ursache eingrenzen. Analyse: Mikroskopie/Querschliff, FTIR-Mikroskopie, LAMMA/REM. Vorbeugung: saubere Untergründe + Eingangskontrolle + Rückstellmuster.

**Stichwörter:** Lackierschaden, Krater, Kocher, Stippen, Schadensanalyse, Ursachensuche, Querschliff, FTIR-Mikroskopie, LAMMA, Rückstellmuster

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie*

## Übungsblatt Ü-161 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Wie gehen Sie bei der Suche nach der Ursache eines Lackierschadens systematisch vor?

**Schadensbild:** Zuerst das Erscheinungsbild genau beschreiben (z. B. Krater, Kocher, Läufer, Stippen).

**Eingrenzen:** Mögliche Ursachen den Bereichen Material, Untergrund, Applikation oder Bedingungen zuordnen.

**Vergleich:** Referenzmuster und Verarbeitungshistorie heranziehen.

**Analyse:** Bei Bedarf Mikroskopie/Querschliff und FTIR-Mikroskopie zur gezielten Untersuchung von Fehlstellen einsetzen.

*Bewertung: Das systematische Vorgehen (Bild → Ursache eingrenzen → vergleichen → analysieren) wird vollständig dargestellt.*

**Frage 2** **(Anwendung, 8 Punkte)**

Auf einem Decklack treten kleine, kraterförmige Vertiefungen auf. Welche Ursache vermuten Sie und wie prüfen Sie das?

**Verdacht:** Krater entstehen meist durch Benetzungsstörungen — z. B. Öl-, Silicon- oder Fettreste auf dem Untergrund oder im Lack.

**Prüfung:** Untergrund und Oberflächenspannung prüfen; unter dem Mikroskop den Kratergrund betrachten; FTIR-Mikroskopie zur Identifizierung der Störsubstanz.

**Abhilfe:** Untergrundreinigung verbessern, Verunreinigungsquelle (z. B. Druckluft/Öl) beseitigen, ggf. Verlaufadditive anpassen.

*Bewertung: Krater werden korrekt als Benetzungsstörung gedeutet und mit passender Analyse und Abhilfe verknüpft.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**

Warum sind Rückstellmuster und eine Eingangskontrolle der Rohstoffe für die Schadensklärung wichtig?

**Rückstellmuster:** Erlauben später den Vergleich mit der tatsächlich gelieferten/verarbeiteten Charge.

**Eingangskontrolle:** Dokumentiert die Rohstoffqualität und trennt Material- von Verarbeitungsfehlern.

**Nutzen:** So lässt sich die Verantwortung (Hersteller/Verarbeiter) besser zuordnen und Wiederholung vermeiden.

*Bewertung: Der Wert von Rückstellmustern und Eingangskontrolle für die Ursachen- und Verantwortungsklärung wird erkannt.*

# L-162 · Farbmessung und der CIELAB-Farbraum

*Farbe objektiv machen: Normlichtart, Normalbeobachter, Remission und L*a*b**

**Wahlqualifikation** · B 13

Farbmetrik ermöglicht eine objektivierte, reproduzierbare Beschreibung von Farbe unter definierten Messbedingungen. Aus Normlichtart, Normalbeobachter und der Remission der Probe entstehen die Farbwerte; im CIELAB-Raum beschreiben L*, a* und b* Helligkeit und Farbart.

## Warum Farbe messen

Das Auge beurteilt Farbe subjektiv und wird von Umgebung, Betrachter und Beleuchtung beeinflusst. Für Qualitätssicherung, Rezepturabgleich und Lieferbedingungen braucht man aber objektive, reproduzierbare Zahlen. Genau das leistet die Farbmetrik: Sie macht aus dem Farbeindruck messbare Größen.

## Wie aus Absorption ein Farbeindruck wird

Bevor gemessen wird, lohnt der Blick darauf, wie der Farbeindruck überhaupt entsteht. Ein Buntpigment leuchtet nicht selbst — es nimmt aus dem weißen Licht einen Teil des Spektrums heraus und wirft den Rest zurück. Was das Auge sieht, ist dieser zurückgeworfene Rest, also die Komplementärfarbe des absorbierten Anteils. Man nennt das subtraktive Farbmischung, weil jedes zugesetzte Farbmittel dem Licht etwas wegnimmt.

Daraus folgen die beiden Grenzfälle: Wird alles absorbiert, erscheint die Fläche schwarz; wird nichts absorbiert, sondern alles zurückgeworfen, erscheint sie weiß.

Die Zuordnung ist paarweise festgelegt:

- absorbiert violett → erscheint grüngelb
- absorbiert indigoblau → erscheint gelb
- absorbiert blau → erscheint orange
- absorbiert blaugrün → erscheint rot
- absorbiert grün → erscheint purpur

Damit schließt sich der Kreis zur Chemie: Der Chromophor eines Farbmittels bestimmt, welcher Wellenlängenbereich absorbiert wird (siehe L-42) — und die Komplementärfarbe dazu ist der Farbton, den man am Lackfilm sieht.

Davon zu unterscheiden ist die additive Farbmischung, bei der farbige Lichtquellen übereinandergelegt werden; Rot, Grün und Blau ergeben zusammen Weiß. Sie beschreibt Bildschirme, nicht Beschichtungen — für den Lacklaboranten ist die subtraktive Mischung der Regelfall.

## Die drei Eingangsgrößen

Eine farbmetrische Berechnung kombiniert die spektrale Probeninformation (Remission, im sichtbaren Bereich etwa 380 bis 760 nm) mit einer definierten Normlichtart (z. B. D65 als Tageslicht) und einem definierten Normalbeobachter (2° oder 10°); daraus werden die CIE-Farbwerte (XYZ) berechnet, die Grundlage aller weiteren Farbräume. Genormt ist das in der Reihe DIN EN ISO/CIE 11664 (Normalbeobachter, Normlichtarten, Farbwerte).

### Messung mit dem Spektralphotometer

Gemessen wird mit einem Spektralphotometer, das die Remission wellenlängenweise erfasst. Entscheidend ist die Messgeometrie — etwa 45°/0° oder Kugelgeometrie d/8° —, weil Glanz und Oberflächenstruktur das Ergebnis beeinflussen. Die Geometrie muss zur Anwendung passen und stets mit angegeben werden, sonst sind Werte nicht vergleichbar.

Bei Kugelgeometrie kommt eine zweite Einstellung dazu: die Glanzfalle. Ist sie geschlossen, wird der spiegelnd reflektierte Anteil mitgemessen — das ist SCI (specular component included). Ist sie geöffnet, wird dieser Anteil in einen schwarzen Absorber geleitet und fehlt im Messsignal — das ist SCE (specular component excluded).

### Der CIELAB-Farbraum

SCI liefert die Farbe des Materials weitgehend unabhängig von der Oberfläche und eignet sich deshalb für Rezepturarbeit und Rohstoffvergleich. SCE kommt dem Seheindruck näher, weil auch das Auge den Glanzanteil nicht als Farbe wahrnimmt — glänzende Flächen wirken dunkler und satter als matte gleicher Rezeptur. Für die Qualitätskontrolle am fertigen Teil ist deshalb meist SCE die richtige Wahl. Entscheidend ist, dass Probe und Referenz in derselben Betriebsart gemessen werden; SCI- und SCE-Werte derselben Probe sind nicht vergleichbar.

Aus den Farbwerten berechnet man den CIELAB-Raum (genormt in ISO/CIE 11664-4, seit 1976, in Deutschland Nachfolger der DIN 6174). Er ist ein geräteunabhängig definierter Farbraum und wurde mit dem Ziel einer annähernden Wahrnehmungsuniformität entwickelt; die Uniformität ist nicht überall gleich gut: L* ist die Helligkeit (0 Schwarz bis 100 Weiß), a* die Achse Grün (negativ) bis Rot (positiv), b* die Achse Blau (negativ) bis Gelb (positiv). Liegen a* und b* bei 0, ist der Ton unbunt und liegt als Grauwert auf der L*-Achse.

### Buntheit und Bunttonwinkel

Anschaulicher sind oft die Polarkoordinaten: die Buntheit (Chroma) $C^* = \sqrt{(a^{*2} + b^{*2})}$ als Abstand von der Grauachse und der Bunttonwinkel h, der quadrantenrichtig aus a* und b* bestimmt und in den Bereich 0 bis 360° überführt wird — bei negativen a*-Werten liefert die einfache Arcustangens-Rechnung sonst den falschen Quadranten. So lassen sich Helligkeit, Sättigung und Farbton sauber trennen — hilfreich, um eine Abweichung gezielt zu deuten.

**Merksatz**

Farbmetrik macht Farbe zur Zahl: Normlichtart + Normalbeobachter + Remission → Farbwerte → CIELAB. L* ist Helligkeit, a* Grün-Rot, b* Blau-Gelb; C* und h sagen, wie bunt und welcher Ton.

**Stichwörter:** Farbmetrik, Farbmessung, CIELAB, L*a*b*, Normlichtart, Normalbeobachter, Remission, Spektralphotometer, Messgeometrie, Buntheit, Bunttonwinkel, DIN EN ISO 11664, subtraktive Farbmischung, additive Farbmischung, Komplementärfarbe, Absorption

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; DIN EN ISO/CIE 11664; Ignatowitz, Chemie für Schule und Beruf (Europa-Lehrmittel); ISO/CIE 11664-4*

## Übungsblatt Ü-162 — Musterlösungen

**Frage 1** (Verständnis, 8 Punkte)

Welche drei Eingangsgrößen verrechnet eine Farbmessung, und was bedeuten die drei CIELAB-Koordinaten L*, a* und b*?

**Eingangsgrößen:** Normlichtart (z. B. D65), CIE-Normalbeobachter (2° oder 10°) und die Remission der Farbprobe über den sichtbaren Bereich.
**L*:** Helligkeit von 0 (Schwarz) bis 100 (Weiß).
**a*:** Achse Grün (negativ) bis Rot (positiv).
**b*:** Achse Blau (negativ) bis Gelb (positiv); bei a*=b*=0 ist der Ton unbunt (grau).
*Bewertung: Alle drei Eingangsgrößen genannt und die drei Achsen korrekt zugeordnet, inklusive des unbunten Falls.*

**Frage 2** **(Berechnung, 9 Punkte)**

Eine Farbe hat die CIELAB-Koordinaten a* = 20 und b* = 30. Berechnen Sie die Buntheit C* und den Bunttonwinkel h.

**Buntheit:** $C^* = \sqrt{(a^{*2} + b^{*2})} = \sqrt{(20^2 + 30^2)} = \sqrt{1300} = 36{,}1$

**Bunttonwinkel:** $h = \arctan(b^*/a^*) = \arctan(30/20) = \arctan(1{,}5) \approx 56{,}3°$; a* und b* sind hier beide positiv, der Winkel liegt also im ersten Quadranten. Bei negativem a* muss der Quadrant gesondert berücksichtigt werden, sonst ergibt sich ein um 180° falscher Wert.

**Deutung:** Der Ton liegt mit rund 56° zwischen Rot (0°) und Gelb (90°), also im orange-gelben Bereich, mit mittlerer Buntheit.

*Bewertung: Beide Polarkoordinaten korrekt berechnet und der Bunttonwinkel anschaulich im Farbkreis eingeordnet.*

**Frage 3** **(Anwendung, 7 Punkte)**

Zwei Labore messen dieselbe Lackprobe und erhalten unterschiedliche L*a*b*-Werte. Nennen Sie zwei messtechnische Ursachen.

**Ursache 1 — Messgeometrie:** Unterschiedliche Geometrie (z. B. 45°/0° gegen Kugelgeometrie d/8°) erfasst Glanz und Oberfläche verschieden.

**Ursache 2 — Einstellungen:** Verschiedene Normlichtart oder Normalbeobachter, unterschiedliche Kalibrierung oder Probenvorbereitung.

**Konsequenz:** Nur bei gleicher Geometrie und gleichen Einstellungen sind Farbwerte vergleichbar — beides muss angegeben werden.

*Bewertung: Die Antwort nennt zwei zutreffende messtechnische Ursachen und erkennt die Vergleichbarkeit als Kernproblem.*

# L-163 · Farbabstand ΔE, Toleranzen und Metamerie

*Zwei Farben quantitativ vergleichen — und die Fallstricke kennen*

**Wahlqualifikation** · B 13

Der Farbabstand ΔE misst, wie weit zwei Farben im CIELAB-Raum auseinanderliegen. ΔE*ab ist der euklidische Abstand aus ΔL*, Δa* und Δb*; für Lieferungen vereinbart man Toleranzen, und Metamerie bleibt zu beachten.

## Der Farbabstand ΔE

Um zwei Farben quantitativ zu vergleichen — etwa Probe gegen Referenz —, berechnet man den Farbabstand ΔE. Der klassische CIELAB-Farbabstand ΔE*ab (nach ISO/CIE 11664-4) ist der euklidische Abstand der beiden Farborte: $\Delta E^*ab = \sqrt{(\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2})}$. Er zählt zu den am häufigsten verwendeten Farbabstandsmaßen.

## Die Komponenten deuten

Der ΔE-Wert allein sagt nur, wie groß der Abstand ist, nicht wohin. Deshalb betrachtet man die Einzelbeträge: ΔL* (heller oder dunkler), Δa* (grüner oder röter) und Δb* (blauer oder gelber). Erst sie zeigen die Richtung der Abweichung — und damit, in welche Richtung die Rezeptur nachgestellt werden muss.

## Toleranzen

In der Praxis vereinbart man Farbtoleranzen, oft in Lieferbedingungen. Als grobe Orientierung gilt: Ein ΔE um 1 ist unter üblichen Abmusterungsbedingungen gerade noch bzw. kaum wahrnehmbar; die Wahrnehmbarkeit hängt von Farbton, Messbedingung, Oberfläche und Betrachter ab. Die zulässige Toleranz hängt aber stark von Anwendung, Farbton und Anspruch ab und wird individuell festgelegt.

## Grenzen von CIELAB und CIEDE2000

Der CIELAB-Raum ist nicht überall gleichabständig; besonders bei gesättigten und blauen Tönen passt der ΔE*ab-Wert nicht immer zum Seheindruck. Deshalb gibt es verbesserte Formeln wie CIEDE2000 (ΔE00, genormt in ISO/CIE 11664-6); diese wurde entwickelt, um die wahrgenommene Farbdifferenz unter vielen Bedingungen besser abzubilden als ΔE*ab, ist dabei aber deutlich aufwendiger zu rechnen und auch nicht in jedem Fall perfekt wahrnehmungsuniform.

## Abmustern in der Lichtkabine

Der visuelle Vergleich ersetzt die Messung nicht, ergänzt sie aber — und ist selbst genormt: DIN EN ISO 3668 legt die Bedingungen fest. Gefordert sind künstliches Tageslicht, eine Beleuchtungsstärke von 1000 bis 4000 Lux auf der Betrachtungsfläche (bei dunklen Farbtönen im oberen Bereich) und eine farbneutrale Umgebung ohne direkte Sonneneinstrahlung. Betrachtet wird unter 45 Grad zur Beleuchtungsrichtung aus etwa 500 mm Abstand; die Probenfläche soll dabei ein Sehfeld von rund 10 Grad einnehmen. Probe und Referenz liegen unmittelbar nebeneinander und in gleicher Ausrichtung.

Für die Metamerieprüfung wird zwischen mehreren Lichtarten umgeschaltet. Deshalb hat eine Abmusterungskabine mehrere Leuchtmittel — typisch Tageslicht, Kunstlicht und Verkaufsraumlicht.

Zwei Fehlerquellen sitzen nicht im Gerät: Die Umgebungskleidung des Prüfers und farbige Wände verfälschen den Eindruck, und das Auge ermüdet — nach längerem Betrachten verschiebt sich die Beurteilung. Deshalb kurz und mit Blickwechsel abmustern.

## Metamerie

Zwei Farben können unter einer Lichtart gleich aussehen und unter einer anderen verschieden — das ist Metamerie. Sie entsteht, wenn die Remissionskurven unterschiedlich verlaufen, die Farbwerte unter einer Lichtart aber zufällig übereinstimmen. Deshalb mustert man Farben unter mehreren Normlichtarten ab, bevor man sie freigibt. Dauerhaft vermeiden lässt sich Metamerie nur über die Rezeptur: Je ähnlicher die Remissionskurven von Probe und Referenz verlaufen, desto geringer die Metamerie — etwa durch Nachstellen mit denselben Pigmenten wie in der Referenz.

**Merksatz**

$\Delta E^*ab = \sqrt{(\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2})}$ misst den Farbabstand, die Einzelwerte zeigen die Richtung. Kleine $\Delta E$ (~1) sind kaum sichtbar, CIEDE2000 rechnet empfindungsgerechter — und Metamerie zwingt zum Abmustern unter mehreren Lichtarten.

**Stichwörter:** Farbabstand, Delta E, ΔEab, ΔL*, Δa*, Δb*, Farbtoleranz, CIEDE2000, Metamerie, Lieferbedingungen, CIELAB, Abmusterung, Lichtkabine, DIN EN ISO 3668, Normlichtart

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; DIN EN ISO/CIE 11664; DIN EN ISO 3668; ISO/CIE 11664-4; ISO/CIE 11664-6*

---

# Übungsblatt Ü-163 — Musterlösungen

**Frage 1** (Verständnis, 8 Punkte)

Erklären Sie, was der Farbabstand $\Delta E^*ab$ aussagt und warum die Einzelwerte $\Delta L^*$, $\Delta a^*$ und $\Delta b^*$ trotzdem wichtig sind.

**$\Delta E^*ab$:** Der euklidische Abstand zweier Farborte im CIELAB-Raum: $\Delta E^*ab = \sqrt{(\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2})}$. Er gibt an, wie groß die Farbabweichung insgesamt ist.

**Grenze von $\Delta E$:** $\Delta E$ sagt nur, wie groß der Abstand ist, nicht in welche Richtung.

**Einzelwerte:** $\Delta L^*$ zeigt heller/dunkler, $\Delta a^*$ grüner/röter, $\Delta b^*$ blauer/gelber — sie geben die Richtung der Abweichung.

**Nutzen:** Erst mit der Richtung weiß man, wie die Rezeptur nachzustellen ist.

*Bewertung: Die Antwort definiert $\Delta E$ korrekt als euklidischen Abstand und begründet die Bedeutung der richtungsweisenden Einzelwerte.*

**Frage 2** (Berechnung, 10 Punkte)

Referenz: L*a*b* = (60, 20, 30); Probe: L*a*b* = (61, 18, 33). Berechnen Sie $\Delta L^*$, $\Delta a^*$, $\Delta b^*$ und den Farbabstand $\Delta E^*ab$ und deuten Sie das Ergebnis.

**Differenzen:** $\Delta L^* = 61 - 60 = 1$; $\Delta a^* = 18 - 20 = -2$; $\Delta b^* = 33 - 30 = 3$

**Farbabstand:** $\Delta E^*ab = \sqrt{(1^2 + (-2)^2 + 3^2)} = \sqrt{(1 + 4 + 9)} = \sqrt{14} \approx 3{,}74$

**Deutung Richtung:** Die Probe ist etwas heller ($\Delta L^* > 0$), grüner ($\Delta a^* < 0$) und gelber ($\Delta b^* > 0$) als die Referenz.

**Deutung Größe:** $\Delta E \approx 3{,}7$ ist eine deutlich sichtbare Abweichung — je nach Toleranz wäre die Probe nachzustellen.

*Bewertung: Differenzen und $\Delta E$ korrekt gerechnet; die Antwort deutet zusätzlich Richtung und Größe der Abweichung praxisgerecht.*

**Frage 3** (Anwendung, 7 Punkte)

Ein Kunststoffteil und ein lackiertes Metallteil sollen farblich zusammenpassen. Unter Tageslicht stimmen sie überein, unter Kunstlicht nicht. Erklären Sie das Phänomen und die richtige Vorgehensweise.

**Phänomen:** Metamerie: Die beiden Teile haben unterschiedliche Remissionskurven, ergeben aber unter der einen Lichtart zufällig gleiche Farbwerte; unter anderer Lichtart weichen sie ab.

**Vorgehen:** Farben unter mehreren Normlichtarten abmustern (z. B. Tageslicht und Kunstlicht), bevor man sie freigibt.

**Rezeptur:** Möglichst so einstellen, dass die Remissionskurven ähnlicher werden — das verringert die Metamerie.

*Bewertung: Die Antwort benennt Metamerie korrekt über die Remissionskurven und nennt das Abmustern unter mehreren Lichtarten als richtige Vorgehensweise.*

# L-164 · Die CIE-Normfarbtafel

*Farbart als x-y-Diagramm — genormt in DIN 5033*

**Wahlqualifikation** · B 13

Die CIE-Normfarbtafel (DIN EN ISO/CIE 11664) stellt Farben über die Normfarbwertanteile x und y in einem Diagramm dar; alle realisierbaren Farben liegen innerhalb der hufeisenförmigen Fläche.

## Von den Farbwerten zur Farbtafel

Aus den Normfarbwerten X, Y und Z (siehe L-162) berechnet man die Normfarbwertanteile x und y. x und y beschreiben die Farbart; die Helligkeitsinformation wird durch den Tristimuluswert Y separat berücksichtigt.

## Die Berechnung

```
x = X / (X + Y + Z)     y = Y / (X + Y + Z)

X, Y, Z = Normfarbwerte · x, y = Farbwertanteile (Normfarbtafel)
```

## Das Diagramm

In der Farbtafel steht x waagerecht, y senkrecht. Die reinen Spektralfarben liegen auf dem hufeisenförmigen Rand, unten geschlossen durch die Purpurgerade. Alle physikalisch realisierbaren Farben liegen innerhalb dieser Fläche. Der unbunte Weißpunkt liegt je nach verwendeter Normlichtart an einer definierten Position innerhalb der Farbtafel; er liegt nicht generell geometrisch in der Mitte.

## Verhältnis zu CIELAB

Normfarbtafel und CIELAB gehen beide aus den Farbwerten X, Y, Z hervor, sind aber verschiedene Darstellungen. CIELAB (L-162) ist wahrnehmungsgerechter und dient der Abstandsmessung; die Normfarbtafel ist anschaulicher für die Farbart. Grundbegriffe stehen in DIN 5033-1; Normalbeobachter, Normlichtarten und die Normfarbwerte X, Y und Z, aus denen die Farbwertanteile berechnet werden, sind in DIN EN ISO/CIE 11664 (Teile 1 bis 3) festgelegt — die früheren Teile 2 bis 4 der DIN 5033 sind zurückgezogen.

## Nutzen

Die Farbtafel zeigt Farborte, Farbmischungen und den erreichbaren Farbraum (Gamut) anschaulich. Für die Freigabe einer Charge nutzt man dagegen den Farbabstand ΔE (siehe L-163).

**Merksatz**

CIE-Normfarbtafel (DIN EN ISO/CIE 11664): x = X/(X+Y+Z), y = Y/(X+Y+Z). Spektralfarben auf dem Rand, Purpurgerade unten, alle realen Farben innen; der unbunte Weißpunkt liegt je nach Normlichtart an einer definierten Stelle innerhalb der Fläche. Anschaulich für die Farbart, ΔE für die Prüfung.

**Stichwörter:** CIE-Normfarbtafel, Normfarbwertanteile, DIN 5033, Farbart, Spektralfarben, Purpurgerade, Weißpunkt, Farbraum, CIELAB, XYZ

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; DIN 5033-1; DIN EN ISO/CIE 11664*

## Übungsblatt Ü-164 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Was zeigt die CIE-Normfarbtafel, und wo liegen Spektralfarben, Purpurgerade und Weißpunkt?

**Inhalt:** Die Farbart über die Normfarbwertanteile x und y, unabhängig von der Helligkeit.
**Spektralfarben:** Auf dem hufeisenförmigen Rand.
**Purpurgerade:** Die untere gerade Verbindung, die das Hufeisen schließt.
**Weißpunkt/Fläche:** Der unbunte Weißpunkt liegt je nach Normlichtart an einer definierten Stelle im Inneren der Fläche (nicht zwangsläufig geometrisch mittig); alle realen Farben liegen innerhalb der Fläche.
*Bewertung: Aufbau der Farbtafel wird korrekt beschrieben.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**

Eine Farbe hat die Normfarbwerte X = 30, Y = 40, Z = 30. Berechnen Sie die Normfarbwertanteile x und y.

**Summe:** X + Y + Z = 30 + 40 + 30 = 100
**x:** x = X / (X+Y+Z) = 30 / 100 = 0,30
**y:** y = Y / (X+Y+Z) = 40 / 100 = 0,40
*Bewertung: Die Normfarbwertanteile werden korrekt aus X, Y, Z berechnet.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**

Wofür nutzt man die Normfarbtafel, und wofür in der Qualitätssicherung eher den Farbabstand ΔE?

**Normfarbtafel:** Anschauliche Darstellung von Farbort, Farbmischung und erreichbarem Farbraum (Gamut).
**ΔE:** Für die Freigabe einer Charge — die messbare Abweichung von einem Standard (siehe L-163).
*Bewertung: Der Unterschied Darstellung (Normtafel) gegen Abstandsmaß (ΔE) wird erkannt.*

# L-165 · Das RAL-Farbregister

*Farbtöne eindeutig benennen — und farbmetrisch prüfen*

**Wahlqualifikation** · B 13

RAL-Nummern dienen der standardisierten Benennung von definierten Farbtönen — im RAL-Classic-System kennzeichnet die erste Ziffer die Farbfamilie; die tatsächliche Übereinstimmung einer Probe muss bei Bedarf messtechnisch bzw. visuell gegen den Referenzstandard geprüft werden.

## Wozu ein Farbregister

Während die Farbmetrik Farben misst (siehe L-162), dient ein Farbregister der eindeutigen Benennung und Bestellung. Im deutschsprachigen Raum weit verbreitet ist das RAL-System, herausgegeben von RAL, dem Deutschen Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung, das aus dem früheren Reichsausschuss für Lieferbedingungen hervorgegangen ist.

## Aufbau der Nummern

Im RAL-Classic-Register hat jeder Farbton eine vierstellige Nummer; die erste Ziffer kennzeichnet die Farbfamilie: 1000er gelb, 2000er orange, 3000er rot, 4000er violett, 5000er blau, 6000er grün, 7000er grau, 8000er braun, 9000er weiß, schwarz und Aluminium. Diese Systematik gilt für RAL Classic und ist nicht ohne Weiteres auf andere RAL-Systeme übertragbar.

## Beispiele

Bekannte Töne sind etwa RAL 5010 Enzianblau, RAL 6005 Moosgrün oder RAL 9010 Reinweiß. Auch Signal- und Leuchtfarben sind erfasst, zum Beispiel RAL 1026 Leuchtgelb, RAL 2005 Leuchtorange, RAL 3024 Leuchtrot und RAL 3026 Leuchthellrot (siehe L-43).

## RAL und Farbmetrik

Eine RAL-Nummer benennt einen Farbton, misst ihn aber nicht. Ob eine Charge den RAL-Ton trifft, wird über die Farbmetrik geprüft: Man vergleicht den gemessenen L*a*b*-Wert der Probe mit dem des RAL-Standards und bewertet den Farbabstand $\Delta E^*ab = \sqrt{(\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2})}$ (siehe L-163). Benennung und Messung ergänzen sich also.

## Weitere Farbsysteme

Neben RAL gibt es weitere Ordnungssysteme, etwa das NCS (Natural Color System) oder herstellereigene Farbkarten. Sie alle lösen dasselbe Problem: Farben unabhängig vom Betrachter eindeutig zu benennen und reproduzierbar zu bestellen.

**Merksatz**

RAL benennt Farbtöne über vierstellige Nummern; die erste Ziffer ist die Farbreihe (1 gelb … 9 weiß/schwarz). Benannt wird über RAL, geprüft über die Farbmetrik (L*a*b*, ΔE).

**Stichwörter:** RAL, Farbregister, RAL Classic, Farbreihe, Farbton, Enzianblau, Leuchtfarbe, NCS, Farbbenennung, ΔE

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; RAL — öffentliches Farbregister*

---

## Übungsblatt Ü-165 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Was sagt die erste Ziffer einer RAL-Classic-Nummer aus? Ordnen Sie den Reihen 1000, 5000 und 8000 die jeweilige Farbe zu.

**Bedeutung:** Im RAL-Classic-System kennzeichnet die erste Ziffer die jeweilige Farbfamilie (Farbreihe).
**1000er:** gelbe Farbtöne
**5000er:** blaue Farbtöne
**8000er:** braune Farbtöne

*Bewertung: Die Systematik der ersten Ziffer wird erklärt und die drei Reihen korrekt zugeordnet.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**

Ein RAL-Standard hat L*a*b* = (70, 10, 75); die Charge misst (72, 8, 79). Berechnen Sie den Farbabstand ΔE*ab und beurteilen Sie, ob die Charge nachgestellt werden sollte.

**Differenzen:** $\Delta L^* = 2$; $\Delta a^* = -2$; $\Delta b^* = 4$

**Farbabstand:** $\Delta E^*ab = \sqrt{(2^2 + (-2)^2 + 4^2)} = \sqrt{(4 + 4 + 16)} = \sqrt{24} \approx 4{,}90$

**Bewertung:** $\Delta E \approx 4{,}9$ ist eine deutlich sichtbare Abweichung; je nach Toleranz sollte die Charge nachgestellt werden.

*Bewertung: Der Farbabstand wird korrekt berechnet und praxisgerecht als deutlich sichtbar eingeordnet.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**

Warum reicht die RAL-Nummer allein nicht aus, um eine produzierte Charge farblich freizugeben?

**Grenze der Nummer:** Die RAL-Nummer benennt den Zielton nur, sie misst die Charge nicht.

**Prüfung nötig:** Die tatsächliche Übereinstimmung wird farbmetrisch geprüft: L*a*b* der Charge gegen den Standard, Bewertung über ΔE.

**Zusatz:** Auch Metamerie kann trotz gleicher Nummer zu sichtbaren Abweichungen führen (siehe L-163).

*Bewertung: Die Antwort trennt Benennung und Messung und nennt die farbmetrische Prüfung als Freigabekriterium.*

# L-166 · Deckvermögen, Kontrastverhältnis und Farbstärke

*Optische Prüfung mit der Kubelka-Munk-Theorie*

**Wahlqualifikation** · B 13

Deckvermögen (Verbergen des Untergrunds), Farbstärke und Transparenz beschreiben die optische Leistung eines Lacks. Gemessen wird über das Kontrastverhältnis und die Kubelka-Munk-Theorie (K/S).

## Deckvermögen

Das Deckvermögen ist die Fähigkeit einer Schicht, einen Kontrastuntergrund (schwarz/weiß) zu verbergen. Gemessen wird das Kontrastverhältnis — die Reflexion über Schwarz geteilt durch die Reflexion über Weiß; in vielen Prüfungen gilt ein Kontrastverhältnis um 98 % als praktische Deckungsgrenze (produkt- bzw. normabhängig). Angegeben wird das Deckvermögen als deckende Schichtdicke oder als Ergiebigkeit (deckende Fläche je Volumen, in m²/l; Formel siehe L-68).

Praxisfolge: Farbtöne mit schlechtem Deckvermögen — vor allem Gelb, Orange und Rot mit organischen Pigmenten — löst man nicht über zusätzliche Decklacklagen, sondern über einen deckenden, farblich abgestimmten Untergrund (siehe L-39).

## Kubelka-Munk

Die Kubelka-Munk-Theorie verknüpft Reflexion, Absorption K und Streuung S. Für eine unendlich deckende Schicht gilt der Zusammenhang unten. Ein hohes Streuvermögen — etwa durch Titandioxid mit hoher Brechzahl (n ≈ 2,7) — kann bei geeigneter Pigmentierung und ausreichender Pigmentkonzentration zu hohem Deckvermögen beitragen; Absorption und Schichtdicke wirken ebenfalls mit. Füllstoffe mit einer Brechzahl nahe der des Bindemittels (n ≈ 1,5–1,6) tragen typischerweise wenig zur Lichtstreuung bei; Form, Partikelgröße und Konzentration können die optische Wirkung dennoch beeinflussen.

## Rechenweg

```
Kubelka-Munk (deckende Schicht):   K/S = (1 − R∞)² / (2 · R∞)
   K = Absorptionskoeffizient, S = Streukoeffizient
   R∞ = Reflexion der unendlich dicken Schicht (0…1)

Kontrastverhältnis:   KV = R(über Schwarz) / R(über Weiß)
   R = Reflexionsgrad; in der Farbmetrik der Hellbezugswert (Tristimuluswert Y).
```

## Farbstärke und Transparenz

Die Farbstärke ist die Fähigkeit eines Buntpigments, einer Weißmischung Farbe zu geben; sie wird gegen einen Standard bestimmt. Transparente Systeme (Lasuren, Metallic-Basislacke) benötigen im sichtbaren Bereich möglichst geringe unerwünschte Lichtstreuung; Deckvermögen und Transparenz sind daher häufig gegenläufige Zielgrößen. Teures Weißpigment durch Füllstoff zu ersetzen senkt das Deckvermögen — ein Zielkonflikt zwischen Kosten und Deckung.

## Farbstärke messen: die Weißabmischung

Die Farbstärke eines Buntpigments wird nicht am Vollton beurteilt, sondern in der Aufhellung. Dazu wird das Buntpigment in festgelegtem Verhältnis mit einer Weißpaste angerieben und die Mischung gegen die genauso hergestellte Mischung eines Standards verglichen — visuell im Abmusterungskasten oder gemessen. Verglichen wird bei gleicher Farbtiefe: Man ermittelt, welche Einwaage des Prüfmusters nötig ist, um die Farbtiefe des Standards zu erreichen. Angegeben wird das Ergebnis als relative Farbstärke in Prozent, der Standard steht bei 100 %: Braucht das Muster nur 90 % der Einwaage des Standards, hat es eine Farbstärke von rund 111 % — es ist farbstärker.

Für Weißpigmente läuft es umgekehrt über das Aufhellvermögen: Das Weißpigment wird in eine genormte Schwarzpaste eingerührt, und beurteilt wird, wie stark es das Grau aufhellt — im Vergleich zum Bezugspigment.

Zwei Punkte entscheiden über die Aussagekraft:
• Die Anreibung muss vollständig sein. Ein nicht ausdispergiertes Pigment erscheint farbschwach — die Prüfung beurteilt dann die Dispergierung und nicht das Pigment (siehe L-53).
• Prüfmuster und Standard müssen unter identischen Bedingungen angerieben, aufgezogen und getrocknet werden. Farbstärke ist eine Vergleichsgröße, kein Absolutwert.

Deshalb taugt die Farbstärke auch als Kenngröße für den Dispergierfortschritt — und zwar als die feinste: Sie steigt oft noch, wenn der Grindometerwert längst steht (siehe L-53).

## Weißgrad und Vergilbungszahl

Bei weißen und nahezu farblosen Beschichtungen genügt der Farbabstand ΔE oft nicht: Gefragt ist eine einzelne Kennzahl, die sagt, wie weiß die Fläche ist und wie stark sie ins Gelbe gekippt ist. Dafür gibt es zwei Größen, beide aus denselben gemessenen Farbwerten berechnet.

Der Weißgrad fasst die Remission zu einer Zahl zusammen — je höher, desto weißer. Der Gelbwert oder die Vergilbungszahl beschreibt umgekehrt die Abweichung ins Gelbe; im deutschen Regelwerk wird sie nach DIN 6167 berechnet, international ist der Yellowness Index nach ASTM E313 gebräuchlich. Berechnungsvorschrift, Normlichtart und Beobachter müssen dabei immer mit angegeben werden, weil die Zahlenwerte je nach Verfahren unterschiedlich ausfallen.

In der Praxis ist die Vergilbungszahl die Kenngröße, mit der die Vergilbung eines Weißlacks über der Bewitterungs- oder Lagerzeit verfolgt wird (siehe L-158) — deutlich empfindlicher und besser dokumentierbar als der Sichtvergleich gegen ein Rückstellmuster.

## Umwelt und Sicherheit

Pigment- und Füllstoffstäube nicht einatmen (Absaugung, Pulverhandhabung). Keine verbotenen oder überholten Buntpigmente einsetzen (Blei-, Cadmium- und Chromatpigmente); auf reizarme, freigegebene Rohstoffe achten.

**Merksatz**

Deckvermögen = Untergrund verbergen; Kontrastverhältnis um 98 % als praktische Deckungsgrenze (norm-/produktabhängig); $K/S = (1-R\infty)^2/(2 \cdot R\infty)$; hohe Streuung ($TiO_2$) trägt zur Deckung bei — bei Buntpigmenten kommt die Absorption hinzu. Farbstärke = Buntkraft; Transparenz = Gegenspieler des Deckvermögens.

**Stichwörter:** Deckvermögen, Kontrastverhältnis, Kubelka-Munk, Streuvermögen, Titandioxid, Farbstärke, Transparenz, Ergiebigkeit, Brechzahl, Weißgrad, Vergilbungszahl, Gelbwert, DIN 6167, Weißabmischung, Aufhellvermögen, relative Farbstärke, Farbtiefe, Anreibung, Schwarzpaste
*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; ASTM E313; DIN 6167*

## Übungsblatt Ü-166 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Erklären Sie, warum Titandioxid ein hohes Deckvermögen bewirkt und ein Füllstoff kaum.

**Grundlage:** Deckvermögen beruht auf Streuung von Licht an Grenzflächen zwischen Pigment und Bindemittel.

**Brechzahl:** Die Streuung ist umso stärker, je größer der Unterschied der Brechzahlen ist.

**$TiO_2$:** Titandioxid hat eine sehr hohe Brechzahl (n ≈ 2,7) — großer Unterschied zum Bindemittel (n ≈ 1,5), daher starke Streuung und hohes Deckvermögen.

**Füllstoff:** Füllstoffe haben eine niedrige Brechzahl (n ≈ 1,5–1,6) nahe der des Bindemittels — kaum Streuung, im Film kaum Deckvermögen.

*Bewertung: Der Zusammenhang Brechzahlunterschied → Streuung → Deckvermögen wird sauber hergeleitet.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**

Eine deckende Schicht hat die Reflexion $R_\infty = 0{,}80$. Berechnen Sie den Kubelka-Munk-Wert K/S. An einer zweiten Probe werden über der Kontrastkarte R(schwarz) = 0,882 und R(weiß) = 0,900 gemessen. Prüfen Sie, ob diese Schicht als deckend gilt.

**Ansatz K/S:** $K/S = (1 - R_\infty)^2 / (2 \cdot R_\infty)$

**Rechnung K/S:** $K/S = (1 - 0{,}80)^2 / (2 \cdot 0{,}80) = 0{,}04 / 1{,}60 = 0{,}025$

**Kontrastverhältnis:** KV = R(schwarz) / R(weiß) = 0,882 / 0,900 = 0,980 = 98,0 %

**Bewertung:** K/S = 0,025; das Kontrastverhältnis erreicht 98,0 % — die übliche Deckungsgrenze ist damit gerade erreicht.

**Antwortsatz:** Die zweite Probe gilt als (gerade) deckend.

*Bewertung: Beide Kennzahlen werden korrekt berechnet und das Kontrastverhältnis an der 98-%-Grenze richtig eingeordnet.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**

Aus Kostengründen soll ein Teil des Titandioxids durch Füllstoff ersetzt werden. Welche optischen Folgen erwarten Sie und wie prüfen Sie sie?

**Folge:** Weniger Streuung → geringeres Deckvermögen; größere deckende Schichtdicke bzw. kleinere Ergiebigkeit nötig.

**Prüfung:** Kontrastverhältnis über Schwarz/Weiß messen und die deckende Schichtdicke bestimmen; ggf. Farbstärke mitprüfen.

**Abwägung:** Kostenersparnis gegen erhöhten Materialbedarf und mögliche Reklamationen abwägen.

*Bewertung: Die Antwort benennt die optische Folge, die passende Messgröße und die wirtschaftliche Abwägung.*

# L-167 · Qualitätssicherung und Statistik im Lacklabor

*Mittelwert, Standardabweichung, Messunsicherheit und Regelkarte*

**Prüfungsteil 1** · A 8.4

Ein einzelner Messwert sagt wenig — Messungen streuen. Qualitätssicherung heißt: aus mehreren Werten Mittelwert und Streuung berechnen, die Messunsicherheit einordnen und den Prozess über die Zeit mit Regelkarten überwachen.

## Warum Statistik im Lacklabor

Jede Messung streut — Schichtdicke, Glanz oder Viskosität schwanken von Probe zu Probe und von Messung zu Messung. Ein einzelner Wert ist deshalb wenig aussagekräftig. Die Qualitätssicherung arbeitet mit mehreren Werten: Ihr Mittelwert beschreibt die Lage, die Standardabweichung die Streuung, und über die Zeit zeigt eine Regelkarte, ob der Prozess stabil bleibt.

## Mittelwert, Standardabweichung, Variationskoeffizient

```
Mittelwert:            x̄ = Σxᵢ / n
Standardabweichung:    s = √(Σ(xᵢ − x̄)² / (n − 1))
Variationskoeffizient: VK = s / x̄ · 100 %

n = Anzahl der Messwerte. Die Stichproben-Standardabweichung s (Nenner n − 1) beschreibt
   die absolute Streuung, der Variationskoeffizient VK die relative.
```

## Wiederhol- und Vergleichbarkeit

Man unterscheidet zwei Arten der Streuung: Die Wiederholbarkeit beschreibt, wie eng dieselbe Person mit demselben Gerät im selben Labor kurz nacheinander misst. Die Vergleichbarkeit — in DIN ISO 5725 als Vergleichpräzision unter Vergleichbedingungen geführt, international meist Reproduzierbarkeit genannt — beschreibt die Streuung von Messergebnissen unter veränderten Bedingungen, z. B. zwischen verschiedenen Laboren, Geräten oder Personen; sie ist typischerweise größer. Ein Messergebnis ist nur belastbar, wenn man seine Streuung kennt.

## Messunsicherheit

Kein Messwert ist exakt — zu jedem gehört eine Messunsicherheit. Ein Ergebnis wird deshalb als Wert plus/minus Unsicherheit angegeben (z. B. 82 ± 2 µm). Man gibt nie mehr Stellen an, als die Unsicherheit rechtfertigt: Eine auf ± 2 µm genaue Messung als 82,37 µm zu berichten, täuscht eine Genauigkeit vor, die es nicht gibt.

## Ausreißer erkennen

Ein Wert außerhalb von $\bar{x}$ ± 2 bis 3 s ist auffällig, aber allein dadurch noch kein statistisch sicherer Ausreißer — dafür braucht es ein passendes Ausreißerkriterium. Bevor man ihn verwirft, prüft man die Ursache — Messfehler, verunreinigte Probe, Gerätefehler. Ausreißer werden dokumentiert, nicht stillschweigend gestrichen.

## Regelkarte (SPC)

In der laufenden Fertigung trägt man die Messwerte über die Zeit in eine Regelkarte ein: eine Mittellinie mit Warn- und Eingriffsgrenzen darum. Ein Prozess gilt im Rahmen einer Regelkarte als statistisch beherrscht, wenn keine relevanten Regelverletzungen oder nichtzufälligen Muster nach dem verwendeten Regelwerk auftreten — zufällige Streuung allein reicht nicht als vollständiges Beherrschungskriterium. Ein Trend Richtung Grenze, ein Sprung oder mehrere Werte auf einer Seite zeigen an, dass etwas driftet — bevor Ausschuss entsteht. Das ist die Idee der statistischen Prozesslenkung (SPC).

## Probenahme und Rückstellmuster

- Repräsentativ ziehen: Die Probe muss den Zustand der ganzen Charge widerspiegeln (richtige Stelle, ausreichende Menge, gut homogenisiert).
- Rückstellmuster aufbewahren: Ein Teil jeder Charge wird zurückgestellt, um später reklamierte Ware vergleichen zu können.
- Kennzeichnen und dokumentieren: Charge, Datum, Prüfer — ohne saubere Dokumentation ist kein Nachweis möglich.

## Prüfmatrix — Technische Frage → passende Methode

Welche Prüfung für welche Fragestellung? Als Lacklaborant muss man nicht nur wissen WIE man prüft, sondern WANN welche Prüfung sinnvoll ist:

Läuft der Lack an senkrechter Fläche? → Ablaufprüfung (Sag-Test, Keilrakel)
Deckt der Film den Untergrund ab? → Deckvermögen / Kontrastverhältnis (ISO 6504)
Ist die Haftung ausreichend? → Gitterschnitt (ISO 2409) qualitativ ODER Pull-off (ISO 4624) quantitativ
Wie hart ist der Film? → Pendeldämpfung König oder Persoz (ISO 1522)
Wie dünn/dick ist die Schicht? → Schichtdickenmessung (ISO 2808)
Sind Pigmente gut dispergiert? → Grindometer / Feinheitsbestimmung (ISO 1524)
Wie glänzend ist der Film? → Reflektometrie 20°/60°/85° (ISO 2813)
Wann ist der Lack trocken? → Trocknungsphasen (ISO 9117-1/-5)
Beständig gegen Witterung? → Bewitterung Xenon/QUV (ISO 16474)
Korrosionsschutz ausreichend? → Salzsprühnebelprüfung (ISO 9227)

Laborpraxis Recht/Umwelt — welche Frage, welche Quelle?
Kann sich das Lösemittel entzünden? → Flammpunkt, Explosionsgrenzen, SDB
Wie viel VOC steckt im Lack? → VOC-Berechnung, ChemVOCFarbV
Ist der Lack wassergefährdend? → WGK / AwSV, nicht die CLP-Klasse
Wie entsorge ich den Rest? → Zusammensetzung prüfen, Abfallschlüssel bestimmen
Ist das Etikett richtig? → CLP-Gemischeinstufung, SDB Abschnitt 2
Wie reduziere ich die Exposition? → Gefährdungsbeurteilung, AGW (TRGS 900), PSA

## Prüfungsfallen-Checkliste — Die 10 häufigsten Irrtümer

1. Gitterschnitt ≠ Haftfestigkeit — Gt 0–5 ist ein Index, kein N/mm²-Wert. Für quantitative Haftfestigkeit: Pull-off (ISO 4624).
2. König ≠ Persoz — Werte sind NICHT vergleichbar oder austauschbar. Gerät immer angeben.
3. Tg ist methodenabhängig — DSC- und DMA-Tg desselben Films können sich um 10–20 °C unterscheiden.
4. Festkörper ist methodenabhängig — ISO 3251 (Bedingungen z. B. 105 °C/60 min, aber vereinbarungsabhängig) ≠ Einbrennrückstand (höhere Temperatur).
5. Scherverdünnung ≠ Thixotropie — Scherverdünnung ist sofort reversibel (strukturviskos); Thixotropie ist zeitabhängig und regeneriert nach Scherungsende langsam.
6. WGK ≠ CLP-Gefahrenklasse — zwei völlig verschiedene Rechtssysteme für zwei verschiedene Fragen.
7. Gefahrstoff ≠ Gefahrgut — Gefahrstoffrecht betrifft Tätigkeiten; Gefahrgutrecht betrifft den Transport.
8. Wasserbasiert ≠ nicht wassergefährdend — WGK richtet sich nach dem konkreten Stoff/Gemisch, nicht nach dem Lösemittel.
9. Auslaufbecher: DIN 4 ≠ Ford 4 ≠ ISO-Becher — Bechertyp und Düse immer angeben, Werte nicht vergleichen.
10. Glanzmessung: 60° ≠ 20° ≠ 85° — Messgeometrie immer angeben; gemessen wird zuerst bei 60°; über 70 GE wechselt man auf 20°, unter 10 GE auf 85°.

**Merksatz**

Messungen streuen — deshalb zählt nicht der Einzelwert, sondern Mittelwert und Standardabweichung. Jedes Ergebnis trägt eine Messunsicherheit und wird mit passender Stellenzahl angegeben. Über die Zeit überwacht die Regelkarte, ob der Prozess beherrscht bleibt. Repräsentative Probenahme und Rückstellmuster sichern die Nachvollziehbarkeit.

**Stichwörter:** Qualitätssicherung, Statistik, Mittelwert, Standardabweichung, Variationskoeffizient, Wiederholbarkeit, Vergleichbarkeit, Messunsicherheit, Ausreißer, Regelkarte, SPC, Probenahme, Rückstellmuster, Prüfmatrix, Prüfungsfallen, Gitterschnitt, König, Persoz, Auslaufbecher
*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; DIN ISO 5725; ISO 1522; ISO 1524; ISO 16474; ISO 2409; ISO 2808; ISO 2813; ISO 3251; ISO 4624; ISO 6504; ISO 9117-1; ISO 9227*

## Übungsblatt Ü-167 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 6 Punkte)**

Was ist der Unterschied zwischen Wiederhol- und Vergleichbarkeit, und warum gehört zu jedem Messergebnis eine Messunsicherheit?

**Wiederholbarkeit:** Streuung bei derselben Person, demselben Gerät und Labor kurz nacheinander — klein.

**Vergleichbarkeit:** Streuung unter veränderten Bedingungen, z. B. zwischen verschiedenen Laboren, Geräten oder Personen — typischerweise größer; in DIN ISO 5725 Vergleichpräzision, international meist Reproduzierbarkeit genannt.

**Messunsicherheit:** Kein Messwert ist exakt; das Ergebnis wird als Wert plus/minus Unsicherheit mit passender Stellenzahl angegeben.

*Bewertung: Beide Streuungsarten werden korrekt unterschieden; die Messunsicherheit wird als notwendige Angabe erkannt.*

**Frage 2** **(Anwendung, 6 Punkte)**

Fünf Schichtdickenmessungen ergeben 82, 85, 79, 83 und 86 µm. Berechnen Sie Mittelwert und Stichproben-Standardabweichung.

**Mittelwert:** $\bar{x} = (82 + 85 + 79 + 83 + 86) / 5 = 415 / 5 = 83$ µm

**Abweichungsquadrate:** $(-1)^2 + 2^2 + (-4)^2 + 0^2 + 3^2 = 1 + 4 + 16 + 0 + 9 = 30$

**Standardabweichung:** $s = \sqrt{(30 / (5 - 1))} = \sqrt{7{,}5} = 2{,}74$ µm

*Bewertung: Mittelwert (83 µm) und Stichproben-Standardabweichung (√7,5 ≈ 2,74 µm) werden korrekt berechnet.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**

In einer Regelkarte wandern die letzten sechs Messwerte langsam auf die obere Warngrenze zu, ohne sie zu überschreiten. Wie beurteilen Sie das und was tun Sie?

**Beurteilung:** Ein Trend zur Grenze zeigt, dass der Prozess driftet — auch wenn noch kein Wert außerhalb liegt.

**Konsequenz:** Ursache suchen und korrigieren, bevor Ausschuss entsteht (z. B. Gerät, Charge, Bedingungen prüfen).

**Prinzip:** Genau das leistet die statistische Prozesslenkung: eingreifen, bevor die Eingriffsgrenze erreicht ist.

*Bewertung: Der Trend wird als Handlungssignal erkannt; die vorbeugende Prozesslenkung wird korrekt eingeordnet.*

# L-178 · Viskosität und Fließverhalten — Messung

*Vom Auslaufbecher bis zum Rotationsviskosimeter*

**Prüfungsteil 1** · A 7.1

Viskosität ist der Widerstand einer Flüssigkeit gegen das Fließen. Die dynamische Viskosität ist das Verhältnis von Schubspannung zu Schergeschwindigkeit für newtonsches bzw. lokal definiertes Fließverhalten; bei nichtnewtonschen Lacken ist sie scherratenabhängig. Lacke sind meist nicht newtonsch (strukturviskos, oft thixotrop); die Messmethode muss zum Zweck passen.

## Grundgrößen

Wirkt auf eine flüssige Schicht eine Kraft, so gleiten die Schichten gegeneinander. Die Schubspannung τ (Kraft je Fläche, in Pa) und die Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ (in 1/s) hängen über die dynamische Viskosität zusammen: $\eta = \tau / \dot{\gamma}$ (in Pa·s). Bei einer newtonschen Flüssigkeit ist η konstant — die Fließkurve ist eine Gerade durch den Ursprung. Die kinematische Viskosität $\nu = \eta / \rho$ (in mm²/s) bezieht die Dichte ein.

## Fließverhalten von Lacken

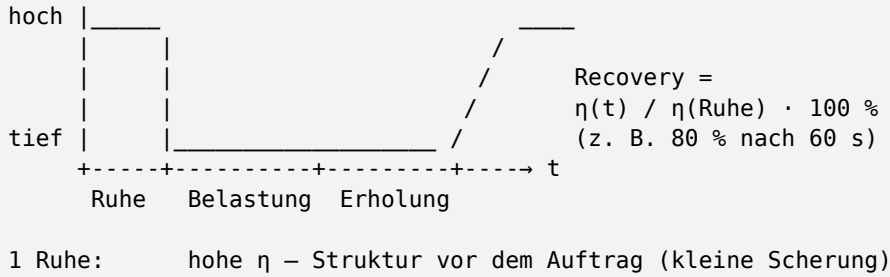
- newtonsch — η bleibt konstant (z. B. dünne Lösungen, reine Lösemittel).
- strukturviskos (pseudoplastisch) — η sinkt mit steigender Scherung, weil Pigment-/Bindemittelstrukturen aufbrechen.
- dilatant — η steigt mit der Scherung (selten, hochgefüllte Systeme).
- mit Fließgrenze — das System fließt erst oberhalb einer Mindest-Schubspannung.
- thixotrop — zeitabhängig: η sinkt unter Scherung und baut sich in Ruhe wieder auf.

## Thixotropie und ihre Messung

Beim Verarbeiten soll ein Lack dünnflüssig sein (gute Verteilung), in Ruhe standfest (kein Ablaufen, kein Absetzen) — Thixotropie ist der gewünschte Kompromiss. Auslaufbecher und einfache Fließkurven erfassen echte Thixotropie (die Zeitabhängigkeit) jedoch nicht. Am Rotationsrheometer gibt es zwei Wege: die ältere Fließkurve mit Hysteresisschleife (Scherung hoch- und wieder herunterfahren — bei Thixotropie liegt die Abwärtskurve unter der Aufwärtskurve, die eingeschlossene Fläche ist ein grobes, wenig reproduzierbares Maß) und den praxisnäheren 3-Intervall-Thixotropie-Test (3ITT). Der 3ITT ist ein Sprungversuch, der den Auftragsprozess nachbildet: 1. Ruheabschnitt bei sehr kleiner Scherung (Struktur vor dem Auftragen), 2. Belastungsabschnitt bei hoher Scherung (Strukturabbau beim Spritzen/Streichen), 3. Erholungsabschnitt wieder bei kleiner Scherung (Strukturregeneration über die Zeit). Ausgewertet wird die Strukturerholung (Recovery in %) nach einer definierten Zeit. Treffender als „Thixotropie“ sind die Begriffe Strukturabbau (unter Scherung) und Strukturerholung (in Ruhe). Je höher die Recovery nach kurzer Zeit, desto schneller wird der Lack wieder standfest (Schutz vor Ablaufen und Absetzen); baut sie sich zu langsam auf, drohen Läufer.

## 3ITT — Viskositäts-Zeit-Verlauf

So sieht der typische Verlauf der Viskosität η über der Zeit aus (schematisch):




1 Ruhe: hohe η – Struktur vor dem Auftrag (kleine Scherung)
2 Belastung: η bricht ein – Auftrag, z. B. Spritzen (hohe Scherung)
3 Erholung: η steigt wieder – Strukturaufbau in Ruhe → standfest

## Messgeräte

• Auslaufbecher (DIN EN ISO 2431) — Auslaufzeit in Sekunden; einfach, für newtonsche oder annähernd newtonsche Lacke; liefert eine Auslaufzeit unter definierten Bedingungen und dient vor allem als vergleichender Prozess-/QC-Wert, nicht direkt als absolute Viskosität.
• Kapillarviskosimeter (z. B. Ubbelohde) — kinematische Viskosität aus der Durchlaufzeit; für klare Lösungen.
• Kugelfallviskosimeter (Höppler) — Fallzeit einer Kugel im geneigten Rohr.
• Rotationsviskosimeter — misst Absolutwerte über einen Schergeschwindigkeitsbereich (Systeme Platte/Platte, Kegel/Platte, koaxiale Zylinder); damit lassen sich Fließkurven und Thixotropie erfassen.
• Krebs-Stormer-Viskosimeter — Rotationsverfahren mit KU-Skala, in der Bautenfarben-Praxis für Dispersionsfarben üblich; ebenfalls ein Relativwert.
• Fallstab-Viskosimeter — für pastöse Systeme, etwa Offset-Druckfarben (siehe L-142).

## Welches Gerät wofür — und was in den Prüfbericht gehört

Die Wahl folgt dem Zweck. Für die laufende Chargenkontrolle eines annähernd newtonschen Spritzlacks genügt der Auslaufbecher: ISO-Becher Nr. 4 nach DIN EN ISO 2431 bei (23,0 ± 0,5) °C; typische Spritzviskositäten dünn eingestellter Lacke liegen etwa zwischen 30 und 45 s — also im gültigen Auslaufzeitbereich von 30 bis 100 s; dicker eingestellte, z. B. streich- oder rollfähige Systeme liegen darüber. In der Praxis ist daneben der DIN-4-Becher der 1996 zurückgezogenen DIN 53211 (20 °C) verbreitet. Die beiden Becher sind trotz gleicher Düsenweite nicht deckungsgleich und lassen sich nicht als bloße Sekundenrelation ineinander umrechnen. Für strukturviskose und thixotrope Systeme — Dispersionsfarben, standfeste Decklacke, Spachtel — führt daran kein Weg vorbei: Es braucht ein Rotationsviskosimeter mit Fließkurve, weil ein einzelner Wert das Verhalten nicht abbildet. Für klare, annähernd newtonsche Lösungen — Lösemittel, Bindemittellösungen — ist das Kapillarviskosimeter das Verfahren der Wahl (Ubbelohde, DIN 51562); für strukturviskose Lacke ist es ungeeignet.

Unabhängig vom Gerät gilt: Eine Viskositätsangabe ohne Messbedingung ist wertlos. In den Prüfbericht gehören deshalb immer Temperatur (Lacke reagieren stark darauf — wenige Kelvin verändern die Auslaufzeit spürbar), Messverfahren mit Norm und Gerät beziehungsweise Becher und Düse, bei Rotationsmessung zusätzlich die Schergeschwindigkeit und das Messsystem, sowie Vorbehandlung und Wartezeit der Probe. Zwei Labore, die dieselbe Charge unterschiedlich messen, kommen sonst zu unterschiedlichen Urteilen über dieselbe gute Ware.

Die verfahrensspezifischen Viskositätsbereiche der Druckfarben — Offset, Flexo, Tiefdruck, Sieb, Inkjet — sind in L-142 zusammengestellt und werden hier nicht wiederholt.

## Umwelt und Sicherheit

Lösemitteldämpfe der Prüfflüssigkeit beachten (Flammpunkt, Absaugung). Reinigungslösemittel sparsam einsetzen und als Sonderabfall entsorgen; wässrige Prüfmuster nicht ungeklärt in die Kanalisation geben. Beim Rotationsviskosimeter auf sichere Befestigung des Messkörpers achten.

**Merksatz**

η = τ / γ̇. Lacke meist strukturviskos/thixotrop — dünn beim Verarbeiten, standfest in Ruhe. Auslaufbecher = Relativwert; Rotationsviskosimeter = Fließkurve. Echte Thixotropie (Strukturabbau/-erholung) misst der 3-Intervall-Test (3ITT).

**Stichwörter:** Viskosität, Schubspannung, Schergeschwindigkeit, newtonsch, strukturviskos, thixotrop, 3-Intervall-Thixotropie-Test, Strukturerholung, Recovery, Hysteresisschleife, dilatant, Fließgrenze, Auslaufbecher, Rotationsviskosimeter
*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur; DIN EN ISO 2431; DIN EN ISO 3219; DIN 53019; DIN 51562 (Ubbelohde); DIN 53015 (Kugelfall nach Höppler)*

## Übungsblatt Ü-178 — Musterlösungen

**Frage 1** (Verständnis, 8 Punkte)
Erklären Sie den Unterschied zwischen newtonschem, strukturviskosem und thixotropem Fließverhalten und nennen Sie je ein Beispiel aus der Lackpraxis.

**Newtonsch:** Die Viskosität ist unabhängig von der Scherung konstant; die Fließkurve ist eine Gerade durch den Ursprung. Beispiel: dünne Lösungen, reine Lösemittel.
**Strukturviskos:** Die Viskosität sinkt mit steigender Schergeschwindigkeit, weil Pigment-/Bindemittelstrukturen aufbrechen. Beispiel: viele pigmentierte Lacke und Dispersionsfarben.
**Thixotrop:** Zusätzlich zeitabhängig: unter Scherung dünnflüssig, in Ruhe baut sich die Struktur wieder auf. Beispiel: standfeste, nicht ablaufende Decklacke.
**Nutzen:** Strukturviskoses/thixotropes Verhalten verbindet gute Verarbeitbarkeit mit Standfestigkeit gegen Ablaufen und Absetzen.
*Bewertung: Die drei Typen werden klar unterschieden und die Zeitabhängigkeit der Thixotropie wird als entscheidendes Merkmal genannt.*

**Frage 2** (Berechnung, 8 Punkte)
Ein Lack hat die dynamische Viskosität $\eta = 2{,}5$ Pa·s und die Dichte $\rho = 1{,}25$ g/cm³. Berechnen Sie die kinematische Viskosität in mm²/s.

**Gegeben:** $\eta = 2{,}5$ Pa·s; $\rho = 1{,}25$ g/cm³ = 1250 kg/m³
**Ansatz:** $\nu = \eta / \rho$
**Rechnung:** $\nu = 2{,}5$ Pa·s / 1250 kg/m³ = 0,002 m²/s
**Umrechnung:** 0,002 m²/s · $10^6$ mm²/m² = 2000 mm²/s
**Antwortsatz:** Die kinematische Viskosität beträgt 2000 mm²/s.
*Bewertung: Die Dichte wird vor dem Einsetzen in SI-Einheiten umgerechnet und die Einheit m²/s korrekt in mm²/s überführt.*

**Frage 3** (Anwendung, 6 Punkte)
Für die Qualitätskontrolle eines thixotropen Decklacks soll die Viskosität geprüft werden. Warum ist ein Auslaufbecher hier ungeeignet und was setzen Sie stattdessen ein?

**Problem:** Der Auslaufbecher liefert nur einen einzelnen Relativwert bei einer bestimmten Scherung und ist auf annähernd newtonsche Flüssigkeiten zugeschnitten.
**Folge:** Bei thixotropem Verhalten hängt die Viskosität von Schergeschwindigkeit und Zeit ab — ein einzelner Auslaufwert bildet das nicht ab.
**Lösung:** Am Rotationsviskosimeter eine Fließkurve über einen Schergeschwindigkeitsbereich aufnehmen, die auch die Thixotropie erfasst. Für die Thixotropie selbst genügt die Hysteresisschleife nicht — sie ist nur ein grober, wenig reproduzierbarer Vergleichswert. Die Zeitabhängigkeit wird mit dem 3-Intervall-Thixotropie-Test (3ITT) gemessen und als Strukturerholung in Prozent nach definierter Zeit ausgewertet.
*Bewertung: Die Antwort begründet die Ungeeignetheit über die Zeit- und Scherabhängigkeit, wählt gezielt das passende Absolutmessgerät und erkennt, dass die Zeitabhängigkeit erst der 3ITT mit der Strukturerholung in Prozent erfasst.*

# L-179 · Moderne Rheologie — Oszillationsmessungen

*Speicher- und Verlustmodul, Amplituden- und Frequenzsweep*

**Prüfungsteil 1** · A 7.1

Bei der Oszillationsmessung wird der Lack mit einer kleinen periodischen Verformung belastet. Speichermodul G′ (elastischer Anteil) und Verlustmodul G″ (viskoser Anteil) zeigen, ob sich die innere Struktur eher fest oder flüssig verhält — etwas, das eine einzelne Viskositätszahl nicht verrät.

## Was die Oszillationsmessung misst

Bei der klassischen Viskositätsmessung wird der Lack fortlaufend geschert. Bei der Oszillationsmessung dagegen wird eine kleine, periodische Verformung aufgebracht — der Lack wird nur leicht hin- und herbewegt. Die Probe antwortet mit einer periodischen Schubspannung, die gegenüber der Verformung phasenverschoben ist. Aus dieser Phasenverschiebung liest man ab, ob sich der Lack unter kleiner Belastung eher elastisch (wie ein Netzwerk) oder viskos (wie eine Flüssigkeit) verhält. Aufschlussreich ist das besonders bei thixotropierten und hochgefüllten Systemen, Dispersionsfarben, mit pyrogener Kieselsäure strukturierten Lacken sowie bei reaktiven Bindemitteln während der Härtung.

## Speicher- und Verlustmodul

```
Die Antwort der Probe wird in zwei Anteile zerlegt:

Speichermodul G′ – der elastische Anteil: die Energie, die die Probe bei der Verformung
   speichert und wieder zurückgibt. Hohes G′ → die innere Struktur wirkt wie ein
   elastisches Netzwerk.

Verlustmodul G″ – der viskose Anteil: die Energie, die während der Verformung dissipiert
   (in Wärme umgewandelt wird). Hohes G″ → das flüssige Verhalten überwiegt.

G′ > G″  →  überwiegend elastischer Antwortanteil unter den gewählten
   Oszillationsbedingungen (spricht für eine stärkere Strukturkomponente, aber nicht allein
   für alle Verarbeitungseigenschaften)
G″ > G′  →  viskoses Verhalten überwiegt (fließfähig)

Verlustfaktor:  tan δ = G″ / G′   (tan δ < 1 elastisch, = 1 gleich, > 1 viskos)
```

## Warum das für Lacke zählt

Eine Viskositätsmessung beantwortet „Wie zäh ist der Lack bei dieser Schergeschwindigkeit?“. Die Oszillationsmessung beantwortet „Wie stabil ist die innere Struktur gegenüber einer kleinen Belastung?“. Zwei Lacke können bei gleicher Schergeschwindigkeit dieselbe scheinbare Viskosität haben und sich beim Lagern und Auftragen doch völlig unterschiedlich verhalten: Ein Lack mit G′ ≫ G″ ist stark strukturiert — gutes Standvermögen, geringe Ablaufneigung, bei zu viel Struktur aber schlechterer Verlauf. Ein Lack mit G″ > G′ ist flüssigkeitsartiger — besserer Verlauf möglich, aber höhere Ablaufneigung. Ein Netzwerk aus pyrogener Kieselsäure ist ein typischer Grund für ein ausgeprägtes G′.

VERTIEFUNG – ÜBER DEM PRÜFUNGSSTOFF

## Amplitudensweep — der LVE-Bereich

Beim Amplitudensweep wird die Deformationsamplitude $\gamma_0$ bei konstanter Frequenz schrittweise erhöht und G′ und G″ werden beobachtet. Bei kleiner Amplitude bleibt die Struktur erhalten, G′ und G″ sind annähernd konstant — das ist der linear-viskoelastische Bereich (LVE, Linear Viscoelastic Region). Wird die Amplitude zu groß, bricht das innere Netzwerk auf und G′ (und/oder G″) ändert sich deutlich. Praktisch entscheidend: Für einen aussagekräftigen Frequenzsweep muss eine Amplitude innerhalb des LVE-Bereichs gewählt werden — sonst misst man an einer bereits zerstörten Struktur.

VERTIEFUNG — ÜBER DEM PRÜFUNGSSTOFF

### Frequenzsweep und Zeitmessung

Beim Frequenzsweep bleibt die Amplitude klein (im LVE-Bereich) und die Frequenz wird verändert (z. B. 0,1 → 1 → 10 → 100 rad/s). Niedrige Frequenz entspricht vereinfacht langsamer, hohe Frequenz schneller Belastung — so erkennt man, ob der Lack bei langsamer oder schneller Beanspruchung stärker strukturiert reagiert. Bei konstanter kleiner Amplitude und Frequenz lässt sich G′(t) und G″(t) über die Zeit verfolgen: Strukturaufbau nach dem Scheren, physikalische Filmbildung oder chemische Vernetzung werden sichtbar. Beim 2K-PUR steigt G′ nach dem Mischen an, während der Film vom flüssigen in den vernetzten Zustand übergeht. Der Gelpunkt darf dabei nicht pauschal als „G′ = G″“ definiert werden — das hängt von Messbedingungen und Auswertung ab.

VERTIEFUNG — ÜBER DEM PRÜFUNGSSTOFF

### Komplexer Modul — Vertiefung

Speicher- und Verlustmodul lassen sich zum komplexen Schermodul zusammenfassen: G* = G′ + i·G″, mit dem Betrag |G*| = √(G′² + G″²). Für die tägliche Beurteilung genügen jedoch G′, G″ und tan δ = G″ / G′.

**Merksatz**

G′ speichert (elastisch), G″ verliert (viskos); tan δ = G″ / G′. G′ > G″ → im Messbereich überwiegend elastisch (Hinweis auf Struktur; Standfestigkeit zusätzlich praktisch prüfen), G″ > G′ → fließfähig. Vor dem Frequenzsweep den LVE-Bereich per Amplitudensweep bestimmen. G′(t)/G″(t) macht Strukturaufbau und Vernetzung sichtbar.

**Stichwörter:** Oszillationsrheologie, Speichermodul G′, Verlustmodul G″, tan δ, LVE-Bereich, Amplitudensweep, Frequenzsweep, viskoelastisch, komplexer Modul, Strukturaufbau
*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; Mezger, Das Rheologie-Handbuch; DIN EN ISO 6721-1; DIN EN ISO 3219*

## Übungsblatt Ü-179 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**
Bei einem Amplitudensweep bleiben G′ und G″ zunächst konstant; ab einer bestimmten Amplitude fällt G′ deutlich ab. Was bedeutet das, und welche Folgerung ziehen Sie für einen anschließenden Frequenzsweep?

**LVE-Bereich:** Solange G′ und G″ konstant bleiben, ist die Probe im linear-viskoelastischen Bereich (LVE) — die kleine Belastung verändert die innere Struktur noch nicht wesentlich.
**Strukturabbau:** Der Abfall von G′ zeigt, dass die Amplitude zu groß wird und das innere Netzwerk aufzubrechen beginnt.
**Folgerung:** Für den Frequenzsweep ist eine Amplitude innerhalb des LVE-Bereichs zu wählen, sonst misst man an einer bereits geschädigten Struktur.
*Bewertung: Der LVE-Bereich wird als Bereich konstanter Moduln erkannt, der G′-Abfall als beginnender Strukturabbau gedeutet und die Amplitudenwahl im LVE für den Frequenzsweep abgeleitet.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**
Bei einer Oszillationsmessung ergeben sich G′ = 180 Pa und G″ = 60 Pa. a) Welcher Anteil überwiegt? b) Berechnen Sie tan δ. c) Was bedeutet das für das Verhalten des Lacks?

**Vergleich:** G′ = 180 Pa > G″ = 60 Pa — der elastische Anteil überwiegt.
**tan δ:** tan δ = G″ / G′ = 60 / 180 = 0,33
**Deutung:** Mit tan δ = 0,33 (< 1) zeigt der Lack unter diesen Messbedingungen ein deutlich strukturiertes, elastisch geprägtes Verhalten — gutes Standvermögen, geringe Ablaufneigung.
*Bewertung: Der elastische Anteil wird aus G′ > G″ erkannt, tan δ = G″/G′ = 0,33 korrekt berechnet und als strukturiertes Verhalten gedeutet.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**

Zwei thixotropierte Lacke haben bei 10 $s^{-1}$ nahezu dieselbe Viskosität. Lack A hat jedoch ein deutlich höheres G′ als Lack B. Welche Aussage ist möglich?

**Lack A:** Lack A besitzt unter den Messbedingungen die stärker ausgeprägte elastische/strukturierte Komponente — tendenziell höheres Standvermögen und geringere Ablaufneigung.

**Lack B:** Lack B verhält sich stärker flüssigkeitsartig — möglicher besserer Verlauf, aber höhere Ablaufneigung.

**Vorbehalt:** Aus G′ allein darf nicht auf alle Verarbeitungseigenschaften geschlossen werden; die Aussage gilt für die gewählten Messbedingungen.

*Bewertung: Das höhere G′ wird als stärkere Struktur/Standfestigkeit gedeutet und gegen die Ablaufneigung abgewogen, mit dem Vorbehalt zur Übertragbarkeit.*

# L-180 · Körnigkeit und Teilchengrößenmessung

*Grindometer, moderne Verfahren und Flockulation*

**Prüfungsteil 1** · A 7.1

Nach dem Dispergieren werden Körnigkeit und Teilchengröße geprüft. Das Grindometer liefert eine schnelle Betriebskontrolle; moderne Verfahren erfassen die ganze Verteilung. Flockulation zeigt eine unerwünschte Zusammenlagerung an.

## Körnigkeit — Grindometer

Das Grindometer nach DIN EN ISO 1524 hat eine keilförmig auslaufende Rille. Eine Rakel zieht die Probe aus; an der Stelle, an der zuerst Körner oder Streifen auftreten, liest man die maximale Teilchengröße auf einer µm- bzw. Hegman-Skala ab. Das ist eine einfache und schnelle Betriebsmethode zur Kontrolle des Ausreibegrades.

Richtig abgelesen wird der Wert dort, wo eine zusammenhängende Streifenbildung beginnt — nicht beim ersten Einzelkorn, das auch ein Schmutzpartikel sein kann. Der Wert ist eine Obergrenze, keine Verteilung: Er sagt nichts darüber, wie viele Teilchen dieser Größe vorliegen. Bei plättchenförmigen Pigmenten (Aluminium, Perlglanz) ist die Methode nur eingeschränkt aussagefähig, weil sich die Plättchen in der Rille ausrichten. Die Anwendung auf Druckfarben ist in L-142 beschrieben.

## Moderne Verfahren

- Laserbeugung — erfasst Teilchengrößenverteilungen über einen breiten Messbereich, sofern Brechungsindex, Dispergierung und Messmodell passend gewählt sind.
- dynamische Lichtstreuung / Photonenkorrelationsspektroskopie (PCS) — für sehr feine Teilchen (nm bis µm) aus der Brownschen Bewegung.
- Elektronenmikroskopie (TEM) — zeigt Form und Größe direkt und erlaubt die Identifizierung.
- Coulter-Verfahren — zählt Teilchen und misst ihre Größe über die Widerstandsänderung in einer Kapillare.

## Flockulation

Flockulation ist die unerwünschte Zusammenlagerung bereits dispergierter Teilchen — durch Van-der-Waals-, Wasserstoffbrücken- oder ionische Wechselwirkungen. Folgen sind Farbschwächung und ein verändertes Aussehen. Gezielte Ausschwimm- oder Flockulationseffekte (etwa für Struktur- oder Effektlacke) sind bewusste Sonderfälle.

## Bedeutung

Teilchengröße und Agglomerationszustand beeinflussen Deckvermögen, Farbstärke, Glanz und Lagerstabilität; zusätzlich wirken Pigmenttyp, Brechungsindex, Oberfläche und Formulierung. Zu grobe Teilchen oder Agglomerate stören besonders bei hochglänzenden Decklacken. Daher ist die Teilchengröße eine zentrale Prüfgröße direkt nach dem Dispergieren. Aus der Teilchengröße folgt die spezifische Oberfläche: Für kugelige, nichtporöse Teilchen gilt näherungsweise $S_m = 6 / (\rho \cdot d)$ — mit ρ in g/cm³ und d in µm ergibt sich $S_m$ in m²/g (siehe L-44, L-45). Je feiner das Pigment, desto größer die Oberfläche und desto mehr Bindemittel und Netzmittel braucht die Benetzung.

## Umwelt und Sicherheit

Pigment- und Füllstoffstäube nicht einatmen — Nassdispergierung bevorzugen, Absaugung nutzen. Messgeräte mit möglichst wenig Lösemittel reinigen und Reste als Sonderabfall entsorgen.

**Merksatz**

Grindometer = schnelle Körnigkeitsprüfung (µm/Hegman); Laserbeugung/PCS/TEM/Coulter = Verteilung; Flockulation = Zusammenlagerung → Farbschwächung. Teilchengröße steuert Deckung, Glanz, Stabilität.

**Stichwörter:** Körnigkeit, Grindometer, Hegman, Teilchengröße, Laserbeugung, PCS, TEM, Coulter, Flockulation, Ausreibegrad

## Übungsblatt Ü-180 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Wozu dient das Grindometer und welche modernen Verfahren gehen darüber hinaus?

**Grindometer:** Schnelle Betriebskontrolle des Ausreibegrades: In einer keilförmigen Rille zeigt sich die Stelle, ab der Körner/Streifen auftreten — die maximale Teilchengröße auf µm-/Hegman-Skala.
**Grenze:** Es liefert nur die grobe Obergrenze, nicht die vollständige Verteilung.
**Moderne Verfahren:** Laserbeugung und dynamische Lichtstreuung (PCS) für die Verteilung, Elektronenmikroskopie (TEM) für Form und Größe, Coulter-Verfahren für Zählung/Größe.
**Nutzen:** Diese Verfahren charakterisieren die gesamte Teilchengrößenverteilung deutlich genauer.
*Bewertung: Die Rolle des Grindometers als schnelle Betriebskontrolle und die Ergänzung durch verteilungsauflösende Verfahren werden klar getrennt.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**

Ein kugelförmiges Pigment hat den mittleren Durchmesser d = 0,30 µm und die Dichte ρ = 4,0 g/cm³. Berechnen Sie die massebezogene spezifische Oberfläche (Kugelnäherung $S_m = 6 / (\rho \cdot d)$).

**Ansatz:** $S_m = 6 / (\rho \cdot d)$
**Einheiten:** $d = 0{,}30\ \mu m = 0{,}30 \cdot 10^{-6}\ m = 0{,}30 \cdot 10^{-4}\ cm$; $\rho = 4{,}0\ g/cm^3$
**Rechnung:** $S_m = 6 / (4{,}0\ g/cm^3 \cdot 0{,}30 \cdot 10^{-4}\ cm) = 6 / (1{,}2 \cdot 10^{-4})\ cm^2/g = 5{,}0 \cdot 10^4\ cm^2/g$
**Umrechnung:** $5{,}0 \cdot 10^4\ cm^2/g = 5{,}0\ m^2/g$
**Antwortsatz:** Die spezifische Oberfläche beträgt rund 5 m²/g — je feiner das Pigment, desto größer die Oberfläche und desto mehr Bindemittel/Netzmittel wird benötigt.
*Bewertung: Die Kugelnäherung wird korrekt eingesetzt, die Einheiten sauber geführt und cm²/g in m²/g überführt.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**

Ein hochglänzender Decklack wirkt matt und farbschwach. Grindometer und Erfahrung deuten auf Flockulation. Was ist passiert und was tun Sie?

**Ursache:** Bereits dispergierte Teilchen haben sich wieder zusammengelagert (Flockulation) — die wirksame Teilchengröße steigt.
**Folge:** Größere Aggregate streuen anders: Glanz sinkt, die Farbstärke nimmt ab.
**Maßnahme:** Netz-/Dispergiermittel und Rezeptur prüfen, ausreichend dispergieren/stabilisieren; Grindometer und ggf. Teilchengrößenmessung zur Kontrolle heranziehen.
*Bewertung: Flockulation wird als Ursache erkannt und mit den optischen Folgen sowie einer sinnvollen Abhilfe verknüpft.*

Kapitel 13

# Recht, Umwelt und Sicherheit

# L-168 · Emissionsminderung und Umweltschutz

*Drei Wege zu weniger Lösemittel und der doppelte Nutzen des Korrosionsschutzes*

**Prüfungsteil 2** · A 10

Emissionsarme Lacktechnologien sind in vielen Anwendungen Stand der Technik; die technisch und wirtschaftlich geeignete Lösung hängt von System und Anwendung ab. Korrosionsschutz kann durch Verlängerung der Nutzungsdauer Ressourcen und Emissionen einsparen und damit zum Umweltschutz beitragen; die Gesamtbilanz hängt vom gesamten Lebenszyklus ab.

## Ausgangslage

Lacke haben in der öffentlichen Meinung häufig ein negatives Image, weil schützende und dekorative Beschichtungen in der Vergangenheit meist lösemittelhaltig appliziert wurden. Für Anlagen oberhalb bestimmter Lösemittel-Verbrauchsschwellen ist eine Minderung der Lösemittelemissionen vorgeschrieben — nach der 31. BImSchV unabhängig davon, ob die Anlage genehmigungsbedürftig ist, für genehmigungsbedürftige Anlagen gilt daneben die TA Luft, im VOC-Bereich geht die 31. BImSchV ihr aber vor (siehe L-111); darüber hinaus ist sie ein aktiver Beitrag zum Umweltschutz.

## Drei Wege bei der Formulierung

- High-Solid-Lacke — hoher nichtflüchtiger Anteil und damit geringer Lösemittelanteil, z. B. der unten beschriebene High-Solid-2K-PU-Klarlack mit rund 65 Masse-%. Für den Begriff gibt es keine genormte Definition: Die Richtlinie VdL-RL 08 regelt nur, wie Festkörper (Masseanteil nach DIN EN ISO 3251) und Festkörpervolumen (Volumenanteil nach DIN EN ISO 3233) zu ermitteln sind, nicht ab welchem Wert ein Lack High Solid heißt. Als Faustwert gilt im Industrie- und Korrosionsschutzlack ein nichtflüchtiger Anteil ab etwa 70 Masse-% (Ultra-High-Solid ab etwa 78 %); in der Automobil-Serienlackierung wird die Schwelle schon bei etwa 55 % nfA gezogen, in der Fahrzeug-Reparaturlackierung bei 45 bis 50 % der spritzfertigen Mischung. Beim Vergleich zweier Angaben immer drei Dinge mitprüfen: Masse-% oder Volumen-%, Lieferzustand oder spritzfertig verdünnt, und aus welchem Marktsegment die Zahl stammt.
- Ersatz organischer Lösemittel durch Wasser — Wasserlacke und Dispersionsfarben.
- Lösemittelfreie Lacke — lösemittelfreie 2K-Systeme, strahlungshärtende Beschichtungen, Pulverlacke.

## Zusätzlich bei der Applikation

Über die Formulierung hinaus lässt sich die Emission durch Verfahren mit höherem Auftragswirkungsgrad senken, etwa durch elektrostatische Lackapplikation, oder durch nachgeschaltete Lösemitteladsorption. Für den Materialbedarf gilt: Theoretische Ergiebigkeit $A = 10 \cdot VFK / TSD$ (A in m²/l, VFK = Volumenfestkörper in %, TSD = Trockenschichtdicke in µm); praktischer Bedarf = theoretischer Bedarf / Auftragswirkungsgrad — Verluste durch Overspray erhöhen den Bedarf.

## Gesetzliche VOC-Grenzwerte

Zwei Regelungsebenen greifen ineinander. Anlagenseitig begrenzen die 31. BImSchV und die TA Luft die Lösemittelemission größerer Verarbeitungsbetriebe. Produktseitig deckelt die ChemVOCFarbV — die deutsche Umsetzung der EU-Decopaint-Richtlinie 2004/42/EG — den VOC-Gehalt dekorativer Bau-, Holz- und Metallbeschichtungen sowie von Fahrzeugreparaturlacken schon beim Inverkehrbringen. Zwölf Produktkategorien werden getrennt nach Wasserbasis (Wb) und Lösemittelbasis (Lb) geführt; die verschärfte Stufe II gilt seit 2010, angegeben in Gramm VOC je Liter gebrauchsfertiges Produkt. Beispiele: eine matte Innenwandfarbe auf Wasserbasis höchstens 30 g/l, ein lösemittelbasierter Holz- und Metalllack 300 g/l, ein Zweikomponenten-Speziallack bis 500 g/l. Für die jeweils erfassten Produkte gelten die Kennzeichnungs- und Informationspflichten der einschlägigen Vorschriften; konkrete Angaben richten sich nach Produktkategorie und Rechtslage.

## Korrosionsschutz als Umweltschutzmaßnahme

Die zweite umweltschützende Wirkung von Beschichtungen ist auf den ersten Blick nicht sichtbar. Die atmosphärische Korrosion von Eisen kehrt im Grunde seine Herstellung um: Beim Hochofenprozess werden Eisenerz und Koks verbraucht und Kohlendioxid emittiert. Korrosionsschutz verlängert die Nutzungsdauer korrosionsanfälliger Werkstoffe, schont damit Rohstoff- und Energieressourcen und entlastet die Umwelt.

Eindrucksvoll wird das am Verhältnis: Der Lackverbrauch eines Fahrzeugs hängt von Aufbau, Schichtdicken, Applikationsverfahren und Verlusten ab; als Größenordnung gilt: Bei einem rund 1000 kg schweren Auto liegt er oft bei etwa 15 bis 25 kg. Eine so vergleichsweise geringe Materialmenge kann dabei eine deutliche Erhöhung der Nutzungsdauer bewirken.

## Ganzheitliche Betrachtung

Für die ökologische Bewertung eines Lacksystems müssen alle Fertigungsschritte einbezogen werden: Ressourcenaufbereitung wie die Erdölgewinnung, Herstellung chemischer Grundstoffe und Zwischenprodukte, Herstellung der Lackrohstoffe, Lackherstellung, Applikation und Filmbildung, Nutzung sowie schließlich Entsorgung beziehungsweise Recycling der beschichteten Objekte. Ein Lack, der bei der Herstellung mehr Ressourcen kostet, kann sich über eine sehr lange Schutzdauer trotzdem lohnen.

## Rohstoffbeispiel: ein flüchtiges Lösemittel ersetzen

In einem lösemittelhaltigen Alkydlack soll ein Teil des schnell verdunstenden Lösemittels — etwa ein leichtflüchtiger Ester — durch ein langsameres, höhersiedendes Lösemittel ersetzt werden, um den VOC-Beitrag je Liter zu senken. Der Austausch verändert aber nicht nur die Zahl im Datenblatt. Die Verdunstungskurve verschiebt sich, der Nassfilm bleibt länger offen, Ablüft- und Trocknungszeit steigen, und mit ihnen ändern sich Verlauf, Läuferneigung und die Zwischenhaftung beim Überlackieren. Ein Lacklaborant bewertet einen solchen Austausch deshalb immer an drei Punkten gleichzeitig: Verdunstungsverhalten (Ablüftzeit, Klebfreizeit, Staubtrockenzeit), Filmbildung (Verlauf, Läufer, Trübung, Blasen) und fertige Oberfläche (Glanz, Haftung, Härteentwicklung). Erst wenn diese drei stimmen, ist die VOC-Minderung praktisch nutzbar.

## Fertiglack-Beispiel: VOC-Minderung an einem 2K-PU-Klarlack

Ein konventioneller 2K-PU-Klarlack (Acrylatpolyol plus HDI-Polyisocyanat, Spritzapplikation, Trockenschichtdicke typisch 40 bis 60 µm) soll auf eine High-Solid-Variante umgestellt werden. Der Festkörper steigt von rund 45 auf etwa 65 Masse-%, der VOC-Gehalt sinkt entsprechend. Damit ist die Aufgabe jedoch nicht gelöst, denn mit dem Festkörper steigt die Viskosität: Die Spritzviskosität muss weiterhin im üblichen Fenster liegen — für dieses System etwa 18 bis 25 s, gemessen im DIN-4-Becher nach der zurückgezogenen DIN 53211 bei 20 °C —, sonst zerstäubt der Lack nicht sauber. Der Wert gilt nur für diesen Becher bei dieser Temperatur; DIN-4- und ISO-4-Zeiten lassen sich nicht ineinander umrechnen (siehe L-146, L-178). Erreicht wird das über niedrigviskose Polyole mit engerer Molmassenverteilung, nicht über mehr Lösemittel — sonst wäre der Effekt sofort wieder aufgezehrt. Zu prüfen sind danach Spritzbild und Zerstäubung, Verlauf und Läuferneigung bei gleicher Schichtdicke, Ablüft- und Trocknungsverhalten, die Topfzeit sowie Endhärte und Chemikalienbeständigkeit des Films. Eine VOC-Minderung ist erst dann eine echte Verbesserung, wenn das gesamte Eigenschaftsprofil erhalten bleibt.

**Merksatz**

Drei Wege in der Formulierung senken VOC: High-Solid, Wasserlack, lösemittelfrei (2K, UV, Pulver). Dazu kommen ein hoher Auftragswirkungsgrad bei der Applikation und, wo nötig, die Abgasreinigung. Jede VOC-Minderung immer gegen Viskosität, Spritzbild, Verlauf, Trocknung und Endhärte gegenprüfen. Und: Korrosionsschutz ist selbst eine Umweltschutzmaßnahme, weil er die Nutzungsdauer verlängert.

**Stichwörter:** Emission, VOC, TA Luft, High-Solids, Wasserlack, Dispersionsfarbe, lösemittelfrei, Pulverlack, strahlungshärtend, Korrosionsschutz, Ökobilanz, Auftragswirkungsgrad, ChemVOCFarbV, Decopaint-Richtlinie, 31.

*Quellen: Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur; Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; ChemVOCFarbV; EU-Richtlinie 2004/42/EG; 31. BImSchV; TA Luft; VdL-RL 08; DIN EN ISO 3251; DIN EN ISO 3233; DIN EN ISO 2431*

## Übungsblatt Ü-168 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 7 Punkte)**
Nennen Sie die drei Wege, die Emission organischer Lösemittel über die Lackformulierung zu senken, und geben Sie zu jedem Beispiele.

**Erster Weg:** High-Solid-Lacke, also Lacke mit hohem nicht flüchtigem Anteil und damit geringem Anteil an Lösemitteln. Eine genormte Definition gibt es nicht: Im Industrie- und Korrosionsschutzlack gilt als Faustwert ein nichtflüchtiger Anteil ab etwa 70 Masse-%, in der Automobil-Serienlackierung schon ab etwa 55 %. Beispiel: der im Blatt beschriebene High-Solid-2K-PU-Klarlack mit rund 65 Masse-% Festkörper — er liegt genau in diesem Übergangsbereich.

**Zweiter Weg:** Ersatz organischer Lösemittel durch Wasser. Beispiele: Wasserlacke und Dispersionsfarben.

**Dritter Weg:** Lösemittelfreie Lacke. Beispiele: lösemittelfreie 2K-Systeme, strahlungshärtende Beschichtungen und Pulverlacke.

**Ergänzung:** Über die Formulierung hinaus lässt sich die Emission bei der Applikation durch Verfahren mit höherem Auftragswirkungsgrad senken, etwa elektrostatisches Spritzen, oder nachgeschaltet durch Lösemitteladsorption.

*Bewertung: Alle drei Formulierungswege (High-Solids, Wasser statt organischer Lösemittel, lösemittelfrei) werden korrekt benannt und jeweils mit Beispielen belegt. Die Ergänzung zur Applikation ist nicht gefordert, zeigt aber, dass die Trennung Formulierung/Applikation verstanden ist.*

**Frage 2** **(Berechnung, 9 Punkte)**
Eine Fläche von 250 m² soll mit einer Trockenschichtdicke von 60 µm beschichtet werden. Der Lack hat einen Volumenfestkörper von 52 %, der Auftragswirkungsgrad beträgt 60 %. Berechnen Sie den Materialbedarf.

**Schritt 1 — theoretische Ergiebigkeit:** A = 10 · VFK / TSD = 10 · 52 / 60 = 8,67 m²/l

**Schritt 2 — theoretischer Bedarf:** V = 250 m² / 8,67 m²/l = 28,84 l

**Schritt 3 — Auftragsverluste:** Bei 60 % Auftragswirkungsgrad gelangen nur 60 % des Lacks auf das Werkstück: V(real) = 28,84 l / 0,60 = 48,1 l

**Antwortsatz:** Es werden rund 48 Liter Lack benötigt.

**Hinweis:** Die theoretische Ergiebigkeit berücksichtigt keine Verluste durch Overspray. Ohne Einrechnen des Wirkungsgrades wäre der Bedarf um rund 40 % zu niedrig angesetzt worden.

*Bewertung: Der Auftragswirkungsgrad wird korrekt als Division und nicht als Multiplikation angesetzt — eine klassische Fehlerquelle. Der Hinweis beziffert die Folge eines solchen Fehlers.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**
Erläutern Sie, inwiefern Korrosionsschutz eine Umweltschutzmaßnahme darstellt.

**Ausgangspunkt:** Die atmosphärische Korrosion von Eisen kehrt im Grunde seine Herstellung um.

**Ressourcenbezug:** Bei der Eisenherstellung im Hochofenprozess werden Eisenerz und Koks verbraucht und das Treibhausgas Kohlendioxid emittiert. Jedes durch Korrosion verlorene Bauteil muss durch neues ersetzt werden, was diesen Aufwand erneut auslöst.

**Wirkung des Korrosionsschutzes:** Korrosionsschutz verlängert die Nutzungsdauer korrosionsanfälliger Werkstoffe. Damit werden Rohstoff- und Energieressourcen geschont und die Umwelt entlastet.

**Verhältnis:** Besonders deutlich wird das am Beispiel eines Automobils: Zur Lackierung eines 1000 kg schweren Fahrzeugs werden nur 15 bis 25 kg Lack benötigt — bei einer deutlichen Erhöhung der Nutzungsdauer.

*Bewertung: Die Argumentation über die Umkehrung des Herstellungsprozesses ist der Kern der Antwort. Das Mengenverhältnis am Schluss macht das Argument greifbar.*

# L-169 · High-Solid-Decklack

*Weniger Lösemittel durch mehr Festkörper*

**Prüfungsteil 1** · A 9

High-Solid-Lacke (HS) senken die Lösemittelemission, indem sie einen erhöhten Anteil nicht flüchtiger Bestandteile haben. Eine niedrigere Molmasse kann bei vergleichbarer Polymerchemie die Lösungsviskosität senken; Polymerarchitektur, Konzentration, Lösemittel und Wechselwirkungen beeinflussen die Viskosität ebenfalls, und zusätzlich werden Reaktivität, Funktionalität und Rezeptur angepasst.

## Was High-Solids sind

High-Solids sind Beschichtungsstoffe mit erhöhtem Festkörperanteil zur Emissionsminderung. In der Lacktechnik-Literatur ist die Abstufung Low-Solids (<30 %), Normal-Solids (30–60 %), Medium-Solids (60–70 %) und High-Solids (>70 %) gebräuchlich, jeweils als nichtflüchtiger Anteil in Masse-%. Diese Staffel ist eine Konvention, keine Norm — andere Marktsegmente ziehen die Grenze anders (siehe L-168). Der Ansatz gehört zu den Wegen der Lösemittelreduktion, neben Wasserlacken, Pulverlacken und strahlenhärtenden Systemen (siehe L-168).

## Fertiglack-Rechnung: Was bedeutet 70 % Festkörper?

Beispiel: 1,00 kg Lack mit 70 Masse-% nichtflüchtigem Anteil enthält theoretisch 700 g nichtflüchtige Bestandteile. Bei 45 % wären es nur 450 g — der HS-Lack liefert bei gleicher Applikationsmenge rund 56 % mehr nichtflüchtige Substanz. Das erklärt anschaulich, warum HS-Systeme bei geeigneter Applikation mehr Trockenschicht pro Nassfilm liefern können. Voraussetzung: Der Volumenfestkörper muss ebenfalls hoch sein (nicht nur Massefestkörper prüfen, wenn Dichte von Lösemittel und Bindemittel stark abweichen).

**Merksatz**

Zu hohe Viskosität kann Spritzbild und Verlauf verschlechtern; zu geringe Viskosität kann Ablaufen und unzureichende Schichtbildung verursachen. Ein HS-Lack mit niedrig eingestellter Viskosität (durch Lösemittelzugabe) verliert seinen Emissionsvorteil. Die Einstellung von Festkörper, Viskosität und Applikationsparametern muss systemspezifisch optimiert werden — pauschal ist High-Solid nicht besser, nur lösemittelärmer bei richtiger Verarbeitung.

## Wie man den Festkörper erhöht

Um den Festkörper bei gleicher Verarbeitungsviskosität zu erhöhen, wird häufig die Molmasse des Bindemittels gesenkt (geringere Eigenviskosität). Bei einer Molmassenabsenkung kann eine angepasste Funktionalität erforderlich sein, um die gewünschte Vernetzungsdichte und das Eigenschaftsniveau zu erreichen; die optimale Kombination ist systemabhängig. Typisch ist ein OH-Polyacrylat, das mit Polyisocyanat vernetzt.

## Festkörperbestimmung und VOC

Der nichtflüchtige Anteil wird über den Massenvergleich von Lack und Trockenfilm bestimmt: FK (%) = Masse Trockenfilm · 100 / Masse Beschichtungsstoff (Ausheizen im Ofen). VOC steht für flüchtige organische Verbindungen; nach Decopaint-Richtlinie/ChemVOCFarbV zählt dazu jede organische Verbindung mit einem Siedepunkt bis 250 °C bei Normaldruck. Der VOC-Gehalt ist die zentrale Emissionskennzahl.

## Applikation

HS-Lacke lassen sich mit den üblichen Verfahren verarbeiten; ein höherer Festkörper kann bei gleicher Applikationsbedingung zu höherer Schichtdicke beitragen — die Läuferneigung hängt jedoch vom gesamten rheologischen und applikativen System ab, daher Applikationsparameter anpassen. Emissionsarm sind auch Sonderverfahren: die Hochdruckspritzung mit überkritischem Kohlenstoffdioxid (ersetzt teilweise Lösemittel) sowie molchbare Leitungen, die sich beim Produktwechsel spülmittelarm reinigen lassen.

### Umwelt und Sicherheit

High-Solids senken Emissionen, enthalten aber weiterhin Lösemittel — lüften und Grenzwerte beachten. Der Ansatz steht im Zeichen von „Responsible Care“ (freiwillige Selbstverpflichtung der Branche zu Umwelt-, Gesundheits- und Sicherheitsschutz). Bei Isocyanat-Vernetzern gelten die üblichen Schutzmaßnahmen (Sensibilisierung).

**Merksatz**

High-Solid = mehr Festkörper, weniger Lösemittel. Erreicht durch niedrigere Molmasse, die Funktionalität wird bei Bedarf angepasst; FK über Massenvergleich, VOC als Emissionsmaß. Applikationsverhalten (Schichtdicke, Ablaufen) systemspezifisch einstellen — emissionsarm, aber nicht lösemittelfrei.

**Stichwörter:** High-Solid, Festkörper, VOC, Emissionsminderung, Molmasse, Funktionalität, überkritisches CO2, molchbare Leitung, Responsible Care, Läuferneigung
*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; Müller/Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur*

## Übungsblatt Ü-169 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Was sind High-Solid-Lacke, und wie erhöht man den Festkörper bei gleicher Verarbeitungsviskosität?

**High-Solid:** Beschichtungsstoffe mit erhöhtem nichtflüchtigem Anteil (üblich >70 %) zur Emissionsminderung.

**Festkörper erhöhen:** Molmasse des Bindemittels senken (geringere Eigenviskosität) und bei Bedarf die Funktionalität anpassen, damit Vernetzungsdichte/Beständigkeit erreicht werden — die optimale Kombination ist systemabhängig.

*Bewertung: Definition und der Molmasse-Funktionalitäts-Zusammenhang werden korrekt erklärt.*

**Frage 2** **(Berechnung, 6 Punkte)**

Aus 15 g Beschichtungsstoff bleiben nach dem Ausheizen 12 g Trockenfilm. Berechnen Sie den Festkörperanteil.

**Ansatz:** FK (%) = Masse Trockenfilm · 100 / Masse Beschichtungsstoff.

**Rechnung:** FK = 12 · 100 / 15 = 80 %.

*Bewertung: Der Festkörper wird korrekt aus dem Massenvergleich bestimmt.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**

Nennen Sie zwei emissionsarme Applikationsbesonderheiten und wofür VOC steht.

**Applikation:** Spritzen mit überkritischem CO2 (ersetzt teils Lösemittel) und molchbare Leitungen (spülmittelarmer Produktwechsel).

**VOC:** Flüchtige organische Verbindungen — die zentrale Emissionskennzahl.

*Bewertung: Emissionsarme Verfahren und der VOC-Begriff werden erkannt.*

# L-170 · Sicherheitstechnische Kenndaten

*Flammpunkt, Zündtemperatur und Explosionsgrenzen*

**Prüfungsteil 1** · A 7.1 · A 10

Flammpunkt, Zündtemperatur und Explosionsgrenzen beschreiben die Brand- und Explosionsgefahr von Lösemitteln und Lacken. Sie steuern Lagerung, Transport und die Einstufung nach heutigem Gefahrstoff- und Gefahrgutrecht.

## Flammpunkt

Der Flammpunkt ist die niedrigste Temperatur, bei der sich über der Flüssigkeit ein durch eine Zündquelle entzündbares Dampf-Luft-Gemisch bildet. Gemessen wird im geschlossenen Tiegel — je nach Temperaturbereich nach Abel-Pensky oder Pensky-Martens. Ein niedriger Flammpunkt weist auf eine höhere Neigung zur Bildung entzündbarer Dampf-Luft-Gemische bei niedrigeren Temperaturen hin; die tatsächliche Brandgefahr hängt zusätzlich von Menge, Freisetzung, Lüftung und Zündquellen ab.

## Explosionsgrenzen

Untere (UEG) und obere Explosionsgrenze (OEG) begrenzen den Konzentrationsbereich, in dem ein Dampf-Luft-Gemisch zündfähig ist. Unterhalb der UEG ist das Gemisch zu mager, oberhalb der OEG zu fett. Auch relativ geringe freigesetzte Lösemittelmengen können unter ungünstigen Bedingungen zu explosionsfähigen Konzentrationen führen; entscheidend sind Stoff, Freisetzungsrate, Raumvolumen und Lüftung.

## Zündtemperatur

Die Zündtemperatur ist die niedrigste Temperatur einer heißen Oberfläche, an der sich das Gemisch von selbst entzündet — ohne offene Flamme oder Funken. Die Zündtemperatur ist eine wichtige sicherheitstechnische Kenngröße; die Auswahl der Temperaturklasse elektrischer Betriebsmittel erfolgt anhand der einschlägigen Ex-Einteilung und der maximal zulässigen Oberflächentemperatur.

## Einstufung und Kennzeichnung

Die frühere „Verordnung über brennbare Flüssigkeiten“ (VbF) mit den Gefahrklassen A I / A II / A III / B ist außer Kraft. Heute werden entzündbare Flüssigkeiten nach dem CLP-Recht in die Kategorien 1 bis 3 eingestuft: Kategorie 3 bei einem Flammpunkt von 23 bis 60 °C, Kategorie 1 und 2 bei einem Flammpunkt unter 23 °C — hier entscheidet zusätzlich der Siedebeginn (Kategorie 1: höchstens 35 °C, Kategorie 2: darüber). Für den Transport werden sie nach Gefahrgutrecht (ADR) mit Verpackungsgruppen versehen.

## Umwelt und Sicherheit

Explosionsgeschützte Ausrüstung und ausgewiesene Ex-Zonen einhalten, Behälter und Anlagen erden (elektrostatische Aufladung vermeiden), Zündquellen fernhalten und gut lüften. Lagermengen und die zulässigen Zusammenlagerungen beachten; Lösemittelreste als Sonderabfall entsorgen.

## Rohstoffbeispiel: was ein niedriger Flammpunkt bedeutet

Ein Lösemittel mit einem Flammpunkt deutlich unterhalb der Raumtemperatur — Aceton liegt bei etwa −18 °C, Ethylacetat bei etwa −4 °C — bildet schon im offenen Gebinde bei normaler Hallentemperatur ein zündfähiges Dampf-Luft-Gemisch. Nach CLP sind beide als leicht entzündbar eingestuft (Kategorie 2: Flammpunkt unter 23 °C und Siedebeginn über 35 °C; läge der Siedebeginn bei höchstens 35 °C, wäre es sogar Kategorie 1). Praktische Folge im Labor: nur in geerdeten, dicht schließenden Gebinden lagern, im Abzug oder unter Absaugung dosieren, Zündquellen fernhalten und die zulässigen Lagermengen im Arbeitsraum einhalten. Für die Prüfung wichtig ist die Übertragung auf das Gemisch: Der tabellierte Flammpunkt gilt für den Reinstoff. Der Flammpunkt eines Lösemittelgemischs lässt sich nicht einfach aus den Flammpunkten der Einzelkomponenten bestimmen — er ist eine Eigenschaft des gesamten Dampf-Flüssigkeits-Gleichgewichts und hängt von der Zusammensetzung ab.

Leichtflüchtige Komponenten können den Flammpunkt stark beeinflussen; die Aussage, die leichtflüchtigste Komponente bestimme ihn, ist als allgemeine Regel jedoch zu pauschal. Für die sicherheitstechnische Beurteilung sind Messwerte am konkreten Gemisch oder geeignete validierte Berechnungen maßgeblich.

## Fertiglack-Beispiel: offenes Rühren im Ansatzbehälter

Wird ein lösemittelhaltiger Lack im offenen Behälter mit dem Dissolver aufgerührt, vergrößert die bewegte Oberfläche die Verdunstung erheblich. Im Kopfraum des Behälters und in der Zone unmittelbar darüber kann die Dampfkonzentration dann rasch die untere Explosionsgrenze überschreiten — und weil Lösemitteldämpfe meist schwerer als Luft sind, sammeln sie sich zusätzlich in Bodennähe, in Gruben und in Vertiefungen. Daraus folgt die Maßnahmenkette: Absaugung direkt am Entstehungsort, explosionsgeschützte Rührwerke und Betriebsmittel in der ausgewiesenen Ex-Zone, Erdung von Behälter und Rührwerk gegen elektrostatische Aufladung, und Gebinde nach der Entnahme sofort wieder verschließen. Der Flammpunkt sagt, ab wann es kritisch werden kann; ob es tatsächlich kritisch wird, entscheiden Oberfläche, Menge, Lüftung und Zündquellen.

**Merksatz**

Flammpunkt = ab wann entzündbares Gemisch (Zündquelle); Zündtemperatur = Selbstentzündung an heißer Fläche; UEG/OEG = zündfähiger Bereich. VbF überholt → heute CLP-Kategorien 1–3 und ADR. Der Flammpunkt eines Gemischs ist eine Eigenschaft des gesamten Dampf-Flüssigkeits-Gleichgewichts und nicht aus den Einzelflammpunkten ableitbar — maßgeblich ist der Messwert am Gemisch.

**Stichwörter:** Flammpunkt, Zündtemperatur, Explosionsgrenze, UEG, OEG, Abel-Pensky, Pensky-Martens, VbF, CLP, ADR, Ex-Zone, Aceton, Ethylacetat, Erdung, Absaugung

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; CLP-Verordnung (EG) Nr. 1272/2008; ADR — Übereinkommen über die Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße; DIN EN ISO 2719; DIN EN ISO 13736; DIN EN 1839; DIN EN 14522*

## Übungsblatt Ü-170 — Musterlösungen

**Frage 1** (Verständnis, 8 Punkte)
Unterscheiden Sie Flammpunkt, Zündtemperatur und Explosionsgrenzen.

**Flammpunkt:** Niedrigste Temperatur, bei der sich über der Flüssigkeit ein durch eine Zündquelle entzündbares Dampf-Luft-Gemisch bildet.
**Zündtemperatur:** Niedrigste Temperatur einer heißen Oberfläche, an der sich das Gemisch von selbst entzündet — ohne Flamme oder Funken.
**Explosionsgrenzen:** UEG und OEG begrenzen den Konzentrationsbereich, in dem das Gemisch zündfähig ist; darunter zu mager, darüber zu fett.
**Bezug:** Der Flammpunkt braucht eine Zündquelle, die Zündtemperatur nicht; die Explosionsgrenzen beschreiben die Zusammensetzung des Gemischs.
*Bewertung: Der entscheidende Unterschied — Zündquelle nötig oder nicht — und die Rolle der Konzentration werden korrekt herausgearbeitet.*

**Frage 2** (Berechnung, 8 Punkte)
In einem Raum von 50 m³ verdunstet ein Lösemittel (Molmasse 58 g/mol, UEG 1,2 Vol.-%). Wie viel Masse Lösemittel genügt, um die untere Explosionsgrenze zu erreichen? (molares Volumen 24 L/mol)

**Dampfvolumen an UEG:** V_Dampf = 1,2 % · 50 m³ = 0,6 m³ = 600 L
**Stoffmenge:** n = 600 L / 24 L/mol = 25 mol
**Masse:** m = 25 mol · 58 g/mol = 1450 g ≈ 1,45 kg
**Antwortsatz:** Schon rund 1,45 kg Lösemittel erzeugen im Raum eine explosionsfähige Atmosphäre — deshalb sind Lüftung und Zündquellenverbot so wichtig.
*Bewertung: Der Rechenweg über Dampfvolumen, Stoffmenge und Masse ist geschlossen und die Antwort ordnet das Ergebnis sicherheitstechnisch ein.*

**Frage 3** (Anwendung, 6 Punkte)
Ein Lösemittel hat einen Flammpunkt unter 0 °C. Welche Maßnahmen ergreifen Sie bei Lagerung und Verarbeitung, und wie ordnet das heutige Recht solche Stoffe ein?

**Einstufung:** Sehr niedriger Flammpunkt = leicht entzündbar; nach CLP hohe Gefahrenkategorie für entzündbare Flüssigkeiten, im Transport entsprechend ADR.
**Lagerung:** Kühl, belüftet, getrennt gelagert; zulässige Mengen und Zusammenlagerungen beachten; Behälter erden.
**Verarbeitung:** Ex-geschützte Ausrüstung, Zündquellen fernhalten, gute Absaugung, elektrostatische Aufladung vermeiden.
*Bewertung: Die Antwort verknüpft den Kennwert mit konkreten Schutzmaßnahmen und der heutigen CLP-/ADR-Einstufung statt der überholten VbF.*

# L-171 · Gefahrstoffkennzeichnung nach GHS/CLP

*Piktogramme, Signalwort, H-/P-Sätze und Sicherheitsdatenblatt*

**Prüfungsteil 2** · A 10

Gefährliche Stoffe und Gemische werden in der EU nach der CLP-Verordnung eingestuft und gekennzeichnet — mit Gefahrenpiktogrammen, Signalwort sowie H- und P-Sätzen; CLP basiert auf dem UN-GHS und enthält EU-spezifische Regelungen. Das Sicherheitsdatenblatt liefert die Details.

## Vom alten zum neuen System

Früher standen schwarze Symbole auf orangem Grund (z. B. reizend, ätzend, giftig, leichtentzündlich). Mit der CLP-Umstellung wurden sie durch die GHS-Piktogramme ersetzt. Heute ist die CLP-Verordnung als Umsetzung des weltweiten GHS für die Produktkennzeichnung maßgeblich: Gefahrenpiktogramme als schwarzes Symbol auf weißem Grund in einer rotumrandeten, auf der Spitze stehenden Raute.

## Die neun Piktogramme

- GHS01 explodierende Bombe — explosiv, selbstzersetzlich, organische Peroxide (Typ A/B): manche Initiatoren und Peroxid-Härter.
- GHS02 Flamme — entzündbar, auch pyrophor oder selbsterhitzend: Lösemittel wie Butylacetat, Xylol und Testbenzin, viele 1K- und 2K-Lacke.
- GHS03 Flamme über Kreis — brandfördernd (oxidierend): Oxidationsmittel, manche Härter.
- GHS04 Gasflasche — Gase unter Druck: Druckgasflaschen, etwa Stickstoff, Druckluft oder Propan/Butan als Treibgas-Rohstoff. Die fertige Spraydose wird nach CLP dagegen als Aerosol eingestuft (Anhang I Abschnitt 2.3) und trägt GHS04 nicht.
- GHS05 Ätzwirkung — ätzend für Haut, Augen und Metalle: Säuren, Laugen, manche Reiniger und Additive.
- GHS06 Totenkopf — akut giftig (Kategorie 1–3): stark giftige Rohstoffe, selten, aber möglich.
- GHS07 Ausrufezeichen — kann je nach Einstufung u. a. Haut-/Augenreizung, bestimmte gesundheitsschädliche Wirkungen und Hautsensibilisierung kennzeichnen (das konkrete Piktogramm ergibt sich aus der CLP-Einstufung des Stoffes oder Gemisches): viele Lösemittel, Amine, Isocyanate.
- GHS08 Gesundheitsgefahr — krebserzeugend, erbgutverändernd, fortpflanzungsgefährdend, atemwegssensibilisierend, Organschäden bei wiederholter Exposition, Aspiration: Isocyanate, bestimmte Lösemittel, historisch Schwermetallpigmente.
- GHS09 Umwelt (toter Baum und Fisch) — gewässergefährdend: manche Biozide, Pigmente, Additive, lösemittelhaltige Systeme.

## Kennzeichnungselemente

Neben den Piktogrammen trägt das Etikett das Signalwort „Gefahr“ oder „Achtung“, die Gefahrenhinweise (H-Sätze) und die Sicherheitshinweise (P-Sätze) sowie Produkt- und Herstellerangaben. H- und P-Sätze haben die früheren R- und S-Sätze abgelöst. Auf dem Etikett gelten die CLP-Vorrang- und Auswahlregeln; dadurch können einzelne Kennzeichnungselemente entfallen, damit es lesbar bleibt. Die vollständige Einstufungsinformation ist im Sicherheitsdatenblatt (Abschnitt 2) und in der Betriebsanweisung nachvollziehbar.

## Wichtige H-Sätze für die Lacktechnik

• Physikalisch: H225 Flüssigkeit und Dampf leicht entzündbar; H226 entzündbar; H228 entzündbarer Feststoff; H242 Erwärmung kann Brand verursachen; H290 kann gegenüber Metallen korrosiv sein.
• Gesundheit: H302 gesundheitsschädlich bei Verschlucken; H304 kann bei Eindringen in die Atemwege tödlich sein (Aspiration, z. B. Kohlenwasserstoffe); H314 schwere Verätzung; H315 Hautreizung; H317 allergische Hautreaktion (Hautsensibilisierung); H318 schwere Augenschäden; H319 schwere Augenreizung; H332 gesundheitsschädlich beim Einatmen; H334 kann bei Einatmen Allergie oder asthmaartige Symptome auslösen (Atemwegssensibilisierung, klassisch bei Isocyanaten); H335 kann die Atemwege reizen; H336 Schläfrigkeit oder Benommenheit; H351 kann vermutlich Krebs erzeugen; H360 kann die Fruchtbarkeit beeinträchtigen oder das Kind im Mutterleib schädigen (Repr. 1A/1B); H361 kann vermutlich die Fruchtbarkeit beeinträchtigen oder das Kind im Mutterleib schädigen (Repr. 2); H372/H373 schädigt die Organe bei längerer oder wiederholter Exposition.
• Umwelt: H400 sehr giftig für Wasserorganismen; H410/H411/H412 sehr giftig, giftig bzw. schädlich für Wasserorganismen mit langfristiger Wirkung.
• Nur in der EU (EUH): EUH066 wiederholter Kontakt kann zu rissiger Haut führen; EUH204 enthält Isocyanate, kann allergische Reaktionen hervorrufen.
• Bei isocyanathaltigen 2K-PUR-Systemen können H334 und H317 (dazu EUH204) wichtige Leitgefahren sein; maßgeblich ist stets die konkrete Gemischeinstufung — Atem- und Handschutz konsequent beachten.

## Wichtige P-Sätze für den Lacklaboranten

• Prävention: P210 von Zündquellen fernhalten, nicht rauchen; P233 Behälter dicht verschlossen halten; P240 Behälter und Anlage erden; P241 explosionsgeschützte Geräte verwenden; P261 Einatmen von Dampf/Aerosol vermeiden; P271 nur im Freien oder gut belüftet verwenden; P273 Freisetzung in die Umwelt vermeiden; P280 Schutzhandschuhe, Schutzkleidung und Augenschutz tragen; P284 bei unzureichender Belüftung Atemschutz tragen (wichtig bei Isocyanaten und Spritzapplikation).
• Reaktion und Erste Hilfe: P302+P352 bei Hautkontakt mit viel Wasser waschen; P303+P361+P353 kontaminierte Kleidung sofort ausziehen, Haut abwaschen; P304+P340 an die frische Luft bringen; P305+P351+P338 Augen einige Minuten mit Wasser spülen, Kontaktlinsen entfernen; P333+P313 bei Hautreizung oder -ausschlag ärztlichen Rat einholen; P370+P378 bei Brand geeignetes Löschmittel verwenden.
• Lagerung und Entsorgung: P403+P235 gut belüftet und kühl lagern; P405 unter Verschluss aufbewahren; P501 Inhalt und Behälter vorschriftsgemäß entsorgen.
• Auswahl: Die P-Sätze folgen einer festen Matrix in Anhang IV der CLP-Verordnung (abhängig von H-Sätzen und Gefahrenklasse). Häufig im Lacklabor: P210, P261, P280, P284, P305+P351+P338 und die Haut-/Augen-Kombisätze.

## Sicherheitsdatenblatt

Das Sicherheitsdatenblatt (SDB) ist in 16 Abschnitte gegliedert und nennt Einstufung, Gefahren, Schutz- und Erste-Hilfe-Maßnahmen, Lagerung, Entsorgung und Kennzahlen. Es ist die Grundlage für die betriebliche Gefährdungsbeurteilung und die Betriebsanweisung.

## Umwelt und Sicherheit

Ein Gefahrstoffverzeichnis führen, Beschäftigte unterweisen und Betriebsanweisungen an die aktuelle Kennzeichnung anpassen. Umgefüllte Gebinde müssen so gekennzeichnet sein, dass Einstufung, Gefahren und Schutzmaßnahmen erkennbar sind (§ 8 Abs. 2 GefStoffV); im Betrieb genügt nach TRGS 201 eine vereinfachte Kennzeichnung — mindestens Produktbezeichnung und Gefahrenpiktogramme, sofern die Beschäftigten unterwiesen sind. Niemals unbeschriftet lassen. Den rechtlichen Rahmen setzt die Gefahrstoffverordnung (GefStoffV).

## Neue EU-Gefahrenklassen seit 2025/2026

Mit der delegierten Verordnung (EU) 2023/707 hat die EU drei neue Gefahrenklassen eingeführt, die Langzeitrisiken abbilden:

• Endokrine Disruptoren (ED) — hormonell wirksame Stoffe, unterschieden nach Wirkung auf die menschliche Gesundheit und auf die Umwelt.
• PBT/vPvB — persistent, bioakkumulierbar und toxisch bzw. sehr persistent und sehr bioakkumulierbar.
• PMT/vPvM — persistent, mobil und toxisch bzw. sehr persistent und sehr mobil (gelangen leicht in den Wasserkreislauf).

Die neuen EU-Gefahrenklassen werden über die dafür vorgesehenen EU-Kennzeichnungselemente in der CLP-Verordnung umgesetzt; zusätzliche GHS-Piktogramme ergeben sich daraus nicht automatisch — gekennzeichnet wird über neue EUH-Hinweise (z. B. EUH380 für endokrine Wirkung). Fristen: Für Stoffe gelten die neuen Gefahrenklassen seit 1. Mai 2025, für Gemische seit 1. Mai 2026 — dieser Stichtag ist inzwischen erreicht. Für Stoffe, die vor dem 1. Mai 2025 in Verkehr gebracht wurden, gilt eine Übergangsfrist bis 1. November 2026; für Gemische, die vor dem 1. Mai 2026 in Verkehr gebracht wurden, bis 1. Mai 2028. Praxis: Bei einem konkreten Lack aktuelle Einstufung, Sicherheitsdatenblatt und Inverkehrbringungsdatum prüfen. Die Verordnung (EU) 2023/707 wurde inzwischen zweimal berichtigt (18.11.2024 und 2025): Für die Stichtage eines konkreten Gemischs und für jede Umstellung von Rezeptur oder Etikett gilt immer die aktuelle, berichtigte (konsolidierte) Fassung, nicht die Erstveröffentlichung. Für Lacke als Gemische heißt das: Rohstoff-Sicherheitsdatenblätter prüfen und die Gemischeinstufung gegebenenfalls um diese Klassen ergänzen.

## Fallbeispiel: NC-Kombiklarlack — von der Rezeptur zum Etikett

An einem NC-Kombiklarlack (physikalisch trocknender Möbellack) lässt sich zeigen, wie Rezeptur, VOC-Gehalt und Gefahrstoff-Kennzeichnung zusammenhängen. Wichtig vorab, für beide Fallbeispiele dieses Blatts: Die verbindliche Einstufung eines realen Produkts ergibt sich am Ende immer aus den CLP-Gemischregeln auf Basis der Sicherheitsdatenblätter der eingesetzten Rohstoffe. Die Beispiele zeigen den Rechen- und Denkweg, ersetzen diese Prüfung aber nicht.

## Beispiel-Rezeptur (Masse-%)

- Nitrocellulose (als Trockenanteil gerechnet): 10
- Hartharz (z. B. Maleinat- oder Ketonharz): 8
- Weichmacher: 4
- Lösemittelgemisch (Ester, Alkohole, ggf. etwas Aromat): 78
- Wasser: 0

Dichte des Lacks ρ ≈ 0,90 g/cm³. Hinweis: Hier ist die NC als trockener Anteil angesetzt; eine tatsächlich wollfeuchte NC (mit Alkohol-/Wasserfeuchte) müsste entsprechend anders bilanziert werden.

## VOC-Berechnung (Holzbeschichtungsstoffe)

```
Nichtflüchtiger Anteil nfa = 10 + 8 + 4 = 22 Masse-%

VOC = (100 − nfa − mᵥᵥ) · ρ · 10
VOC = (100 − 22 − 0) · 0,90 · 10 = 702 g/l

(mᵥᵥ = Wasseranteil in %, ρ in g/cm³. Diese Formel für Holzbeschichtungsstoffe
stammt aus der 31. BImSchV; das Ergebnis wird hier mit den
Produktgrenzwerten der ChemVOCFarbV verglichen — zwei Regelwerke
mit eigener VOC-Definition, siehe L-172.)
```

## VOC-Einordnung

Der berechnete VOC-Gehalt von etwa 702 g/l verdeutlicht den sehr hohen Lösemittelanteil eines klassischen, physikalisch trocknenden NC-Kombilacks.

## Flammpunkt und CLP — sauber betrachtet

Der Flammpunkt eines Lösemittelgemisches lässt sich nicht einfach aus den Flammpunkten der Einzelkomponenten ableiten; er hängt von Zusammensetzung und Wechselwirkungen ab und ist bei fehlenden belastbaren Daten experimentell zu bestimmen. Maßgeblich sind Flammpunkt UND Anfangssiedepunkt des Gemisches:

Kat. 1: Flammpunkt < 23 °C und Anfangssiedepunkt ≤ 35 °C
Kat. 2: Flammpunkt < 23 °C und Anfangssiedepunkt > 35 °C
Kat. 3: Flammpunkt 23 °C bis 60 °C

Liegt der maßgebliche Flammpunkt unter 23 °C und der Anfangssiedepunkt über 35 °C, ist der Lack als entzündbare Flüssigkeit der Kategorie 2 einzustufen — Gefahrenhinweis H225, Piktogramm GHS02, Signalwort Gefahr.

## Gesundheitsgefahren — nur über die Gemischeinstufung

Gesundheitsgefahren dürfen nicht pauschal aus einer Stoffklasse abgeleitet werden. Je nach Konzentration der einzelnen Lösemittel können zusätzliche Hinweise wie H319 (schwere Augenreizung), H336 (Schläfrigkeit/Benommenheit) oder EUH066 (rissige Haut bei wiederholtem Kontakt) für das Gemisch resultieren; die konkrete Einstufung ist anhand der tatsächlichen Zusammensetzung und der CLP-Konzentrationsgrenzen vorzunehmen. Auch Aromaten wirken konzentrationsabhängig: Bei entsprechendem Toluolgehalt können Gefahren wie H304, H361d und H373 zu einer Einstufung mit GHS08 führen.

## Beispiel-Etikett (wenn Kategorie 2 zutrifft)

- Produktidentifikator: Handelsname und Rezeptur-Nr.
- Piktogramm(e): GHS02 (Flamme); je nach Gesundheitsgefahren zusätzlich GHS07, ggf. GHS08
- Signalwort: Gefahr
- Gefahrenhinweise: H225; je nach Gemischeinstufung z. B. H319, H336, EUH066
- Sicherheitshinweise (Auswahl): P210, P233, P240, P280, P303+P361+P353, P304+P340, P403+P235, P501
- Nennmenge sowie Name und Anschrift des Inverkehrbringers; ggf. EUH208 bei sensibilisierenden Additiven

## Fällt der Lack unter die ChemVOCFarbV?

Ein ausschließlich zur Beschichtung von Möbeln bestimmter Lack fällt nicht in den sachlichen Anwendungsbereich der ChemVOCFarbV, da Möbel dort ausdrücklich nicht als Bauteile gelten (§ 2 nennt als Bauteile z. B. Fenster, Türen, Zargen, Fußböden und Treppen). Wird derselbe Klarlack dagegen als Lack für Gebäude und Bauteile in Verkehr gebracht, greift der Grenzwert nach Anhang II (lösemittelbasierte Klar- und Lasurlacke, Stufe II: 400 g/l) — die 702 g/l überschreiten ihn deutlich. Für industrielle Holzbeschichtungsanlagen kann stattdessen die 31. BImSchV maßgeblich sein (Tätigkeit Beschichten von Holz und Holzwerkstoffen, gestaffelt nach jährlichem Lösungsmittelverbrauch). Mehr dazu in L-168 und L-176.

## Kurzfazit des Beispiels

Ein NC-Kombiklarlack mit 22 Masse-% nichtflüchtigen Bestandteilen und ρ = 0,90 g/cm³ hat rechnerisch rund 702 g/l VOC. Die Einstufung als entzündbare Flüssigkeit Kategorie 2 (H225) gilt, wenn der maßgebliche Flammpunkt unter 23 °C und der Anfangssiedepunkt über 35 °C liegt. Weitere Hinweise wie H319, H336, EUH066 oder — bei entsprechenden Bestandteilen — GHS08 sind über die CLP-Gemischeinstufung zu bestimmen. Ein reiner Möbellack fällt nicht unter die ChemVOCFarbV; für Gebäudelacke bzw. industrielle Anlagen gelten ChemVOCFarbV bzw. 31. BImSchV.

## Die Grenzwerte, an denen es sich entscheidet

Für Haut und Auge — die häufigsten Auslöser bei Lacken — legt Anhang I der CLP-Verordnung allgemeine Konzentrationsgrenzwerte fest. Ätzende Bestandteile zählen dabei zehnfach:

• Haut: Summe der ätzenden Bestandteile (Skin Corr. 1) ≥ 5 % → das Gemisch ist ätzend, H314. Gilt 10 × (ätzend) + (hautreizend) ≥ 10 %, ist es hautreizend, H315 — ein ätzender Bestandteil reicht dafür also schon ab 1 %.

• Auge: Summe aus ätzenden und augenschädigenden Bestandteilen (Skin Corr. 1 + Eye Dam. 1) ≥ 3 % → schwere Augenschädigung, H318. Zwischen 1 % und 3 % → Augenreizung, H319.

Das Auge ist damit das engste Tor: Ein Prozent genügt. Daneben gibt es stoffspezifische Grenzwerte (SCL) im Sicherheitsdatenblatt, die den allgemeinen vorgehen. Und ein Gemisch mit pH ≥ 11,5 kann unter Berücksichtigung der Alkalireserve allein wegen des pH-Werts als ätzend einzustufen sein.

## Zweites Fallbeispiel: Wasserlack — das Amin auf dem Etikett

Ein wasserverdünnbarer Alkydlack enthält 350 g Bindemittel-Festkörper je 1000 g Lack. Das Harz hat eine Säurezahl von 50 mg KOH/g und wird zu 80 % neutralisiert (siehe L-17).

Säuregruppen: 350 g · 50 mg/g = 17 500 mg KOH = 17,5 g; n = 17,5 g / 56,1 g/mol = 0,312 mol. Davon 80 % = 0,250 mol.

Jetzt entscheidet allein die molare Masse des Amins, wie viel Masse das im Lack ist:

• mit Ammoniak (17 g/mol): 0,250 · 17 = 4,3 g → 0,43 % im Lack

• mit Dimethylethanolamin (89 g/mol): 0,250 · 89 = 22,3 g → 2,2 % im Lack

Angenommen, das Amin ist laut Sicherheitsdatenblatt ätzend eingestuft — bei Neutralisationsaminen der Regelfall. Dann gilt für die Variante mit 2,2 %: Haut 10 · 2,2 = 22 ≥ 10 → H315; Auge 2,2 % liegt zwischen 1 % und 3 % → H319. Das Gebinde trägt GHS07, Signalwort „Achtung“. Bei 0,43 % dagegen: 10 · 0,43 = 4,3 < 10 und 0,43 % < 1 % — aus dem Amin folgt keine Einstufung.

## Was daraus folgt

Derselbe Lack, derselbe Neutralisationsgrad — und einmal trägt das Gebinde ein Piktogramm und einmal nicht. Den Ausschlag gibt die molare Masse, nicht die Chemie der Neutralisation. Das ist der Grund, warum die Aminwahl in Wasserlacken auch eine Kennzeichnungsfrage ist und nicht nur eine des Geruchs.

Drei Stellschrauben ergeben sich daraus: den Neutralisationsgrad nur so hoch fahren wie nötig; ein Amin mit kleinerer molarer Masse prüfen (Ammoniak bringt aber eigene Nachteile bei Geruch und Handhabung); oder das ionische Prinzip ganz verlassen und ein nichtionisch selbstemulgierendes Harz einsetzen (siehe L-17).

Zwei Punkte gehören noch dazu. Erstens der VOC-Wert: Unter der ChemVOCFarbV zählen organische Verbindungen mit einem Anfangssiedepunkt von höchstens 250 °C als VOC. Ammoniak ist anorganisch und daher kein VOC; organische Neutralisationsamine wie Triethylamin, Dimethylethanolamin oder AMP können dagegen unter die VOC-Definition fallen und in den deklarierten VOC-Gehalt eingehen (siehe L-176). Zweitens die Konservierung: Wasserlacke brauchen ein Topfkonservierungsmittel, und Isothiazolinone tragen den Lack schon unterhalb der Einstufungsgrenze aufs Etikett — als EUH208 „Enthält …, kann allergische Reaktionen hervorrufen“.

**Merksatz**

CLP/GHS: neun Piktogramme (rote Raute), Signalwort „Gefahr“/„Achtung“, H- und P-Sätze (statt R/S). Alte orange Symbole sind für neu gekennzeichnete Produkte seit der CLP-Umstellung unzulässig; die Abverkaufsfrist für Gemische lief am 1. Juni 2017 aus. SDB = 16 Abschnitte, Basis der Gefährdungsbeurteilung.

**Stichwörter:** GHS, CLP, Gefahrenpiktogramm, Signalwort, H-Satz, P-Satz, Sicherheitsdatenblatt, GefStoffV, Betriebsanweisung, Gefährdungsbeurteilung, Atemwegssensibilisierung, EUH204, EUH208, Gemischeinstufung, Konzentrationsgrenzwert, Additivität, Neutralisationsamin, Wasserlack, Isothiazolinon
*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; CLP-Verordnung (EG) Nr. 1272/2008; Delegierte Verordnung (EU) 2023/707; Berichtigung zur Verordnung (EU) 2023/707; TRGS 201; REACH-Verordnung (EG) Nr. 1907/2006, Anhang II (Sicherheitsdatenblatt); Gefahrstoffverordnung (GefStoffV); ChemVOCFarbV; 31. BImSchV*

## Übungsblatt Ü-171 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**
Wie unterscheidet sich die heutige Gefahrstoffkennzeichnung nach CLP/GHS von der früheren?
**Früher:** Schwarze Symbole auf orangem Grund mit R- und S-Sätzen; seit 2017 endgültig ungültig.
**Heute:** Gefahrenpiktogramme (schwarz auf weiß, rote Raute), Signalwort „Gefahr“ oder „Achtung“, H-Sätze (Gefahren) und P-Sätze (Sicherheit).
**Ziel:** Weltweit einheitliche, eindeutige Gefahrenkommunikation entlang der Lieferkette.
*Bewertung: Alter und neuer Stand werden korrekt gegenübergestellt; H/P-Sätze werden den R/S-Sätzen zugeordnet.*

**Frage 2** **(Anwendung, 8 Punkte)**
Ein lösemittelhaltiger Klarlack ist leicht entzündbar und reizt die Atemwege. Welche Kennzeichnungselemente erwarten Sie und wo schlagen Sie Details nach?
**Piktogramme:** Flamme (entzündbar) und Ausrufezeichen (reizend/gesundheitsschädlich); je nach Einstufung ggf. Gesundheitsgefahr.
**Signalwort:** „Gefahr“ oder „Achtung“ je nach Einstufungskategorie, dazu passende H- und P-Sätze.
**Nachschlagen:** Details im Sicherheitsdatenblatt (16 Abschnitte) — Grundlage für Gefährdungsbeurteilung und Betriebsanweisung.
*Bewertung: Die Gefahren werden korrekt in Piktogramme/Signalwort übersetzt und das SDB als Detailquelle genannt.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**
Ein Mitarbeiter füllt Verdünnung in ein unbeschriftetes Gefäß um. Warum ist das ein Problem und was ist richtig?
**Problem:** Ohne Kennzeichnung fehlen Gefahrenhinweise — Verwechslungs- und Unfallgefahr; rechtlich unzulässig.
**Richtig:** Umgefüllte Gebinde müssen so gekennzeichnet sein, dass Einstufung, Gefahren und Schutzmaßnahmen erkennbar sind (§ 8 Abs. 2 GefStoffV). Im Betrieb genügt nach TRGS 201 eine vereinfachte Kennzeichnung — mindestens Produktbezeichnung und Gefahrenpiktogramme —, sofern die Beschäftigten über Betriebsanweisung und Unterweisung informiert sind.
**Organisation:** Gefahrstoffverzeichnis und Betriebsanweisung aktuell halten, Beschäftigte unterweisen.
*Bewertung: Die Antwort erkennt die Kennzeichnungspflicht auch beim Umfüllen und ordnet sie in die betriebliche Organisation ein.*

**Frage 4** **(Anwendung, 6 Punkte)**

Ein NC-Kombiklarlack wird auf einen höheren Festkörper umgestellt: Nitrocellulose 14 %, Hartharz 12 %, Weichmacher 4 %, Lösemittel 70 %, Wasser 0 %; Dichte ρ = 0,95 g/cm³. Berechnen Sie den VOC-Gehalt und prüfen Sie, ob das Produkt als Gebäude-Klarlack den ChemVOCFarbV-Grenzwert (Anhang II, Stufe II: 400 g/l) einhält.

**Nichtflüchtiger Anteil:** nfa = 14 + 12 + 4 = 30 Masse-%

**VOC-Berechnung:** VOC = (100 − nfa − Wasser) · ρ · 10 = (100 − 30 − 0) · 0,95 · 10 = 665 g/l

**Beurteilung:** Wird der Lack als Klarlack für eine von der ChemVOCFarbV erfasste Bauteil-/Gebäudeanwendung eingesetzt und fällt die konkrete Produktkategorie unter den Grenzwert von 400 g/l, überschreitet er diesen mit 665 g/l deutlich. Als reiner Möbellack fällt er ohnehin nicht unter die ChemVOCFarbV (Möbel gelten dort nicht als Bauteile).

**Lerneffekt:** Trotz Anstieg des Festkörpers von 22 auf 30 % sinkt der VOC-Gehalt nur von 702 auf 665 g/l (≈ 5 %). Mehr Festkörper allein macht einen klassischen NC-Lack noch nicht VOC-arm.

*Bewertung: Nichtflüchtiger Anteil (30 %) und VOC-Formel richtig angewandt (665 g/l); der 400-g/l-Grenzwert wird korrekt an die erfasste Produktkategorie geknüpft, Möbellack-Sonderfall und der Vergleich mit der Ausgangsrezeptur (702 g/l) werden erkannt.*

**Frage 5** **(Anwendung, 8 Punkte)**

Ein 2K-PUR-Klarlack ist mit GHS02, GHS07 und GHS08 gekennzeichnet. Nennen Sie die zwei für Isocyanate typischen H-Sätze sowie den passenden EUH-Hinweis und geben Sie je einen sinnvollen P-Satz an.

**Piktogramme deuten:** GHS02 steht für entzündbar, GHS07 für reizend beziehungsweise sensibilisierend, GHS08 für eine ernste Gesundheitsgefahr.

**Isocyanat-H-Sätze:** H334 — kann bei Einatmen Allergie oder asthmaartige Symptome auslösen (Atemwegssensibilisierung); H317 — kann allergische Hautreaktionen verursachen (Hautsensibilisierung).

**EUH-Hinweis:** EUH204 — enthält Isocyanate, kann allergische Reaktionen hervorrufen.

**Passende P-Sätze:** Gegen H334: P284 (bei unzureichender Belüftung Atemschutz tragen) und P261 (Einatmen von Dampf oder Aerosol vermeiden). Gegen H317: P280 (Schutzhandschuhe und Schutzkleidung tragen).

*Bewertung: Die Piktogramme werden richtig zugeordnet, H334 und H317 als Isocyanat-Leitgefahren samt EUH204 genannt und passende Schutz-P-Sätze gewählt.*

# L-172 · Arbeitssicherheit: Grenzwerte, Explosionsschutz und Gefahrguttransport

*AGW statt MAK/TRK, Ex-Schutz und ADR*

**Prüfungsteil 2** · A 10

Der Arbeitsplatzgrenzwert (AGW) begrenzt die Luftbelastung, der Explosionsschutz die Zündgefahr, das Gefahrgutrecht (ADR) den Transport. Der AGW hat MAK und TRK abgelöst; im Gefahrgutrecht gelten ADR/RID/IMDG, national umgesetzt durch GGVSEB (Straße, Eisenbahn, Binnenschiff) und GGVSee (Seeverkehr).

## Schutzkonzept im Lacklabor: Die richtige Reihenfolge

Gefahr erkennen → Exposition beurteilen → technisch vermeiden / reduzieren → organisatorisch absichern → PSA einsetzen → Wirksamkeit kontrollieren.

Diese Reihenfolge ist keine Empfehlung, sondern rechtlich vorgegeben: Die Rangfolge der Schutzmaßnahmen ergibt sich aus § 7 Abs. 4 GefStoffV (Substitution vorrangig nach § 7 Abs. 3; Fassung zuletzt geändert am 17.12.2025), ergänzt durch die allgemeinen und zusätzlichen Schutzmaßnahmen der §§ 8 und 9. § 10 betrifft dagegen die besonderen Schutzmaßnahmen bei Tätigkeiten mit krebserzeugenden, keimzellmutagenen oder reproduktionstoxischen Gefahrstoffen der Kategorien 1A und 1B. PSA (Handschuhe, Atemschutz) steht in der Rangfolge des § 7 Abs. 4 GefStoffV an letzter Stelle — sie ergänzt technische und organisatorische Maßnahmen, ersetzt sie aber nicht. Technische Maßnahmen (Absaugung, geschlossene Systeme, lösemittelarme Produkte) haben Vorrang. Ein Atemschutz schützt nur dann, wenn der richtige Filtertyp und die richtige Schutzklasse gewählt werden.

## Arbeitsplatzgrenzwert

Der Arbeitsplatzgrenzwert (AGW, in der TRGS 900) ist die zeitlich gewichtete Konzentration eines Stoffes in der Arbeitsplatzluft, bei der bei Einhaltung der vorgesehenen Bedingungen die Gesundheit der Beschäftigten geschützt werden soll — als Schichtmittelwert, ergänzt durch einen Kurzzeitwert (Kurzzeitwert = AGW × Überschreitungsfaktor, bezogen auf 15-Minuten-Mittelwerte); kurzzeitige Überschreitungen werden über die jeweiligen Regelungen begrenzt. Der AGW hat die früheren Werte MAK (maximale Arbeitsplatzkonzentration) und TRK (technische Richtkonzentration) abgelöst. Für krebserzeugende, erbgutverändernde und fortpflanzungsgefährdende Stoffe gelten eigene Regeln. Aktuell: TRGS 900 wurde 2026 erneut geändert und ergänzt — immer die aktuelle BAuA-Fassung verwenden.

## Explosionsschutz

Wo Lösemitteldämpfe auftreten, kann eine explosionsfähige Atmosphäre entstehen. Solche Bereiche werden in Ex-Zonen eingeteilt; es gelten Anforderungen an Geräte, Erdung (gegen elektrostatische Aufladung) und Lüftung. Zündquellen sind konsequent fernzuhalten.

## Persönliche Schutzmaßnahmen

Je nach Gefährdung Atemschutz, Schutzhandschuhe, Schutzbrille und Hautschutz tragen; geeignetes ableitfähiges Schuhwerk kann zusammen mit einem geeigneten ableitfähigen Boden-/Erdungskonzept zur Begrenzung elektrostatischer Aufladung beitragen. Augen-/Notduschen, Feuerlöscheinrichtungen, Erste-Hilfe-Ausstattung und ein Alarmplan müssen vorhanden und bekannt sein.

## Gefahrguttransport

Der Transport gefährlicher Güter richtet sich nach dem ADR (Straße), dem RID (Eisenbahn) und dem IMDG-Code (See). In Deutschland werden sie über nationale Verordnungen verbindlich gemacht: die GGVSEB für Straße, Eisenbahn und Binnenschifffahrt und die GGVSee für den Seeverkehr. Die früher getrennten Verordnungen GGVS und GGVE wurden 2001 zur GGVSE zusammengefasst, die 2009 in der GGVSEB aufging. Gefahrgut wird nach ADR/RID/IMDG entsprechend der konkreten Einstufung und den Transportvorschriften u. a. über UN-Nummer, ggf. Verpackungsgruppe und vorgeschriebene Kennzeichnungen dokumentiert bzw. gekennzeichnet.

## Umwelt und Sicherheit

Gesundheitsgefahren beim Umgang mit Lacken reichen von Haut- und Atemwegserkrankungen über Allergien bis zu Schäden an inneren Organen und am Nervensystem. Deshalb Exposition minimieren, lösemittelarm arbeiten und Grenzwerte sowie Schutzmaßnahmen einhalten.

## Wichtige Abgrenzung: Gefahrstoff ≠ Gefahrgut

Prüfungsfalle: Gefahrstoffrecht und Gefahrgutrecht sind zwei verschiedene Rechtsbereiche für zwei verschiedene Fragen.

Gefahrstoffrecht (GefStoffV, TRGS): Betrifft Tätigkeiten — die sichere Handhabung von Stoffen am Arbeitsplatz. Grundlage: SDB, AGW, Gefährdungsbeurteilung.

Gefahrgutrecht (ADR, RID, IMDG): Betrifft die Beförderung — den sicheren Transport gefährlicher Güter auf Straße, Schiene, See. Grundlage: UN-Nummer, Verpackungsgruppe, Gefahrzettel, Begleitpapiere.

Ein Stoff kann Gefahrstoff sein, ohne als Gefahrgut eingestuft zu sein (z. B. wegen Ausnahmemengen oder Verpackungsart). Und umgekehrt.

## AGW-Werte für wichtige Lacklösemittel (Orientierung)

TRGS 900, aktuelle BAuA-Fassung (2026) maßgeblich — hier nur Beispielwerte zur Orientierung. Bei Gasen und Dämpfen wird der AGW in beiden Einheiten geführt — ml/m³ (ppm) und mg/m³; bei Stäuben und Aerosolen dagegen nur in mg/m³, weil sich dort keine Volumenkonzentration angeben lässt. Die Zahlen werden regelmäßig abgesenkt; Ethanol und Xylol lagen früher deutlich höher. Beispielwerte:
n-Butylacetat: AGW 62 ml/m³ (ppm) = 300 mg/m³ (Schichtmittelwert)
Xylol (alle Isomere): AGW 50 ml/m³ = 220 mg/m³
Ethanol: AGW 200 ml/m³ = 380 mg/m³
Toluol: AGW 50 ml/m³ = 190 mg/m³ (zusätzlich Biologischer Grenzwert BGW nach TRGS 903 beachten)
MEK (Butanon): AGW 200 ml/m³ = 600 mg/m³

### Die zehn häufigsten Fehler — was ein Lacklaborant in Recht/Umwelt/Sicherheit vermeiden muss

1. WGK und CLP gleichsetzen — zwei verschiedene Systeme für verschiedene Fragen.
2. Flammpunkt und Zündtemperatur verwechseln — völlig verschiedene Prüfkonzepte.
3. VOC-Gehalt des Produkts mit Anlagenemission gleichsetzen — Produktvorschrift (ChemVOCFarbV) vs. Anlagenvorschrift (31. BImSchV) sind verschieden.
4. Wasserlack = ungefährlich behaupten — wasserbasiert ≠ nicht wassergefährdend, ≠ ungiftig.
5. Molmasse allein als Gefahrenmaß verwenden — Exposition, Reaktivität und Sensibilisierungspotenzial sind entscheidend.
6. Gefahrstoff und Gefahrgut gleichsetzen — Tätigkeitsrecht vs. Transportrecht.
7. Unbekannte Lackreste mit anderem Abfall vermischen — erst identifizieren, dann korrekt entsorgen.
8. PSA als einzige Schutzmaßnahme ansehen — technische Maßnahmen haben Vorrang.
9. Eine LCA auf eine einzige Zahl reduzieren — Systemgrenzen und Wirkungskategorien entscheiden das Ergebnis.
10. Alte Grenzwerte oder Rechtsstände ungeprüft übernehmen — TRGS 900, ChemVOCFarbV und CLP werden regelmäßig aktualisiert.

**Merksatz**

AGW (TRGS 900) statt MAK/TRK; TRGS 900 aktuell (2026 aktualisiert) — immer die neue BAuA-Fassung verwenden. Schutzreihenfolge: Substitution → Technisch → Organisatorisch → PSA. Gefahrstoffrecht (Tätigkeit, SDB, AGW) ≠ Gefahrgutrecht (Transport, ADR, UN-Nummer). Ex-Zonen, Erdung, Zündquellen meiden.

**Stichwörter:** Arbeitsplatzgrenzwert, AGW, TRGS 900, MAK, TRK, Explosionsschutz, Ex-Zone, persönliche Schutzausrüstung, ADR, Gefahrgut
*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; Gefahrstoffverordnung (GefStoffV); TRGS 900; TRGS 510; TRGS 720; TRGS 727; Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV); ADR — Übereinkommen über die Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße*

## Übungsblatt Ü-172 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**
Was ist der Arbeitsplatzgrenzwert (AGW) und welche früheren Begriffe hat er abgelöst?

**Definition:** Höchstzulässige Konzentration eines Stoffes in der Atemluft am Arbeitsplatz (Schichtmittelwert), festgelegt in der TRGS 900.
**Kurzzeitwert:** Über den Überschreitungsfaktor werden kurzzeitige Spitzen begrenzt.
**Vorgänger:** Der AGW hat die maximale Arbeitsplatzkonzentration (MAK) und die technische Richtkonzentration (TRK) abgelöst.
**CMR-Stoffe:** Für krebserzeugende/erbgutverändernde/fortpflanzungsgefährdende Stoffe gelten eigene Regeln.
*Bewertung: Definition, Kurzzeitwert und die Ablösung von MAK/TRK werden korrekt genannt.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**
Für ein Lösemittel gilt ein AGW von 100 mg/m³ mit dem Überschreitungsfaktor 2. Berechnen Sie den Kurzzeitwert und beurteilen Sie eine kurzzeitig gemessene Konzentration von 260 mg/m³.

**Kurzzeitwert:** Kurzzeitwert = AGW · Überschreitungsfaktor = 100 mg/m³ · 2 = 200 mg/m³
**Vergleich:** 260 mg/m³ > 200 mg/m³
**Bewertung:** Der Kurzzeitwert ist überschritten — die Belastung ist zu hoch.
**Maßnahme:** Lüftung/Absaugung verbessern, Exposition senken, ggf. Atemschutz; Ursache prüfen.
*Bewertung: Der Kurzzeitwert wird korrekt berechnet und die Messung eindeutig als Überschreitung bewertet.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**

Ein Fass Lösemittel soll per Lkw zu einem Kunden transportiert werden. Welche Regeln greifen und was war früher zuständig?

**Heute:** Der Straßentransport gefährlicher Güter richtet sich nach dem ADR, in Deutschland verbindlich gemacht durch die GGVSEB (Straße, Eisenbahn, Binnenschifffahrt); für die Eisenbahn gilt das RID, für den Seeverkehr der IMDG-Code mit der GGVSee.

**Kennzeichnung:** Das Gut erhält UN-Nummer, Verpackungsgruppe und Gefahrzettel; geeignete Verpackung verwenden.

**Früher:** Für Straße und Eisenbahn galten früher getrennte Verordnungen (GGVS, GGVE); sie wurden zur GGVSE und schließlich zur heutigen GGVSEB zusammengeführt.

*Bewertung: Die Antwort ordnet den Transport dem ADR zu und kennt die Ablösung der alten GGVS.*

# L-173 · Molekülgröße, Flüchtigkeit und Gefahr

*Warum kleine, flüchtige Moleküle besonders relevant für die Exposition sein können*

**Prüfungsteil 2** · A 10

Molekülgröße, Flüchtigkeit und chemische Reaktivität beeinflussen Exposition und Gefährdungspotenzial. Maßgeblich für die Beurteilung sind aber die Eigenschaften und die Einstufung des konkreten Stoffes oder Gemisches — das Vergrößern zu Oligomeren, Addukten oder Präpolymeren senkt vor allem die Flüchtigkeit, nicht zwangsläufig die übrige Wirkung.

## Zwei Quellen der Gefahr

Wie stark ein reaktiver Rohstoff den Beschäftigten gefährdet, hängt an zwei Dingen: erstens an der Wirkung des Stoffes selbst, wie sie sich aus seiner Einstufung nach Gefahrstoffrecht und dem Sicherheitsdatenblatt ergibt; zweitens am Weg in den Körper — über die Atemluft (Flüchtigkeit) oder durch die Haut. Ein Strukturmerkmal wie eine Isocyanat-, Amin- oder Acrylatgruppe ist dabei ein Hinweis auf mögliche Wirkungen, aber kein eigenständiger Gefahrenindikator: Es legt weder Gefahrenklasse noch Kategorie fest. Die Molekülgröße wirkt vor allem auf den zweiten Punkt, die Exposition.

## Warum kleine Moleküle besonders relevant sein können

Kleine Moleküle besitzen häufig höhere Dampfdrücke als strukturell vergleichbare größere Moleküle; der Dampfdruck hängt jedoch wesentlich von Molekülstruktur und intermolekularen Kräften ab. Eine geringe Molekülgröße kann die Hautpenetration begünstigen; Hautgängigkeit und Reaktivität sind jedoch stoff- und strukturabhängige Eigenschaften und nicht zwangsläufig gekoppelt. So ist ein monomeres Diisocyanat oder ein kleines Amin wie Diethylentriamin meist flüchtiger und hautgängiger als sein größeres Folgeprodukt. Die gesundheitliche Gefährdung muss jedoch für den jeweiligen Stoff bzw. das Gemisch anhand seiner spezifischen Eigenschaften beurteilt werden.

## Was das Vergrößern bringt — und was nicht

Setzt man die Monomere zu Oligomeren, Addukten oder Präpolymeren um, sinkt der Dampfdruck drastisch — es steht kaum noch Dampf zum Einatmen in der Luft. Das ist der große Sicherheitsgewinn. Was nicht verschwindet, ist die reaktive Gruppe: Ist der Stoff entsprechend eingestuft, wirkt sie weiter, sobald sie den Körper erreicht — vor allem als Spritznebel (feine Tröpfchen) oder als Staub. Diese Aerosole und Stäube gelangen unabhängig vom Dampfdruck in die Lunge. „Größer“ heißt also weniger flüchtig, nicht harmlos.

## Das Muster über die Stoffklassen

Dasselbe Prinzip zieht sich durch den ganzen Lack: Isocyanate — monomer (flüchtig, giftig) über Oligomer (Trimer, Biuret) bis zum Präpolymer (siehe L-26). Amine — kleines Diethylentriamin über Addukt und Polyaminoamid bis ins ausgehärtete Netz (siehe L-29). Acrylate — niedermolekulare Reaktivverdünner sind stark hautsensibilisierend und reizend, oligomere und polymere Acrylate deutlich milder (siehe L-24, L-147). Auch beim Epoxid ist das niedermolekulare Bisphenol-A-Harz kritischer als ein höhermolekulares Festharz — Bisphenol A ist als reproduktionstoxisch Kategorie 1B eingestuft und steht auf der REACH-Kandidatenliste (siehe L-28), und Styrol wirkt als flüchtiges Monomer im UP-Harz (siehe L-23).

## Erst das Abreagieren macht sicher

Die Gefährdung durch eine reaktive Gruppe kann durch vollständige chemische Umsetzung deutlich sinken: Im weitgehend ausgehärteten, vernetzten Film ist sie überwiegend verbraucht und fest gebunden; Restmonomere, Extrahierbares und mögliche Abbauprodukte müssen dennoch berücksichtigt werden. Bis dahin zählt der Rest-Monomeranteil (bewusst niedrig gehalten, teils gesetzlich beschränkt), und die eigentliche Belastung kommt aus Spritznebel, Schleifstaub und Hautkontakt.

### Was das für die Praxis heißt

Für den Arbeitsschutz folgt daraus: Nicht nur der Dampf ist das Problem, sondern gerade das Aerosol beim Spritzen und der Staub beim Schleifen. Deshalb spritzt man geschlossen in der Kabine mit Frischluft- oder Atemschutz, saugt ab, trägt Handschutz, wählt monomerarme beziehungsweise oligomere Qualitäten und lässt den Lack vollständig aushärten.

### Geruch ist kein Maß für die Gefahr

Eine typische Prüfungsfalle: Ein geruchsarmer Lack ist nicht automatisch gesundheitlich unbedenklich. Geruchsschwelle und toxikologische Wirkung sind zwei voneinander unabhängige Größen. Manche Stoffe werden schon weit unterhalb jeder gesundheitlich relevanten Konzentration wahrgenommen — sie riechen unangenehm, ohne in dieser Konzentration gefährlich zu sein. Andere sind nahezu geruchlos, obwohl die Konzentration in der Luft den Arbeitsplatzgrenzwert bereits überschreitet; Isocyanate sind dafür das bekannte Beispiel. Hinzu kommt die Geruchsermüdung: Die Nase gewöhnt sich innerhalb kurzer Zeit an einen Geruch, die Exposition bleibt jedoch unverändert. Maßgeblich sind deshalb immer Sicherheitsdatenblatt, Arbeitsplatzgrenzwert und Messung — niemals der Eindruck der Nase.

**Merksatz**

Klein und flüchtig heißt vor allem: gut exponierbar über Dampf und Haut. Wie gefährlich der Stoff ist, sagt seine Einstufung, nicht sein Strukturmerkmal. Das Vergrößern zu Oligomer, Addukt oder Präpolymer senkt die Flüchtigkeit, nicht die sonstige Wirkung — als Spritznebel und Staub bleibt sie kritisch. Sicher wird der Film erst, wenn die reaktive Gruppe vollständig abreagiert ist. Und: geruchsarm ≠ unbedenklich — Geruchsschwelle und Wirkschwelle sind unabhängig voneinander.

**Stichwörter:** Geruchsschwelle, Geruchsermüdung, Arbeitsplatzgrenzwert, Molekülgröße, Flüchtigkeit, Dampfdruck, Monomer, Oligomer, Präpolymer, Reaktivverdünner, Sensibilisierung, Spritznebel, Aerosol, Arbeitsschutz

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; Gefahrstoffverordnung (GefStoffV); TRGS 900; TRGS 430*

## Übungsblatt Ü-173 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Warum ist die freie, monomere Form eines reaktiven Rohstoffs meist am stärksten expositionsrelevant?

**Flüchtig:** Kleine Moleküle besitzen häufig höhere Dampfdrücke, verdunsten leichter und werden als Dampf eingeatmet.

**Hautgängig:** Sie dringen leichter durch die Haut ein.

**Aufnahme und Wirkung:** Über Dampf und Haut erreicht der Stoff den Körper besonders leicht — ein monomeres Diisocyanat oder ein kleines Amin ist meist flüchtiger und hautgängiger als sein größeres Folgeprodukt. Wie gefährlich es wirkt, sagt seine Einstufung.

*Bewertung: Hoher Dampfdruck/Inhalation und Hautgängigkeit werden als Expositionsgründe genannt; dass über die Wirkung die Einstufung des Stoffes entscheidet und nicht das Strukturmerkmal, wird erkannt.*

**Frage 2** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Was bewirkt das Vergrößern der Moleküle zu Oligomeren oder Addukten — und was bleibt trotzdem gefährlich?

**Weniger flüchtig:** Der Dampfdruck sinkt drastisch — es steht kaum noch Dampf zum Einatmen in der Luft. Das ist der Sicherheitsgewinn.

**Sensibilisierung bleibt:** Die reaktive Gruppe bleibt erhalten — ist der Stoff entsprechend eingestuft (z. B. sensibilisierend), wirkt sie weiter — vor allem als Spritznebel (Aerosol) oder Staub, die unabhängig vom Dampfdruck in die Lunge gelangen.

**Fazit:** „Größer“ heißt weniger flüchtig, nicht harmlos.

*Bewertung: Der Rückgang der Flüchtigkeit und die bleibende Sensibilisierung über Aerosol/Staub werden erklärt.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**

Ordnen Sie für Isocyanate, Amine und Acrylate je ein Beispiel der Reihe monomer → größer → gebunden zu.

**Isocyanat:** Monomeres Diisocyanat → Oligomer (Trimer/Biuret) → ausgehärtetes Polyurethan-Netz (siehe L-26).

**Amin:** Diethylentriamin → Addukt/Polyaminoamid → ausgehärtetes Epoxid-Netzwerk (siehe L-29).

**Acrylat:** Niedermolekularer Reaktivverdünner → oligomeres/polymeres Acrylat → ausgehärteter UV-Film (siehe L-24, L-147).

*Bewertung: Für alle drei Stoffklassen wird die Reihe monomer → oligomer/Addukt → ausgehärtet mit Beispiel belegt.*

# L-174 · Wasserrecht und Wassergefährdungsklassen

*WHG, AwSV und die Einstufung in WGK 1–3*

**Prüfungsteil 2** · A 10

Das Wasserhaushaltsgesetz (WHG) schützt die Gewässer. Wassergefährdende Stoffe und Gemische werden nach den Vorgaben der AwSV in WGK 1–3 eingestuft; daneben gibt es insbesondere nwg und awg als besondere Einstufungen. Danach richten sich die Anforderungen an Lager- und Umgangsanlagen.

## Rechtsrahmen

Oberste Ebene ist das Wasserhaushaltsgesetz (WHG), ergänzt durch die Landeswassergesetze. Es schützt die Gewässer; das Einleiten von Stoffen ist erlaubnispflichtig. Für den betrieblichen Umgang mit wassergefährdenden Stoffen gilt die Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (AwSV).

## Wassergefährdungsklassen

- WGK 1 — schwach wassergefährdend.
- WGK 2 — deutlich wassergefährdend.
- WGK 3 — stark wassergefährdend.
- nicht wassergefährdend (nwg) — fällt nicht unter die AwSV.
- allgemein wassergefährdend (awg) — bestimmte Gemische ohne eigenes Einstufungsverfahren.

Wichtig: Fehlt eine dokumentierte Einstufung, sind die hierfür geltenden Vorsorgeregeln der AwSV anzuwenden; im Rahmen des Kompendiums wird dies als vorsorgliche WGK 3 behandelt. Die frühere „WGK 0“ gibt es nicht mehr.

## Anlagen und Gefährdungsstufen

Aus der Wassergefährdungsklasse und dem Volumen einer Anlage ergibt sich ihre Gefährdungsstufe. Danach richten sich die Anforderungen: Rückhaltung (Auffangwannen), Dichtheit, Überwachung und Betriebsvorschriften. In Wasserschutzgebieten können verschärfte Anforderungen an Rückhaltung und Anlagen gelten; das erforderliche Rückhaltevolumen richtet sich nach der konkreten Anlage und den einschlägigen Vorschriften.

## Wichtige Abgrenzung: WGK ≠ CLP-Gefahrenklasse

Prüfungsfalle: WGK (Wassergefährdungsklasse nach AwSV) und CLP-Gefahrenklasse sind zwei völlig verschiedene Einstufungssysteme für zwei verschiedene Schutzziele.

CLP/GHS: Einstufung für Gesundheits- und physikalische Gefahren sowie Umweltgefahren, und zwar akute wie chronische (H400 sowie H410 bis H413). Das Piktogramm GHS09 tragen dabei nur H400, H410 und H411; H412 und H413 werden ohne Piktogramm und ohne Signalwort allein über den H-Satz gekennzeichnet. Kennzeichnung auf dem Etikett.

WGK (AwSV): Einstufung ausschließlich für die Gefährdung der Gewässer in Anlagen. Keine Kennzeichnung auf dem Etikett; steht im Sicherheitsdatenblatt in Abschnitt 15 (nationale Vorschriften) — die zugrunde liegenden ökotoxikologischen Daten stehen in Abschnitt 12 und in der amtlichen Datenbank des UBA.

Ein Stoff kann hohe WGK haben (stark wassergefährdend) ohne CLP-Umweltpiktogramm GHS09 — und umgekehrt. Beide immer getrennt prüfen.

### Abwasser und Indirekteinleiter

Betriebsabwässer — etwa aus der Reinigung von Wasserlack-Anlagen — dürfen nur nach Vorgabe in die Kanalisation gelangen (Indirekteinleiter). Es gelten kommunale Satzungen und Grenzwerte, z. B. für Schwermetalle. Die Wasserbasis erlaubt keine Aussage über die WGK — ein wasserbasierter Lack kann weiterhin wassergefährdende Bestandteile enthalten (z. B. Biozide, bestimmte Pigmente, Dispergiermittel). Maßgeblich ist die Einstufung des konkreten Stoffes bzw. Gemisches nach AwSV; Reste gehören ohnehin nicht ungeklärt ins Abwasser.

### Laborpraxis Wasserrecht

Konkrete Regeln für den Lacklaboranten:

• Lack- und Reinigungsreste nicht ungeklärt in den Ausguss geben — auch nicht verdünnte Wasserbasislacke.
• Auffangwannen unter Gebinde und Arbeitsplätzen nutzen.
• Lagermengen und Gefährdungsstufen nach AwSV kennen und einhalten.
• Bei Leckagen: sofort binden (Bindemittel), nicht in Kanalisation spülen.
• WGK-Angabe im SDB kann veraltet sein — maßgeblich ist die amtliche Einstufung; bei Zweifel die amtliche Datenbank des Umweltbundesamtes (Rigoletto) heranziehen. GisChem der BG RCI und der BGHM ist demgegenüber eine Gefahrstoff-Datenbank der Unfallversicherungsträger und für die verbindliche WGK-Einstufung nicht maßgeblich.

### Umwelt und Sicherheit

Keinen Bodeneintrag zulassen; wassergefährdende Reste als Sonderabfall entsorgen (Einzelregeln siehe Laborpraxis Wasserrecht).

**Merksatz**

WHG schützt Gewässer; AwSV regelt Anlagen. WGK 1 schwach / 2 deutlich / 3 stark; ohne Nachweis gilt WGK 3. Abwasser nur als Indirekteinleiter nach Satzung, Reste als Sonderabfall.

**Stichwörter:** WHG, AwSV, Wassergefährdungsklasse, WGK, WGK vs CLP, nicht wassergefährdend, Gefährdungsstufe, Auffangwanne, Indirekteinleiter, Wasserschutzgebiet, wasserbasiert
*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; Wasserhaushaltsgesetz (WHG); AwSV — Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen*

## Übungsblatt Ü-174 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Erklären Sie die Wassergefährdungsklassen nach AwSV und was gilt, wenn ein Stoff nicht eingestuft ist.

**WGK 1:** schwach wassergefährdend.
**WGK 2:** deutlich wassergefährdend.
**WGK 3:** stark wassergefährdend.
**Sonderfälle:** Daneben gibt es nicht wassergefährdende (nwg) und allgemein wassergefährdende (awg) Stoffe. Ohne dokumentierte Einstufung gilt ein Stoff vorsorglich als WGK 3.
*Bewertung: Die drei Klassen werden korrekt benannt und die Vorsorgeregel (ohne Nachweis WGK 3) erkannt.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**

In einem Wasserschutzgebiet lagern drei Fässer à 200 L eines wassergefährdenden Reinigers. In Schutzgebieten muss das gesamte lagernde Volumen zurückgehalten werden können (100 %). Welches Rückhaltevolumen muss die Auffangwanne mindestens haben?

**Regel:** In Wasserschutzgebieten gelten besonders strenge Anforderungen; das nötige Rückhaltevolumen richtet sich nach Anlagenart und freisetzbarem Volumen. In Schutzgebieten ist die vollständige Rückhaltung (100 % der Lagermenge) vorgegeben.

**Lagermenge:** 3 · 200 L = 600 L

**Rückhaltevolumen:** 100 % von 600 L = 600 L

**Antwortsatz:** Die Auffangwanne muss mindestens 600 L zurückhalten können. Maßgeblich sind im Einzelfall die für die konkrete Anlage geltenden Vorschriften (AwSV, gegebenenfalls Schutzgebietsverordnung).

*Bewertung: Die vorgegebene 100-%-Anforderung wird korrekt auf die Gesamtlagermenge angewandt.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**

Beim Reinigen einer Wasserlack-Anlage fällt lösemittelarmes Spülwasser an. Wie gehen Sie damit um?

**Einstufung:** Auch schwach wassergefährdendes Spülwasser darf nicht ungeklärt in die Kanalisation.

**Weg:** Als Indirekteinleiter die kommunale Satzung und Grenzwerte beachten; Reste sammeln und als Sonderabfall über einen zugelassenen Entsorger entsorgen.

**Vorsorge:** Auffangwannen nutzen, Leckagen sofort binden, keinen Bodeneintrag zulassen.

*Bewertung: Die Antwort trennt zulässige Einleitung (nach Satzung) von der Sonderabfallentsorgung und nennt Vorsorgemaßnahmen.*

# L-175 · Abfall- und Kreislaufwirtschaft

*KrWG, Abfallhierarchie, AVV und Verpackungsrecht*

**Prüfungsteil 2** · A 10

Das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) ordnet den Umgang mit Abfällen nach einer fünfstufigen Hierarchie. Abfälle werden nach der AVV mit einem sechsstelligen Schlüssel eingestuft; für gefährliche Abfälle gelten besondere Nachweis- und Dokumentationspflichten; Umfang und Verfahren richten sich nach Abfallart, Menge und den geltenden Ausnahmen.

## Rechtsrahmen

Zentrale Regelung ist das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG); es hat das frühere Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG) abgelöst und setzt die EU-Abfallrahmenrichtlinie um. Ziel ist es, Ressourcen zu schonen und Stoffkreisläufe zu fördern.

## Fünfstufige Abfallhierarchie

- Vermeidung — höchste Priorität.
- Vorbereitung zur Wiederverwendung.
- Recycling (stoffliche Verwertung).
- sonstige Verwertung — vor allem energetisch.
- Beseitigung — Deponie oder Verbrennung ohne Energiegewinnung, als letzte Option.

Die Abfallhierarchie gibt der Vermeidung, Vorbereitung zur Wiederverwendung und Verwertung grundsätzlich Vorrang vor der Beseitigung, soweit dies technisch möglich, wirtschaftlich zumutbar und umweltverträglich ist.

## Einstufung und Nachweis

Abfälle werden nach der Abfallverzeichnis-Verordnung (AVV) mit einem sechsstelligen Abfallschlüssel eingestuft; gefährliche Abfälle sind in der AVV mit einem Sternchen (*) gekennzeichnet; ob ein konkretes Lösemittelgemisch oder ein nicht ausgehärteter Altlack gefährlich ist, richtet sich nach dem zugehörigen Abfallschlüssel und der Einstufung. Für gefährliche Abfälle gilt ein (elektronisches) Nachweisverfahren mit Entsorgungsnachweis und Begleitschein.

## Rohstoffbeispiel: Pigment- und Additivreste

Nicht abreagierte Reste einer Pigmentpaste oder eines Additiv-Konzentrats dürfen nicht einfach in einen gemeinsamen Lösemittelabfall gegeben werden, wenn dadurch ein unbekannter oder unerwünschter Abfall entsteht. Erstens könnten unverträgliche Stoffe gefährlich miteinander reagieren; zweitens geht die Identität verloren und der Abfall lässt sich nicht mehr einem klaren Abfallschlüssel zuordnen. Getrennt halten und beschriften.

## Fertiglack-Beispiel: 2K-PU-Rest

Ein nicht ausgehärteter 2K-PU-Rest (Stamm + Härter gemischt, aber nicht appliziert) und ein vollständig ausgehärteter Lackrest sind NICHT automatisch derselbe Abfall. Der nicht ausgehärtete Rest enthält noch freie Isocyanate und ist nach AVV einzustufen; der ausgehärtete Rest ist ein Feststoff ohne freie reaktive Gruppen. Zusammensetzung ermitteln, Zustand prüfen, dann den richtigen Abfallschlüssel bestimmen.

## Verpackungen

Das Verpackungsgesetz (VerpackG) hat die Verpackungsverordnung abgelöst. Hersteller müssen sich im Verpackungsregister registrieren und ihre Verkaufsverpackungen an einem dualen System beteiligen. So werden Weißblech-, Kunststoff- und Papiergebinde zurückgenommen und verwertet.

### Umwelt und Sicherheit

Abfälle sauber trennen und korrekt deklarieren. Lösemittelreste und flüssige Altlacke sind abhängig von Zusammensetzung und Einstufung häufig gefährliche Abfälle und müssen entsprechend getrennt und über geeignete Entsorgungswege behandelt werden; eingetrocknete/ausgehärtete Reste werden oft anders eingestuft. Nicht gefährliche Abfälle zur Beseitigung gehen an die entsorgungspflichtige Körperschaft.

**Merksatz**

KrWG (statt KrW-/AbfG); Hierarchie: Vermeiden → Wiederverwenden → Recyceln → sonstige (energetische) Verwertung → Beseitigen. AVV = sechsstelliger Schlüssel, gefährlich mit *. VerpackG + duales System.

**Stichwörter:** KrWG, Abfallhierarchie, Vermeidung, Recycling, AVV, Abfallschlüssel, gefährlicher Abfall, Sonderabfall, VerpackG, duales System

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG); AVV — Abfallverzeichnis-Verordnung; Verpackungsgesetz (VerpackG)*

## Übungsblatt Ü-175 — Musterlösungen

**Frage 1** (Verständnis, 8 Punkte)

Nennen Sie die fünf Stufen der Abfallhierarchie nach KrWG in der richtigen Rangfolge.

1. **Vermeidung:** Abfälle möglichst gar nicht erst entstehen lassen — höchste Priorität.
2. **Vorbereitung zur Wiederverwendung:** Erzeugnisse ohne weitere Verarbeitung wieder nutzbar machen.
3. **Recycling:** Stoffliche Verwertung zu neuen Produkten.
4. **sonstige Verwertung:** Vor allem energetische Verwertung.
5. **Beseitigung:** Deponie/Verbrennung ohne Energiegewinnung — letzte Option.

*Bewertung: Alle fünf Stufen stehen in der korrekten Rangfolge; Verwertung vor Beseitigung wird deutlich.*

**Frage 2** (Berechnung, 8 Punkte)

Aus 500 kg Verpackungsabfall werden 350 kg stofflich recycelt, 100 kg energetisch verwertet und 50 kg beseitigt. Berechnen Sie die Recyclingquote und die Gesamtverwertungsquote.

**Recyclingquote:** 350 kg / 500 kg · 100 % = 70,0 %

**Verwertung gesamt:** (350 kg + 100 kg) / 500 kg · 100 % = 450 / 500 · 100 % = 90,0 %

**Beseitigung:** 50 kg / 500 kg · 100 % = 10,0 %

**Antwortsatz:** Die Recyclingquote beträgt 70 %, die gesamte Verwertungsquote 90 %; nur 10 % werden beseitigt.

*Bewertung: Recycling- und Gesamtverwertungsquote werden korrekt getrennt berechnet und im Antwortsatz ausgewiesen.*

**Frage 3** (Anwendung, 6 Punkte)

In der Produktion fallen flüssige Altlackreste und leere, ausgehärtete Gebinde an. Wie stufen Sie beides ein und entsorgen es?

**Flüssige Altlackreste:** In der Regel gefährlicher Abfall (Sonderabfall, im AVV mit *) — Sammlung und Entsorgung über einen zugelassenen Entsorger mit Nachweis.

**Ausgehärtete Gebinde:** Restentleerte, ausgehärtete Gebinde sind meist anders (oft nicht gefährlich) einzustufen; Verwertung als Wertstoff über den betrieblichen Entsorgungsweg bzw. Rücknahmesysteme der Lieferanten.

**Grundsatz:** Korrekt nach AVV deklarieren und die Abfallhierarchie beachten.

*Bewertung: Der Unterschied flüssig/ausgehärtet wird richtig auf die Einstufung und den Entsorgungsweg übertragen.*

# L-176 · Luftreinhaltung und VOC

*BImSchG, TA Luft, 31. BImSchV und ChemVOCFarbV*

**Prüfungsteil 2** · A 10

Das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) und seine Verordnungen sowie die TA Luft regeln die Luftreinhaltung. Für Lacke begrenzen die 31. BImSchV (Anlagen) und die ChemVOCFarbV (Produkte) die Lösemittelemissionen.

## Rechtsrahmen

Oberste Ebene ist das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG), konkretisiert durch die Bundes-Immissionsschutzverordnungen (BImSchV) — z. B. die 4. BImSchV zur Genehmigungsbedürftigkeit nach Anlagenart und Durchsatz und die 12. BImSchV (Störfall). Die TA Luft ist eine Verwaltungsvorschrift und dokumentiert den Stand der Technik für genehmigungsbedürftige Anlagen (Grenzwerte, Bagatellgrenzen). Zur Unterscheidung: Emissionen treten aus einer Anlage aus, Immissionen wirken auf Mensch und Umwelt ein.

## 31. BImSchV — Lösemittelanlagen

Die 31. BImSchV („Lösemittelverordnung“) gilt für Anlagen, die organische Lösemittel oberhalb bestimmter Mengenschwellen einsetzen. Sie verlangt die Minderung gefasster und diffuser Emissionen. Der Nachweis wird über eine Lösemittelbilanz geführt; alternativ zur Einhaltung der Emissionsgrenzwerte kann ein Reduzierungsplan angewendet werden; der Stand der Technik ist regelmäßig zu überprüfen.

## ChemVOCFarbV — Produktgrenzwerte

Die ChemVOCFarbV setzt die EU-Decopaint-Richtlinie um und begrenzt den VOC-Gehalt (in g je Liter gebrauchsfertiger Beschichtungsstoff) bestimmter Beschichtungsstoffe; ob ein konkretes Produkt erfasst ist, hängt von Produktkategorie und Anwendungsbereich ab. Sie betrifft auch kleine Verarbeiter. Wasser-, High-Solid-, Pulver- und andere emissionsarme Systeme können die jeweiligen VOC-Anforderungen erleichtern bzw. erfüllen; entscheidend sind Produktkategorie und konkreter VOC-Gehalt. Rechtsstand: Die ChemVOCFarbV wurde zuletzt am 29. März 2026 geändert; für die Konformitätserklärung eines Produkts ist immer die dann geltende Fassung maßgeblich, nicht eine ältere Zusammenstellung von Grenzwerten.

## Umwelt und Sicherheit

Bestimmte VOC können zusammen mit Stickoxiden unter Sonneneinstrahlung zur Bildung von bodennahem Ozon beitragen; nicht jede VOC-Spezies ist in gleicher Weise ozonbildend, die photochemische Reaktivität ist unterschiedlich. Lösemitteldämpfe sind zudem brand- und gesundheitsgefährlich — Absaugung, Explosionsschutz und Arbeitsplatzgrenzwerte beachten. Verbrauch und Emissionen dokumentieren.

## Rohstoffbeispiel: von Lösemittel auf Wasser

Wird in einem Holzlack das organische Lösemittel weitgehend durch Wasser ersetzt, sinkt der VOC-Gehalt deutlich und der Grenzwert der Produktkategorie ist leichter einzuhalten. Technisch wird die Aufgabe damit aber schwieriger. Wasser verdunstet stark abhängig von Temperatur und relativer Luftfeuchte — die Trocknung wird wetter- und klimaabhängig, was in der Werkstatt ohne konditionierte Kabine sofort spürbar ist. Der Film entsteht außerdem nicht mehr durch bloßes Verdunsten, sondern durch Koaleszenz der Bindemittelteilchen; verarbeitet werden muss oberhalb der Mindestfilmbildetemperatur, sonst reißt oder kreidet der Film. Je nach Polymerdispersion und Formulierung ist dafür ein Koaleszenzhilfsmittel erforderlich — es gibt aber auch koaleszenzmittelarme und koaleszenzmittelfreie Systeme mit von Haus aus niedriger MFT. Wegen der hohen Oberflächenspannung des Wassers werden zudem Benetzung und Verlauf kritischer, sodass Substratbenetzungs- und Entschäumeradditive nötig werden. Und der entscheidende Merksatz für die Bilanz: Ob ein eingesetztes Koaleszenzhilfsmittel regulatorisch als VOC zählt, ist anhand der jeweils geltenden VOC-Definition und der konkreten Substanz zu beurteilen — fällt es darunter, geht es in die Berechnung ein und darf den erzielten Vorteil nicht wieder aufzehren.

## Fertiglack-Beispiel: VOC überschlägig abschätzen

Ein lösemittelhaltiger Lack enthält 40 Masse-% flüchtige Bestandteile und hat eine Dichte von rund 1,00 kg/l. Für die erste Einordnung — etwa um zu erkennen, ob ein Produkt überhaupt in die Nähe eines Grenzwerts kommt — genügt eine Überschlagsrechnung:

## Überschlagsrechnung

```
VOC ≈ Anteil flüchtiger Bestandteile · Dichte

VOC ≈ 0,40 · 1,00 kg/l = 0,40 kg/l = 400 g/l
```

## Warum das nur eine Näherung ist

Die rund 400 g/l sind eine grobe Orientierung, kein rechtlicher Nachweis. Die rechtlich maßgebliche Berechnung ist deutlich differenzierter. Erstens stellt sie auf den gebrauchsfertigen Zustand ab — also einschließlich Härter und Verdünnung nach Verarbeitungsvorschrift, was bei einem 2K-System den Wert erheblich verschiebt. Zweitens zählt ein enthaltener Wasseranteil nicht zu den VOC; bei Bautenlacken bleibt das Wasser aber im Bezugsvolumen (Grenzwert in g/l des gebrauchsfertigen Produkts einschließlich Wasser) — nur bei Produkten der Fahrzeugreparaturlackierung wird der Wasseranteil vom Volumen abgezogen. Drittens gilt als VOC nur, was der Definition der jeweiligen Vorschrift genügt; die ChemVOCFarbV stellt dabei auf einen Siedepunkt bei Normaldruck von höchstens 250 °C ab. Nicht jeder flüchtige Bestandteil ist damit automatisch ein VOC im Sinne der Vorschrift, und ein hochsiedendes Koaleszenzhilfsmittel kann je nach Definition erfasst sein oder nicht. Für die Konformitätserklärung gilt deshalb immer die Formel und die Definition der einschlägigen Vorschrift — nicht der Überschlag.

## Lösemittelminderung gelingt in Kombination

In der Praxis wird ein Grenzwert selten über eine einzige Maßnahme erreicht, sondern über deren Kombination: ein emissionsarmes Bindemittelsystem (Wasser, High-Solid, Pulver, UV), ein höherer Auftragswirkungsgrad in der Applikation (elektrostatisch statt konventionell, weniger Overspray), gefasste Absaugung mit Rückgewinnung oder Abgasreinigung (thermisch oder adsorptiv) an der Anlage sowie organisatorische Maßnahmen wie geschlossene Reinigungssysteme und die Rückgewinnung von Spüllösemittel. Auch bei emissionsarmen Systemen kann eine Abgasbehandlung nötig bleiben. Der rechnerische Nachweis läuft dabei auf zwei Ebenen: anlagenseitig über die Lösemittelbilanz nach 31. BImSchV, produktseitig über den VOC-Gehalt je Liter nach ChemVOCFarbV.

**Merksatz**

BImSchG → BImSchV + TA Luft (Stand der Technik). 31. BImSchV = Lösemittelanlagen (Lösemittelbilanz). ChemVOCFarbV = VOC-Grenzwerte je Liter für Bauten-/Reparaturlacke, Rechtsstand zuletzt 29.03.2026. Emissionsarm = Wasser/High-Solid/Pulver/UV. Überschlag: Anteil flüchtig · Dichte ≈ g/l — der rechtliche Wert wird jedoch am gebrauchsfertigen Produkt nach der Formel der jeweiligen Vorschrift berechnet und nur für Stoffe, die der VOC-Definition genügen; Wasser zählt nicht als VOC, wird aber nur bei Produkten der Fahrzeugreparaturlackierung vom Bezugsvolumen abgezogen.

**Stichwörter:** BImSchG, BImSchV, TA Luft, 31. BImSchV, Lösemittelbilanz, ChemVOCFarbV, Decopaint, VOC, Emission, Immission, VOC-Berechnung, Koaleszenzhilfsmittel, Mindestfilmbildetemperatur, gebrauchsfertig

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG); 31. BImSchV; 4. BImSchV; 12. BImSchV (Störfall-Verordnung); TA Luft; ChemVOCFarbV; EU-Richtlinie 2004/42/EG*

## Übungsblatt Ü-176 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**
Grenzen Sie 31. BImSchV und ChemVOCFarbV voneinander ab.

**31. BImSchV:** Anlagenbezogen: gilt für Anlagen mit organischen Lösemitteln oberhalb bestimmter Mengenschwellen; verlangt Emissionsminderung, Nachweis über Lösemittelbilanz.
**ChemVOCFarbV:** Produktbezogen: begrenzt den VOC-Gehalt (g/l gebrauchsfertig) bestimmter Bauten- und Fahrzeugreparaturlacke; betrifft auch kleine Verarbeiter.
**Einordnung:** Die eine regelt die Anlage, die andere das Produkt; beide setzen europäisches Recht um.
*Bewertung: Der Kern — anlagenbezogen vs. produktbezogen — wird klar herausgearbeitet.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**
Ein gebrauchsfertiger Lack enthält 40 Massen-% flüchtige organische Verbindungen und hat die Dichte 1,00 kg/l. Berechnen Sie den VOC-Gehalt in g/l und beurteilen Sie ihn gegen den Grenzwert von 300 g/l für einen lösemittelbasierten Holz- und Metalllack (Decopaint-Kategorie d, Stufe II).

**Masse je Liter:** 1,00 kg/l = 1000 g/l
**VOC-Gehalt:** 40 % · 1000 g/l = 400 g/l
**Vergleich:** 400 g/l > 300 g/l
**Antwortsatz:** Mit 400 g/l überschreitet der Lack den Grenzwert von 300 g/l deutlich — unter den in der Aufgabe genannten Voraussetzungen (Produktkategorie d, Stufe II, gebrauchsfertiger Zustand) wäre er damit nicht konform; ein lösemittelärmeres System (Wasser-/High-Solid-Lack) ist nötig.
*Bewertung: Der VOC-Gehalt wird korrekt aus Massenanteil und Dichte berechnet und klar gegen den Grenzwert eingeordnet.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**
Ein kleiner Lackierbetrieb will die VOC-Emissionen senken, ohne eine große Abgasreinigung zu bauen. Welche Wege schlagen Sie vor?

**Produktwechsel:** Auf emissionsarme Systeme umstellen: Wasser-, High-Solid-, Pulver- oder UV-Lacke.
**Technik/Organisation:** Applikationswirkungsgrad erhöhen (Overspray senken), gefasste Absaugung; Verbrauch dokumentieren.
**Nachweis:** Über eine Lösemittelbilanz belegen, dass die Anforderungen eingehalten werden.
*Bewertung: Die Antwort setzt am Produkt an (größter Hebel) und ergänzt Technik/Organisation sowie den geforderten Nachweis.*

# L-177 · Ökobilanz und Lebenszyklusbetrachtung

*Umweltwirkungen über den gesamten Lebensweg*

**Prüfungsteil 2** · A 10

Eine Ökobilanz (Life Cycle Assessment) untersucht ausgewählte Umweltwirkungen eines Produkts innerhalb definierter Systemgrenzen über dessen Lebensweg — von den Rohstoffen bis zur Entsorgung. Sie liefert Entscheidungsgrundlagen, hat aber Grenzen.

## Definition

Eine Ökobilanz untersucht ausgewählte Umweltwirkungen innerhalb festgelegter Systemgrenzen über den Lebenszyklus eines Produkts — Rohstoffgewinnung, Herstellung, Anwendung, Nutzung und Entsorgung. Sie ist in den Normen ISO 14040/14044 beschrieben und dient dem sachlichen Vergleich von Alternativen.

## Die vier Schritte nach ISO 14040/14044

- Schritt 1 — Ziel und Untersuchungsrahmen festlegen: wozu wird bilanziert, welche Systemgrenzen gelten, und vor allem: welche funktionelle Einheit wird verglichen.
- Schritt 2 — Sachbilanz: die für Ziel und Systemgrenzen relevanten Stoff- und Energieflüsse erfassen (Rohstoffe, Wasser, Energie, Abfall, Emissionen).
- Schritt 3 — Wirkungsabschätzung: die Flüsse den Umweltwirkungen zuordnen, etwa Treibhauspotenzial, Versauerung, Toxizität oder Ressourcenverbrauch.
- Schritt 4 — Auswertung: signifikante Parameter identifizieren, Vollständigkeit, Sensitivität und Konsistenz prüfen sowie Schlussfolgerungen und Empfehlungen ableiten. Normierung, Ordnung und Gewichtung sind dagegen optionale Bestandteile der Wirkungsabschätzung (Schritt 3); bei vergleichenden, veröffentlichten Aussagen ist die Gewichtung nach ISO 14044 nicht zulässig.

## Die funktionelle Einheit entscheidet

Die funktionelle Einheit ist der Punkt, an dem Lackvergleiche am häufigsten scheitern. Verglichen werden darf nicht Liter gegen Liter und auch nicht Kilogramm gegen Kilogramm, sondern die tatsächlich erbrachte Leistung — zum Beispiel ein Quadratmeter Bauteil, geschützt in einer definierten Korrosivitätskategorie über eine definierte Schutzdauer, bei festgelegter Trockenschichtdicke und festgelegtem Anforderungsprofil. Erst diese Festlegung macht zwei Systeme vergleichbar, weil sie Unterschiede in Ergiebigkeit, Auftragswirkungsgrad, Schichtdicke und Lebensdauer mit einrechnet. Ohne definierte funktionelle Einheit ist jeder Ökobilanz-Vergleich beliebig.

## Lebensweg eines Lacks

Ein typischer Weg: Basisrohstoffe → Harz/Bindemittel → Halbfabrikate → Lack → Lagerung/Transport → Applikation (mit Overspray und Reinigung) → Trocknung → Nutzung → Entsorgung. An jeder Stufe entstehen Energie-, Wasser- und Abfallströme sowie Emissionen, die in die Bilanz eingehen.

## Aussagen und Grenzen

Das Ergebnis einer Ökobilanz hängt u. a. von Systemgrenzen, Datenqualität, funktioneller Einheit, Annahmen und — sofern durchgeführt — der Gewichtung von Wirkungskategorien ab. Beispiel: Ein Wasserlack spart Lösemittel, kann aber beim Trocknen mehr Energie benötigen — die Gesamtbewertung ist nicht immer eindeutig. Eine Ökobilanz stützt Entscheidungen, ersetzt sie aber nicht.

## Umwelt und Sicherheit

Praktische Hebel: emissionsarme Systeme, Materialeffizienz (Overspray senken), Recycling von Gebinden und Reststoffen sowie Energie sparen. Die Ökobilanz zeigt, an welcher Stelle des Lebenswegs die größten Umweltlasten liegen.

## Rohstoffbeispiel: der scheinbar bessere Rohstoff

Ein Lieferant bietet ein Bindemittel an, das weniger flüchtige Bestandteile in die Rezeptur einbringt. Für den Produktgrenzwert ist das ein klarer Gewinn — ökobilanziell ist damit aber noch nichts entschieden. Zu betrachten sind ebenso die Herstellung des Rohstoffs (Energie- und Rohstoffeinsatz der Synthese, Ausbeute, Nebenprodukte), Transport und Lagerung (Gefahrgutklasse, Temperaturführung, Gebindegrößen), die Dosierung in der Rezeptur — ein Rohstoff, von dem die doppelte Menge eingesetzt werden muss, verschiebt die Bilanz spürbar — sowie die am Ende erreichte Lebensdauer der Beschichtung. Ein Rohstoff mit höherer Herstellungslast kann ökobilanziell trotzdem der bessere sein, wenn die Beschichtung damit doppelt so lange hält.

## Fertiglack-Beispiel: Wasserlack gegen Lösemittellack

Ein Wasserlack emittiert bei der Applikation deutlich weniger organische Lösemittel — das ist der offensichtliche Vorteil. Ihm steht der Trocknungsaufwand gegenüber: Wasser hat eine hohe Verdampfungsenthalpie, die Trocknung braucht deshalb häufig längere Zeiten, höhere Objekttemperaturen oder entfeuchtete Umluft und damit mehr Energie. Ob die Umstellung ökologisch gewinnt, hängt am Energiemix der Trocknung, am Auftragswirkungsgrad der Applikation, an der erreichten Schutzdauer und an der Ausschussquote. Genau deshalb muss die funktionelle Einheit vorher feststehen (siehe Abschnitt „Die funktionelle Einheit entscheidet“).

## Lacklaboranten-Check: fünf Kurzfälle

- Ein neues Lösemittel soll in eine Rezeptur — was prüfen Sie zuerst? Sicherheitsdatenblatt und CLP-Einstufung, dann den Flammpunkt und die daraus folgenden Lager- und Ex-Anforderungen, dann die Arbeitsplatzsituation (Grenzwert, Absaugung, persönliche Schutzausrüstung). Die lacktechnische Eignung wird erst danach beurteilt.
- Ein Wasserlack wird als „umweltfreundlich“ beworben — was hinterfragen Sie? Den VOC-Gehalt im gebrauchsfertigen Zustand, Herkunft und Einstufung der Rohstoffe, den Energiebedarf der Trocknung, Abfall und Reinigungsaufwand sowie die erreichte Lebensdauer — und ob überhaupt eine Ökobilanz mit definierter funktioneller Einheit vorliegt.
- Ein Rest 2K-PU aus dem Ansatz soll entsorgt werden — wie gehen Sie vor? Die Komponenten nicht unkontrolliert zusammenkippen (Reaktion, Wärmeentwicklung, $CO_2$-Bildung und Druckaufbau im geschlossenen Gebinde), Zusammensetzung und Zustand feststellen (angesetzt oder unvermischt, ausreagiert oder nicht) und nach den geltenden Abfallvorgaben sowie dem betrieblichen Entsorgungsweg getrennt sammeln.
- Beim Einwiegen von Pigment entsteht Staub — welche Maßnahme zuerst? Die Rangfolge lautet Substitution vor technisch vor organisatorisch vor persönlich: zuerst prüfen, ob staubarme Gebinde oder Pigmentpräparationen das staubende Pulver ersetzen können (Substitution), dann Absaugung am Entstehungsort, dann organisatorische Regelungen wie eine getrennte Einwaagezone und Zugangsbeschränkung, und erst zuletzt die persönliche Schutzausrüstung.
- Ein Lack enthält 40 % flüchtige Bestandteile — ist das der VOC-Wert? Nein. Zu prüfen ist erstens, ob die flüchtigen Bestandteile der VOC-Definition der einschlägigen Vorschrift genügen (Siedepunkt, Wasseranteil), und zweitens, welche Produktkategorie und welcher Grenzwert überhaupt gelten. Berechnet wird am gebrauchsfertigen Produkt nach der vorgeschriebenen Formel.

**Merksatz**

Ökobilanz/LCA (ISO 14040/14044) = Umweltwirkungen über den ganzen Lebensweg. Vier Schritte: Ziel/Rahmen → Sachbilanz → Wirkungsabschätzung → Auswertung. Ohne definierte funktionelle Einheit ist kein Vergleich möglich — verglichen wird die Leistung ($m^2$ über Schutzdauer), nicht der Liter. Das Ergebnis hängt von Systemgrenzen, Datenqualität und Wichtung ab: Die Ökobilanz stützt eine Entscheidung, ersetzt sie aber nicht.

**Stichwörter:** Ökobilanz, Life Cycle Assessment, Lebenszyklus, ISO 14040, Sachbilanz, Wirkungsabschätzung, Treibhauspotenzial, Overspray, Materialeffizienz, funktionelle Einheit, Systemgrenzen, Verdampfungsenthalpie, Lacklaboranten-Check

*Quellen: Brock/Groteklaes/Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie; DIN EN ISO 14040; DIN EN ISO 14044*

## Übungsblatt Ü-177 — Musterlösungen

**Frage 1** **(Verständnis, 8 Punkte)**

Aus welchen Schritten besteht eine Ökobilanz und was ist ihr Zweck?

**Zweck:** Vergleich der Umweltwirkungen eines Produkts über den gesamten Lebensweg (ISO 14040/14044).

**Ziel/Rahmen:** Zunächst werden Ziel und Untersuchungsrahmen festgelegt.

**Sachbilanz:** Erfassung der für Ziel und Systemgrenzen relevanten Stoff- und Energieflüsse (Wasser, Energie, Abfall, Emissionen).

**Wirkungsabschätzung und Auswertung:** Zuordnung zu Umweltwirkungen (z. B. Treibhauspotenzial) und anschließende Deutung.

*Bewertung: Die vier Schritte werden in der richtigen Reihenfolge genannt und der Vergleichszweck erkannt.*

**Frage 2** **(Berechnung, 8 Punkte)**

Verglichen werden 1000 g eines Wasserlacks (5 % Lösemittel) und 1000 g eines konventionellen Lacks (45 % Lösemittel). Wie viel Lösemittel gelangt jeweils in die Luft und wie groß ist die Ersparnis?

**Wasserlack:** 5 % · 1000 g = 50 g Lösemittel

**Konventioneller Lack:** 45 % · 1000 g = 450 g Lösemittel

**Ersparnis:** 450 g − 50 g = 400 g weniger Lösemittelemission je 1000 g Lack

**Antwortsatz:** In der vereinfachten Sachbilanz der Aufgabe ergeben sich rechnerisch 400 g weniger Lösemittelanteil; eine reale Emission ist daraus nicht automatisch 1:1 ableitbar, da ein Massenanteil im Lack nicht identisch mit tatsächlich emittierter Masse ist.

*Bewertung: Die Emissionen werden korrekt aus den Lösemittelanteilen berechnet und die Ersparnis sauber ausgewiesen.*

**Frage 3** **(Anwendung, 6 Punkte)**

Warum ist der Wasserlack aus Aufgabe 2 trotz geringerer Lösemittelemission nicht automatisch die bessere Wahl?

**Weitere Faktoren:** Die Ökobilanz betrachtet den ganzen Lebensweg — der Wasserlack kann z. B. beim Trocknen mehr Energie brauchen.

**Wichtung:** Sofern eine Gewichtung der Wirkungskategorien durchgeführt wird, hängt das Gesamturteil auch von ihr ab — bei veröffentlichten vergleichenden Aussagen ist sie nach ISO 14044 nicht zulässig; maßgeblich bleiben funktionelle Einheit, Systemgrenzen und Datenqualität.

**Schluss:** Eine Ökobilanz stützt die Entscheidung, ersetzt aber nicht die Abwägung im Einzelfall.

*Bewertung: Die Antwort erkennt, dass ein einzelner Faktor nicht genügt und das Gesamturteil von funktioneller Einheit, Systemgrenzen, Datenqualität und einer allenfalls optionalen Gewichtung abhängt.*

# Prüfungssimulation

Diese Simulation enthält keine Original-Prüfungsaufgaben und ist keine amtliche Prüfung. Aufbau, Zeiten und Gewichtungen orientieren sich an der Ausbildungsordnung; alle Aufgaben und Lösungen sind eigene Formulierungen aus diesem Kompendium.

Wirtschafts- und Sozialkunde (60 Minuten, 10 %) ist nicht Teil dieses Kompendiums. Für die Vorbereitung eignen sich die WiSo-Materialien der Kammern und die einschlägigen Lehrwerke; in der Auswertung läuft der Bereich als Platzhalter mit.

| Prüfungsbereich | Teil | Zeit | Gewicht | Punkte |
|---|---|---|---|---|
| Chemie und Physik von Beschichtungsstoffen | 1 | 135 min | 17,5 % | 170 |
| Applikations- und Prüftechnik | 1 | 420 min | 17,5 % | 100 |
| Lack- und Beschichtungstechnologie | 2 | 195 min | 27,5 % | 160 |
| Herstellung und Qualitätskontrolle | 2 | 540 min | 27,5 % | 100 |
| Wahlqualifikationen (drei gewählte) | 2 | — | in 27,5 % | 240 |

## Chemie und Physik von Beschichtungsstoffen · Teil 1 · 135 Minuten · 17,5 % der Gesamtnote

Höchstpunktzahl 170, gewichtet über die Faktoren der Aufgaben.

## Aufgabe 1 — Berechnung (Faktor 2, 10 Punkte)

Ein lösemittelhaltiger Alkydharz-Decklack wird nach folgendem Ansatz gefertigt (Angaben in Masse-%): 40,0 Alkydharzlösung mit 70 % Festharz; 18,0 Titandioxid; 6,0 Füllstoff; 1,5 nichtflüchtige Additive; 34,5 Lösemittel.

**a)** 4 Punkte

Ordnen Sie die Bestandteile des Ansatzes dem nichtflüchtigen und dem flüchtigen Anteil zu.

**b)** 4 Punkte

Berechnen Sie den Massenfestkörper des Lacks in Prozent.

**c)** 2 Punkte

Begründen Sie, warum für die Berechnung der Trockenschichtdicke nicht der Massenfestkörper, sondern der Volumenfestkörper gebraucht wird.

## Aufgabe 2 — Berechnung (Faktor 2, 10 Punkte)

Bei der Wareneingangsprüfung eines pflanzlichen Öls sind die chemischen Kennzahlen zu bestimmen und zu deuten.

**a)** 3 Punkte

Definieren Sie Säurezahl und Iodzahl jeweils vollständig mit Bezugsmenge und Einheit und erläutern Sie, warum zu jeder dieser Kennzahlen zusätzlich die Bezugsbasis (Festharz oder Lieferform) gehört.

**b)** 4 Punkte

Ein reines Triglycerid der Linolsäure hat die molare Masse M = 879 g/mol und trägt sechs C=C-Doppelbindungen. Berechnen Sie die theoretische Iodzahl. (1 mol Doppelbindungen bindet 1 mol Iod = 253,8 g)

**c)** 3 Punkte

Ordnen Sie das Öl anhand dieser Iodzahl in die Trocknungscharakteristik ein und nennen Sie eine Grenze der Aussagekraft der Iodzahl.

## Aufgabe 3 — Verständnis (Faktor 1, 10 Punkte)

Für einen physikalisch trocknenden Lack ist ein Lösemittelgemisch auszuwählen.

**a)** 4 Punkte

Erklären Sie, warum die Regel „Gleiches löst sich in Gleichem“ über Löslichkeitsparameter beschrieben wird und warum ein einzelner Zahlenwert dafür oft nicht genügt.

**b)** 3 Punkte

Erklären Sie den Begriff „latenter Löser“ und geben Sie an, wie sich das Verhalten eines Gemischs abschätzen lässt.

**c)** 3 Punkte

Nennen Sie zwei Eigenschaften des Lacks, die sich bei sonst gleicher Rezeptur mit der Wahl des Lösemittels ändern, und begründen Sie eine davon.

## Aufgabe 4 — Anwendung (Faktor 2, 10 Punkte)

Ein Formteil aus Polypropylen soll lackiert werden. Der aufgetragene Lack zieht sich auf der Fläche zu Tropfen zusammen; an einzelnen Stellen bilden sich Krater.

**a)** 3 Punkte
Erklären Sie die Ursache über die Oberflächenenergie des Untergrunds und die Oberflächenspannung des Lacks.

**b)** 4 Punkte
Nennen Sie zwei Vorbehandlungsverfahren für diesen Untergrund und beschreiben Sie jeweils, was sie an der Oberfläche bewirken.

**c)** 3 Punkte
Der Erfolg soll über den Randwinkel belegt werden. Geben Sie an, was $\theta = 0$, $\theta < 90°$ und $\theta > 90°$ bedeuten und mit welchem Gerät gemessen wird. Begründen Sie außerdem, warum der Randwinkel und nicht der bloße Vergleich von Oberflächenspannung und Oberflächenenergie den Ausschlag gibt.

## Aufgabe 5 — Verständnis (Faktor 2, 10 Punkte)

Eine Mahlpaste mit organischem Buntpigment wird am Dissolver angesetzt.

**a)** 4 Punkte
Erklären Sie die Begriffe Primärteilchen, Aggregat und Agglomerat und geben Sie an, welche davon der Dispergierprozess trennen soll.

**b)** 3 Punkte
Nennen Sie die drei Schritte des Dispergierprozesses und geben Sie zum ersten Schritt die thermodynamische Voraussetzung an.

**c)** 3 Punkte
Am Dissolver bleibt der Doughnut-Effekt aus, und es wird sichtbar Luft eingeschlagen. Deuten Sie den Befund und nennen Sie eine Abhilfe.

## Aufgabe 6 — Berechnung (Faktor 2, 10 Punkte)

Für einen weißen Decklack liegt folgender Feststoffanteil vor: 240 g Titandioxid ($\rho = 4{,}10$ g/cm³), 60 g Calciumcarbonat ($\rho = 2{,}70$ g/cm³) und 180 g Bindemittel-Festkörper ($\rho = 1{,}05$ g/cm³). Die kritische PVK des Pigment-Füllstoff-Gemischs wurde zu 45 % bestimmt.

**a)** 4 Punkte
Berechnen Sie die Pigmentvolumenkonzentration des Films.

**b)** 3 Punkte
Beurteilen Sie anhand des Ergebnisses, ob die Pigmentierung für einen glänzenden Decklack geeignet ist.

**c)** 3 Punkte
Beschreiben Sie zwei Eigenschaftsänderungen, die eintreten, wenn die PVK über die kritische PVK angehoben wird, und nennen Sie einen Produkttyp, bei dem dies bewusst genutzt wird.

## Aufgabe 7 — Verständnis (Faktor 2, 10 Punkte)

Die Verarbeitungsviskosität zweier Produkte soll geprüft werden: ein niedrigviskoser Klarlack und ein thixotrop eingestellter Fassadenlack.

**a)** 4 Punkte
Definieren Sie die dynamische Viskosität über Schubspannung und Schergeschwindigkeit, geben Sie die Einheit an und erklären Sie, was eine newtonsche Flüssigkeit auszeichnet.

**b)** 3 Punkte
Geben Sie für die Prüfung mit dem Auslaufbecher nach DIN EN ISO 2431 die Prüftemperatur und den gültigen Auslaufzeitbereich an.

**c)** 3 Punkte
Begründen Sie, warum der Auslaufbecher für den thixotropen Fassadenlack nicht geeignet ist, und nennen Sie ein passendes Messgerät.

## Aufgabe 8 — Berechnung (Faktor 2, 10 Punkte)

Ein Industrielack mit einem Volumenfestkörper von 45 % wird mit einer Nassschichtdicke von 120 µm auf ein Stahlblech und auf ein Aluminiumprofil aufgetragen.

**a)** 3 Punkte
Berechnen Sie die zu erwartende Trockenschichtdicke.

**b)** 4 Punkte
Nennen Sie für Stahl und für Aluminium je ein zerstörungsfreies Messverfahren für die Trockenschichtdicke und geben Sie das jeweilige Messprinzip an.

**c)** 3 Punkte
Begründen Sie, warum die Nassschichtdicke unmittelbar nach dem Auftrag gemessen werden muss, und nennen Sie ein Messmittel.

## Aufgabe 9 — Verständnis (Faktor 1, 10 Punkte)

Zwei Beschichtungsstoffe stehen zur Auswahl: ein physikalisch trocknender Acrylatlack und ein chemisch härtender 2K-Lack.

**a)** 4 Punkte
Stellen Sie physikalische Trocknung und chemische Härtung gegenüber: Was geschieht jeweils mit dem Filmbildner, und welche Folge hat das für die Wiederlöslichkeit des Films?

**b)** 3 Punkte
Erklären Sie, was die Glasübergangstemperatur beschreibt, und welche Bedeutung ihre Lage zur Gebrauchstemperatur hat.

**c)** 3 Punkte
Berechnen Sie nach der Fox-Gleichung $1/Tg = w_1/Tg_1 + w_2/Tg_2$ die Glasübergangstemperatur eines Copolymers aus 70 Masse-% Methylmethacrylat und 30 Masse-% Butylacrylat. Für die Homopolymere gilt Tg(PMMA) = 378 K und Tg(PBA) = 228 K.

## Aufgabe 10 — Bewertung (Faktor 1, 10 Punkte)

In der Lackierkabine soll ein lösemittelhaltiger 2K-Polyurethanlack gespritzt werden.

**a)** 4 Punkte
Benennen Sie zwei wesentliche Gefährdungen dieser Tätigkeit und begründen Sie jede.

**b)** 3 Punkte
Geben Sie die Rangfolge der Schutzmaßnahmen nach der Gefahrstoffverordnung an und ordnen Sie dieser Rangfolge je eine Maßnahme für diesen Arbeitsplatz zu.

**c)** 3 Punkte
Welches Dokument ist für die Beurteilung des konkreten Produkts verbindlich, und welche Angaben entnehmen Sie ihm für diese Tätigkeit?

## Applikations- und Prüftechnik · Teil 1 · 420 Minuten · 17,5 % der Gesamtnote

Höchstpunktzahl 100, gewichtet über die Faktoren der Aufgaben.

## Aufgabe 1 — Berechnung (Faktor 3, 10 Punkte)

In der Eingangskontrolle steht eine Lieferung Leinöl, das als Rohstoff für einen Ölfirnis vorgesehen ist. Sie sollen die Charge über zwei chemische Einzelbestimmungen prüfen: Säurezahl und Iodzahl, jeweils als Doppelbestimmung. Die Spezifikation lässt für die Säurezahl höchstens 3,0 mg KOH/g zu.

**a)** 4 Punkte

Planen Sie die Durchführung der beiden chemischen Bestimmungen. Erläutern Sie dazu, was Säurezahl und Iodzahl definitionsgemäß angeben und wie sie messtechnisch erfasst werden, warum Sie einen Blindversuch mitführen und jede Bestimmung doppelt ansetzen, und auf welche Bezugsbasis Sie die Kennzahlen beziehen.

**b)** 3 Punkte

Für die Säurezahl liegen vor: Probe 1 Einwaage 5,012 g, Verbrauch 1,85 mL KOH-Maßlösung c = 0,1 mol/L; Probe 2 Einwaage 4,988 g, Verbrauch 1,78 mL; Blindwert 0,05 mL. Berechnen Sie die Säurezahl beider Einzelbestimmungen und den Mittelwert. Geben Sie den Rechenweg an und runden Sie das Endergebnis auf eine sinnvolle Stellenzahl.

**c)** 3 Punkte

Die Iodzahl ergibt in der Doppelbestimmung 176 und 180 g Iod je 100 g Probe. Berechnen Sie den Mittelwert und ordnen Sie ihn dem Trocknungscharakter zu. Bewerten Sie außerdem, ob die Säurezahl die Spezifikation einhält, und beurteilen Sie, wie weit die Iodzahl allein das Trocknungsverhalten belegt.

## Aufgabe 2 — Berechnung (Faktor 3, 10 Punkte)

Ein lösemittelhaltiger 2K-PUR-Spritzlack soll für die Fertigung freigegeben werden. Dafür sind zwei physikalische Einzelbestimmungen vorgesehen: die Auslaufviskosität und der nichtflüchtige Anteil, jeweils als Doppelbestimmung. Die Spezifikation fordert eine Auslaufzeit von 40 s plus/minus 3 s und einen nichtflüchtigen Anteil von 52 % plus/minus 2 %.

**a)** 4 Punkte

Planen Sie die Durchführung der beiden physikalischen Bestimmungen. Geben Sie für die Auslaufviskosität Norm, Becher, Prüftemperatur und Messendpunkt an, für den nichtflüchtigen Anteil Norm, Einwaage, Schälchen und Trockenbedingungen, begründen Sie die Doppelbestimmung und benennen Sie die Grenze des Auslaufbechers.

**b)** 3 Punkte

Die Festkörperbestimmung ergibt: Probe 1 Einwaage 1,024 g, Trockenrückstand 0,532 g; Probe 2 Einwaage 0,987 g, Trockenrückstand 0,509 g. Berechnen Sie den nichtflüchtigen Anteil beider Einzelbestimmungen und den Mittelwert in Prozent. Geben Sie den Rechenweg an und begründen Sie die gewählte Stellenzahl.

**c)** 3 Punkte

Die Auslaufzeiten betragen 38,4 s und 39,2 s. Berechnen Sie den Mittelwert und bewerten Sie beide Prüfgrößen — die Auslaufzeit und den in Teilaufgabe b ermittelten nichtflüchtigen Anteil — gegen die Spezifikation. Geben Sie außerdem an, welche Angaben in den Prüfbericht gehören, damit die Werte vergleichbar bleiben.

## Aufgabe 3 — Anwendung (Faktor 2, 10 Punkte)

Für einen Stahlbau mit 120 m² zu beschichtender Fläche sollen die Bauteile vorbehandelt und mit einem Korrosionsschutz-Grundlack im Niederdruckverfahren (HVLP) gespritzt werden. Der Lack hat einen Volumenfestkörper von 45 %, die geforderte Trockenschichtdicke beträgt 60 µm, der Auftragswirkungsgrad der Anlage liegt bei 60 %.

**a)** 4 Punkte

Stellen Sie den Vorbehandlungsplan für die Stahlbauteile in der richtigen Reihenfolge auf. Nennen Sie die Reinigungsstufe, die mechanische Vorbehandlung mit den zugehörigen getrennten Kenngrößen, die von Ihnen gewählte Konversionsbehandlung mit Begründung und begründen Sie, warum auf diesem Untergrund eine Chromatierung ausscheidet.

**b)** 3 Punkte

Berechnen Sie für den beschriebenen Auftrag die Ergiebigkeit in m² je Liter, den tatsächlichen Materialbedarf in Litern unter Berücksichtigung des Auftragswirkungsgrads und die einzustellende Nass-Schichtdicke in µm. Geben Sie den Rechenweg an.

**c)** 3 Punkte

An den senkrechten Flächen zeigen sich nach dem Spritzen Läufer, an einzelnen Stellen Krater. Deuten Sie beide Fehlerbilder mit je einer Ursache und leiten Sie je eine Korrekturmaßnahme ab. Geben Sie außerdem an, welche Schutzmaßnahmen gegen die Lösemittelbelastung in der Spritzkabine Vorrang haben und welche erst zuletzt greifen.

## Aufgabe 4 — Bewertung (Faktor 2, 10 Punkte)

Ein 2K-PUR-Industrielack auf gestrahltem und phosphatiertem Stahlblech soll nach der Aushärtung freigegeben werden. Sie stellen dafür den Prüfplan auf und werten die Messreihen aus. Gefordert sind eine Trockenschichtdicke von 80 µm plus/minus 10 µm und ein Gitterschnittkennwert von höchstens Gt 1.

**a)** 4 Punkte

Stellen Sie den Prüfplan auf. Ordnen Sie den vier Prüffragen Trockenschichtdicke, Haftung, Filmhärte und Glanz je ein genormtes Verfahren zu und geben Sie zu jedem Verfahren die Angabe an, ohne die das Ergebnis nicht vergleichbar ist.

**b)** 3 Punkte

Die Schichtdickenmessung an sechs Stellen ergibt 78, 82, 85, 79, 83 und 81 µm. Berechnen Sie Mittelwert und Standardabweichung der Stichprobe und geben Sie das Ergebnis als Wert mit Messunsicherheit in einer sinnvollen Stellenzahl an. Geben Sie den Rechenweg an.

**c)** 3 Punkte

Der Gitterschnitt ergibt Gt 1, die Glanzmessung 88 GE bei 60 Grad. Bewerten Sie die Schichtdicke und die Haftung gegen die Vorgaben und begründen Sie, warum der Gitterschnitt keine Haftfestigkeit in N je mm² liefert. Beurteilen Sie außerdem die gewählte Glanz-Messgeometrie.

## Lack- und Beschichtungstechnologie · Teil 2 · 195 Minuten · 27,5 % der Gesamtnote

Höchstpunktzahl 160, gewichtet über die Faktoren der Aufgaben.

## Aufgabe 1 — Anwendung (Faktor 3, 10 Punkte)

Ein pigmentierter, lösemittelhaltiger Industrielack geht aus dem Labor in die Fertigung. Für die erste Betriebscharge ist der Herstellungsablauf festzulegen.

**a)** 4 Punkte

Nennen Sie die Schritte der Flüssiglackherstellung in der richtigen Reihenfolge und begründen Sie, warum die geforderte Feinheit im Mahlgut erreicht sein muss, bevor aufgelackt wird.

**b)** 3 Punkte

Ordnen Sie Netz- und Dispergiermittel, Verlaufsadditiv und Entschäumer dem Mahlgut, dem Auflacken oder beiden Stufen zu und begründen Sie die Zuordnung jeweils über die Funktion des Additivs.

**c)** 3 Punkte

Die Körnigkeitsprüfung liegt über dem Sollwert. Geben Sie die Fertigungsentscheidung an und nennen Sie zwei Grenzen der Aussagekraft dieser Prüfung.

## Aufgabe 2 — Bewertung (Faktor 3, 10 Punkte)

Für eine Stahlkonstruktion im Freien wird ein Decklack gesucht: Auftrag von Hand auf der Baustelle, Trocknung bei Umgebungstemperatur, dauerhafte Bewitterung.

**a)** 4 Punkte

Stellen Sie ein Anforderungsprofil für das Bindemittel auf: Nennen Sie vier Kriterien mit je einer konkreten Anforderung und einer Begründung aus dem Einsatzfall.

**b)** 3 Punkte

Wählen Sie einen Bindemitteltyp aus und begründen Sie die Wahl an zwei Eigenschaften des Bindemittels.

**c)** 3 Punkte

Nennen Sie eine Grenze des gewählten Bindemittels und einen Untergrund oder Einsatzfall, für den es nicht in Frage kommt.

## Aufgabe 3 — Verständnis (Faktor 3, 10 Punkte)

In einer weißen Rezeptur soll aus Kostengründen ein Teil des Titandioxids durch Calciumcarbonat ersetzt werden.

**a)** 4 Punkte

Grenzen Sie Pigment und Füllstoff gegeneinander ab und ordnen Sie beide in die Systematik der Farbmittel ein.

**b)** 3 Punkte

Begründen Sie über die Brechzahl, warum das Deckvermögen in der Regel von anorganischen Pigmenten kommt.

**c)** 3 Punkte

Beurteilen Sie den geplanten Austausch und nennen Sie die Prüfung, mit der Sie die Folge belegen.

## Aufgabe 4 — Anwendung (Faktor 3, 10 Punkte)

Für eine neue Rezeptur ist das Additivpaket festzulegen.

**a)** 4 Punkte
Nennen Sie vier Additivgruppen und geben Sie zu jeder die Wirkung im Lack oder im Film an.

**b)** 3 Punkte
Erklären Sie am Beispiel des Dispergiermittels, wie die Stabilisierung zustande kommt, und warum ein Dispergiermittel nicht für jede Pigment-Bindemittel-Kombination passt.

**c)** 3 Punkte
Begründen Sie, warum die Dosierung über eine Dosierungsreihe ermittelt wird, und nennen Sie zwei Eigenschaften, die dabei zusätzlich zum Ausgangsfehler bewertet werden müssen.

## Aufgabe 5 — Berechnung (Faktor 2, 10 Punkte)

Ein 2K-Polyurethanlack wird gefertigt. Die Stammkomponente enthält 750 g Bindemittel-Festkörper mit der OH-Zahl 84 mg KOH/g. Gehärtet wird mit einem Polyisocyanat mit 20 % NCO-Gehalt bei der Kennzahl 1,05. (M(NCO) = 42,02 g/mol)

**a)** 4 Punkte
Berechnen Sie die Stoffmenge der OH-Gruppen und die NCO-Äquivalentmasse des Härters.

**b)** 3 Punkte
Berechnen Sie die Härtereinwaage und die Summe aus Bindemittel-Festkörper und Härter.

**c)** 3 Punkte
Derselbe Lack wird in der Fertigung chargenweise angesetzt. Eine Charge von 400 kg mit 62 Masse-% Festkörper soll für die Spritzapplikation auf 55 Masse-% eingestellt werden. Berechnen Sie die Lösemittelzugabe.

## Aufgabe 6 — Bewertung (Faktor 2, 10 Punkte)

Die erste Laborcharge eines lufttrocknenden Decklacks wird geprüft. Befund: Der Lack läuft an der senkrechten Fläche ab, der Glanz liegt unter dem Sollwert, und die Staubtrockenzeit ist zu lang.

**a)** 4 Punkte
Ordnen Sie zwei der drei Abweichungen je eine Rezepturmaßnahme zu und begründen Sie die Wirkung.

**b)** 3 Punkte
Beschreiben Sie den Lackentwicklungszyklus und begründen Sie, warum die Optimierung in mehreren Durchgängen mit kleiner werdenden Schritten abläuft. Nennen Sie außerdem ein Vorgehen, mit dem sich mehrere Rezepturfaktoren zugleich untersuchen lassen.

**c)** 3 Punkte
Nennen Sie zu einer Ihrer Maßnahmen einen möglichen Nachteil und geben Sie an, welche Eigenschaft Sie deshalb zusätzlich prüfen.

## Herstellung und Qualitätskontrolle · Teil 2 · 540 Minuten · 27,5 % der Gesamtnote

Höchstpunktzahl 100, gewichtet über die Faktoren der Aufgaben.

## Aufgabe 1 — Berechnung (Faktor 3, 10 Punkte)

Sie arbeiten in der Lackfertigung eines Herstellers von Korrosionsschutzsystemen; gewählte Wahlqualifikation ist Nr. 8, Korrosionsschutzsysteme. Für den Stammlack einer lösemittelhaltigen 2K-Epoxid-Grundierung für Stahl-Brückensegmente liegt Ihnen das Kalkulationsrezept auf 100 Gewichtsteile vor: Epoxidharz 34,0 / Zinkphosphat 10,0 / Zinkoxid 3,0 / Eisenoxidrot 4,0 / Talkum 12,0 / Baryt 10,0 / Netz- und Dispergiermittel 1,2 / Rheologieadditiv 0,8 / Entschäumer 0,4 / Lösemittelgemisch 24,6. Das Epoxidharz wird als Lösung mit einem Festkörpergehalt von 81,2 % geliefert; alle übrigen Rohstoffe sind lösemittelfrei. Daraus ist eine Arbeitsrezeptur für einen Ansatz von 250,0 kg zu erstellen.

**a)** 4 Punkte

Berechnen Sie die Einwaagen aller zehn Rohstoffe für den Ansatz von 250,0 kg. Geben Sie die verwendete Umrechnung sowie die Kontrollsumme der Einwaagen an.

**b)** 3 Punkte

Legen Sie die Zugabereihenfolge der Rohstoffe fest und begründen Sie sie an drei Rohstoffen beziehungsweise Rohstoffgruppen.

**c)** 3 Punkte

Nennen Sie vier Angaben, die über die Einwaagen hinaus in die Herstellungsanweisung dieser Charge gehören. Begründen Sie am Beispiel der Viskosität, warum ein Prüfwert ohne Zusatzangabe wenig wert ist.

## Aufgabe 2 — Anwendung (Faktor 3, 10 Punkte)

Der Ansatz von 250,0 kg wird im Produktionsdissolver gefahren und nach Ihrer Arbeitsrezeptur dokumentiert. Die Spezifikation fordert eine Feinheit von höchstens 30 µm nach DIN EN ISO 1524; ein Teil des Lösemittels wird zum späteren Einstellen zurückbehalten. Sie führen den Prozess von der Mahlgutvorlage bis zur Freigabe.

**a)** 4 Punkte

Stellen Sie das Mahlgut zusammen: Geben Sie an, welche Rohstoffe der Arbeitsrezeptur in das Mahlgut gehören, und begründen Sie, warum das Mahlgut konzentriert angesetzt wird. Begründen Sie außerdem die Zuordnung des Netz- und Dispergiermittels sowie eines verlaufsaktiven Additivs und ordnen Sie Zinkphosphat und Talkum je einem Schutzmechanismus des Korrosionsschutzsystems zu.

**b)** 3 Punkte

Nach 40 Minuten Dispergieren zeigt der Grindometer 45 µm. Entscheiden Sie, ob aufgelackt wird, begründen Sie die Entscheidung und nennen Sie zwei Maßnahmen, mit denen Sie die Zielfeinheit erreichen, ohne allein die Drehzahl zu erhöhen.

**c)** 3 Punkte

Nach dem Auflacken wiegt der Ansatz 230,0 kg bei einem Festkörpergehalt von 75,0 %. Berechnen Sie die Lösemittelmenge in kg, die für einen Ziel-Festkörpergehalt von 69,0 % zuzugeben ist, nennen Sie drei produktionsbegleitende Prüfungen vor der Freigabe und geben Sie an, welche Schutzmaßnahmen beim Dispergieren und Auflacken dieses lösemittelhaltigen Ansatzes Vorrang haben.

## Aufgabe 3 — Berechnung (Faktor 2, 10 Punkte)

Die freigegebene Grundierung wird im Werk auf gestrahlte Stahl-Brückensegmente aufgebracht; die zu beschichtende Fläche beträgt 1200 m². Gefordert ist eine Trockenschichtdicke von 80 µm, der Volumenfestkörper des applikationsfertigen Materials beträgt 50 %. Für die vorgesehene Anlage wurde ein Auftragswirkungsgrad von 60 % ermittelt.

**a)** 4 Punkte
Berechnen Sie die erforderliche Nassschichtdicke, die theoretische Ergiebigkeit, den theoretischen Materialbedarf für die 1200 m² und den tatsächlichen Materialbedarf. Geben Sie alle vier Ergebnisse mit Einheit an.

**b)** 3 Punkte
Wählen Sie ein Spritzverfahren aus und begründen Sie die Wahl. Nennen Sie zwei typische Einstellgrößen dieses Verfahrens und begründen Sie, warum Sie das konventionelle Druckluftspritzen hier nicht wählen.

**c)** 3 Punkte
Nennen Sie zwei Maßnahmen, mit denen Sie während der Applikation die geforderte Schichtdicke sichern, und ordnen Sie den Fehlerbildern Läufer und Trockenspritzer je eine Ursache zu.

## Aufgabe 4 — Bewertung (Faktor 2, 10 Punkte)

Für die Grundierung gilt die Spezifikation: Feinheit höchstens 30 µm, Trockenschichtdicke 80 µm mit einer Toleranz von plus/minus 10 µm, Gitterschnitt höchstens Gt 1. An einem beschichteten Prüfblech messen Sie fünf Trockenschichtdicken: 74, 82, 78, 86 und 80 µm. Auf der Fläche fallen zusätzlich vereinzelte kleine, kraterförmige Vertiefungen auf.

**a)** 4 Punkte
Stellen Sie den Prüfplan auf: Ordnen Sie den Prüfgrößen Feinheit, Haftung, Trockenschichtdicke und Korrosionsschutzwirkung je ein genormtes Prüfverfahren mit Norm zu. Geben Sie außerdem zu jedem der vier Verfahren die Angabe an, ohne die das Ergebnis nicht vergleichbar ist.

**b)** 3 Punkte
Berechnen Sie aus den fünf Messwerten den Mittelwert und die Standardabweichung und bewerten Sie das Ergebnis gegen die Spezifikation. Begründen Sie, warum ein einzelner Messwert für diese Bewertung nicht ausreicht.

**c)** 3 Punkte
Deuten Sie das Fehlerbild der kraterförmigen Vertiefungen, beschreiben Sie das Vorgehen bei der Ursachensuche und leiten Sie eine Korrekturmaßnahme ab.

# Wahlqualifikationen

Drei dieser elf Blöcke werden in der Prüfung gewählt; zusammen tragen sie 60 Prozent des Prüfungsbereichs Lack- und Beschichtungstechnologie. Je Block 80 gewichtete Punkte.

## Wahlqualifikation 1 — wasserverdünnbar — Holz und Holzwerkstoffe

## Aufgabe 1 — Verständnis (Faktor 3, 10 Punkte)

Ihr Labor stellt eine Serie von Innentüren aus beschichteten Holzwerkstoffplatten von einem lösemittelhaltigen auf ein wasserverdünnbares System um. In der Vorauswahl liegen ein selbstvernetzender 1K-Wasserlack und ein wässriger 2K-PUR-Lack auf dem Tisch. Ihr Ausbilder bittet Sie, die stofflichen Grundlagen für die Besprechung aufzubereiten.

**a)** 4 Punkte
Lackbindemittel sind überwiegend hydrophob. Beschreiben Sie die drei grundsätzlichen Wege, auf denen ein Bindemittel dennoch in ein wässriges System gebracht wird, und geben Sie zu jedem Weg an, in welcher Form das Bindemittel dabei im Wasser vorliegt.

**b)** 3 Punkte
Erklären Sie, wie aus einer Dispersion ein zusammenhängender Lackfilm entsteht, welche Bedeutung die Mindestfilmbildetemperatur dabei hat und wodurch der Zielkonflikt zwischen Filmhärte und Filmbildung rezepturtechnisch gelöst wird.

**c)** 3 Punkte
Unterscheiden Sie die nicht selbstvernetzenden von den selbstvernetzenden 1K-Wasserlacken und geben Sie an, welchen Vorteil die Selbstvernetzung für die Beständigkeit der Türoberfläche bringt.

## Aufgabe 2 — Berechnung (Faktor 3, 10 Punkte)

Für die Versiegelung eines Parkettbodens setzen Sie im Labor einen wasserverdünnbaren 2K-PUR-Parkettlack an. Das OH-funktionelle Bindemittel liegt mit 400 g Festkörper vor und hat eine OH-Zahl von 105 mg KOH/g; der hydrophil modifizierte Polyisocyanat-Härter hat einen NCO-Gehalt von 20 Prozent, bezogen auf den Festkörper. Gearbeitet wird mit der für wässrige Systeme üblichen Kennzahl 1,3.

**a)** 4 Punkte
Berechnen Sie die Stoffmenge der OH-Gruppen, die NCO-Äquivalentmasse des Härters und die einzuwiegende Härtermenge. Geben Sie den Rechenweg an und nennen Sie den Gesamtansatz.

**b)** 3 Punkte
Nennen Sie drei Maßnahmen der Untergrundvorbehandlung, die vor dem Beschichten eines Holzuntergrunds erforderlich sind, und begründen Sie jeweils kurz.

**c)** 3 Punkte
Begründen Sie mit den Eigenschaften des Lösemittels Wasser, warum die Trocknung wässriger Holzlacke stark von Temperatur und Luftfeuchte abhängt, und erläutern Sie am Beispiel der industriellen Türenfertigung, welche Bedeutung das Ablüften vor der forcierten Trocknung hat.

## Aufgabe 3 — Bewertung (Faktor 2, 10 Punkte)

Eine Schreinerei hat einen wässrigen Holzlack in einer unbeheizten Werkstatt bei etwa 12 Grad Celsius appliziert. Der Film ist pulvrig und zeigt feine Risse. Beim Nacharbeiten der Fläche mit einem wasserverdünnbaren 2K-PUR-Parkettlack werden Schleifen und Spritzapplikation nötig.

**a)** 4 Punkte
Deuten Sie das Schadensbild des pulvrigen, rissigen Films, nennen Sie zwei geeignete Abhilfemaßnahmen und begründen Sie deren Wirkung.

**b)** 3 Punkte
Beurteilen Sie die Gefährdungen beim Schleifen des Holzbodens und beim Spritzen des isocyanathaltigen Parkettlacks nach dem Muster Gefahr, technische Maßnahme, Schutzwirkung.

**c)** 3 Punkte
Bewerten Sie die Umstellung von einem lösemittelhaltigen auf ein wasserverdünnbares Holzlacksystem. Nennen Sie den wesentlichen Vorteil und zwei technische Nachteile.

# Wahlqualifikation 2 — wasserverdünnbar — Kunststoffoberflächen

## Aufgabe 1 — Verständnis (Faktor 3, 10 Punkte)

Ihr Betrieb entwickelt ein wasserverdünnbares Lacksystem für Stoßfänger aus Polypropylen. In einem Vorversuch perlt der Lack auf dem unbehandelten Spritzgussteil zu Tropfen zusammen. Sie sollen die Grundlagen für die Systemauslegung zusammenstellen.

**a)** 4 Punkte
Erklären Sie mit den Kennwerten der Oberflächenspannung und der Oberflächenenergie, warum ein wasserverdünnbarer Lack ein unbehandeltes Polypropylenteil schlecht benetzt.

**b)** 3 Punkte
Nennen Sie die Bindemittelbasis wasserverdünnbarer Kunststofflacke, begründen Sie, warum bei Kunststoffbauteilen die Elastizität des Films eine zentrale Rezepturvorgabe ist, und geben Sie an, auf welchem Herstellweg die dafür bevorzugten Polyurethandispersionen ins Wasser gebracht werden.

**c)** 3 Punkte
Für die Instrumententafel wird ein Soft-Feel-Effekt gefordert. Erläutern Sie, aus welchen zwei Bausteinen die samtige Haptik entsteht und wodurch der optische Eindruck verstärkt wird.

## Aufgabe 2 — Anwendung (Faktor 3, 10 Punkte)

In der Vorbehandlungslinie werden die Polypropylenteile gereinigt und beflammt, bevor der wässrige Primer aufgetragen wird. Der Primer hat einen Volumenfestkörper von 32 Prozent, gefordert sind 12 µm Trockenschichtdicke auf insgesamt 150 m² Bauteilfläche. Der Auftragswirkungsgrad der Anlage beträgt 60 Prozent.

**a)** 4 Punkte
Beschreiben Sie, was beim Beflammen chemisch an der Kunststoffoberfläche geschieht, wie das Ergebnis im Betrieb geprüft wird und warum vorbehandelte Teile nur innerhalb eines festgelegten Zeitfensters beschichtet werden dürfen.

**b)** 3 Punkte
Berechnen Sie die einzustellende Nass-Schichtdicke, die theoretische Ergiebigkeit des Primers und die tatsächlich bereitzustellende Lackmenge für die 150 m². Geben Sie den Rechenweg an.

**c)** 3 Punkte
Für besonders kritische Polyolefinteile ist zusätzlich ein Haftvermittler vorgesehen. Nennen Sie den üblichen Haftvermittlertyp, seine Auftragsweise und seine Wirkung, und geben Sie an, was für andere Kunststoffe wie Polycarbonat gilt.

## Aufgabe 3 — Bewertung (Faktor 2, 10 Punkte)

An lackierten Kunststoffteilen aus der laufenden Serie treten vereinzelt Krater auf, an einzelnen Teilen platzt der Film bei geringer Belastung ab. Die Teile stammen aus dem Spritzguss und durchlaufen ein wässriges Reinigungsbad. Aufgetragen wird zuletzt ein wasserverdünnbarer 2K-PUR-Klarlack im Spritzverfahren.

**a)** 4 Punkte
Deuten Sie die möglichen Ursachen der Krater und leiten Sie für zwei Ursachen jeweils eine konkrete Abhilfemaßnahme ab.

**b)** 3 Punkte
Der Kunde fordert für die Haftung einen Absolutwert in N/mm². Erläutern Sie, warum der im Werk übliche Gitterschnitt dafür nicht ausreicht, und nennen Sie das geeignete Prüfverfahren mit seiner Auswertung.

**c)** 3 Punkte
Beurteilen Sie die Gefährdung durch die Spritzapplikation des isocyanathaltigen Klarlacks nach dem Muster Gefahr, technische Maßnahme, Schutzwirkung.

## Wahlqualifikation 3 — wasserverdünnbar — metallische Untergründe

### Aufgabe 1 — Verständnis (Faktor 3, 10 Punkte)

In der Anwendungstechnik werden zwei wasserverdünnbare Wege des Korrosionsschutzes gegenübergestellt: die kathodische Elektrotauchlackierung einer Karosserie und ein mehrschichtiges Stahlbausystem. Sie sollen die stofflichen und elektrochemischen Grundlagen für eine Schulung aufbereiten.

**a)** 4 Punkte
Beschreiben Sie den Aufbau des KTL-Bindemittels, wie es wasserdispergierbar gemacht wird und welche Vorgänge an der Kathode zur Filmabscheidung führen. Geben Sie die beiden zugehörigen Reaktionsgleichungen an.

**b)** 3 Punkte
Begründen Sie, warum die kathodische Elektrotauchlackierung dem anodischen Verfahren im Korrosionsschutz überlegen ist, und nennen Sie einen Verfahrensvorteil, den beide Elektrotauchverfahren gegenüber dem Spritzen haben.

**c)** 3 Punkte
Erläutern Sie die drei Schutzmechanismen, über die Korrosionsschutzpigmente in einer Grundbeschichtung auf Stahl wirken, und nennen Sie jeweils ein Beispielpigment.

### Aufgabe 2 — Berechnung (Faktor 3, 10 Punkte)

Für einen Stahlbau mit 600 m² zu beschichtender Fläche ist eine wasserverdünnbare 2K-Epoxid-Zwischenbeschichtung vorgesehen. Ihr Volumenfestkörper beträgt 45 Prozent, gefordert sind 120 µm Trockenschichtdicke in zwei Lagen, der Auftragswirkungsgrad der Anlage liegt bei 70 Prozent. Parallel prüfen Sie im Labor die Charge eines wasserverdünnbaren Bindemittels.

**a)** 4 Punkte
Berechnen Sie die theoretische Ergiebigkeit der Zwischenbeschichtung, den theoretischen Materialbedarf und den tatsächlich bereitzustellenden Materialbedarf. Geben Sie den Rechenweg an.

**b)** 3 Punkte
Erklären Sie, was der MEQ-Wert eines wasserverdünnbaren Bindemittels angibt und warum er für den Chargenvergleich aussagekräftiger ist als der pH-Wert allein. Berechnen Sie den MEQ-Wert aus folgender Titration: 10,0 g Lack mit einem nichtflüchtigen Anteil von 42 Prozent verbrauchen 12,6 ml Maßlösung der Konzentration 0,1 mol/l.

**c)** 3 Punkte
Beschreiben Sie die Untergrundvorbereitung des Stahls vor der Grundbeschichtung und geben Sie an, welche Kenngrößen dabei nach welchen Normen festgelegt werden.

### Aufgabe 3 — Bewertung (Faktor 2, 10 Punkte)

Auf einem gestrahlten Stahlblech zeigt ein frisch applizierter wasserverdünnbarer 2K-PUR-Decklack nach dem Trocknen Blasen; aufgetragen wurde in einer einzigen dicken Schicht ohne Zwischenablüftung. Anschließend soll das Gesamtsystem für eine Korrosivitätskategorie qualifiziert werden. Für die Grundbeschichtung ist ein wasserverdünnbarer 2K-Epoxidharzlack vorgesehen.

**a)** 4 Punkte
Deuten Sie die Blasenbildung im wässrigen 2K-PUR-Film chemisch und leiten Sie drei Maßnahmen ab, mit denen sich das Problem in der Praxis beherrschen lässt.

**b)** 3 Punkte
Erläutern Sie, wie der Korrosionsschutz des Systems im Labor geprüft und bewertet wird, und beurteilen Sie die Aussagekraft der Dauer-Salzsprühnebelprüfung.

**c)** 3 Punkte
Beurteilen Sie die Gefährdung durch den Härter des wasserverdünnbaren 2K-Epoxidharzlacks nach dem Muster Gefahr, technische Maßnahme, Schutzwirkung.

# Wahlqualifikation 4 — Beschichtungsstoffe für mineralische Untergründe

## Aufgabe 1 — Verständnis (Faktor 3, 10 Punkte)

In Ihrem Labor soll eine Fassadenbeschichtung für ein denkmalgeschütztes Gebäude mit mineralischem Kalkputz ausgewählt werden. Der Planer verlangt eine hohe Diffusionsoffenheit, der ausführende Betrieb wünscht eine möglichst einfache Verarbeitung. Sie stellen die infrage kommenden Bindemittelsysteme gegenüber.

**a)** 4 Punkte
Benennen Sie das Bindemittel einer 2K-Silicatfarbe, erläutern Sie die Härtungsreaktion (Verkieselung) und begründen Sie, warum dieses System nur auf mineralischen Untergründen eingesetzt werden kann.

**b)** 3 Punkte
Beschreiben Sie die Zusammensetzung einer Dispersionssilicatfarbe und einer Siliconharzfarbe und nennen Sie den verarbeitungstechnischen Vorteil beider Systeme gegenüber der 2K-Silicatfarbe.

**c)** 3 Punkte
Erklären Sie, warum Fassadenfarben in der Regel höher pigmentiert werden als Glanzlacke, und nennen Sie zwei Nachteile, die sich oberhalb der kritischen PVK einstellen.

## Aufgabe 2 — Berechnung (Faktor 3, 10 Punkte)

Für die Fassadenfarbe liegt ein Rezepturansatz mit Titandioxid, Talkum und Bindemittel-Festkörper vor. Vor der Musterherstellung sollen Sie die Pigmentierungshöhe prüfen und anschließend am Prüfanstrich die bauphysikalischen Kennwerte bewerten. Der Kalkputz ist stark saugend.

**a)** 4 Punkte
Berechnen Sie für den Ansatz aus 82 g Titandioxid (Dichte 4,1 g/cm3), 210 g Talkum (Dichte 2,8 g/cm3) und 55 g Bindemittel-Festkörper (Dichte 1,1 g/cm3) die PVK. Berechnen Sie außerdem die kritische PVK näherungsweise aus der Ölzahl des Titandioxids (Ölzahl 18 g/100 g, Dichte Leinöl 0,93 g/cm3) und bewerten Sie das Ergebnis.

**b)** 3 Punkte
Der Prüfanstrich hat eine Trockenschichtdicke von 200 µm; die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl µ des Films beträgt 900, der Wasseraufnahmekoeffizient w beträgt 0,3 kg/(m2 mal Wurzel h). Berechnen Sie den sd-Wert und prüfen Sie alle drei Künzel-Kriterien.

**c)** 3 Punkte
Begründen Sie, warum auf dem stark saugenden Kalkputz vor der Fassadenfarbe ein Tiefgrund eingesetzt wird, und nennen Sie die Eigenschaften, die ein Tiefgrund dafür mitbringen muss.

## Aufgabe 3 — Bewertung (Faktor 2, 10 Punkte)

Zwei Jahre nach einer Fassadensanierung zeigen sich Blasen und Abplatzungen, an einigen Stellen sind weiße Ausblühungen sichtbar. Für die Neubeschichtung ist eine 2K-Silicatfarbe vorgesehen; zuvor werden die Altbeschichtungen mechanisch entfernt.

**a)** 4 Punkte
Deuten Sie die Blasen und Abplatzungen sowie die Ausblühungen und leiten Sie daraus die Anforderungen an die bauphysikalischen Kennwerte der Neubeschichtung ab.

**b)** 3 Punkte
Beim mechanischen Entfernen der Altbeschichtung entsteht Staub. Nennen Sie die Gefahr, zwei Schutzmaßnahmen und deren Schutzwirkung.

**c)** 3 Punkte
Bewerten Sie die Verarbeitung der 2K-Silicatfarbe unter Sicherheits- und Verarbeitungsgesichtspunkten und nennen Sie zwei Schutzmaßnahmen.

# Wahlqualifikation 5 — lösemittelhaltige Beschichtungsstoffe — Holz und Holzwerkstoffe

## Aufgabe 1 — Verständnis (Faktor 3, 10 Punkte)

In einer Möbelmanufaktur werden Fronten und Türen mit lösemittelhaltigen Systemen lackiert. Zur Auswahl stehen ein säurehärtender Lack und ein Cellulosenitrat-Kombilack. Sie sollen beide Systeme technisch einordnen.

**a)** 4 Punkte
Beschreiben Sie den Aufbau eines säurehärtenden Lackes, die Vernetzungsreaktion und die Aufgabe des sauren Härters.

**b)** 3 Punkte
Begründen Sie, warum einem Cellulosenitrat-Lack Weichmacher und harte Kombiharze zugesetzt werden.

**c)** 3 Punkte
Geben Sie an, wie der Stickstoffgehalt beim Cellulosenitrat zustande kommt, welche Bedeutung er hat und in welchem Bereich Lacktypen liegen.

## Aufgabe 2 — Berechnung (Faktor 3, 10 Punkte)

Für eine Parkettversiegelung wird ein lösemittelhaltiger 2K-PUR-Lack angesetzt. Das OH-Bindemittel liegt mit 800 g Festkörper und einer OH-Zahl von 105 mg KOH/g vor, der Polyisocyanat-Härter hat einen NCO-Gehalt von 20 %, bezogen auf den Festkörper. Vor dem Ansetzen prüfen Sie die Gebinde und die Verarbeitungsbedingungen.

**a)** 4 Punkte
Berechnen Sie die nötige Härtermenge (Festkörper) für die Kennzahl 1,05 in drei Schritten und geben Sie an, wie viel Lieferware einzuwiegen ist, wenn der Härter als 75-prozentige Lösung vorliegt.

**b)** 3 Punkte
Erläutern Sie, warum Rohstoffe, Geräte und Gebinde beim lösemittelhaltigen 2K-PUR-Parkettlack trocken sein müssen, und nennen Sie vier geeignete Maßnahmen.

**c)** 3 Punkte
Nennen Sie fünf Anforderungen an einen Parkettlack und beschreiben Sie, wie der Gleitwiderstand bestimmt wird.

## Aufgabe 3 — Bewertung (Faktor 2, 10 Punkte)

Im Spritzstand riecht es nach dem Verarbeiten des säurehärtenden Lackes stechend, die Beschäftigten klagen über Augenreizungen. Zusätzlich fragt ein Kunde nach dem VOC-Gehalt des eingesetzten Cellulosenitrat-Klarlackes; dieser hat 20 % Festkörper und eine Dichte von 0,95 kg/l.

**a)** 4 Punkte
Erklären Sie die Herkunft des Formaldehyds im säurehärtenden System, nennen Sie zwei Einstufungsmerkmale nach CLP samt Arbeitsplatzgrenzwert und beschreiben Sie, wie Formaldehydfänger wirken.

**b)** 3 Punkte
Beim Spritzen des Cellulosenitrat-Lackes entstehen Lösemitteldämpfe. Nennen Sie die Gefahr, eine vorrangig technische Maßnahme und deren Schutzwirkung.

**c)** 3 Punkte
Schätzen Sie den VOC-Gehalt des Cellulosenitrat-Klarlackes überschlägig ab und begründen Sie, warum dieser Wert kein rechtlicher Nachweis ist.

# Wahlqualifikation 6 — lösemittelhaltige Beschichtungsstoffe — Kunststoffoberflächen

## Aufgabe 1 — Verständnis (Faktor 3, 10 Punkte)

Ein Stoßfänger aus Polypropylen soll in einem Reparaturbetrieb mit einem lösemittelhaltigen 2K-PUR-System lackiert werden. Der erste Versuch auf dem nur gereinigten, aber nicht aktivierten Teil ergibt einen Film, der sich zusammenzieht und abperlt.

**a)** 4 Punkte
Erklären Sie, warum der Lack auf unbehandeltem Polypropylen nicht benetzt, und beschreiben Sie die notwendigen Schritte der Vorbehandlung einschließlich des Haftvermittlers.

**b)** 3 Punkte
Beschreiben Sie den Aufbau des lösemittelhaltigen 2K-PUR-Decklackes und begründen Sie die Wahl des Härtertyps sowie die Anforderung an das Lösemittel.

**c)** 3 Punkte
Begründen Sie, warum Kunststofflacke elastisch eingestellt werden, und erklären Sie den Aufbau eines Soft-Feel-Lackes.

## Aufgabe 2 — Berechnung (Faktor 3, 10 Punkte)

Nach dem Beflammen werden die Polypropylenteile im Labor geprüft und anschließend gespritzt. Für die Kalkulation soll der Materialbedarf für 60 m2 Bauteilfläche bestimmt werden.

**a)** 4 Punkte
Für den beflammten Kunststoff wurde die Oberflächenenergie mit 40 mN/m bestimmt, für den Lack die Oberflächenspannung mit 30 mN/m und für die Grenzfläche Lack/Kunststoff 12 mN/m. Berechnen Sie mit der Young-Gleichung den Randwinkel und bewerten Sie die Benetzung. Berechnen Sie zum Vergleich den Randwinkel für unbehandeltes Polypropylen, für das die Oberflächenenergie 30 mN/m und die Grenzflächenspannung Lack/Kunststoff 35 mN/m beträgt.

**b)** 3 Punkte
Der Lack hat einen Volumenfestkörper von 45 %, die Trockenschichtdicke soll 30 µm betragen, der Auftragswirkungsgrad liegt bei 65 %. Berechnen Sie die Ergiebigkeit, den Materialbedarf für 60 m2 und zum Vergleich den Bedarf, der ohne Overspray-Verlust nötig wäre.

**c)** 3 Punkte
Beschreiben Sie, wie die Aktivierung im Betrieb geprüft wird, welche Richtwerte gelten und warum vorbehandelte Teile zeitnah lackiert werden müssen.

## Aufgabe 3 — Bewertung (Faktor 2, 10 Punkte)

An der lackierten Serie zeigen sich Krater, und an einzelnen Teilen lässt sich der Film mit dem Fingernagel abheben. Gleichzeitig wird der Betrieb auf den Umgang mit dem Isocyanat-Härter und auf seine Lösemittelemission hin überprüft.

**a)** 4 Punkte
Deuten Sie die beiden Fehlerbilder und leiten Sie zu jedem eine Abstellmaßnahme ab.

**b)** 3 Punkte
Beim Spritzen des 2K-PUR-Lackes entsteht Spritznebel. Nennen Sie die Gefahr, eine vorrangig technische Maßnahme und deren Schutzwirkung.

**c)** 3 Punkte
Nennen Sie zwei Wege, mit denen der Betrieb die Lösemittelemission senken kann, und ordnen Sie zu, welche Vorschrift das Produkt und welche die Anlage betrifft.

# Wahlqualifikation 7 — lösemittelhaltige Beschichtungsstoffe — metallische Untergründe

## Aufgabe 1 — Verständnis (Faktor 3, 10 Punkte)

In Ihrem Labor wird ein lösemittelhaltiger 2K-Polyurethan-Decklack für Stahlbauteile entwickelt, die im Freien stehen. Stammlack und Isocyanat-Härter werden getrennt geliefert und erst kurz vor der Applikation gemischt. Sie unterrichten die Anwendungstechnik über den Aufbau des Systems.

**a)** 4 Punkte
Erläutern Sie die Härtungsreaktion eines 2K-PUR-Lacks und die Bedeutung der entstehenden Vernetzung für den Film. Beschreiben Sie außerdem die Nebenreaktion des Isocyanats mit Wasser samt ihrer Folge und leiten Sie daraus ab, welche Konsequenz sich für das Ansetzen des Lacks ergibt.

**b)** 3 Punkte
Begründen Sie, welchen Isocyanat-Härtertyp Sie für diesen bewitterten Decklack wählen. Stellen Sie dazu aromatische und (cyclo)aliphatische Härter mit je einem Beispiel, ihrem Verhalten unter Licht und ihrem typischen Einsatzgebiet gegenüber.

**c)** 3 Punkte
Nennen Sie drei für 2K-PUR geeignete Lösemittel und begründen Sie die gemeinsame chemische Anforderung an sie. Erklären Sie außerdem, warum Alkohole ausscheiden, und nennen Sie das dabei besonders verwechslungsgefährdete Stoffpaar.

## Aufgabe 2 — Berechnung (Faktor 3, 10 Punkte)

Für einen Versuchsansatz des 2K-PUR-Decklacks stehen 400 g Bindemittel-Festkörper mit der OH-Zahl 120 mg KOH/g bereit. Der Härter ist ein Polyisocyanat mit einem NCO-Gehalt von 20 Prozent, bezogen auf den Festkörper, und wird als 75-prozentige Lösung geliefert; gearbeitet wird mit der Kennzahl 1,05. Die Stahlbauteile werden im Werk vorbehandelt und anschließend gespritzt.

**a)** 4 Punkte
Berechnen Sie nacheinander die Stoffmenge der OH-Gruppen im Bindemittel-Festkörper, die NCO-Äquivalentmasse des Härters und die Härtermenge als Festkörper. Geben Sie abschließend an, wie viel Gramm der 75-prozentigen Lieferware einzuwiegen sind. Schreiben Sie den Rechenweg auf.

**b)** 3 Punkte
Beschreiben Sie die Vorbehandlung der Stahlbauteile in der richtigen Reihenfolge. Nennen Sie das Verfahren zur Entfernung von Zunder und Rost mit einem Beispiel für einen Entrostungsgrad und der zugehörigen Norm sowie eine Konversionsbehandlung mit ihrer Wirkung.

**c)** 3 Punkte
Der Betrieb erwägt, vom konventionellen Druckluftspritzen auf Niederdruckspritzen (HVLP) umzustellen. Erklären Sie den Begriff Auftragswirkungsgrad, nennen Sie für beide Verfahren den Richtwert und begründen Sie, wodurch HVLP den höheren Wert erreicht.

## Aufgabe 3 — Bewertung (Faktor 2, 10 Punkte)

Beim Spritzen des 2K-PUR-Lacks treten an dick beschichteten Stellen Blasen und Nadelstiche auf. Zugleich fragt der Sicherheitsbeauftragte nach den Schutzmaßnahmen beim Verspritzen isocyanathaltiger Lacke, und die Betriebsleitung möchte die Lösemittelemission des Standorts senken.

**a)** 4 Punkte

Beurteilen Sie die Gefährdung beim Verspritzen isocyanathaltiger Lacke nach dem Muster Gefahr, technische Maßnahme, Schutzwirkung. Geben Sie außerdem an, welchen Rang die persönliche Schutzausrüstung in der vorgeschriebenen Reihenfolge der Schutzmaßnahmen einnimmt.

**b)** 3 Punkte

Deuten Sie die Blasen und Nadelstiche. Nennen Sie je eine mögliche Ursache aus dem 2K-PUR-System und aus der Applikation und leiten Sie zu jeder Ursache eine Maßnahme ab.

**c)** 3 Punkte

Schlagen Sie zwei technische Wege vor, mit denen sich die Lösemittelemission dieses Systems senken lässt, und begründen Sie jeweils die Wirkung. Ordnen Sie außerdem zu, welche Vorschrift die Anlage und welche das Produkt betrifft.

# Wahlqualifikation 8 — Korrosionsschutzsysteme

## Aufgabe 1 — Verständnis (Faktor 3, 10 Punkte)

Ihr Labor entwickelt eine Grundierung für Stahlsegmente einer Brücke, die im Werk auf gestrahlten Stahl aufgebracht wird. Die Bauteile stehen dauerhaft im Freien bei hoher Korrosivität, gefordert ist eine lange Schutzdauer. Sie sollen das Schutzkonzept und die Rezepturbausteine erläutern.

**a)** 4 Punkte

Erläutern Sie die drei Schutzmechanismen, die in Korrosionsschutzsystemen genutzt werden, jeweils mit einem typischen Pigment und seiner Wirkungsweise. Grenzen Sie dabei ausdrücklich den aktiven Schutz durch Zinkphosphat gegen den kathodischen Schutz ab.

**b)** 3 Punkte

Beschreiben Sie den mehrlagigen Aufbau eines Korrosionsschutzsystems und nennen Sie für jede der drei Lagen ihre Hauptaufgabe.

**c)** 3 Punkte

Für die Grundierung ist ein 2K-Epoxidharzsystem vorgesehen. Begründen Sie diese Bindemittelwahl, nennen Sie einen geeigneten Härtertyp mit seinem Vorteil und geben Sie an, welche Pigmente und Füllstoffe die Aufgaben aktiver Korrosionsschutz, Barriere und Standfestigkeit sowie Farbe und Deckung übernehmen.

## Aufgabe 2 — Berechnung (Faktor 3, 10 Punkte)

Für die Werkbeschichtung sind 850 m² Stahlfläche mit der Grundierung zu versehen. Die Grundierung hat einen Volumenfestkörper von 55 Prozent, gefordert ist eine Trockenschichtdicke von 80 µm. Appliziert wird im Airless-Verfahren mit einem Auftragswirkungsgrad von 65 Prozent. Ein Teil der Bauteile ist feuerverzinkt.

**a)** 4 Punkte

Berechnen Sie die theoretische Ergiebigkeit der Grundierung, den theoretischen Materialbedarf für die Fläche und den tatsächlich bereitzustellenden Materialbedarf. Berechnen Sie außerdem die Nass-Schichtdicke, die für die geforderte Trockenschichtdicke einzustellen ist. Schreiben Sie den Rechenweg auf.

**b)** 3 Punkte

Erläutern Sie die Untergrundvorbereitung des unbeschichteten Stahls. Nennen Sie das Verfahren, die Bezeichnung des erreichten Reinheitsgrades mit einem Beispiel und begründen Sie, welche zweite Wirkung dieses Verfahren neben dem Entfernen von Rost und Zunder hat.

**c)** 3 Punkte

Erklären Sie am Beispiel der feuerverzinkten Bauteile, was ein Duplexsystem ist und welchen Vorteil es bietet. Nennen Sie außerdem, worauf bei der Vorbereitung der Zinkoberfläche besonders zu achten ist.

## Aufgabe 3 — Bewertung (Faktor 2, 10 Punkte)

Das fertige System soll für eine Korrosivitätskategorie qualifiziert werden. Parallel bereitet das Labor eine zinkstaubhaltige Grundierung vor, bei der sich der Zinkstaub im Gebinde stark absetzt. Auf der Baustelle werden beschichtete Teile später verschweißt.

**a)** 4 Punkte

Beschreiben Sie, wie der Korrosionsschutz des Systems im Labor geprüft wird. Nennen Sie die Salzsprühnebelprüfung mit Norm und ihren drei Varianten, eine weitere Einzelprüfung mit Norm, die Bewertungsgrößen an der Probe und beurteilen Sie die Aussagekraft des Dauer-Salzsprühnebels.

**b)** 3 Punkte

Beurteilen Sie das Absetzen des Zinkstaubs und leiten Sie eine Maßnahme ab. Nennen Sie außerdem eine Anforderung an das Bindemittel einer Zinkstaubgrundierung mit Begründung und den Zinkanteil, der nach ISO 12944-5 als Basis für zinkreiche Grundbeschichtungen gilt.

**c)** 3 Punkte

Beim Schweißen und thermischen Trennen der zinkbeschichteten Teile besteht eine besondere Gefährdung. Stellen Sie diese nach dem Muster Gefahr, technische Maßnahme, Schutzwirkung dar.

## Wahlqualifikation 9 — Pulverlacksysteme

## Aufgabe 1 — Verständnis (Faktor 3, 10 Punkte)

Ein Kunde lässt Fassadenprofile aus Aluminium pulverbeschichten; die Profile sind dauerhaft der Bewitterung ausgesetzt. Im Labor sollen Sie das passende Pulverlacksystem auswählen und die Bindemittelanforderungen begründen. Lager- und Verlaufsverhalten des Pulvers sind dabei gleichermaßen zu betrachten.

**a)** 4 Punkte
Erläutern Sie den Zielkonflikt, den das Bindemittel eines Pulverlacks lösen muss. Nennen Sie die beiden gegenläufigen Anforderungen mit ihrer jeweiligen Begründung und beschreiben Sie, mit welchen zwei rezepturtechnischen Mitteln dieser Konflikt gelöst wird.

**b)** 3 Punkte
Begründen Sie die Auswahl des Bindemittelsystems für die bewitterten Fassadenprofile. Stellen Sie dazu den reinen Epoxid-Pulverlack, den Epoxid/Polyester-Hybrid und den reinen Polyester-Pulverlack hinsichtlich Bewitterungseignung und typischem Einsatzgebiet gegenüber.

**c)** 3 Punkte
Für den reinen Polyester-Pulverlack stehen TGIC und Hydroxyalkylamid als Vernetzer zur Wahl. Nennen Sie für beide den Reaktionstyp und das dabei entstehende Abspaltprodukt und leiten Sie die jeweilige Folge für die Verarbeitung oder für den Arbeitsschutz ab.

## Aufgabe 2 — Berechnung (Faktor 3, 10 Punkte)

Für eine Innenanwendung soll ein Epoxid/Polyester-Hybrid-Pulverlack formuliert werden. Der carboxylgruppenhaltige Polyester hat die Säurezahl 35 mg KOH/g, das Epoxidharz eine Epoxid-Äquivalentmasse von 700 g je Äquivalent. Anschließend wird das Pulver hergestellt und elektrostatisch appliziert.

**a)** 4 Punkte
Berechnen Sie für 100 g Polyester die Stoffmenge der Carboxylgruppen und daraus die stöchiometrisch nötige Masse an Epoxidharz. Geben Sie das Mischungsverhältnis Polyester zu Epoxid in Massenprozent an und beurteilen Sie, ob das Ergebnis im typischen Bereich für Hybridformulierungen liegt. Schreiben Sie den Rechenweg auf.

**b)** 3 Punkte
Beschreiben Sie die Prozesskette der Pulverlackherstellung in der richtigen Reihenfolge. Erklären Sie außerdem, welche Aufgabe der Extruder erfüllt und warum die Schmelzetemperatur begrenzt und die Verweilzeit kurz gehalten wird.

**c)** 3 Punkte
Vergleichen Sie Koronaaufladung und Triboaufladung beim elektrostatischen Pulverspritzen. Nennen Sie für beide, wie die Ladung entsteht, und beschreiben Sie je einen typischen Nachteil des jeweiligen Verfahrens.

## Aufgabe 3 — Bewertung (Faktor 2, 10 Punkte)

An einer mit HAA-vernetztem Polyester-Pulverlack beschichteten Serie zeigen dick beschichtete Stellen nach dem Einbrennen Poren und Nadelstiche. Die Wareneingangsprüfung des Pulvers steht ebenfalls an, und in der Pulverkabine wurden Mängel im Explosionsschutz gemeldet.

**a)** 4 Punkte

Deuten Sie die Poren und Nadelstiche an der beschichteten Serie. Nennen Sie die chemische Ursache aus dem Vernetzungssystem, eine zweite mögliche Ursache aus dem Pulver selbst, zwei Maßnahmen zur Abhilfe und beurteilen Sie, ob ein Wechsel des Vernetzers das Problem beheben würde.

**b)** 3 Punkte

Erläutern Sie, wie die Gelzeit eines Pulverlacks nach DIN EN ISO 8130-6 bestimmt wird. Nennen Sie die Prüftemperatur im Regelfall, das Kriterium für das Ende der Messung und werten Sie aus, was eine kurze und was eine lange Gelzeit für den Einbrennprozess bedeutet.

**c)** 3 Punkte

Beurteilen Sie die Gefährdung durch das Pulver in der Applikationskabine nach dem Muster Gefahr, technische Maßnahme, Schutzwirkung.

## Wahlqualifikation 10 — Elektrotauchlacke

## Aufgabe 1 — Verständnis (Faktor 3, 10 Punkte)

In der Grundierlinie eines Automobilwerks werden Karosserien kathodisch tauchlackiert. Ein Kunde aus der Industriefertigung fragt an, ob für seine Bauteile auch ein anodischer Elektrotauchlack in Frage kommt. Sie sollen den chemischen Aufbau und die Wirkungsweise beider Systeme gegenüberstellen.

**a)** 4 Punkte

Beschreiben Sie den Aufbau des Bindemittels eines kathodischen Elektrotauchlacks. Gehen Sie darauf ein, wie es hergestellt wird, wodurch es wasserdispergierbar wird und welche funktionelle Gruppe später der Vernetzung dient.

**b)** 3 Punkte

Erklären Sie, warum das Werkstück beim kathodischen Elektrotauchlack als Kathode geschaltet wird. Geben Sie die Elektrodenreaktion am Werkstück an und beschreiben Sie, wodurch die Abscheidung ausgelöst wird.

**c)** 3 Punkte

Begründen Sie, warum der kathodische Elektrotauchlack einen höheren Korrosionsschutz liefert als der anodische. Gehen Sie dabei sowohl auf das Verhalten des Werkstücks während der Abscheidung als auch auf den Aufbau des abgeschiedenen Films ein.

## Aufgabe 2 — Berechnung (Faktor 3, 10 Punkte)

Sie überwachen im Labor ein kathodisches Elektrotauchlackbad der Serienfertigung. Zur Chargenkontrolle bestimmen Sie den MEQ-Wert des Badmaterials durch Titration. Außerdem sollen Sie einem neuen Kollegen die Verfahrenstechnik der Anlage erläutern.

**a)** 4 Punkte

Für die MEQ-Bestimmung werden 10,0 g Lack eingewogen; der nichtflüchtige Anteil beträgt 20,0 Prozent. Der Verbrauch an Maßlösung (Salzsäure, 0,1 mol/l) beträgt 6,0 ml. Geben Sie die Berechnungsformel an, berechnen Sie den MEQ-Wert mit vollständigem Rechenweg und nennen Sie die Einheit des Ergebnisses.

**b)** 3 Punkte

Erläutern Sie die Aufgabe der Ultrafiltration im Elektrotauchlackbad. Geben Sie an, welche Stoffe die Membran passieren, welche zurückgehalten werden und wofür das Permeat genutzt wird.

**c)** 3 Punkte

Erklären Sie, warum sich die Schichtdicke bei der Elektrotauchlackierung selbst begrenzt, und beschreiben Sie, wie sich eine zu hohe und eine zu niedrige Abscheidespannung auf den abgeschiedenen Film auswirken.

## Aufgabe 3 — Bewertung (Faktor 2, 10 Punkte)

Im laufenden Betrieb steigt die elektrische Leitfähigkeit des Elektrotauchlackbades an; gleichzeitig meldet die Fertigung ungleichmäßige Schichtdicken und vereinzelte Fehlstellen. Zusätzlich soll die Gefährdungsbeurteilung für den Einbrennofen überarbeitet werden.

**a)** 4 Punkte

Bewerten Sie den Befund. Erklären Sie, was die elektrische Leitfähigkeit über das Bad aussagt, welche Ursachen für die Abweichungen in Frage kommen und welche Maßnahmen die Badführung wieder stabilisieren.

**b)** 3 Punkte

Beim Einbrennen der kathodisch abgeschiedenen Grundierung entkappt der Polyisocyanat-Härter. Beschreiben Sie nach dem Muster Gefahr, technische Maßnahme und Schutzwirkung, wie die Beschäftigten am Ofen geschützt werden.

**c)** 3 Punkte

Beurteilen Sie die Elektrotauchlackierung unter ökologischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten. Nennen Sie drei Vorteile gegenüber dem Spritzauftrag und begründen Sie diese.

## Wahlqualifikation 11 — Druckfarben

## Aufgabe 1 — Verständnis (Faktor 3, 10 Punkte)

Sie arbeiten im Anwendungslabor eines Druckfarbenherstellers. Ein neuer Auszubildender soll die Rezepturunterlagen einer Flexodruckfarbe und einer UV-Offsetfarbe verstehen. Sie erklären ihm den grundsätzlichen Aufbau von Druckfarben und die Besonderheiten strahlungshärtender Systeme.

**a)** 4 Punkte
Nennen Sie die vier Komponentengruppen einer Druckfarbe und geben Sie zu jeder Gruppe die Aufgabe sowie ein typisches Beispiel an.

**b)** 3 Punkte
Begründen Sie, warum Dispergierqualität und Farbstärke bei Druckfarben eine größere Rolle spielen als bei Flüssiglacken. Belegen Sie Ihre Begründung mit typischen Schichtdicken.

**c)** 3 Punkte
Beschreiben Sie den Aufbau und den Härtungsmechanismus einer UV-Druckfarbe und grenzen Sie das Elektronenstrahlverfahren davon ab.

## Aufgabe 2 — Berechnung (Faktor 3, 10 Punkte)

Für eine lösemittelbasierte Flexodruckfarbe soll die Betriebsviskosität überprüft werden. Sie messen die Auslaufzeit im DIN-4-Becher bei 20 Grad Celsius und bestimmen zusätzlich Dichte und Feinheit der Charge.

**a)** 4 Punkte
Die Auslaufzeit im DIN-4-Becher beträgt 25 s bei 20 Grad Celsius, die Dichte der Farbe 1,05 g/cm3. Berechnen Sie mit der Beziehung kinematische Viskosität gleich 4,57 mal t minus 452 geteilt durch t zunächst die kinematische und daraus die dynamische Viskosität. Beurteilen Sie, ob der Wert im typischen Bereich für Flexodruckfarben liegt.

**b)** 3 Punkte
Im laufenden Druckbetrieb steigt die Viskosität der Farbe an. Erklären Sie die Ursache, nennen Sie zwei Folgen für das Druckergebnis und leiten Sie eine Maßnahme ab.

**c)** 3 Punkte
Erläutern Sie, was mit dem Grindometer nach ISO 1524 bestimmt wird und welche Aussagekraft der Messwert hat. Nennen Sie eine Grenze der Methode und eine geeignete Ergänzungsmethode.

## Aufgabe 3 — Bewertung (Faktor 2, 10 Punkte)

Ein UV-Siebdruck mit einer rußschwarz pigmentierten Farbe wird beanstandet: Die Oberfläche ist trocken, der Farbkörper darunter jedoch noch klebrig. Der Auftrag betrifft eine Faltschachtel für Lebensmittel, deshalb prüfen Sie neben der Härtung auch Arbeitsschutz und Verpackungstauglichkeit.

**a)** 4 Punkte
Deuten Sie den Befund. Erklären Sie, warum die Tiefenhärtung ausbleibt, und leiten Sie zwei Maßnahmen sowie eine geeignete Prüfung ab.

**b)** 3 Punkte
Beim Andrucken im Labor arbeiten Sie mit der ungehärteten UV-Farbe und einer UV-Lampe. Beschreiben Sie nach dem Muster Gefahr, technische Maßnahme und Schutzwirkung, wie Sie sich schützen.

**c)** 3 Punkte
Der Druck ist für eine Lebensmittelverpackung bestimmt. Beurteilen Sie das Risiko, das von einer unvollständig gehärteten UV-Farbe ausgeht, erklären Sie den Begriff NIAS und nennen Sie zwei Abhilfen.

# Erwartungshorizonte

Bewertungsanker, keine Musterlösungen: Jeder Anker beschreibt einen bepunktbaren Inhalt. In Klammern stehen die Lerntafeln, aus denen sich die Antwort ergibt.

## Chemie und Physik von Beschichtungsstoffen

**Aufgabe 1 a)** 4 Punkte · L-01

- Nichtflüchtig: Festharz aus der Alkydharzlösung, Titandioxid, Füllstoff, nichtflüchtige Additive.
- Flüchtig: das zugesetzte Lösemittel und der Lösemittelanteil der Alkydharzlösung.
- Erkannt, dass die Harzlösung in beide Anteile aufgeteilt werden muss und nicht vollständig zum Festkörper zählt.

**Aufgabe 1 b)** 4 Punkte · L-01, L-56

- Festharz: 40,0 · 0,70 = 28,0 Masse-%.
- Summe nichtflüchtig: 28,0 + 18,0 + 6,0 + 1,5 = 53,5 Masse-%.
- Kontrolle über den flüchtigen Anteil: 12,0 (Lösemittel aus der Harzlösung) + 34,5 = 46,5 Masse-%; Summe 100 %.
- Antwortsatz mit Einheit.

**Aufgabe 1 c)** 2 Punkte · L-01, L-154, L-59

- Die Schichtdicke ist eine Volumengröße: Trockenschichtdicke = Nassschichtdicke · Volumenfestkörper / 100.
- Der Massenfestkörper sagt nichts über das verbleibende Volumen aus, weil die Dichten der Bestandteile verschieden sind.

**Aufgabe 2 a)** 3 Punkte · L-08

- Säurezahl: Masse KOH in Milligramm, die zur Neutralisation der freien Säuren in 1 g Probe nötig ist.
- Iodzahl: Masse Iodäquivalent in Gramm, die von 100 g Probe unter festgelegten Bedingungen aufgenommen wird.
- Beide Angaben nur mit Bezugsbasis (Festharz oder Lieferform) interpretierbar.

**Aufgabe 2 b)** 4 Punkte · L-08, L-14

- Ansatz: IZ = 253,8 · 100 · n / M.
- Einsetzen: IZ = 253,8 · 100 · 6 / 879.
- Ergebnis: IZ ≈ 173 (g Iod je 100 g).
- Einheiten mitgeführt und Antwortsatz formuliert.

**Aufgabe 2 c)** 3 Punkte · L-14

- Einordnung: über 150 — trocknendes Öl.
- Grenze: Die Iodzahl zählt nur die Zahl der Doppelbindungen, nicht ihre Lage; Konjuenöle reagieren rascher als Isolenöle gleicher Iodzahl.
- Ein Grenzfall genannt oder erkannt, dass es sich um einen Orientierungswert handelt.

**Aufgabe 3 a)** 4 Punkte · L-07

- Löslichkeit setzt ähnliche zwischenmolekulare Wechselwirkungen von Polymer und Lösemittel voraus.
- Ein einzelner Parameter fasst Dispersions-, Polar- und Wasserstoffbrückenanteil zusammen und kann verschiedene Stoffe gleich erscheinen lassen.
- Erst die Aufteilung in Teilparameter trennt sie sinnvoll.

**Aufgabe 3 b)** 3 Punkte · L-07

- Latenter Löser: löst das Polymer allein nicht, im Gemisch mit einem zweiten Lösemittel aber sehr wohl.
- Abschätzung: Die Teilparameter des Gemischs lassen sich näherungsweise über die Volumenanteile mitteln.
- Erkannt, dass das Verhalten polymer-, molmassen- und temperaturabhängig bleibt.

**Aufgabe 3 c)** 3 Punkte · L-07, L-10, L-02

- Zwei zutreffende Eigenschaften, etwa Viskosität der Lösung, Ablüft- und Trocknungsverhalten, Verlauf oder Ablaufneigung.
- Eine Begründung, die über die Lösekraft oder die Verdunstungsgeschwindigkeit führt.

**Aufgabe 4 a)** 3 Punkte · L-12

- Polypropylen ist ein unpolarer, niederenergetischer Kunststoff.
- Benetzung wird begünstigt, wenn die Oberflächenspannung des Lacks niedriger ist als die Oberflächenenergie des Untergrunds; hier ist es umgekehrt.
- Krater zusätzlich als Folge örtlicher Verunreinigung (Fett, Trennmittel, Silicon) erkannt.

**Aufgabe 4 b)** 4 Punkte · L-12, L-64

- Zwei zutreffende Verfahren, etwa Beflammen, Corona- oder Plasmabehandlung; Reinigen und Entfetten als Voraussetzung.
- Wirkung: Einbau polarer, sauerstoffhaltiger Gruppen und dadurch höhere Oberflächenenergie.
- Erkannt, dass die Aktivierung mit der Zeit abklingt und zeitnah beschichtet werden muss.

**Aufgabe 4 c)** 3 Punkte · L-12

- $\theta = 0$ vollständige Spreitung, $\theta < 90°$ gute Benetzung, $\theta > 90°$ schlechte Benetzung.
- Messung optisch mit dem Randwinkelmessgerät (Goniometer, aufgesetzter Tropfen).
- Erkannt, dass der Randwinkel der maßgebliche Messwert ist und nicht der bloße Vergleich zweier Oberflächenspannungen.

**Aufgabe 5 a)** 4 Punkte · L-53

- Primärteilchen: kleinste bei der Pigmentherstellung entstehende Teilchen.
- Aggregate: stärker gebundene bzw. flächig verwachsene Primärteilchen.
- Agglomerate: locker an Ecken und Kanten zusammenhängende Primärteilchen und Aggregate.
- Zweck des Dispergierens ist das Trennen der Agglomerate; Aggregate werden in der Regel nicht aufgeschlossen.

**Aufgabe 5 b)** 3 Punkte · L-53

- Benetzen, Zerteilen, Stabilisieren.
- Voraussetzung für spontanes Eindringen: Randwinkel unter 90 Grad, am besten null.
- Erkannt, dass die Bedingung nur sagt, ob die Benetzung abläuft, nicht wie schnell.

**Aufgabe 5 c)** 3 Punkte · L-53

- Der Doughnut-Effekt ist das erwünschte torusförmige Umlaufbild und zeigt an, dass das Mahlgut die Scherzone durchläuft.
- Lufteinschlag mit Trichterbildung deutet auf eine zu dünn eingestellte Paste; die Scherkräfte kommen nicht ins Mahlgut.
- Abhilfe: Viskosität anheben, etwa über weniger Lösemittel beziehungsweise höheren Pigment- oder Bindemittelanteil in der Mahlpaste; alternativ Füllhöhe oder Scheibengröße anpassen.

**Aufgabe 6 a)** 4 Punkte · L-55, L-59

- Volumina einzeln: 240/4,10 = 58,5 $cm^3$; 60/2,70 = 22,2 $cm^3$; 180/1,05 = 171,4 $cm^3$.
- Ansatz: PVK = V(Pigment + Füllstoff) / V(Pigment + Füllstoff + Bindemittel) · 100 %.
- Einsetzen: 80,7 / (80,7 + 171,4) · 100 % = 80,7 / 252,1 · 100 %.
- Ergebnis: PVK ≈ 32 Vol.-%, mit Antwortsatz.

**Aufgabe 6 b)** 3 Punkte · L-55

- PVK liegt mit rund 32 % deutlich unter der kritischen PVK von 45 % — die Pigmentierung ist unterkritisch.
- Damit ist genug Bindemittel für einen dichten, geschlossenen Film vorhanden; das ist die Voraussetzung für Glanz.
- Erkannt, dass der Glanz zusätzlich von Verlauf, Oberflächenglätte und einem etwaigen Mattierungsmittel abhängt.

**Aufgabe 6 c)** 3 Punkte · L-55

- Zwei zutreffende Punkte, etwa: Film wird matt und porös, Wasseraufnahme und Schleifbarkeit steigen, Sperrwirkung und Nassabriebbeständigkeit fallen.
- Erkannt, dass dies bei matten Innenfarben bewusst genutzt wird.

**Aufgabe 7 a)** 4 Punkte · L-10

- η = τ / γ̇ mit τ Schubspannung und γ̇ Schergeschwindigkeit.
- Einheit Pa·s beziehungsweise mPa·s.
- Newtonsch: η ist bei gegebener Temperatur unabhängig von der Schergeschwindigkeit.

**Aufgabe 7 b)** 3 Punkte · L-10

- Prüftemperatur (23 ± 0,5) °C.
- Gültiger Bereich etwa 30 bis 100 s.
- Becher, Norm und Temperatur immer gemeinsam angeben.

**Aufgabe 7 c)** 3 Punkte · L-10, L-178

- Der Auslaufbecher gilt nur für nahezu newtonsche Flüssigkeiten; bei strukturviskosen und thixotropen Systemen hängt die Viskosität von Scherung und Vorgeschichte ab.
- Eine einzelne Auslaufzeit beschreibt das Fließverhalten dann nicht.
- Geeignet ist das Rotationsviskosimeter, das eine Fließkurve über die Schergeschwindigkeit liefert.

**Aufgabe 8 a)** 3 Punkte · L-154

- Ansatz: Trockenschichtdicke = Nassschichtdicke · Volumenfestkörper / 100.
- Einsetzen: 120 µm · 45 / 100.
- Ergebnis 54 µm, mit Einheit und Antwortsatz.

**Aufgabe 8 b)** 4 Punkte · L-154

- Stahl: magnetinduktives Verfahren für nichtmagnetische Schichten auf Eisen und Stahl.
- Aluminium: Wirbelstromverfahren für nichtleitende Schichten auf Nichteisenmetallen.
- Messprinzip in eigenen Worten sinngemäß richtig wiedergegeben.

**Aufgabe 8 c)** 3 Punkte · L-154, L-153, L-02

- Nach dem Auftrag verdunstet der flüchtige Anteil; die Nassschichtdicke nimmt sofort ab und die Messung wäre nicht mehr aussagekräftig.
- Messmittel: Schichtdickenkamm oder Schichtdickenrad.
- Erkannt, dass die Nassmessung der Prozesskontrolle während des Auftrags dient.

**Aufgabe 9 a)** 4 Punkte · L-02, L-03, L-22

- Physikalische Trocknung: Der Filmbildner liegt bereits als Polymer vor; der Film entsteht durch Verdunsten des flüchtigen Anteils, ohne chemische Reaktion.
- Chemische Härtung: Aus Vorstufen entstehen durch Reaktion höhermolekulare beziehungsweise vernetzte Strukturen.
- Folge: Der physikalisch getrocknete Film ist im ursprünglichen Lösemittel wieder anlösbar, der vernetzte Film nicht.

**Aufgabe 9 b)** 3 Punkte · L-09

- Übergangsbereich zwischen glasartig-hartem und zähelastischem Verhalten des Polymers.
- Deutlich über der Gebrauchstemperatur: harter, spröder Film; deutlich darunter: weicher, klebriger Film.
- Erkannt, dass es sich um einen Bereich handelt und die Lage nahe der Gebrauchstemperatur ungünstig ist, weil sich die Eigenschaften dort stark mit der Temperatur ändern.

**Aufgabe 9 c)** 3 Punkte · L-09

- Einsetzen: 1/Tg = 0,70/378 + 0,30/228 = 0,001852 + 0,001316 = 0,003168 $K^{-1}$.
- Ergebnis: Tg ≈ 316 K, das sind rund 43 °C.
- Massenanteile korrekt als Dezimalzahlen eingesetzt und Einheit angegeben.

**Aufgabe 10 a)** 4 Punkte · L-26, L-68, L-170, L-171, L-172

- Isocyanathaltiges Spritzaerosol: einatembar, sensibilisierend, sehr niedriger Grenzwert.
- Lösemitteldämpfe: Gesundheitsgefahr und zugleich Brand- beziehungsweise Explosionsgefahr, weil sich mit Luft ein zündfähiges Gemisch bilden kann.
- Begründung jeweils an der Stoffeigenschaft festgemacht, nicht nur behauptet.

**Aufgabe 10 b)** 3 Punkte · L-172, L-68

• Rangfolge: Substitution vor technischen vor organisatorischen Maßnahmen vor persönlicher Schutzausrüstung.
• Je eine passende Maßnahme, etwa: emissionsärmeres System prüfen; Absaugung und Kabinenlüftung; Zutritts- und Zeitbeschränkung; Atemschutz und Schutzhandschuhe.
• Erkannt, dass persönliche Schutzausrüstung die letzte Stufe ist und keine technische Maßnahme ersetzt.

**Aufgabe 10 c)** 3 Punkte · L-171, L-172

• Das Sicherheitsdatenblatt des konkreten Produkts.
• Zwei sinnvolle Angaben genannt, etwa Gefahrenhinweise und Sicherheitsratschläge, Grenzwerte, persönliche Schutzausrüstung, Lagerung und Entsorgung.
• Erkannt, dass die Gefährdungsbeurteilung des Betriebs daraus abzuleiten ist.

## Applikations- und Prüftechnik

**Aufgabe 1 a)** 4 Punkte · L-08, L-27, L-167

• Die Säurezahl gibt die Masse an KOH in mg an, die zur Neutralisation der in 1 g Probe enthaltenen freien Säuren nötig ist; bestimmt wird sie durch Titration mit KOH-Maßlösung.
• Die Iodzahl gibt an, wie viel Gramm Iod 100 g Probe unter festgelegten Analysenbedingungen aufnehmen; das Iod addiert sich an die C=C-Doppelbindungen, die gebundene Menge wird titrimetrisch bestimmt.
• Ein Blindversuch ohne Probe wird mitgeführt, weil erst die Differenz zwischen Blindwert und Probenverbrauch den tatsächlichen Verbrauch der Probe angibt.
• Jede Bestimmung wird doppelt angesetzt, weil ein Einzelwert wenig aussagekräftig ist; ausgewertet wird der Mittelwert, und die Kennzahlen sind mit ihrer Bezugsbasis anzugeben, hier das unverdünnte Öl.

**Aufgabe 1 b)** 3 Punkte · L-08, L-19, L-167

• Ansatz SZ = (V − V(blind)) · c · 56,1 / m mit M(KOH) = 56,1 g/mol; Probe 1: (1,85 − 0,05) mL · 0,1 mol/L = 0,180 mmol KOH, entsprechend 0,180 · 56,1 = 10,098 mg KOH, SZ = 10,098 / 5,012 = 2,015 mg KOH/g.
• Probe 2: (1,78 − 0,05) mL · 0,1 mol/L = 0,173 mmol KOH, entsprechend 9,705 mg KOH, SZ = 9,705 / 4,988 = 1,946 mg KOH/g.
• Mittelwert SZ = (2,015 + 1,946) / 2 = 1,98 mg KOH/g; die Spanne von 0,07 mg KOH/g (rund 3,5 % vom Mittelwert) belegt eine gute Wiederholbarkeit, mehr als drei signifikante Stellen sind nicht gerechtfertigt.

**Aufgabe 1 c)** 3 Punkte · L-14, L-08

• Mittelwert der Iodzahl = (176 + 180) / 2 = 178 g Iod je 100 g; damit liegt der Wert über 150 und die Charge ist als trocknendes Öl einzuordnen, das oxidativ härtet.
• Der Säurezahl-Mittelwert von 1,98 mg KOH/g liegt unter dem zulässigen Höchstwert von 3,0 mg KOH/g; der Gehalt an freien Säuren ist damit spezifikationsgerecht und die Charge insoweit freigabefähig.
• Erkannt, dass die Iodzahl nur den Ungesättigtheitsgrad erfasst und nichts über Lage und Art der Doppelbindungen aussagt (Isolen- oder Konjuentyp) und deshalb allein keine sichere Klassifizierung des Trocknungsverhaltens ist.

**Aufgabe 2 a)** 4 Punkte · L-151, L-178, L-167

• Auslaufviskosität nach DIN EN ISO 2431 mit dem ISO-Becher Nr. 4 (100 mL): Probe auf 23 Grad Celsius temperieren, Düse verschließen, befüllen, freigeben und die Zeit bis zum Abreißen des Strahls stoppen; die Düse ist so zu wählen, dass die Auslaufzeit im gültigen Bereich von 30 bis 100 s liegt.
• Nichtflüchtiger Anteil nach DIN EN ISO 3251 gravimetrisch: Einwaage 1,0 g plus/minus 0,1 g auf ein flaches Aluminiumschälchen mit einem Bodendurchmesser von 75 mm plus/minus 5 mm, Trocknung 60 Minuten bei 105 Grad Celsius.
• Beide Bestimmungen werden doppelt angesetzt und über den Mittelwert ausgewertet, weil ein Einzelwert wegen der Streuung der Messung wenig aussagekräftig ist.
• Erkannt, dass der Auslaufbecher nur bei newtonschen oder annähernd newtonschen Lacken trägt; strukturviskose oder thixotrope Systeme erfordern ein Rotationsviskosimeter mit Fließkurve, weil ein Einzelwert ihr Fließverhalten nicht abbildet.

**Aufgabe 2 b)** 3 Punkte · L-151, L-167

• Ansatz nfA = m(Rückstand) / m(Einwaage) · 100; Probe 1: 0,532 / 1,024 · 100 = 51,95 %.
• Probe 2: 0,509 / 0,987 · 100 = 51,57 %.
• Mittelwert nfA = (51,95 + 51,57) / 2 = 51,8 %; die Spanne der Doppelbestimmung beträgt 0,38 Prozentpunkte, weshalb eine Nachkommastelle die Genauigkeit angemessen wiedergibt und weitere Stellen eine nicht vorhandene Genauigkeit vortäuschen würden.

**Aufgabe 2 c)** 3 Punkte · L-151, L-178, L-167

• Mittlere Auslaufzeit = (38,4 + 39,2) / 2 = 38,8 s; der Wert liegt im geforderten Feld von 37 bis 43 s, im gültigen Auslaufzeitbereich von 30 bis 100 s und im typischen Spritzbereich von 30 bis 45 s.
• Der nichtflüchtige Anteil von 51,8 % liegt im geforderten Feld von 50 bis 54 % und im typischen Bereich von 50 bis 70 % für einen 2K-PUR-Lack; beide Kennwerte sind damit freigabefähig.
• Erkannt, dass beide Ergebnisse nur mit ihren Messbedingungen vergleichbar sind: Bechertyp, Düse und Temperatur bei der Viskosität, weil DIN-4-, Ford-4- und ISO-Becher nicht deckungsgleich sind, sowie Trockentemperatur und Trockenzeit beim Festkörper, weil der ISO-3251-Wert nicht dem Einbrennrückstand entspricht.

**Aufgabe 3 a)** 4 Punkte · L-64, L-172

• Zuerst reinigen und entfetten: Öl, Fett, Läppasten-, Lack- und Altbeschichtungsreste werden entfernt, weil sie Benetzung und Haftung verhindern.
• Danach strahlen, um Zunder und Rost zu entfernen und eine definierte Rauheit zu erzeugen; der Entrostungsgrad, zum Beispiel Sa 2 1/2, richtet sich nach DIN EN ISO 8501-1, die Rauheit dagegen nach der eigenen Norm DIN EN ISO 8503.
• Anschließend eine Zinkphosphatierung als Konversionsbehandlung: Sie bildet eine kristalline, fest haftende Schicht mit besserem Korrosionsschutz und Haftgrund, während die Eisenphosphatierung als dünne amorphe Schicht nur für mildere Anforderungen genügt.
• Eine Chromatierung scheidet doppelt aus: Sie ist eine Passivschicht für Zink und Aluminium und auf blankem Stahl kein geeignetes Verfahren; unabhängig davon ist Chrom(VI) giftig und krebserzeugend und wird durch chromatfreie Verfahren auf Titan-, Zirkon- oder Silanbasis ersetzt — Substitution steht in der Rangfolge der Schutzmaßnahmen an erster Stelle.

**Aufgabe 3 b)** 3 Punkte · L-68, L-154

• Ergiebigkeit A = 10 · VFK / TSD = 10 · 45 / 60 = 7,5 m² je Liter.
• Theoretischer Bedarf = Fläche / A = 120 m² / 7,5 m² je Liter = 16 l.
• Tatsächlicher Bedarf = theoretischer Bedarf geteilt durch den Auftragswirkungsgrad = 16 l / 0,60 = 26,7 l.
• Nass-Schichtdicke aus TSD = NSD · VFK / 100, umgestellt NSD = TSD · 100 / VFK = 60 · 100 / 45 = 133 µm.

**Aufgabe 3 c)** 3 Punkte · L-68, L-64, L-172

• Läufer und Gardinen entstehen durch zu dicken Auftrag oder zu niedrige Viskosität; Korrektur: dünner und gleichmäßiger auftragen beziehungsweise die Viskosität anheben.
• Krater sind eine Benetzungsstörung durch Verunreinigung, insbesondere Silicone, Öl oder Fett; Korrektur: Untergrund vor dem Lackieren gründlich entfetten und siliconfreie Arbeitsmittel und Druckluft verwenden.
• Vorrang haben technische Maßnahmen wie Absaugung und ausreichende Belüftung, geschlossene Systeme, lösemittelarme Produkte sowie Erdung gegen elektrostatische Aufladung; persönliche Schutzausrüstung mit Atemschutz, Handschuhen und Schutzbrille ist immer die letzte Maßnahme.

**Aufgabe 4 a)** 4 Punkte · L-154, L-156, L-157, L-155, L-167

• Trockenschichtdicke: zerstörungsfreie Messung nach DIN EN ISO 2808, auf Stahl magnetinduktiv, weil die Schicht nichtmagnetisch und der Untergrund ferromagnetisch ist; anzugeben sind Untergrund und Messverfahren.
• Haftung: Gitterschnitt nach DIN EN ISO 2409 mit Einstufung Gt 0 bis Gt 5; anzugeben sind Schnittabstand und Untergrund, weil der Kennwert sonst nicht vergleichbar ist.
• Filmhärte: Pendeldämpfung nach DIN EN ISO 1522; das Gerät ist anzugeben, weil König- und Persoz-Werte nicht austauschbar sind, und der Prüfraum ist auf das Normklima 23 Grad Celsius plus/minus 2 Grad bei 50 plus/minus 5 Prozent relativer Luftfeuchte nach DIN EN 23270 (ISO 3270) zu halten.
• Glanz: Reflektometer nach DIN EN ISO 2813; gemessen wird zuerst bei 60 Grad, über 70 GE wird auf 20 Grad und unter 10 GE auf 85 Grad gewechselt, und die Messgeometrie ist stets mit anzugeben.

**Aufgabe 4 b)** 3 Punkte · L-167, L-154

• Mittelwert x quer = Summe der Messwerte / n = 488 / 6 = 81,3 µm.
• Standardabweichung der Stichprobe s = Wurzel aus (Summe der quadrierten Abweichungen / (n − 1)) = Wurzel aus (33,33 / 5) = Wurzel aus 6,67 = 2,6 µm.
• Angabe des Ergebnisses als 81 µm plus/minus 3 µm, weil nie mehr Stellen angegeben werden dürfen, als die Messunsicherheit rechtfertigt; der Variationskoeffizient beträgt 2,6 / 81,3 · 100 = 3,2 %.

**Aufgabe 4 c)** 3 Punkte · L-156, L-155, L-167

• Der Schichtdicken-Mittelwert von 81 µm und auch alle Einzelwerte liegen im geforderten Feld von 70 bis 90 µm; die Anforderung an die Trockenschichtdicke ist damit erfüllt.
• Der Gitterschnittwert Gt 1 hält die Vorgabe von höchstens Gt 1 ein, ist aber nur ein Haftwiderstandsindex von Gt 0 bis Gt 5 und damit eine Relativbewertung; eine Haftfestigkeit in N je mm² liefert nur der Stirnabzug nach DIN EN ISO 4624.
• Erkannt, dass 88 GE über 70 GE liegen und die Messung deshalb im Hochglanzbereich auf 20 Grad umzustellen ist; ohne Angabe der Messgeometrie ist der Glanzwert nicht vergleichbar.

## Lack- und Beschichtungstechnologie

**Aufgabe 1 a)** 4 Punkte · L-60, L-56

• Reihenfolge: Ansetzen nach Fertigungsrezept, Mahlgutansatz und Vordispergieren, Feindispergieren bis zur Zielkörnigkeit, Auflacken (Let-down), Einstellen von Viskosität und Farbton, Filtrieren, Abfüllen.
• Im konzentrierten Mahlgut stimmen Scherwirkung und Energieeintrag; dort wird die Feinheit erreicht.
• Beim Auflacken sinken Feststoffgehalt und Viskosität — die Scherkräfte kommen nicht mehr ins Pigment, Nachdispergieren ist dann kaum noch möglich.
• Erkannt, dass die laufende Qualitätskontrolle den Ablauf begleitet und nicht erst am Ende steht.

**Aufgabe 1 b)** 3 Punkte · L-60, L-47

- Netz- und Dispergiermittel gehören ins Mahlgut: Sie müssen wirken, während die frischen Teilchenoberflächen entstehen.
- Verlaufsadditive kommen beim Auflacken hinzu; in der Mahlung würden sie stören oder geschädigt.
- Entschäumer werden je nach System anteilig auf Mahlgut und Let-down verteilt.
- Erkannt, dass der Zugabezeitpunkt aus der Funktion folgt und keine pauschale Regel ist.

**Aufgabe 1 c)** 3 Punkte · L-60, L-180

- Entscheidung: weiterdispergieren, nicht auflacken.
- Grenze 1: Der Grindometerwert erfasst grobe Agglomerate und Stippen, nicht die Primärteilchengröße.
- Grenze 2: Er ist kein universeller Wert, sondern produkt- und systemspezifisch spezifiziert.
- Für die Ursachenklärung sind mikroskopische Verfahren zuständig, nicht die Routineprüfung.

**Aufgabe 2 a)** 4 Punkte · L-56, L-99

- Vier tragfähige Kriterien, etwa Härtungsart, Bewitterungsbeständigkeit, Applikations- und Verlaufsverhalten, Untergrundverträglichkeit, Lösemittelbedarf beziehungsweise Emissionen.
- Zu jedem Kriterium eine Anforderung, die aus dem Einsatzfall folgt — Trocknung ohne Wärmezufuhr, Wetterbeständigkeit, gute Streich- oder Rollbarkeit.
- Begründungen am Einsatzfall festgemacht und nicht allgemein behauptet.
- Erkannt, dass die Applikationsart die Rezeptur mitbestimmt und dieselbe Zusammensetzung nicht für jedes Verfahren taugt.

**Aufgabe 2 b)** 3 Punkte · L-16, L-17, L-25, L-26

- Eine begründete Wahl, etwa langöliger Alkyd (oxidativ trocknend bei Raumtemperatur, gut zu streichen, löslich in schwach aromatischem Lösemittel) oder 2K-PUR (hart und zugleich elastisch, chemikalien- und abriebbeständig).
- Beim 2K-PUR ist die Härterklasse zu nennen: Für die bewitterte Sichtfläche kommt nur ein aliphatischer oder cycloaliphatischer Härter in Frage; aromatische Härter vergilben unter Licht und gehören in Grundierungen, Füller und den Innenbereich.
- Zwei Eigenschaften genannt, die zur Wahl passen, nicht nur der Produktname.
- Der Bezug zur Anforderung aus Teilaufgabe 1 ist erkennbar.

**Aufgabe 2 c)** 3 Punkte · L-16, L-25, L-26

- Beim Alkyd: Die Esterbindungen sind alkaliempfindlich; frischer Beton und verzinkter Stahl scheiden für den direkten Auftrag aus, außerdem Vergilbung und langsames Durchhärten.
- Beim 2K-PUR: Nach dem Mischen läuft die Topfzeit — für lange, immer wieder unterbrochene Baustellenarbeiten ungeeignet, weil nur so viel angemischt werden darf, wie sich in dieser Zeit verarbeiten lässt; Isocyanat reagiert außerdem mit Wasser zu Harnstoff und $CO_2$, feuchte Untergründe und feuchte Gebinde scheiden deshalb aus.
- Die genannte Grenze passt zum in Teilaufgabe 2 gewählten Bindemittel.

**Aufgabe 3 a)** 4 Punkte · L-39, L-40

- Pigment: im Anwendungsmedium praktisch unlösliche, teilchenförmige Substanz, dekorativ als Farbmittel oder funktional eingesetzt.
- Füllstoff: meist pulverförmig, praktisch unlöslich, allenfalls geringe farbgebende Wirkung; er gibt Volumen und technische Eigenschaften.
- Farbmittel ist der genormte Oberbegriff für Pigmente und Farbstoffe; Füllstoffe gehören ausdrücklich nicht dazu.
- Erkannt, dass Füllstoffe in Sonderfällen wie Dispersionsfarben dennoch zur Deckfähigkeit beitragen können.

**Aufgabe 3 b)** 3 Punkte · L-39, L-166

- Streuung entsteht aus dem Unterschied der Brechzahlen von Teilchen und umgebendem Bindemittel.
- Anorganische Pigmente liegen deutlich über der Brechzahl des Bindemittels — Titandioxid mit $n \approx 2{,}7$ gegenüber rund 1,5 bis 1,6 — und streuen stark.
- Organische Pigmente liegen nahe am Bindemittel, streuen kaum und wirken transparent bis schwach deckend; sie liefern Brillanz und Farbstärke.

**Aufgabe 3 c)** **3 Punkte · L-166, L-39**

• Calciumcarbonat hat eine Brechzahl nahe der des Bindemittels und trägt deshalb kaum zur Lichtstreuung bei; das Deckvermögen sinkt.
• Der Zielkonflikt ist benannt: geringere Rohstoffkosten gegen schlechtere Deckung, gegebenenfalls höhere Schichtdicke oder eine zusätzliche Lage.
• Beleg über das Kontrastverhältnis, gemessen über schwarz-weißem Kontrastuntergrund; als praktische Deckungsgrenze gilt vielfach ein Wert um 98 %.

**Aufgabe 4 a)** **4 Punkte · L-47, L-46**

• Netz- und Dispergiermittel: Benetzen der Pigmentoberfläche und Stabilisieren der Dispersion gegen Flockulation.
• Rheologie-Additive: steuern das Fließverhalten, verhindern Ablaufen und Absetzen, geben Thixotropie.
• Entschäumer: zerstören und verhindern Schaum bei Herstellung und Applikation.
• Verlaufsadditive oder Lichtschutzmittel: glattere Oberfläche beziehungsweise Schutz vor UV-Abbau durch UV-Absorber und HALS.

**Aufgabe 4 b)** **3 Punkte · L-47, L-52**

• Aufbau: Ankergruppe adsorbiert an der Pigmentoberfläche, solvatisierte Polymersegmente ragen in die Flüssigphase.
• Wirkung: sterische beziehungsweise elektrosterische Barriere, die die Annäherung zweier Teilchen erschwert.
• Welche Ankerchemie passt, hängt von Pigment und Bindemittel ab; Universaldispergiermittel sind die Ausnahme.

**Aufgabe 4 c)** **3 Punkte · L-47**

• Additive folgen einer Kurve mit Optimum: zu wenig wirkt nicht, zu viel erzeugt neue Fehlerbilder.
• Deshalb wird über mehrere Konzentrationen geprüft statt nach Erfahrungswert dosiert; pauschale Dosierempfehlungen sind nicht tragfähig.
• Zwei weitere Eigenschaften genannt, etwa Glanz, Verlauf, Schaum, Haftung, Wasserbeständigkeit, Überlackierbarkeit oder Lagerstabilität.

**Aufgabe 5 a)** **4 Punkte · L-58, L-27**

• n(OH) = m · OH-Zahl / 56100 = 750 · 84 / 56100 = 1,1230 mol.
• NCO-Äquivalentmasse = 42,02 / 0,20 = 210,1 g je Äquivalent.
• Erkannt, dass 56100 die Masse KOH in Milligramm je Mol ist.
• Einheiten mitgeführt.

**Aufgabe 5 b)** **3 Punkte · L-58**

• m(Härter) = n(OH) · NCO-Äquivalentmasse · Kennzahl = 1,1230 · 210,1 · 1,05 ≈ 247,7 g.
• Summe aus Festkörper und Härter = 750 + 247,7 ≈ 997,7 g.
• Erkannt, dass darin weder Lösemittel noch weitere Bestandteile der Lieferform enthalten sind — die Ansatzmasse des fertigen Lacks liegt darüber.
• Antwortsatz mit Einheit.

**Aufgabe 5 c)** **3 Punkte · L-60**

• Festkörpermasse bleibt konstant: 400 kg · 0,62 = 248 kg.
• Ziel-Gesamtmasse = 248 / 0,55 = 450,9 kg.
• Zugabe = 450,9 − 400 = 50,9 kg Lösemittel, mit Antwortsatz.

**Aufgabe 6 a)** **4 Punkte · L-46, L-55, L-14**

• Ablaufen: Rheologie-Additiv zugeben oder anheben — es baut eine Struktur auf, die bei geringer Scherung trägt und beim Auftrag zusammenbricht.
• Glanz zu niedrig: Pigmentierungshöhe senken oder Dispergierung verbessern — bei zu hoher PVK fehlt Bindemittel für einen dichten, geschlossenen Film.
• Trocknung zu langsam: Sikkativierung anpassen — die Trockenstoffe beschleunigen die oxidative Vernetzung.
• Je Maßnahme eine Begründung, die über die Wirkungsweise führt, nicht nur die Maßnahme selbst.

**Aufgabe 6 b)** 3 Punkte · L-56, L-62

• Zyklus: Aufgabenstellung, Rezept, Labormuster, Applikation und Härtung, Prüfung, Vergleich mit den Anforderungen, Optimierung.
• Der Zyklus wird mehrfach durchlaufen, die Schritte werden von Durchgang zu Durchgang kleiner.
• Die Prüfergebnisse stimmen anfangs noch nicht mit den Anforderungen überein; deshalb wird der Zyklus vielfach durchlaufen, wobei die Schritte von Durchgang zu Durchgang kleiner werden.
• Statistische Versuchsplanung (DoE) prüft mehrere Faktoren systematisch zugleich und macht Wechselwirkungen sichtbar, die die Einzelvariation nicht aufdeckt.

**Aufgabe 6 c)** 3 Punkte · L-46, L-47, L-14, L-153, L-166

• Ein plausibler Nachteil, etwa: zu viel Rheologie-Additiv verschlechtert den Verlauf; weniger Pigment senkt das Deckvermögen; eine höhere Sikkativierung ist keine beliebig drehbare Stellschraube, weil Additive ein Dosieroptimum haben und Cobaltsikkative zudem unter REACH-Beobachtung stehen.
• Eine passende Zusatzprüfung genannt, etwa Verlauf und Ablaufneigung, Kontrastverhältnis oder Lagerstabilität.
• Erkannt, dass eine Maßnahme, die ein Problem löst und zwei neue schafft, keine Lösung ist.

## Herstellung und Qualitätskontrolle

**Aufgabe 1 a)** 4 Punkte · L-56

• Die Umrechnung ist reine Dreisatzarbeit: Einwaage = Anteil in Gewichtsteilen mal 250 kg geteilt durch 100, also Anteil mal 2,5 kg.
• Bindemittel und Lösemittel: Epoxidharz 85,0 kg, Lösemittelgemisch 61,5 kg; Additive: Netz- und Dispergiermittel 3,0 kg, Rheologieadditiv 2,0 kg, Entschäumer 1,0 kg.
• Pigmente und Füllstoffe: Zinkphosphat 25,0 kg, Zinkoxid 7,5 kg, Eisenoxidrot 10,0 kg, Talkum 30,0 kg, Baryt 25,0 kg.
• Die Kontrollsumme der Einwaagen ergibt 250,0 kg und stimmt mit der Ansatzmenge überein; ein Gewichtsteil entspricht hier einem Massenprozent, weil die Rezeptur genau auf 100 Teile summiert.

**Aufgabe 1 b)** 3 Punkte · L-56, L-53

• Reihenfolge: einen Teil des Bindemittels und des Lösemittels vorlegen, Netz- und Dispergiermittel zugeben, dann Pigmente und Füllstoffe einrühren und dispergieren, anschließend mit restlichem Bindemittel, Additiven und Lösemittel auflacken; im Fertigungsrezept stehen die Rohstoffe nach Zugabe und nicht nach Stoffgruppen.
• Das Netz- und Dispergiermittel gehört vor dem Pigment ins Mahlmedium, weil es nur dann zur Verfügung steht, während die frischen Teilchenoberflächen entstehen.
• Pigment, das erst in den fertigen Lack gerührt wird, dispergiert nicht mehr: Die Mahlpaste ist zu dünn, die Scherkräfte kommen nicht an.
• Ein Rheologieadditiv zu früh im Ansatz treibt die Viskosität hoch, bevor überhaupt dispergiert wurde.

**Aufgabe 1 c)** 3 Punkte · L-56, L-178

• Ansatzmenge und Chargenbezeichnung sowie Zugabereihenfolge und, wo es darauf ankommt, die Zugabegeschwindigkeit.
• Rühr- und Dissolverbedingungen mit Dispergierzeit, die Temperatur, soweit sie geführt oder begrenzt werden muss, sowie Mahlschritt, Auflacken und Einstellen von Viskosität und Farbton.
• Filtration und Abfüllung sowie die Prüfwerte mit Sollwert, Toleranz und Messbedingung.
• Zur Viskosität gehören Temperatur und Messverfahren beziehungsweise Schergefälle, weil Lacke in aller Regel nicht newtonsch sind; ohne Messbedingung kommen zwei Labore über dieselbe Charge zu verschiedenen Urteilen.

**Aufgabe 2 a)** 4 Punkte · L-53, L-60, L-99, L-41

• In das Mahlgut gehören die Pigmente und Füllstoffe Zinkphosphat, Zinkoxid, Eisenoxidrot, Talkum und Baryt zusammen mit einem Teil des Bindemittels, Lösemittel und dem Netz- und Dispergiermittel.
• Das Mahlgut wird konzentriert angesetzt, weil der höhere Feststoffanteil die Scherkräfte besser überträgt und pro Durchgang mehr Pigment aufschließt; die Grenze setzt die Zirkulation, denn eine zu dicke Paste bringt kein Strömungsbild mehr zustande.
• Das Netz- und Dispergiermittel muss bereits im Mahlgut wirken, damit es die frisch entstandene Pigmentoberfläche zuerst und möglichst vollständig belegt; verlaufs-, licht- und oberflächenaktive Additive würden die Mahlung stören oder in ihr geschädigt und kommen deshalb erst beim Auflacken hinzu.
• Zinkphosphat ist ein aktives Korrosionsschutzpigment: Es wirkt inhibierend über abgegebene Ionen. Das plättchenförmige Talkum wirkt dagegen passiv als Barriere, weil es den Diffusionsweg für Wasser, Sauerstoff und Ionen verlängert.
• Erkannt, dass das Dispergiermittel bezogen auf die Pigmentmasse dosiert wird und nicht auf den Gesamtansatz.

**Aufgabe 2 b)** 3 Punkte · L-53, L-60

• Es wird nicht aufgelackt: Der Grindometerwert liegt über dem Sollwert, also wird weiterdispergiert.
• Die geforderte Feinheit muss im konzentrierten Mahlgut erreicht werden, weil sich beim Auflacken Feststoffgehalt, Bindemittel- und Lösemittelanteil und damit die Viskosität ändern und ein Nachdispergieren danach deutlich schwieriger ist.
• Erste Maßnahme: das Strömungsbild in Ordnung bringen, also Viskosität, Füllhöhe, Scheibenhöhe und Scheibendurchmesser prüfen, bis sich der torusförmige Umlauf einstellt; weiter Drehzahl geben bringt vor allem Wärme.
• Zweite Maßnahme: längere Vormisch- beziehungsweise Einsumpfzeit, damit die Bindemittellösung tiefer in die Agglomerate eindringt, dabei kühlen, weil die Paste sonst leicht über 60 °C steigt.

**Aufgabe 2 c)** 3 Punkte · L-60, L-172

• Beim Verdünnen bleibt die Festkörpermasse konstant: 230,0 kg mal 0,750 = 172,5 kg.
• Ziel-Gesamtmasse = 172,5 kg geteilt durch 0,690 = 250,0 kg; die Differenz zur Ausgangsmasse ergibt eine Lösemittelzugabe von 20,0 kg.
• Produktionsbegleitend geprüft werden Körnigkeit, Viskosität, Farbton beziehungsweise Deckvermögen sowie Dichte und Festkörper; danach wird filtriert, nach Spezifikation freigegeben, abgefüllt und gekennzeichnet, und von jeder Charge wird ein Rückstellmuster gezogen.
• Technische Maßnahmen haben Vorrang: Lösemitteldämpfe absaugen, in explosionsgefährdeten Bereichen Ex-Schutz, Erdung und Zündquellenverbot beachten und die Pigment- und Füllstoffstäube schon beim Einwiegen absaugen; persönliche Schutzausrüstung ist die letzte Stufe und ersetzt keine technische Maßnahme.

**Aufgabe 3 a)** 4 Punkte · L-154, L-68, L-99

• Aus TSD = NSD mal VFK geteilt durch 100 folgt NSD = 80 µm mal 100 geteilt durch 50 = 160 µm.
• Ergiebigkeit A = 10 mal VFK geteilt durch TSD = 10 mal 50 geteilt durch 80 = 6,25 m² je Liter.
• Theoretischer Bedarf = 1200 m² geteilt durch 6,25 m² je Liter = 192 l.
• Tatsächlicher Bedarf = theoretischer Bedarf geteilt durch den Auftragswirkungsgrad = 192 l geteilt durch 0,60 = 320 l.

**Aufgabe 3 b)** 3 Punkte · L-67, L-68

• Gewählt wird das Airless-Spritzen: Eine Pumpe presst den Lack unter hohem Druck durch eine feine Düse, er zerstäubt allein durch die Entspannung; das ergibt dicke Schichten in einem Gang und wenig Sprühnebel, typischer Einsatz sind Stahlbau, Brücken und Tanks.
• Typische Einstellgrößen: Düsendurchmesser 0,3 bis 0,6 mm und Materialdruck 100 bis 250 bar; die Viskosität darf bis etwa 60 s (DIN 4 mm) betragen.
• Das konventionelle Druckluftspritzen zerstäubt zwar am feinsten, hat aber mit einem Richtwert um 30 % den niedrigsten Auftragswirkungsgrad; über Materialkosten und Emissionen entscheidet der Auftragswirkungsgrad und nicht der Düsendurchmesser.
• Erkannt, dass beim elektrostatischen Spritzen tiefe Vertiefungen und Hohlräume der Stahlprofile wegen des Faradaykäfig-Effekts schlecht erreicht würden, an scharfen Kanten dagegen zu dick aufgetragen wird.

**Aufgabe 3 c)** 3 Punkte · L-154, L-68

• Die Nassschichtdicke wird direkt nach dem Auftrag mit Schichtdickenkamm oder Messrad kontrolliert; so lässt sich die spätere Trockenschichtdicke frühzeitig einstellen und Nacharbeit vermeiden.
• Zweite Maßnahme: gleichmäßige Spritzführung mit festem Abstand, konstanter Bahngeschwindigkeit und rund 50 % Überlappung der Bahnen sowie Kontrolle von Materialdruck und Düsengröße; nachgewiesen wird die Trockenschichtdicke später nach DIN EN ISO 2808.
• Läufer und Gardinen entstehen durch zu dicken Auftrag oder zu niedrige Viskosität.
• Trockenspritzer entstehen durch zu großen Spritzabstand, weil der Lack bereits in der Luft antrocknet.

**Aufgabe 4 a)** 4 Punkte · L-159, L-156, L-154, L-53, L-167

• Feinheit: Grindometer beziehungsweise Feinheitsbestimmung nach DIN EN ISO 1524.
• Haftung: Gitterschnitt nach DIN EN ISO 2409 mit den Kennwerten Gt 0 bis Gt 5; ein quantitativer Wert in N/mm² verlangt dagegen den Abreißversuch nach DIN EN ISO 4624.
• Trockenschichtdicke: zerstörungsfrei magnetinduktiv nach DIN EN ISO 2808; Korrosionsschutzwirkung: Salzsprühnebelprüfung nach DIN EN ISO 9227.
• Vergleichbar wird jedes Ergebnis erst mit seiner Zusatzangabe: bei der Feinheit Grindometerbereich und Ablesekriterium, bei der Haftung Schnittabstand und Untergrund, bei der Trockenschichtdicke Untergrund und Messverfahren, bei der Salzsprühnebelprüfung die Variante sowie die Prüfdauer und die Bewertung des Schadensbilds.

**Aufgabe 4 b)** 3 Punkte · L-167

• Mittelwert $\bar{x}$ = (74 + 82 + 78 + 86 + 80) µm geteilt durch 5 = 400 µm geteilt durch 5 = 80,0 µm.
• Standardabweichung s = Wurzel aus der Summe der Abweichungsquadrate (36 + 4 + 4 + 36 + 0) µm² geteilt durch n minus 1 = Wurzel aus 20 µm² = 4,5 µm.
• Das Toleranzband reicht von 70 bis 90 µm; Mittelwert und alle fünf Einzelwerte liegen darin, die Prüfgröße Trockenschichtdicke ist damit in Ordnung.
• Jede Messung streut, deshalb beschreibt erst der Mittelwert die Lage und die Standardabweichung die Streuung; zu jedem Ergebnis gehört eine Messunsicherheit, und es wird mit passender Stellenzahl angegeben.

**Aufgabe 4 c)** 3 Punkte · L-161, L-68, L-167

• Krater sind eine Benetzungsstörung, verursacht durch Verunreinigungen wie Fett-, Trennmittel- oder Siliconreste auf dem Untergrund oder in der Anlage.
• Vorgehen: zuerst das Schadensbild genau beschreiben, dann die möglichen Ursachen nach Material, Untergrund, Applikation und Bedingungen eingrenzen und Referenzmuster sowie die Verarbeitungshistorie einbeziehen.
• Korrekturmaßnahme: saubere, gut vorbehandelte Untergründe sicherstellen und Spritzeinrichtung sowie Zuluft auf Silicon- und Ölreste prüfen; das Rückstellmuster der Charge dient dabei zum Vergleich.
• Erkannt, dass sich die Fehlstelle mit FTIR-Mikroskopie gezielt chemisch untersuchen lässt, wobei Spektrum, Datenbank und Matrix zu berücksichtigen sind.

## Wahlqualifikation 1 — wasserverdünnbar — Holz und Holzwerkstoffe

**Aufgabe 1 a)** **4 Punkte · L-72, L-70, L-74, L-75**

• Weg 1 Primärdispersion: Das Bindemittel wird durch Emulsionspolymerisation direkt im Wasser aufgebaut; es entstehen dispergierte Polymerteilchen (Latex) von etwa 0,05 bis 5 µm, stabilisiert durch Emulgatoren und gegebenenfalls Schutzkolloide.
• Weg 2 Sekundärdispersion: Das fertige Bindemittel wird getrennt in Lösung oder Schmelze hergestellt und danach in Wasser dispergiert; eingebaute, neutralisierte Carboxylgruppen machen es selbstdispergierend.
• Weg 3 Wässrige Lösung: Bindemittel mit Carboxylgruppen werden mit einem Amin neutralisiert, das gebildete Carboxylat-Salz ist hydrophil; die Moleküle liegen einzeln gelöst vor, die Lösung ist klar.
• Erkannt, dass Polyurethan-Sekundärdispersionen emulgatorarm sind und deshalb wasserfestere Filme ergeben als viele Primärdispersionen.

**Aufgabe 1 b)** **3 Punkte · L-76**

• Beim Verdunsten des Wassers rücken die Teilchen zusammen, verformen sich unter Kapillarkräften und verschmelzen zu einem geschlossenen Film; dieser Vorgang heißt Koaleszenz.
• Unterhalb der Mindestfilmbildetemperatur verschmelzen die Teilchen nicht, der Auftrag bleibt pulvrig und rissig; erst oberhalb der MFT entsteht ein klarer Film.
• Ein Filmbildehilfsmittel wirkt als temporärer Weichmacher, senkt die MFT während der Filmbildung und verdunstet danach, sodass ein hartes, beständiges Polymer trotzdem bei Raumtemperatur verfilmt.

**Aufgabe 1 c)** **3 Punkte · L-124**

• NSV-Lacke trocknen rein physikalisch durch Wasserverdunstung und Koaleszenz; das Ergebnis ist ein thermoplastischer Film.
• SV-Lacke enthalten ein fertig eingearbeitetes Vernetzungssystem, das erst nach der Filmbildung reagiert, zum Beispiel Ketogruppen im Polymer mit einem zugesetzten Dihydrazid zur Hydrazon-Vernetzung.
• Das dabei entstehende leichte Netzwerk verbessert die chemische und mechanische Beständigkeit gegenüber dem NSV-Typ deutlich.

**Aufgabe 2 a)** **4 Punkte · L-58, L-27, L-83, L-125**

• n(OH) = m · OH-Zahl / 56100 = 400 · 105 / 56100 = 0,7487 mol.
• NCO-Äquivalentmasse = 42,02 / (20/100) = 210,1 g je Äquivalent.
• m(Härter) = n(OH) · NCO-Äquivalentmasse · Kennzahl = 0,7487 · 210,1 · 1,3 = 204,5 g; Gesamtansatz 400 g + 204,5 g = 604,5 g.
• Erkannt, dass im wässrigen System ein deutlich höherer NCO-Überschuss von etwa 1,2 bis 1,5 nötig ist, weil ein Teil des Isocyanats mit dem Wasser der Rezeptur zu Harnstoff und Kohlendioxid abreagiert.

**Aufgabe 2 b)** **3 Punkte · L-64**

• Schleifen und Bürsten entfernt Schleifreste, Staub und Lackreste und schafft eine haftfähige Oberfläche.
• Öl- und harzreiche Hölzer wie Teak zusätzlich entfetten, weil die Holzinhaltsstoffe sonst Benetzung und Haftung verhindern.
• Wasserlösliche Holzinhaltsstoffe mit einer Isoliergrundierung absperren; außerdem sind Holzfeuchte und Restfeuchte vor dem Beschichten zu beachten.

**Aufgabe 2 c)** **3 Punkte · L-71, L-69, L-124**

• Wasser hat wegen der Wasserstoffbrücken eine sehr hohe Verdunstungsenthalpie von rund 2258 kJ/kg; das Verdunsten braucht viel Energie, läuft langsam und kühlt den Film ab.
• Bei hoher Luftfeuchte oder zu niedriger Temperatur trocknet der Film kaum; das Verarbeitungsfenster ist eng, wässrige Holzlacke sind entsprechend klimaempfindlich.
• Beim Ablüften entweicht das Wasser kontrolliert über die Oberfläche; heizt man zu früh auf, verschließt sich die Filmoberfläche und das eingeschlossene Wasser erzeugt beim Durchbrechen Kocher, Nadelstiche und Blasen.

**Aufgabe 3 a)** 4 Punkte · L-76, L-176

• Der Lack wurde unterhalb der Mindestfilmbildetemperatur verarbeitet; die Teilchen sind nicht koalesziert, deshalb bleibt der Auftrag pulvrig und rissig statt klar und zusammenhängend.
• Maßnahme 1: Objekt- und Raumtemperatur über die MFT anheben, damit die Teilchen sich unter den Kapillarkräften verformen und verschmelzen können.
• Maßnahme 2: Filmbildehilfsmittel als temporären Weichmacher zusetzen beziehungsweise ein System mit von Haus aus niedrigerer MFT wählen; das Hilfsmittel senkt die MFT während der Filmbildung und verdunstet danach.
• Erkannt, dass ein zugesetztes Koaleszenzhilfsmittel je nach VOC-Definition in die VOC-Berechnung eingeht und den Emissionsvorteil des Wasserlacks teilweise wieder aufzehren kann.

**Aufgabe 3 b)** 3 Punkte · L-125, L-83

• Gefahr: Isocyanat-Härter können die Atemwege sensibilisieren; eine Sensibilisierung kann dauerhaft bestehen, und bei sensibilisierten Personen können bereits geringe Expositionen Beschwerden auslösen; die Spritzapplikation erzeugt zudem Aerosol.
• Technische Maßnahme: Absaugung beziehungsweise Spritzkabine sowie Atemschutz, bei längeren oder großflächigen Spritzarbeiten fremdbelüfteter Atemschutz, dazu Chemikalienschutzhandschuhe und Schutzbrille; Schutzwirkung ist die Vermeidung von Aerosol- und Hautkontakt.
• Gefahr Schleifstaub: feiner Holzstaub kann Allergien oder Asthma auslösen; technische Maßnahme ist die Absaugung direkt an der Maschine mit Staubmaske, Schutzwirkung ist die Erfassung des Staubs an der Entstehungsstelle.

**Aufgabe 3 c)** 3 Punkte · L-124, L-176, L-71

• Vorteil: Wässrige Systeme senken den Ausstoß organischer Lösemittel gegenüber lösemittelhaltigen CN-, SH- und PUR-Lacken deutlich und erleichtern die Einhaltung der VOC-Anforderungen.
• Nachteil 1: langsamere Trocknung und höhere Nassauftragsmenge.
• Nachteil 2: größere Empfindlichkeit gegenüber dem Trocknungsklima, dazu kritischere Benetzung und kritischerer Verlauf wegen der hohen Oberflächenspannung des Wassers.

## Wahlqualifikation 2 — wasserverdünnbar — Kunststoffoberflächen

**Aufgabe 1 a)** 4 Punkte · L-71, L-126, L-12

• Wasser hat mit rund 72 mN/m eine sehr hohe Oberflächenspannung, deutlich höher als organische Lösemittel mit etwa 25 bis 30 mN/m.
• Polyolefine wie Polypropylen sind unpolar und haben eine niedrige Oberflächenenergie in der Größenordnung von 29 bis 36 mN/m.
• Benetzung wird begünstigt, wenn die Oberflächenspannung des Lacks niedriger ist als die Oberflächenenergie des Untergrunds; maßgeblich ist der Randwinkel nach Young. Hier ist es umgekehrt, der Lack zieht sich zusammen, perlt ab und haftet kaum.
• Erkannt, dass streng genommen der Randwinkel maßgeblich ist: Nach der Young-Gleichung $\cos\theta = (\gamma SV - \gamma SL) / \gamma LV$ geht zusätzlich die Grenzflächenspannung zwischen Lack und Festkörper ein.

**Aufgabe 1 b)** 3 Punkte · L-127, L-72, L-74

• Wässrige Kunststofflacke basieren auf Acrylat- und Polyurethandispersionen und werden als wässrige Primer wie als Decklacke eingesetzt.
• Kunststoffbauteile sind oft flexibel; der Lackfilm muss die Verformung mitmachen, ohne zu reißen, deshalb werden elastische Bindemittel gewählt und Härte und Elastizität gezielt über die Rezeptur eingestellt.
• Polyurethandispersionen entstehen als Sekundärdispersion, das Bindemittel wird also getrennt maßgeschneidert hergestellt und danach dispergiert; das ergibt hochwertige, elastische und beständige Filme.

**Aufgabe 1 c)** 3 Punkte · L-127

• Baustein 1 ist ein weiches, weichsegmentreiches Polyurethan-Bindemittel, das dem Film die gummiartige Nachgiebigkeit gibt.
• Baustein 2 sind eingearbeitete Haptik- beziehungsweise Mattierungspartikel, zum Beispiel organische Polymethylharnstoff-Typen oder mikronisierte Polyester-Elastomerpartikel, die die Oberfläche mikroskopisch aufrauen.
• Erst das Zusammenspiel aus weicher Matrix und mikrostrukturierter Oberfläche ergibt die samtige Haptik; zusätzliche Mattierungsmittel wie pyrogene oder gefällte Kieselsäure senken den Glanzgrad und verstärken den optischen Soft-Touch-Eindruck.

**Aufgabe 2 a)** 4 Punkte · L-126, L-64, L-12

• Beim Beflammen wird die Oberfläche oxidativ aktiviert; es entstehen polare sauerstoffhaltige Gruppen wie Hydroxyl-, Hydroperoxid-, Aldehyd-, Keto- und Carboxylgruppen, dadurch steigt die Oberflächenenergie.
• Geprüft wird mit Testtinten nach DIN ISO 8296 (früher DIN 53364) oder über den Kontaktwinkel.
• Als Richtwert gilt ab etwa 38 mN/m lackierfähig; für wasserverdünnbare Systeme sollten rund 44 mN/m erreicht werden.
• Die Aktivierung hält nicht dauerhaft an: Die polaren Gruppen wandern mit der Zeit in das Polymerinnere zurück, die Oberflächenenergie sinkt wieder, deshalb ist innerhalb des festgelegten Zeitfensters von meist wenigen Stunden zu beschichten.

**Aufgabe 2 b)** 3 Punkte · L-154, L-68

• Aus TSD = NSD · VFK / 100 folgt NSD = 12 · 100 / 32 = 37,5 µm.
• Ergiebigkeit A = 10 · VFK / TSD = 10 · 32 / 12 = 26,67 m² je Liter.
• Theoretischer Bedarf = 150 / 26,67 = 5,625 l; tatsächlicher Bedarf = 5,625 / 0,60 = 9,4 l.

**Aufgabe 2 c)** 3 Punkte · L-126

• Als Haftvermittler dienen modifizierte, meist chlorierte Polyolefine (CPO), die in organischen Lösemitteln löslich sind.
• Sie werden sehr dünn aufgetragen, nur wenige µm, und sind niedrig im Festkörper.
• Sie bilden eine Brücke zwischen dem unpolaren Kunststoff und dem Decklack; für andere Kunststoffe wie Polycarbonat gibt es angepasste, auch wässrige Primer.

**Aufgabe 3 a)** 4 Punkte · L-12, L-126, L-161

• Trennmittelreste aus dem Spritzguss sowie Fette, Öle und Handschweiß bilden eine unsichtbare, niederenergetische Schicht, die Benetzung und Haftung mindert; Abhilfe ist sorgfältiges Reinigen und Entfetten vor jeder Aktivierung.
• Ein Reinigungsbad reichert sich mit Fett an; ist seine Aufnahmefähigkeit erschöpft, zieht das gelöste Fett beim Abtrocknen wieder auf das Werkstück. Abhilfe ist die Überwachung der Bäder, rechtzeitiger Wechsel und Nachspülen mit rückstandsfrei verdunstendem Reiniger.
• Auch der Lack selbst kann Krater erzeugen: siliconmodifizierte Additive, vor allem Entschäumer, wirken über eine gewollte feine Unverträglichkeit, die bei Überdosierung, unverträglichem Silicontyp oder schlechter Einarbeitung in Krater umschlägt.
• Erkannt, dass zur Ursachenklärung das Schadensbild zuerst genau beschrieben und dann nach Material, Untergrund, Applikation und Bedingungen eingegrenzt wird, unterstützt durch Auflichtmikroskopie, Querschliff oder FTIR-Mikroskopie.

**Aufgabe 3 b)** 3 Punkte · L-156

• Der Gitterschnitt nach DIN EN ISO 2409 liefert nur einen Haftwiderstandsindex in den Kennwerten Gt 0 bis Gt 5, also eine Relativbewertung und keinen quantitativen Absolutwert.
• Für einen Absolutwert ist der Stirnabzug beziehungsweise die Pull-off-Prüfung nach DIN EN ISO 4624 zu wählen: Ein Prüfstempel wird aufgeklebt und senkrecht abgezogen.
• Die Haftfestigkeit ergibt sich aus Abreißkraft in N geteilt durch Stempelfläche in mm²; ein typischer Anhaltswert für Industrielack auf Stahl liegt bei mindestens 5 N/mm².

**Aufgabe 3 c)** 3 Punkte · L-83, L-68

• Gefahr: Isocyanate können die Atemwege sensibilisieren, eine einmal eingetretene Sensibilisierung kann dauerhaft bestehen, und bereits geringe Expositionen können dann Beschwerden auslösen; der Arbeitsplatzgrenzwert wird über die gesamten reaktiven Isocyanatgruppen angegeben und liegt bei 10 µg NCO je m³ als Schichtmittelwert bis zum 31.12.2028, danach 6 µg NCO je m³.
• Technische Maßnahme: Spritzapplikation nur in abgesaugter Kabine, dazu Atemschutz nach Gefährdungsbeurteilung und TRGS 430 — bei längeren oder großflächigen Isocyanat-Spritzarbeiten fremdbelüfteter Atemschutz —, ergänzt durch Nitrilhandschuhe und Schutzbrille.
• Schutzwirkung: Die Absaugung führt das isocyanathaltige Aerosol ab und hält die Luftkonzentration unter dem Grenzwert, der Atemschutz verhindert die verbleibende Aufnahme über die Atemwege; das gilt auch bei wässriger Basis, weil das Aerosol gesundheitsrelevant bleibt.

## Wahlqualifikation 3 — wasserverdünnbar — metallische Untergründe

**Aufgabe 1 a)** 4 Punkte · L-88, L-86

• Ein Epoxidharz wird mit einem Amin umgesetzt; die Epoxidgruppe öffnet sich, das Amin addiert sich an, es entstehen sekundäre OH-Gruppen und tertiäre Amingruppen im selben Molekülgerüst.
• Mit Säure werden die Amingruppen protoniert: R3N + H+ → R3NH+; dadurch wird das Bindemittel positiv geladen und kationisch wasserdispergierbar.
• An der Kathode, also am Werkstück, wird Wasser reduziert: 2 H2O + 2 e- → H2 + 2 OH-; die Hydroxidionen deprotonieren die Amingruppen (R3NH+ + OH- → R3N + H2O), das Bindemittel verliert seine Ladung, wird wasserunlöslich und koaguliert als Film.
• Erkannt, dass ein verkapptes Polyisocyanat mit im Film liegt, beim Einbrennen entkappt und mit den OH-Gruppen ein sehr dichtes, beständiges Netzwerk bildet.

**Aufgabe 1 b)** 3 Punkte · L-86, L-88

• Das Werkstück ist als Kathode geschaltet und wird während der Abscheidung nicht anodisch aufgelöst, es findet also kein Metallabtrag statt.
• Das Epoxid-Isocyanat-Netzwerk der KTL ergibt eine dichtere, barrierestärkere Schicht als das carboxylgruppenhaltige ATL-Netzwerk.
• Verfahrensvorteil: Die Abscheidung im elektrischen Feld erreicht auch abgeschattete Flächen, Hohlräume und Kanten, weil das Feld dorthin folgt, wo noch kein isolierender Film sitzt; die Schichtdicke begrenzt sich dabei von selbst.

**Aufgabe 1 c)** 3 Punkte · L-41, L-99

• Barrierewirkung: Lamellare Pigmente wie Eisenglimmer richten sich beim Trocknen parallel zur Oberfläche aus und verlängern rein physikalisch den Diffusionsweg für Wasser, Sauerstoff und Ionen.
• Aktiver, passivierender Schutz: Zinkphosphat beeinflusst die elektrochemischen Korrosionsreaktionen an der Metalloberfläche und opfert sich dabei nicht; es ist ausdrücklich kein kathodischer Schutz.
• Kathodischer Schutz: Zinkstaub hat leitenden Kontakt zum Stahl, das unedlere Zink löst sich bevorzugt auf und wirkt als Opferanode: Zn → Zn2+ + 2 e-.

**Aufgabe 2 a)** 4 Punkte · L-99, L-68

• Theoretische Ergiebigkeit A = 10 · Volumenfestkörper / Trockenschichtdicke = 10 · 45 / 120 = 3,75 m² je Liter.
• Theoretischer Bedarf = Fläche / A = 600 / 3,75 = 160 l.
• Tatsächlicher Bedarf = theoretischer Bedarf / Auftragswirkungsgrad = 160 / 0,70 = 228,6 l.
• Erkannt, dass ein höherer Auftragswirkungsgrad zugleich Material, Emission und Abfall senkt und damit wirtschaftlich und ökologisch wirkt.

**Aufgabe 2 b)** 3 Punkte · L-150

• Der MEQ-Wert gibt die Milliäquivalente an Säure oder Base je 100 g Lackfestkörper an, also die Menge des eingesetzten Neutralisationsmittels; bestimmt wird er durch Titration.
• Er erfasst eine Menge und hängt nicht vom Zustand einer Elektrode ab, während die pH-Messung mit der Glaselektrode in pigmentierten Lacken durch Beläge fehleranfällig ist; deshalb ist der MEQ-Wert reproduzierbarer.
• MEQ = V · 1000 / (m_Lack · nfA) = 12,6 · 1000 / (10,0 · 42) = 12600 / 420 = 30,0 Milliäquivalente je 100 g Festkörper.

**Aufgabe 2 c)** 3 Punkte · L-99, L-64

• Stahl wird gestrahlt; das entfernt Zunder, Rost und Verunreinigungen und erzeugt zugleich eine definierte Rauheit, die die Grundierung verankert und die Haftung sichert.
• Der erreichte Reinheitsgrad heißt Entrostungsgrad, zum Beispiel Sa 2, Sa 2½ oder Sa 3 beim Strahlen und St 2 oder St 3 bei Handentrostung; er ist in DIN EN ISO 8501-1 geregelt, die Rauheitsgrade dagegen in DIN EN ISO 8503.
• Anschließend kann eine Konversionsbehandlung eine fest haftende, korrosionshemmende Zwischenschicht erzeugen, etwa eine Eisen- oder Zinkphosphatierung; höhere Korrosivitätskategorien verlangen höhere Entrostungsgrade.

**Aufgabe 3 a)** 4 Punkte · L-83

• Das Isocyanat reagiert nicht nur mit den OH-Gruppen des Bindemittels, sondern auch mit dem Wasser der Rezeptur, wobei CO2 und Harnstoff entstehen; das CO2 verursacht im Film die Blasen.
• Maßnahme 1: dünne Schichten mit ausreichender Ablüftzeit auftragen, damit das entstehende CO2 den Film verlassen kann, bevor er zu viskos wird.
• Maßnahme 2: hydrophil modifizierte, selbstemulgierende Polyisocyanate einsetzen; sie emulgieren fein und schnell, sodass die NCO-Gruppen bevorzugt auf die OH-Gruppen treffen.
• Maßnahme 3: mit NCO-Überschuss arbeiten, ein NCO:OH-Verhältnis von etwa 1,2 bis 1,5 zu 1 ist ein gängiger Richtwert, um den Verlust an das Wasser auszugleichen; der nötige Überschuss wird härterspezifisch empirisch festgelegt.

**Aufgabe 3 b)** 3 Punkte · L-159, L-99

• Geprüft wird unter anderem mit Salzsprühnebel nach DIN EN ISO 9227 an einem eingeritzten Blech, ergänzt durch Kondenswasserprüfung nach DIN EN ISO 6270 und UV-Bewitterung.
• Bewertet werden Blasengrad, Rostgrad, Rissgrad und Abblätterungsgrad nach DIN EN ISO 4628 sowie die Unterwanderung am Ritz.
• Der Dauer-Salzsprühnebel ist ein reiner Zeitraffer und korreliert nur begrenzt mit der Praxis; zyklische Wechseltests nach DIN EN ISO 11997-1 oder VDA 233-102 können reale Belastungswechsel praxisnäher abbilden.

**Aufgabe 3 c)** 3 Punkte · L-84

• Gefahr: Wasserlösliche Härter auf Basis primärer Amine wie DETA wirken ätzend auf Haut und Augen (H314) und sind hautsensibilisierend (H317); auch das Epoxidharz selbst enthält mit BADGE einen bekannten Hautsensibilisator.
• Technische Maßnahme: bevorzugt epoxidharzmodifizierte Addukt-Härter einsetzen, in denen das freie Amin gebunden ist, dazu Absaugung und bei Spritzapplikation Atemschutz sowie Chemikalienschutzhandschuhe aus Nitril oder Butylkautschuk und Schutzbrille.
• Schutzwirkung: Der geringere Anteil freien Amins senkt Ätz- und Sensibilisierungsrisiko deutlich, die Absaugung hält Amingeruch und Sprühnebel von den Atemwegen fern; in wässrigen Systemen sind zwar die Lösemitteldämpfe reduziert, Aerosol und Amin bleiben aber gesundheitsrelevant.

## Wahlqualifikation 4 — Beschichtungsstoffe für mineralische Untergründe

**Aufgabe 1 a)** 4 Punkte · L-78

• Bindemittel ist eine wässrige Kaliumsilicat-Lösung (Kaliwasserglas); ihr Molverhältnis SiO2 zu K2O (Modul) bestimmt Viskosität, Reaktionsfreudigkeit und Lagerstabilität.
• Bei der Härtung wirken Carbonatisierung durch Luft-CO2, Ansäuerung und Polykondensation der Silicatspezies sowie Reaktionen mit den mineralischen Bestandteilen des Untergrunds zusammen; es entsteht unlösliches Kieselgel.
• Durch diese Verkieselung verwächst der Anstrich fest mit dem Untergrund, statt nur auf ihm zu haften; die Haftung ist dadurch besonders dauerhaft.
• Erkannt, dass auf organischen oder nicht saugfähigen Untergründen keine Verkieselung mit dem Untergrund möglich ist und Silicatfarbe dort nicht haftet.

**Aufgabe 1 b)** 3 Punkte · L-79, L-78

• Dispersionssilicatfarbe besteht aus stabilisiertem Kaliwasserglas mit einer geringen Menge Kunststoffdispersion (organischer Anteil meist unter 5 %).
• Siliconharzfarbe kombiniert eine Kunststoffdispersion (meist Styrol-Acrylat) mit einer Siliconharzemulsion; diese senkt die Wasseraufnahme und verbessert die Wasserdampfdurchlässigkeit gegenüber der reinen Dispersionsfarbe.
• Beide sind gebrauchsfertige Einkomponentensysteme und stehen nicht ab dem Anmischen unter dem Zeitdruck der begrenzten Topfzeit der 2K-Silicatfarbe.

**Aufgabe 1 c)** 3 Punkte · L-80, L-55, L-77

• Eine hohe PVK erzeugt viele Poren im Film; das senkt den sd-Wert und lässt Wasserdampf aus dem Untergrund entweichen, außerdem sind Füllstoffe günstiger als Bindemittel.
• Oberhalb der kritischen PVK reicht das Bindemittel nicht mehr aus, alle Teilchen einzubinden: Der Film wird porös, nimmt mehr Wasser auf, Sperrwirkung und Beständigkeit fallen ab.
• An der Oberfläche baut UV das Bindemittel ab und legt Pigmentkörner frei; es entsteht eine pulvrige Schicht, die Kreidung.
• Erkannt, dass nicht die PVK-Zahl allein zählt, sondern ihre Lage relativ zur KPVK des jeweiligen Systems.

**Aufgabe 2 a)** 4 Punkte · L-59, L-55

• Volumina über V = m durch Dichte: Titandioxid 82/4,1 = 20,0 cm3, Talkum 210/2,8 = 75,0 cm3, Pigment und Füllstoff zusammen 95,0 cm3; Bindemittel 55/1,1 = 50,0 cm3.
• PVK = 95,0 / (95,0 + 50,0) mal 100 % = 65,5 %.
• KPVK = 100 / (1 + 4,1 mal 18 / (0,93 mal 100)) = 100 / 1,794 = 55,8 %.
• Bewertung: Die PVK von 65,5 % liegt über der kritischen PVK von rund 56 %, der Ansatz ist überkritisch pigmentiert; das ergibt einen matten, diffusionsoffenen, aber porösen Film mit Kreidungsneigung.

**Aufgabe 2 b)** 3 Punkte · L-81

• sd = μ mal s = 900 mal 0,000200 m = 0,18 m.
• w = 0,3 kg/(m2 mal Wurzel h) liegt unter der Grenze von 0,5; sd = 0,18 m liegt unter der Grenze von 2,0 m.
• Produkt sd mal w = 0,18 mal 0,3 = 0,054 kg/(m mal Wurzel h) und damit unter 0,2; alle drei Kriterien sind gleichzeitig erfüllt.
• Erkannt, dass das Produktkriterium allein nicht genügt, weil eine sehr dichte Schicht mit niedrigem w-Wert es trotz Dampfsperrwirkung einhalten könnte.

**Aufgabe 2 c)** 3 Punkte · L-109, L-64

• Ein stark saugender Untergrund zieht das Bindemittel in die Poren; der Film bleibt bindemittelarm und haftet schlecht.
• Der Tiefgrund hebt die Saugfähigkeit auf oder mindert sie, verfestigt und imprägniert den Untergrund und verbessert die Haftung der nachfolgenden Beschichtung.
• Dafür muss er niedrigviskos und festkörperarm sein, damit er tief eindringt.
• Erkannt, dass das Bindemittel für die Alkalität des mineralischen Untergrunds ausreichend beständig sein muss.

**Aufgabe 3 a)** 4 Punkte · L-81, L-77

• Die Altbeschichtung war zu dicht: Wasserdampf aus dem Untergrund konnte nicht entweichen, die Feuchte staute sich hinter der Schicht und führte zu Blasen und Abplatzungen.
• Eindringendes flüssiges Wasser transportiert Salze; diese kristallisieren beim Austrocknen als Ausblühungen aus und können die Beschichtung absprengen.
• Die Neubeschichtung muss flüssiges Wasser abhalten (niedriger w-Wert) und zugleich Wasserdampf durchlassen (niedriger sd-Wert).
• Erkannt, dass w-Wert, sd-Wert und das Produkt sd mal w gleichzeitig eingehalten werden müssen.

**Aufgabe 3 b)** 3 Punkte · L-109

• Gefahr: Die Stäube mineralischer Untergründe reagieren meist alkalisch und können quarzhaltig sein; Tätigkeiten mit alveolengängigem Quarzfeinstaub gelten nach TRGS 906 als krebserzeugend.
• Maßnahme: staubarm arbeiten, ergänzend geeigneter Atemschutz nach Gefährdungsbeurteilung — je nach Staubart und Exposition Partikelfilter wie P2/FFP2 oder höhere Schutzstufen — und Schutzbrille gegen abplatzende Lack- und Mineralpartikel.
• Schutzwirkung: Die eingeatmete Staubmenge wird begrenzt und die Augen sind gegen abplatzende Partikel geschützt.

**Aufgabe 3 c)** 3 Punkte · L-78

• Kaliwasserglas ist stark alkalisch (hoher pH) und reizt beziehungsweise verätzt Haut und Augen; persönliche Schutzausrüstung ist Pflicht.
• Schutzbrille und Handschuhe tragen und angrenzende Flächen wie Glas, Naturstein und Lack abdecken.
• Nach dem Mischen von Pigmentpaste und Kaliwasserglas setzt die Härtung sofort ein; die Topfzeit ist begrenzt und angebrochene Mischung ist später nicht mehr verwendbar.
• Erkannt, dass deshalb nur bedarfsgerecht angesetzt werden darf und die Farbpalette auf alkalifeste, silicatbeständige Pigmente beschränkt ist.

## Wahlqualifikation 5 — lösemittelhaltige Beschichtungsstoffe — Holz und Holzwerkstoffe

**Aufgabe 1 a)** 4 Punkte · L-122

• Filmbildner sind hydroxylgruppenhaltige Polyester oder Polyether; Reaktionspartner ist ein Aminoharz, klassisch ein Harnstoffharz, häufig auch ein Melaminharz.
• Die Hydroxylgruppen des Filmbildners vernetzen mit den Methylol- beziehungsweise Methoxymethylgruppen des Aminoharzes in einer säurekatalysierten Polykondensation; dabei werden je nach Aminoharz Methanol und/oder Wasser abgespalten, die aus dem Film entweichen müssen.
• Der saure Härter, meist para-Toluolsulfonsäure, protoniert die Methylol- beziehungsweise Methoxymethylgruppen und senkt die Aktivierungsenergie so weit, dass die Kondensation bei Raumtemperatur abläuft.
• Erkannt, dass daraus die begrenzte Topfzeit folgt, weil die Vernetzung nach dem Mischen unaufhaltsam weiterläuft.

**Aufgabe 1 b)** 3 Punkte · L-123, L-21

• Reines Cellulosenitrat bildet harte, aber spröde Filme, die allein nicht gebrauchsfähig sind.
• Weichmacher wie Adipinsäureester, Butylstearat, Rizinusöl oder epoxidiertes Sojaöl senken die Glasübergangstemperatur und erhöhen die Flexibilität.
• Harte Harze wie Maleinat-, Keton- oder Cyclohexanon-Formaldehyd-Harze heben die Glasübergangstemperatur des Filmbildnergemisches wieder an und verbessern Kratzfestigkeit, Fülle und Schleifbarkeit.
• Erkannt, dass erst diese Kombination den im Möbelbereich als Hartlack bezeichneten Lack ergibt.

**Aufgabe 1 c)** 3 Punkte · L-21

• Der Stickstoffgehalt folgt aus der Zahl der Nitratgruppen je Glucose-Einheit: eine Gruppe 6,76 %, zwei 11,11 %, drei 14,14 %.
• Er beeinflusst Löslichkeit, Verträglichkeit mit anderen Bindemitteln und Lösemitteln, Trocknungsverhalten und Filmhärte; niedriger nitrierte Typen sind alkohollöslich (A-Typen), höher nitrierte esterlöslich (E-Typen).
• Lacktypen liegen als Richtwert bei etwa 11 bis 12 % Stickstoff.
• Erkannt, dass hochnitrierte Qualitäten über etwa 12,5 % Stickstoff als Explosivstoff gelten und kein Lackrohstoff sind.

**Aufgabe 2 a)** 4 Punkte · L-58, L-27

• Stoffmenge OH: n(OH) = 800 mal 105 / 56100 = 1,497 mol.
• NCO-Äquivalentmasse: 42,02 / 0,20 = 210,1 g je Äquivalent.
• Härtermenge: m = 1,497 mal 210,1 mal 1,05 = 330,3 g Härter-Festkörper.
• Erkannt, dass bei 75-prozentiger Lieferform 330,3 / 0,75 = 440,4 g einzuwiegen sind.

**Aufgabe 2 b)** 3 Punkte · L-125, L-27

• Der Isocyanat-Härter reagiert stark mit Wasser; dabei entsteht über die instabile Carbaminsäure CO2, das im Film Blasen bildet, und es laufen Nebenreaktionen ab.
• Maßnahmen: Wassergehalt vorher prüfen, trockene Gebinde verwenden und den Behälter mit Schutzgas wie Stickstoff fluten.
• Restfeuchte lässt sich mit Trockenmitteln, zum Beispiel Molekularsieb, binden.
• Erkannt, dass die Kennzahl in der Praxis leicht über 1,0 gewählt wird, um Nebenreaktionen mit Restfeuchte auszugleichen.

**Aufgabe 2 c)** 3 Punkte · L-125, L-68

• Ein Parkettlack braucht hohe Härte, hohe Abriebfestigkeit und gute Haftung.
• Hinzu kommen gutes Verhalten bei Druckbelastung (Verblockung) und Beständigkeit gegen Haushaltschemikalien.
• Der Gleitwiderstand wird über den Reibungskoeffizienten bestimmt: Eine Ebene wird geneigt, bis ein Gewicht mit definierter Fläche rutscht.
• Erkannt, dass die Haftung genormt mit dem Gitterschnitt nach DIN EN ISO 2409 (Kennwerte 0 bis 5) geprüft wird.

**Aufgabe 3 a)** 4 Punkte · L-122

• Bei der säurekatalysierten Kondensation des Aminoharzes kann Formaldehyd frei werden.
• Formaldehyd ist unter anderem als krebserzeugend Kategorie 1B (H350) und hautsensibilisierend (H317) eingestuft; der Arbeitsplatzgrenzwert nach TRGS 900 beträgt 0,3 ml/m3 mit Überschreitungsfaktor 2.
• Fänger tragen freie Aminogruppen (Harnstoff, Melamin, Kasein) und addieren freies Formaldehyd zur N-Methylolverbindung (Halbaminal): R-NH2 + HCHO ergibt R-NH-CH2OH.
• Erkannt, dass die Bindung reversibel ist und Wärme, Feuchte sowie der im Film verbleibende saure Katalysator über Monate wieder Formaldehyd freisetzen können; Fänger senken die Emission, sie beenden sie nicht.

**Aufgabe 3 b)** 3 Punkte · L-68, L-21, L-172

• Gefahr: Lösemitteldämpfe sind gesundheitsschädlich und bilden mit Luft explosionsfähige Gemische; Cellulosenitrat ist zudem ein leicht entzündlicher, energiereicher Stoff.
• Maßnahme: ausreichende Absaugung und Belüftung, Behälter und Anlagen erden, Zündquellen fernhalten.
• Schutzwirkung: Die untere Explosionsgrenze wird nicht erreicht und die Konzentration in der Atemluft bleibt unter dem Arbeitsplatzgrenzwert.
• Erkannt, dass persönliche Schutzausrüstung wie Atemschutz erst nach den technischen Maßnahmen greift.

**Aufgabe 3 c)** 3 Punkte · L-176, L-123

• Anteil flüchtiger Bestandteile = 100 % minus 20 % Festkörper = 80 %.
• VOC ist ungefähr 0,80 mal 0,95 kg/l = 0,76 kg/l, also rund 760 g/l.
• Der rechtlich maßgebliche Wert wird am gebrauchsfertigen Produkt nach der Formel der jeweils geltenden Vorschrift berechnet, einschließlich Härter und Verdünnung.
• Erkannt, dass nur Stoffe zählen, die der VOC-Definition genügen; die ChemVOCFarbV stellt dabei auf einen Siedepunkt von höchstens 250 °C ab.

## Wahlqualifikation 6 — lösemittelhaltige Beschichtungsstoffe — Kunststoffoberflächen

**Aufgabe 1 a)** 4 Punkte · L-126, L-12

• Polypropylen ist unpolar und hat eine niedrige Oberflächenenergie in der Größenordnung 29 bis 36 mN/m; der Lack benetzt schlecht, zieht sich zusammen und perlt ab, statt einen geschlossenen Film zu bilden.
• Zuerst wird gereinigt und entfettet, weil Trennmittelreste aus dem Spritzguss eine unsichtbare, haftungsmindernde Schicht bilden.
• Anschließend wird die Oberfläche durch Beflammen, Plasma oder Corona aktiviert; dabei entstehen polare sauerstoffhaltige Gruppen wie Hydroxyl-, Aldehyd-, Keto- und Carboxylgruppen, und die Oberflächenenergie steigt.
• Erkannt, dass bei Polyolefinen zusätzlich ein Haftvermittler aus modifizierten, meist chlorierten Polyolefinen (CPO) sehr dünn aufgetragen wird und als Brücke zum Decklack wirkt.

**Aufgabe 1 b)** 3 Punkte · L-26, L-27, L-127

• Das System besteht aus einem hydroxylhaltigen Bindemittel, zum Beispiel einem hydroxyfunktionellen Acrylatharz, und einem Polyisocyanat-Härter.
• Für den Decklack werden aliphatische oder cycloaliphatische Härter (HDI, IPDI) gewählt, weil sie wetter- und vergilbungsbeständig sind; aromatische Typen wie TDI und MDI vergilben unter Licht.
• Das Lösemittel muss frei von OH- und NH-Gruppen sein, zum Beispiel Butylacetat, Xylol oder Methoxypropylacetat.
• Erkannt, dass Alkohole und Wasser ausscheiden, weil ihre OH-Gruppen selbst mit dem Isocyanat reagieren und den Härter verbrauchen.

**Aufgabe 1 c)** 3 Punkte · L-127

• Kunststoffbauteile sind oft flexibel; der Lackfilm muss die Verformung mitmachen, ohne zu reißen, deshalb wählt man elastische Bindemittel und stellt Härte und Elastizität über die Rezeptur ein.
• Ein zu spröder Film reißt, ein zu weicher ist nicht beständig genug.
• Ein Soft-Feel-Lack besteht aus einem weichen, weichsegmentreichen Polyurethan-Bindemittel und eingearbeiteten Haptik- beziehungsweise Mattierungspartikeln, die die Oberfläche mikroskopisch aufrauen.
• Erkannt, dass erst das Zusammenspiel aus weicher Matrix und mikrostrukturierter Oberfläche die samtige, leicht gummiartige Haptik ergibt.

**Aufgabe 2 a)** 4 Punkte · L-12

• cos θ = (γSV minus γSL) / γLV = (40 minus 12) / 30 = 0,93; daraus θ ungefähr 21 Grad.
• Bewertung: θ kleiner 90 Grad bedeutet gute Benetzung; bei θ gleich 0 läge vollständige Spreitung vor.
• Unbehandelt: cos θ = (30 minus 35) / 30 = minus 0,17; daraus θ ungefähr 100 Grad — über 90 Grad und damit schlechte Benetzung: Der Lack perlt ab.
• Erkannt, dass nicht der bloße Vergleich von Oberflächenspannung und Oberflächenenergie entscheidet, sondern der Randwinkel und damit zusätzlich die Grenzflächenspannung γSL.

**Aufgabe 2 b)** 3 Punkte · L-68

• Ergiebigkeit A = 10 mal VFK / TSD = 10 mal 45 / 30 = 15 m2/l.
• Materialbedarf V = Fläche / A / (Wirkungsgrad/100) = 60 / 15 / 0,65 = 6,2 l.
• Ohne Overspray-Verlust wären rechnerisch nur 60 / 15 = 4,0 l nötig.
• Erkannt, dass ein höherer Auftragswirkungsgrad Material spart und zugleich Emission und Abfall senkt.

**Aufgabe 2 c)** 3 Punkte · L-126

• Geprüft wird mit Testtinten nach DIN ISO 8296 (früher DIN 53364) oder über den Kontaktwinkel.
• Richtwert: ab etwa 38 mN/m ist eine Oberfläche lackierfähig, für wasserverdünnbare Systeme sollten rund 44 mN/m erreicht werden.
• Die eingebauten polaren Gruppen wandern mit der Zeit in das Polymerinnere zurück, die Oberflächenenergie sinkt wieder.
• Erkannt, dass die Teile deshalb innerhalb des festgelegten Zeitfensters von meist wenigen Stunden beschichtet werden müssen.

**Aufgabe 3 a)** 4 Punkte · L-12, L-126, L-68

• Krater sind Benetzungsstörungen durch Verunreinigungen: Trennmittelreste aus dem Spritzguss, Fett oder Silicon an der Oberfläche.
• Auch überdosierte, unverträgliche oder schlecht eingearbeitete siliconmodifizierte Additive des Lackes selbst, vor allem Entschäumer, erzeugen dieselben Krater.
• Abstellmaßnahme: gründlich reinigen und entfetten, die Reinigungsbäder überwachen und rechtzeitig wechseln sowie die Additivdosierung prüfen.
• Der abhebbare Film zeigt eine unzureichende Aktivierung oder ein überschrittenes Zeitfenster nach der Vorbehandlung.
• Abstellmaßnahme: Oberflächenenergie vor dem Lackieren mit Testtinten prüfen und die Teile innerhalb des Zeitfensters beschichten.

**Aufgabe 3 b)** 3 Punkte · L-26, L-125

• Gefahr: Die freien Isocyanatgruppen der Härter wirken haut- und atemwegssensibilisierend, vor allem als Aerosol im Spritznebel.
• Maßnahme: Spritzen nur in der Kabine mit Absaugung, ergänzt durch Atemschutz und Handschuhe.
• Schutzwirkung: Die Aerosolkonzentration in der Atemluft wird gesenkt und Haut- sowie Atemwegskontakt werden vermieden.
• Erkannt, dass für Diisocyanate oberhalb der REACH-Schwelle von 0,1 Gew.-% seit dem 24. August 2023 eine erfolgreich absolvierte Schulung zur sicheren Verwendung nachzuweisen ist.

**Aufgabe 3 c)** 3 Punkte · L-176, L-127

• Emissionsarme Systeme einsetzen, etwa wässrige Primer und Basislacke oder festkörperreich eingestellte Lacke.
• Den Auftragswirkungsgrad erhöhen, zum Beispiel elektrostatisch statt konventionell spritzen, damit weniger Overspray entsteht.
• Gefasste Absaugung mit Abgasreinigung sowie organisatorische Maßnahmen wie geschlossene Reinigungssysteme und Rückgewinnung von Spüllösemittel.
• Zuordnung: Produktseitig gilt die ChemVOCFarbV mit dem VOC-Gehalt je Liter, anlagenseitig die 31. BImSchV mit der Lösemittelbilanz.

## Wahlqualifikation 7 — lösemittelhaltige Beschichtungsstoffe — metallische Untergründe

**Aufgabe 1 a)** 4 Punkte · L-25

• Die Isocyanatgruppe reagiert mit der OH-Gruppe des Bindemittels zur Urethanbindung; die Polyaddition läuft ohne Abspaltprodukt ab.
• Viele Ketten verknüpfen sich zu einem Netzwerk, aus dem Härte, Beständigkeit und Haftung des Films kommen.
• Isocyanat reagiert mit Wasser über eine instabile Carbamidsäure zu Amin und Kohlendioxid, das Amin mit weiterem Isocyanat zu Harnstoff; das freigesetzte Kohlendioxid kann Blasen verursachen, deshalb müssen Rohstoffe und Anlage trocken sein.
• Erkannt, dass nach dem Mischen die Topfzeit läuft und nur so viel angesetzt werden darf, wie sich in dieser Zeit verarbeiten lässt.

**Aufgabe 1 b)** 3 Punkte · L-26

• Aromatische Härter wie TDI und MDI sind reaktiv und kostengünstig, neigen unter Licht aber zur Vergilbung und werden deshalb für Grundierungen, Füller und Innenanwendungen eingesetzt.
• Aliphatische und cycloaliphatische Härter wie HDI und IPDI sind wetter- und vergilbungsbeständig und damit die Wahl für hochwertige Decklacke.
• Für den bewitterten Decklack wird deshalb ein aliphatischer oder cycloaliphatischer Härter gewählt; HDI ergibt eher flexible, IPDI eher harte Filme.

**Aufgabe 1 c)** 3 Punkte · L-25, L-27

• Geeignet sind Butylacetat, Xylol und Methoxypropylacetat.
• Sie tragen selbst keine OH- oder NH-Gruppen und reagieren deshalb nicht mit dem Isocyanat-Härter, sondern verdünnen nur.
• Alkohole und Wasser scheiden aus, weil ihre OH-Gruppen selbst mit dem Isocyanat reagieren und den Härter verbrauchen; zu verwechseln sind Methoxypropylacetat (geeignet) und Methoxypropanol (Alkohol, ungeeignet).

**Aufgabe 2 a)** 4 Punkte · L-27, L-58

• n(OH) = m · OH-Zahl / 56100 = 400 · 120 / 56100 = 0,8556 mol.
• NCO-Äquivalentmasse = 42,02 / (20/100) = 210,1 g je Äquivalent.
• m(Härter, Festkörper) = n(OH) · NCO-Äquivalentmasse · Kennzahl = 0,8556 · 210,1 · 1,05 = 188,8 g.
• Einwaage Lieferware = 188,8 / 0,75 = 251,7 g der 75-prozentigen Lösung.

**Aufgabe 2 b)** 3 Punkte · L-64

• Zuerst reinigen und entfetten, weil Reste von Öl, Fett, Trennmittel oder Altbeschichtung Benetzung und Haftung verhindern.
• Anschließend Strahlen: Es entfernt Zunder und Rost und erzeugt eine definierte Rauheit; die Entrostungsgrade, zum Beispiel Sa 2½, regelt DIN EN ISO 8501-1, die Rauheitsgrade DIN EN ISO 8503.
• Danach Konversionsbehandlung, zum Beispiel Zinkphosphatierung: Sie bildet eine kristalline, fest haftende und korrosionshemmende Zwischenschicht und dient als Haftgrund.

**Aufgabe 2 c)** 3 Punkte · L-67, L-68

• Der Auftragswirkungsgrad ist der Anteil des eingesetzten Lacks, der tatsächlich als Film auf dem Werkstück landet; der Rest geht als Overspray verloren.
• Druckluftspritzen erreicht als Richtwert etwa 30 Prozent, HVLP als Richtwert über 60 Prozent.
• HVLP arbeitet mit viel Luft bei geringem Druck an der Luftkappe; die Tröpfchen treffen langsamer auf, prallen weniger ab und der Sprühnebel sinkt.

**Aufgabe 3 a)** 4 Punkte · L-26, L-68, L-172

• Gefahr: Die freien Isocyanatgruppen wirken haut- und atemwegssensibilisierend, vor allem als Spritznebel; auch die dampfdruckarmen Oligomere bleiben sensibilisierend.
• Technische Maßnahme: Verarbeiten in der Spritzkabine mit wirksamer Absaugung an der Entstehungsstelle.
• Schutzwirkung: Der Spritznebel wird erfasst und abgeführt, die Exposition der Atemwege sinkt; beim Spritzen ist zusätzlich Atemschutz zu tragen.
• Die Reihenfolge lautet Gefahr erkennen, Exposition beurteilen, technisch vermeiden oder reduzieren, organisatorisch absichern, PSA einsetzen, Wirksamkeit kontrollieren; die PSA ist damit die letzte, nicht die erste Maßnahme.

**Aufgabe 3 b)** 3 Punkte · L-25, L-27, L-68

• Ein deutlicher NCO-Überschuss reagiert mit Luftfeuchte über die Carbamidsäure zu Amin und Kohlendioxid; bei dicken Schichten wird das als Blasen sichtbar. Maßnahme: Kennzahl richtig einstellen sowie Rohstoffe, Gebinde und Anlage trocken halten.
• Kocher und Nadelstiche entstehen auch, wenn eingeschlossenes Lösemittel oder Luft erst beim Trocknen entweicht. Maßnahme: dünner applizieren und ausreichende Ablüftzeit einhalten.
• Erkannt, dass ein NCO-Unterschuss umgekehrt OH-Gruppen unvernetzt lässt und der Film weicher, klebriger und weniger chemikalienbeständig bleibt.

**Aufgabe 3 c)** 3 Punkte · L-169, L-176

• Umstellung auf ein High-Solid-System mit erhöhtem Festkörperanteil (High-Solids über 70 Prozent): Bei gleicher Applikationsmenge wird weniger Lösemittel eingesetzt, der VOC-Gehalt sinkt.
• Erhöhung des Auftragswirkungsgrads, zum Beispiel elektrostatisch statt konventionell: weniger Overspray, dadurch weniger eingesetztes Material und weniger Emission; ergänzend gefasste Absaugung mit thermischer oder adsorptiver Abgasreinigung.
• Anlagenseitig gilt die 31. BImSchV mit dem Nachweis über die Lösemittelbilanz, produktseitig die ChemVOCFarbV mit dem VOC-Gehalt je Liter gebrauchsfertiger Beschichtungsstoff.

## Wahlqualifikation 8 — Korrosionsschutzsysteme

**Aufgabe 1 a)** 4 Punkte · L-99, L-41, L-101

• Barrierewirkung: Die Beschichtung hält Wasser, Sauerstoff und Ionen vom Metall fern; lamellare Pigmente wie Eisenglimmer richten sich parallel zur Oberfläche aus und verlängern den Diffusionsweg.
• Aktiver, inhibierender Schutz: Rostschutzpigmente wie Zinkphosphat wirken passivierend und beruhigen die Stahloberfläche elektrochemisch.
• Kathodischer Schutz: Zinkstaubreiche Grundierungen enthalten so viel Zink in leitendem Kontakt zum Stahl, dass sich das unedlere Zink als Opferanode auflöst ($Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2\ e^-$).
• Erkannt, dass Zinkphosphat kein kathodischer Schutz ist: Es opfert sich nicht wie Zinkstaub, sondern hemmt die Korrosionsreaktion chemisch an der Metalloberfläche.

**Aufgabe 1 b)** 3 Punkte · L-99

• Die Grundbeschichtung sorgt für Haftung auf dem vorbereiteten Stahl und für den aktiven oder kathodischen Schutz.
• Die Zwischenbeschichtung liefert Schichtdicke und die Barrierewirkung.
• Die Deckbeschichtung liefert Wetter-, Chemikalien- und UV-Beständigkeit sowie den Farbton.

**Aufgabe 1 c)** 3 Punkte · L-57, L-28, L-29

• 2K-Epoxid haftet sehr gut auf Metall und ergibt eine dichte, wasser- und chemikalienbeständige Barriere; es ist das klassische Bindemittel für schweren Korrosionsschutz.
• Als Härter passt ein Polyaminoamid: Es härtet langsamer, ist flexibler, benetzt gut und ist feuchtigkeitstolerant.
• Aktiven Schutz liefert Zinkphosphat, ergänzt durch Zinkoxid und einen organischen Inhibitor; die Barriere kommt aus dem plättchenförmigen Talkum, das den Diffusionsweg verlängert, Volumen, Standfestigkeit und Chemikalienbeständigkeit aus dem Baryt, Farbe und Deckung aus dem Eisenoxidrot.

**Aufgabe 2 a)** 4 Punkte · L-99, L-68, L-154

• Ergiebigkeit $A = 10 \cdot VFK / TSD = 10 \cdot 55 / 80 = 6{,}875\ m^2$ je Liter.
• Theoretischer Bedarf = Fläche / A = 850 / 6,875 = 123,6 Liter.
• Tatsächlicher Bedarf = theoretischer Bedarf / Auftragswirkungsgrad = 123,6 / 0,65 = 190,2 Liter.
• Nass-Schichtdicke aus $TSD = NSD \cdot VFK / 100$, umgestellt $NSD = 80 \cdot 100 / 55 = 145{,}5\ \mu m$.

**Aufgabe 2 b)** 3 Punkte · L-99, L-64

• Stahl wird gestrahlt; Rost, Zunder und Verunreinigungen müssen entsprechend dem vorgesehenen System entfernt werden.
• Der erreichte Reinheitsgrad heißt Entrostungsgrad, beim Strahlen zum Beispiel Sa 2, Sa 2½ oder Sa 3, bei Handentrostung St 2 oder St 3; höhere Korrosivitätskategorien verlangen höhere Entrostungsgrade.
• Das Strahlen erzeugt zugleich eine Rauheit, die die Grundierung verankert und so die Haftung sichert.

**Aufgabe 2 c)** 3 Punkte · L-99

• Ein Duplexsystem entsteht, wenn auf feuerverzinkten Stahl beschichtet wird: Zinküberzug und Beschichtung schützen gemeinsam.
• Der Vorteil liegt darin, dass die Schutzdauer dadurch überproportional verlängert wird.
• Auf Zink ist die Haftung eigens sicherzustellen, durch Anschleifen oder Sweep-Strahlen und eine geeignete Grundierung.

**Aufgabe 3 a)** 4 Punkte · L-159, L-99

• Salzsprühnebelprüfung nach DIN EN ISO 9227 am eingeritzten Blech in den Varianten NSS (neutral), AASS (essigsauer) und CASS (kupferbeschleunigt essigsauer).
• Als weitere Einzelprüfung dient die Kondenswasserprüfung nach DIN EN ISO 6270, die Feuchteempfindlichkeit, Blasenbildung und Haftungsverlust sichtbar macht.
• Bewertet werden Blasengrad, Rostgrad, Rissgrad und Abblätterungsgrad nach DIN EN ISO 4628 sowie die Unterwanderung am Ritz.
• Erkannt, dass der Dauer-Salzsprühnebel ein reiner Zeitraffer ist und nur begrenzt mit der Praxis korreliert, während zyklische Wechseltests reale Belastungswechsel praxisnäher abbilden können.

**Aufgabe 3 b)** 3 Punkte · L-101

• Wegen der hohen Dichte setzt sich Zinkstaub schnell ab; Antiabsetzmittel wie Bentonit-Paste sind daher besonders wichtig, und der Bodensatz muss aufrührbar bleiben.
• Das Bindemittel darf nicht stark sauer oder basisch sein, sonst reagiert das Zink chemisch, bei Säuren unter Wasserstoffbildung und Bildung löslicher Salze, was die Schutzwirkung mindert.
• Nach ISO 12944-5 gelten mindestens 80 Prozent Zinkstaub im Trockenfilm als Basis für zinkreiche Grundbeschichtungen; in der Praxis liegen hochwertige Typen häufig bei etwa 90 bis 95 Prozent.

**Aufgabe 3 c)** 3 Punkte · L-101

• Gefahr: Beim Schweißen, Schleifen oder thermischen Trennen zinkbeschichteter Teile entsteht Zinkoxidrauch; das Einatmen kann Zinkrauchfieber mit grippeähnlichen Symptomen auslösen, die einige Stunden nach der Exposition auftreten.
• Technische Maßnahme: wirksame Absaugung am Entstehungsort und ausreichende Lüftung des Arbeitsbereichs.
• Schutzwirkung: Der Rauch wird erfasst, bevor er die Atemluft erreicht; ergänzend ist geeigneter Atemschutz nach Gefährdungsbeurteilung zu tragen — je nach Exposition Partikelfilter wie P2/FFP2 oder höhere Schutzstufen, bei intensiver Exposition Gebläseatemschutz.

## Wahlqualifikation 9 — Pulverlacksysteme

**Aufgabe 1 a)** 4 Punkte · L-90

• Das Bindemittel braucht eine ausreichend hohe Glasübergangstemperatur, Richtwert über 50 °C, damit das Pulver bei Transport und Lagerung nicht verklumpt oder anbackt.
• Zugleich soll es in der ersten Einbrennphase rasch niedrigviskos werden, damit der Film gut verläuft.
• Gelöst wird das über Polymere mit hoher Glasübergangstemperatur, aber gezielt niedriger Molmasse: Die Polykondensation wird durch einen kleinen Überschuss einer Komponente früh gestoppt, es entstehen Oligomere mit etwa 1500 bis 4000 g/mol.
• Damit die Glasübergangstemperatur trotzdem hoch bleibt, werden starre aromatische Dicarbonsäuren wie Isophthal- und Terephthalsäure mit sperrigen Diolen wie Neopentylglykol kombiniert, die die Kristallisation unterdrücken.

**Aufgabe 1 b)** 3 Punkte · L-93, L-94, L-95

• Reine Epoxid-Pulverlacke haften sehr gut auf Metall und schützen gut vor Korrosion, besitzen aber keine ausreichende langfristige Wetter- und UV-Beständigkeit; sie vermatten, kreiden und vergilben im Freien und bleiben deshalb Innen- und geschützten Anwendungen vorbehalten.
• Epoxid/Polyester-Hybride sind besser überarbeitbar, verlaufen besser und vergilben weniger als reines Epoxid, sind aber nicht voll wetterbeständig und damit Produkte für Innen- und Industrieanwendungen.
• Reine Polyester-Pulverlacke aus carboxylgruppenhaltigen aromatischen Polyestern sind die wetterbeständigen Systeme und werden deshalb für Fassadenprofile, Gartenmöbel und Außenbauteile gewählt.

**Aufgabe 1 c)** 3 Punkte · L-95

• TGIC trägt drei Epoxidgruppen und vernetzt die Carboxylgruppen des Polyesters in einer Additionsreaktion; es entstehen keine Abspaltprodukte, deshalb sind dicke, störungsfreie Filme möglich.
• TGIC ist allerdings als erbgutverändernd eingestuft und wirkt sensibilisierend; beim Umgang mit dem Pulver sind Atem- und Hautschutz nötig.
• Hydroxyalkylamid reagiert mit den Carboxylgruppen in einer Kondensationsreaktion, dabei wird Wasser abgespalten; dieses Reaktionswasser muss entweichen können, deshalb darf die Schichtdicke nicht zu hoch sein und es muss gut entlüftet werden.

**Aufgabe 2 a)** 4 Punkte · L-94, L-28

• n(COOH) = m · Säurezahl / 56100 = 100 · 35 / 56100 = 0,0624 mol.
• Da je Epoxidgruppe eine Carboxylgruppe reagiert, gilt m(Epoxidharz) = n(COOH) · Epoxid-Äquivalentmasse = 0,0624 · 700 = 43,7 g.
• Massenverhältnis: 100 g zu 43,7 g, also 100 / 143,7 = 69,6 Prozent Polyester und 30,4 Prozent Epoxid, gerundet rund 70 zu 30.
• Erkannt, dass dieses Verhältnis im typischen Bereich von etwa 50 zu 50 bis 70 zu 30 Polyester zu Epoxid liegt.

**Aufgabe 2 b)** 3 Punkte · L-97

• Reihenfolge: Einwiegen, Vormischen als Dry-Blend, Extrudieren, Abkühlen und Zerschlagen zu Chips, Mahlen in der Rotor-Sichtermühle, Post-Blend, Schutzsiebung und Abfüllen.
• Im beheizten Extruder schmelzen die Harze; die Schmelze wird geknetet und alle Feststoffe werden gleichmäßig dispergiert, ohne dass die Vernetzung startet.
• Die Schmelzetemperatur am Austritt bleibt bei höchstens etwa 140 °C und die Verweilzeit kurz, weil reaktive Härter sonst vorvernetzen und das Extrudat unbrauchbar wird.

**Aufgabe 2 c)** 3 Punkte · L-91

• Bei der Koronaaufladung liegt die Pistole auf 50 bis 100 kV Gleichspannung; an der Nadelspitze ionisiert das Feld die Luft. Die Pulverteilchen nehmen die Ionen auf, laden sich negativ auf und folgen den Feldlinien zum geerdeten Werkstück.
• Nachteil der Korona ist der Faraday-Käfig-Effekt: In Hohlräumen und Ecken dringen die Feldlinien nicht ein, diese Stellen werden schlecht beschichtet; bei zu dickem Film oder zu hoher Spannung kommt es zur Rückionisation mit kraterartigen Defekten.
• Bei der Triboaufladung reibt das Pulver ohne Hochspannung an Kunststoffrohren wie PTFE und lädt sich positiv auf; es gibt kein externes Feld und damit keinen Faraday-Käfig-Effekt, doch die Ladung ist schwerer zu kontrollieren und empfindlich gegenüber Formulierung, Additivierung und Luftfeuchte.

**Aufgabe 3 a)** 4 Punkte · L-95, L-90, L-98

• Ursache im Vernetzungssystem: Hydroxyalkylamid reagiert mit den Carboxylgruppen in einer Kondensation und spaltet dabei Wasser ab; kann das Reaktionswasser bei zu hoher Schichtdicke nicht entweichen, entstehen Poren.
• Zweite Ursache: ein hoher Einbrennverlust, also ein hoher Anteil flüchtiger Bestandteile oder Abspaltprodukte im Pulver, erhöht das Risiko von Pinholes.
• Maßnahmen: dünner applizieren und gut entlüften sowie ein Entgasungsadditiv wie Benzoin einsetzen, das beim Aufschmelzen das Entweichen eingeschlossener Luft, Feuchtigkeit und flüchtiger Abspaltprodukte unterstützt.
• Erkannt, dass ein TGIC-vernetztes System per Addition ohne Abspaltprodukt härtet und deshalb dickere, störungsfreie Filme erlaubt, dafür aber die Einstufung des TGIC als erbgutverändernd zu berücksichtigen ist.

**Aufgabe 3 b)** 3 Punkte · L-98

• Auf einem elektrisch beheizten Metallblock mit Mulde, im Regelfall bei 180 °C, werden (0,25 ± 0,01) ml Pulver aufgegeben und mit einem Rührer geringer Wärmekapazität gleichmäßig gerührt.
• Die Messung endet, wenn beim Hochheben des Rührers die Fäden abreißen und sich nicht mehr ziehen lassen; das kennzeichnet den Beginn der Vernetzung.
• Eine kurze Gelzeit unter 90 s zeigt ein reaktives, schnell vernetzendes System mit kürzerer Einbrennzeit an, eine lange Gelzeit über 150 s ein träges System mit gutem Verlauf, bei dem Ofen und Einbrennzeit anzupassen sind.

**Aufgabe 3 c)** 3 Punkte · L-90, L-97

• Gefahr: Pulverlackstäube sind einatembar und können mit Luft eine explosionsfähige Staub-Luft-Atmosphäre bilden.
• Technische Maßnahme: Absaugung des Pulvers, Erdung der Anlagenteile gegen elektrostatische Aufladung und konsequentes Fernhalten von Zündquellen.
• Schutzwirkung: Die Staubkonzentration in der Atemluft und im Kabinenraum bleibt gering, Zündquellen und Aufladungen werden vermieden; zusätzlich wird das Overspray-Pulver zurückgewonnen und im Kreislauf geführt.

## Wahlqualifikation 10 — Elektrotauchlacke

**Aufgabe 1 a)** 4 Punkte · L-88, L-33

• Ein Epoxidharz, zum Beispiel auf Bisphenol-A-Basis, wird mit einem Amin umgesetzt; die Epoxidgruppe öffnet sich und das Amin addiert sich an.
• Dabei entstehen im selben Molekülgerüst sekundäre OH-Gruppen und tertiäre Amingruppen.
• Mit Säure, zum Beispiel Essigsäure, werden die Amingruppen protoniert (R3N + H+ ergibt R3NH+); dadurch wird das Bindemittel kationisch und wasserdispergierbar.
• Erkannt, dass die OH-Gruppen aus der Epoxidöffnung beim Einbrennen mit dem verkappten Polyisocyanat-Härter vernetzen.

**Aufgabe 1 b)** 3 Punkte · L-88, L-86

• Das Bindemittel ist kationisch, also positiv geladen; positive Teilchen wandern im elektrischen Feld zur negativen Elektrode, deshalb muss das Werkstück die Kathode sein.
• Am Werkstück wird Wasser reduziert: 2 H2O + 2 e- ergibt H2 und 2 OH-.
• Die Hydroxidionen deprotonieren die Amingruppen (R3NH+ + OH- ergibt R3N + H2O); das neutrale Bindemittel ist wasserunlöslich und koaguliert als Film.
• Erkannt, dass der entstehende Wasserstoff als Gas aus dem Bad entweicht.

**Aufgabe 1 c)** 3 Punkte · L-86, L-87, L-88

• Als Kathode wird das Werkstück während der Abscheidung nicht anodisch angegriffen, es findet kein Metallabtrag statt; beim anodisch geschalteten Werkstück tritt dagegen ein leichter anodischer Angriff auf.
• Das Epoxid-Isocyanat-Netzwerk des KTL ergibt eine dichtere, barrierestärkere Schicht als das carboxylgruppenhaltige ATL-Netzwerk.
• Im ATL-Film bleiben Carboxylgruppen zurück; sie sind hydrophil und können Wasser ins Netzwerk ziehen, was den Korrosionsschutz schwächt.
• Erkannt, dass beim Einbrennen ein Teil der COOH-Gruppen mit dem Vernetzer reagiert und eingebunden wird, der Effekt also nur teilweise, nicht vollständig aufgehoben wird.

**Aufgabe 2 a)** 4 Punkte · L-150

• Formel: MEQ = V mal 1000 geteilt durch (m Lack mal nfA), mit V in ml, m Lack in g und nfA in Prozent.
• Einsetzen: MEQ = 6,0 mal 1000 geteilt durch (10,0 mal 20,0) = 6000 geteilt durch 200.
• Ergebnis: MEQ = 30 Milliäquivalente je 100 g Festkörper.
• Erkannt, dass der MEQ-Wert die eingesetzte Menge Neutralisationsmittel mengenbezogen erfasst und deshalb für den Chargenvergleich reproduzierbarer ist als der pH-Wert allein.

**Aufgabe 2 b)** 3 Punkte · L-89

• Die Ultrafiltration ist eine Membranfiltration mit Poren von etwa 1 bis 100 nm.
• Das Permeat enthält Wasser, Salze und Neutralisationsmittel, also kleine Moleküle ohne Lackfunktion.
• Im Retentat bleiben Bindemittelmoleküle und Pigmentteilchen zurück, also alle hochmolekularen Lackbestandteile.
• Erkannt, dass das Permeat zum Spülen der Werkstücke dient, dadurch kein Frischwasser nötig ist und der pigmenthaltige Spülrücklauf ins Bad zurückgeführt wird.

**Aufgabe 2 c)** 3 Punkte · L-86, L-89

• Die abgeschiedene Schicht wächst so lange, bis sie ausreichend isolierend ist und den Stromfluss stoppt; dadurch begrenzt sich die Schichtdicke von selbst.
• Eine zu hohe Spannung kann zu porösen, gasblasenreichen Filmen führen.
• Eine zu niedrige Spannung liefert eine zu dünne Schicht.
• Erkannt, dass neben der Spannung auch Badtemperatur und Verweilzeit Schichtdicke und Filmqualität bestimmen und deshalb genau kontrolliert werden müssen.

**Aufgabe 3 a)** 4 Punkte · L-150, L-89

• Die Leitfähigkeit in Mikrosiemens je Zentimeter ist ein Maß für die gelösten Ionen; ein Anstieg kann auf erhöhten Ionengehalt, Neutralisationsmittel oder Verunreinigungen hinweisen und ist systemspezifisch zu bewerten.
• Abweichungen in Konzentration, Temperatur oder Verunreinigungen zeigen sich unmittelbar als Fehlstellen oder ungleichmäßige Beschichtung.
• Maßnahme: Bindemittel und Pigmentpaste laufend nachdosieren, damit Festkörper und Pigmentierungshöhe konstant bleiben, und die Ultrafiltration kontinuierlich mitlaufen lassen, um niedermolekulare Störstoffe abzutrennen.
• Erkannt, dass regelmäßige Analysen und konstant geführte Bad-Parameter die Voraussetzung für gleichbleibende Schichtdicken sind und Nacharbeit vermeiden.

**Aufgabe 3 b)** 3 Punkte · L-33, L-172

• Gefahr: Beim Entkappen werden das Blockierungsmittel, etwa Caprolactam, und reaktive Isocyanatgruppen frei und gelangen in die Ofenabluft.
• Technische Maßnahme: Die Ofenabluft wird abgesaugt.
• Schutzwirkung: Die freigesetzten Stoffe werden an der Entstehungsstelle erfasst, die Belastung der Atemluft am Arbeitsplatz sinkt.
• Erkannt, dass technische Maßnahmen wie Absaugung und geschlossene Systeme der persönlichen Schutzausrüstung in der Rangfolge der Schutzmaßnahmen vorgehen.

**Aufgabe 3 c)** 3 Punkte · L-86, L-89

• Elektrotauchlacke sind wässrig und damit emissionsarm; sie liefern zudem eine sehr gleichmäßige Schichtdicke, ohne dass Overspray entsteht.
• Das elektrische Feld erreicht auch abgeschattete Flächen, Hohlräume und Kanten, weil es dorthin folgt, wo noch kein isolierender Film liegt; Spritzverfahren erreichen dies nicht vergleichbar zuverlässig.
• Der am Werkstück anhaftende Lack wird mit Permeat abgespült und über den Spülkreislauf ins Bad zurückgeführt; die Materialeffizienz liegt nahe 100 Prozent.
• Erkannt, dass nur der tatsächlich abgeschiedene Film das System verlässt, wodurch Kosten und Materialverlust deutlich sinken.

## Wahlqualifikation 11 — Druckfarben

**Aufgabe 1 a)** 4 Punkte · L-140

• Farbmittel: erzeugen Farbe, Transparenz und Deckvermögen; Beispiele sind organische und anorganische Pigmente, bei bestimmten Inkjet-Systemen auch Farbstoffe.
• Bindemittel beziehungsweise Vehicle: benetzen und transportieren das Pigment und binden es nach der Verfestigung im Film; Beispiele sind Harze, Öle und Firnisse sowie Polymerbindemittel.
• Wasser, Lösemittel oder Reaktivverdünner: dienen der Verarbeitung und der Einstellung des Fließverhaltens; Beispiele sind Wasser, Alkohole, Ester, Glycolether oder Acrylat-Monomere.
• Additive: verbessern gezielt einzelne Eigenschaften; Beispiele sind Dispergiermittel, Entschäumer, Wachse, Netzmittel und Sikkative. Erkannt, dass nicht jedes System alle Gruppen in gleicher Form enthält.

**Aufgabe 1 b)** 3 Punkte · L-140, L-144

• Druckfarben werden in sehr dünnen Schichten verarbeitet, im Offset zum Beispiel 1 bis 3 Mikrometer, während Flüssiglacke meist mit 30 bis 200 Mikrometer Nassschichtdicke aufgetragen werden.
• Bei Schichtdicken unter etwa 5 Mikrometer wird eine mangelhafte Dispersion als Farbtonabweichung oder Weißschleier sichtbar, die in dickerer Schicht noch tolerierbar wäre.
• Eine Farbe mit zu geringer Farbstärke kann auf 1 bis 3 Mikrometer kein ausreichendes Druckbild liefern.
• Erkannt, dass kleine Primärpartikel allein keine agglomeratfreie Dispersion garantieren und die Kontrolle deshalb über Grindometer und Partikelgrößenmessung erfolgt.

**Aufgabe 1 c)** 3 Punkte · L-147, L-143

• UV-Farben enthalten reaktive Oligomere und Harze, Reaktivverdünner in Form von Acrylat-Monomeren, Pigmente, Additive und einen Photoinitiator.
• UV-Strahlung im Bereich 200 bis 400 nm aktiviert den Photoinitiator; es entstehen reaktive Radikale oder Kationen, die die Polymerisation und Vernetzung auslösen.
• Beim Elektronenstrahlverfahren bringen energiereiche Elektronen die Energie direkt ein; ein Photoinitiator ist nicht erforderlich, und die Strahlung dringt tiefer ein als UV-Strahlung.
• Erkannt, dass beide Systeme durch Polymerisation und nicht durch Verdunsten härten und deshalb praktisch lösemittelfrei sind.

**Aufgabe 2 a)** 4 Punkte · L-146, L-142

• Kinematische Viskosität: 4,57 mal 25 minus 452 geteilt durch 25 ergibt 114,25 minus 18,08 gleich 96,2 mm2/s.
• Dynamische Viskosität: 96,2 mm2/s mal 1,05 g/cm3 ergibt rund 101 mPa s.
• Der Wert liegt im typischen Bereich für Flexodruckfarben von 50 bis 300 mPa s.
• Erkannt, dass die Umrechnung nur ein Richtwert ist, dass strukturviskose Systeme ein Rotationsviskosimeter erfordern und dass Becher, Norm und Temperatur immer mit angegeben werden müssen.

**Aufgabe 2 b)** 3 Punkte · L-146

• Ursache: Mit fortschreitendem Lösemittel- beziehungsweise Wasserverlust durch Verdunstung steigt die Viskosität der Farbe.
• Folge: Die über Anilox- beziehungsweise Näpfchenvolumen dosierte Farbmenge und damit das Druckbild verändern sich.
• Folge: Die zähere Farbe entleert die Näpfchen schlechter und überträgt unvollständig; Verlauf und Benetzung auf dem Bedruckstoff verschlechtern sich, im Extremfall trocknet Farbe in Näpfchen oder Düsen ein.
• Maßnahme: Viskosität im Druckbetrieb laufend kontrollieren und nachstellen; bei wasserbasierten Systemen zusätzlich Luftfeuchte, Temperatur und Luftführung im Trockner beachten.

**Aufgabe 2 c)** 3 Punkte · L-142

• In einer keilförmigen Rille mit definierter Tiefe wird die Probe abgezogen; die Stelle, an der die ersten Körner oder Streifen erscheinen, ergibt den Feinheitswert.
• Der Wert beschreibt, ob noch größere Partikel oder Agglomerate vorhanden sind, und nicht die Größe der Primärpartikel.
• Grenze: Das Grindometer liefert nur die grobe Obergrenze der Partikelgröße und keine vollständige Verteilung; für schuppenförmige Pigmente ist die Methode nur eingeschränkt anwendbar.
• Erkannt, dass Laserbeugung für die Volumenverteilung, dynamische Lichtstreuung für sehr feine Partikel und Mikroskopie für Form und Struktur die Prüfung sinnvoll ergänzen.

**Aufgabe 3 a)** **4 Punkte · L-143, L-147, L-148**

• Es handelt sich um eine Unterhärtung in der Tiefe; die Oberfläche ist gehärtet, der Farbkörper darunter noch reaktiv und deshalb klebrig und abriebempfindlich.
• Ursache: Rußschwarz absorbiert UV-Strahlung stark, und die Strahlung wird auf dem Weg durch den Film nach Lambert-Beer abgeschwächt; im Siebdruck kommen mit 15 bis 100 Mikrometer sehr hohe Schichtdicken hinzu.
• Maßnahmen: Strahlungsdosis erhöhen, mehrere Durchgänge fahren oder den Auftrag in dünnere Lagen aufteilen; Photoinitiator auf Lichtquelle und Pigment abstimmen.
• Prüfung: MEK-Wischtest als Orientierung, aussagekräftiger sind Abrieb- und Beständigkeitstests. Erkannt, dass die Sauerstoffinhibierung dagegen die Oberfläche betrifft und hier nicht die Ursache ist.

**Aufgabe 3 b)** **3 Punkte · L-147, L-149, L-172**

• Gefahr: Ungehärtete reaktive Acrylate, also Monomere und Oligomere, können hautreizend und sensibilisierend wirken; UV-Strahler gefährden Augen und Haut.
• Technische Maßnahme: Geschlossene Arbeitsweise mit dem unvernetzten Material und Betrieb des UV-Strahlers nur in abgeschirmter, verriegelter Anlage; ergänzend organisatorisch nach Betriebsanweisung arbeiten und erst danach PSA einsetzen (UV-Schutzbrille, Schutzhandschuhe aus geeignetem Material).
• Schutzwirkung: Die Abschirmung hält die UV-Strahlung von Augen und Haut fern, die geschlossene Arbeitsweise verhindert Hautkontakt mit den sensibilisierenden Acrylaten; die PSA wirkt nur als letzte Rückfallebene.
• Erkannt, dass die Gefahr im unvernetzten Zustand steckt, mit fortschreitender Aushärtung die Exposition gegenüber reaktiven Bestandteilen sinkt — ob vom vollständig ausgehärteten Film noch eine relevante sensibilisierende Wirkung ausgeht, hängt vom konkreten System und möglichen Reststoffen ab —, und dass Sicherheitsdatenblatt und Betriebsanweisung maßgeblich sind.

**Aufgabe 3 c)** **3 Punkte · L-147, L-149**

• Risiko: Nicht umgesetzte Photoinitiatoren, deren Spaltprodukte und Restmonomere können aus dem Verpackungsaufbau in das Füllgut migrieren.
• NIAS sind nicht absichtlich zugesetzte Stoffe, also Reaktions-, Abbau- oder Verunreinigungsprodukte, die nicht als Rohstoff dosiert wurden, aber vorhanden sind.
• Abhilfen: Low-Migration-UV-Farben mit polymeren beziehungsweise hochmolekularen Photoinitiatoren, vollständige Durchhärtung, Barriereschichten oder der Einsatz von Elektronenstrahlhärtung ohne Photoinitiator.
• Erkannt, dass die Eignung für Lebensmittelkontakt eine Aussage über den gesamten Verpackungsaufbau ist und nicht über einen einzelnen Rohstoff; bei Rezepturänderungen genügt eine Farbtonprüfung nicht.

# Quellen & Normen

Register aller in den Lerntafeln zitierten Quellen. In Klammern die Lerntafeln, in denen die Quelle herangezogen wurde. Für die jeweils aktuelle rechtliche und normative Bewertung sind die gültigen amtlichen Fassungen und Originalnormen maßgeblich.

## Fachliteratur (15)


Brock, T.; Groteklaes, M.; Mischke, P.: Lehrbuch der Lacktechnologie. Hrsg. U. Zorll. Vincentz Verlag, Hannover 1998. ISBN 3-87870-547-6. (Aktuelle Auflage: Brock/Groteklaes/Mischke/Strehmel, 5. Aufl., ISBN 978-3-86630-619-6.) (L-01, L-02, L-03, L-04, L-05, L-06, L-07, L-08, L-09, L-10, L-11, L-14, L-15, L-16, L-17, L-18, L-19, L-20, L-21, L-22, L-23, L-24, L-25, L-26, L-27, L-28, L-29, L-30, L-31, L-32, L-33, L-34, L-35, L-36, L-37, L-38, L-39, L-40, L-41, L-42, L-43, L-45, L-46, L-47, L-48, L-53, L-57, L-58, L-59, L-60, L-61, L-62, L-63, L-64, L-69, L-70, L-71, L-72, L-73, L-74, L-75, L-76, L-77, L-78, L-79, L-80, L-81, L-82, L-83, L-84, L-85, L-86, L-87, L-88, L-89, L-90, L-91, L-92, L-93, L-94, L-95, L-96, L-98, L-99, L-100, L-101, L-102, L-103, L-104, L-105, L-106, L-107, L-108, L-109, L-110, L-111, L-112, L-113, L-114, L-115, L-116, L-117, L-118, L-119, L-120, L-122, L-123, L-124, L-125, L-126, L-127, L-128, L-129, L-130, L-131, L-132, L-133, L-134, L-135, L-136, L-137, L-140, L-141, L-142, L-143, L-144, L-145, L-146, L-147, L-148, L-149, L-150, L-151, L-152, L-153, L-154, L-155, L-156, L-157, L-158, L-159, L-160, L-161, L-162, L-163, L-164, L-165, L-166, L-167, L-168, L-169, L-170, L-171, L-172, L-173, L-174, L-175, L-176, L-177, L-178, L-179, L-180)

Müller, B.; Poth, U.: Lackformulierung und Lackrezeptur — Das Lehrbuch für Ausbildung und Praxis. Hrsg. U. Zorll. Vincentz Network, Hannover. ISBN 3-87870-170-5. (Aktuelle Auflage: 4. Aufl., ISBN 978-3-86630-616-5.) (L-01, L-02, L-03, L-12, L-13, L-16, L-17, L-18, L-19, L-20, L-21, L-22, L-23, L-24, L-25, L-26, L-27, L-28, L-29, L-30, L-31, L-32, L-33, L-34, L-35, L-36, L-37, L-38, L-39, L-40, L-41, L-44, L-46, L-47, L-48, L-49, L-50, L-51, L-52, L-53, L-54, L-55, L-56, L-57, L-58, L-59, L-65, L-66, L-67, L-68, L-71, L-72, L-73, L-74, L-75, L-76, L-77, L-78, L-79, L-80, L-81, L-82, L-83, L-84, L-85, L-86, L-87, L-88, L-89, L-90, L-91, L-92, L-93, L-94, L-95, L-96, L-101, L-104, L-108, L-111, L-112, L-113, L-114, L-115, L-116, L-117, L-118, L-122, L-123, L-124, L-126, L-127, L-168, L-169, L-178, L-180)

Ignatowitz, E.: Chemie für Schule und Beruf — Ein Lehr- und Lernbuch. 4. Auflage, Verlag Europa-Lehrmittel, Haan-Gruiten 1999. (L-39, L-42, L-162)

Heilen, W.; Herrwerth, S.: Silicone Resins and their Combinations. Vincentz Network, Hannover 2014 (European Coatings Library). ISBN 978-3-86630-828-2. (L-37, L-109)

BASF, Basonat HI 100 NG Technical Data Sheet (L-115)

BASF, Joncryl 500 Technical Data Sheet (Rev. 6, Juni 2024) (L-115)

Covestro, Desmodur N 3300 Produktdatenblatt (L-115)

Covestro, Uralac 7136 E-70 Produktdatenblatt (L-116)

Evonik Operations GmbH: Dynasylan SIVO 140 — Technisches Datenblatt und Starting-Point-Formulierung (öffentlich). (L-101)

Evonik, Technical Bulletin 54 (AEROSIL in UP-/Vinylesterharzen, Gelcoat-Startformulierung) (L-128)

Mezger, T. G.: Das Rheologie-Handbuch — Für Anwender von Rotations- und Oszillations-Rheometern. Vincentz Network, Hannover. (L-179)

Wacker Chemie AG, HDK® – Pyrogenic Silica, Product Overview und Coatings and Printing Inks (Broschüren) (L-46)

— Weitere herangezogene Fachliteratur —

Goldschmidt, A.; Streitberger, H.-J.: BASF Handbuch Lackiertechnik. Vincentz Verlag, Hannover.

Poth, U.: Autolacke formulieren — Chemie, Physik und Praxis. Vincentz Network, Hannover 2007. ISBN 978-3-87870-335-8.

Prieto, J.; Kiene, J.: Holzbeschichtung — Chemie und Praxis. Vincentz Network, Hannover 2007. ISBN 978-3-87870-749-3.


## Normen (106)

DIN EN ISO 2431 — Beschichtungsstoffe – Bestimmung der Auslaufzeit mit Auslaufbechern (L-10, L-142, L-146, L-149, L-168, L-178)

ISO 12644 — Graphic technology: Bestimmung rheologischer Eigenschaften pastöser Druckfarben mit dem Fallstab-Viskosimeter (L-140, L-141, L-142, L-144, L-145, L-149)

DIN EN ISO 1524 — Beschichtungsstoffe – Bestimmung der Mahlfeinheit (L-53, L-140, L-142, L-149, L-180)
DIN EN ISO 12944 — Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme (L-57, L-99, L-108)
DIN EN ISO 2409 — Beschichtungsstoffe – Gitterschnittprüfung (L-68, L-149, L-156)
DIN EN ISO 4628 — Beschichtungsstoffe – Beurteilung von Beschichtungsschäden (L-99, L-158, L-159)
DIN EN ISO 787-5 — Allgemeine Prüfverfahren für Pigmente und Füllstoffe, Teil 5: Bestimmung des Ölbedarfs (Ölzahl); Endpunkt ist die zusammenhängende, kittartige Paste (L-39, L-40, L-44)
DIN EN ISO 9227 — Korrosionsprüfungen in künstlichen Atmosphären – Salzsprühnebelprüfungen (L-57, L-99, L-159)
DIN EN ISO/CIE 11664 — Farbmetrik (Normlichtarten, Normalbeobachter, CIELAB) (L-162, L-163, L-164)
ISO 12944 (L-65, L-84, L-105)
DIN 53170 — Lösemittel für Beschichtungsstoffe – Bestimmung der Verdunstungszahl (L-02, L-151)
DIN EN 13300 — Wasserhaltige Beschichtungsstoffe für Wände und Decken im Innenbereich – Einteilung (L-55, L-80)
DIN EN ISO 1519 (L-102, L-156)
DIN EN ISO 1520 (L-102, L-156)
DIN EN ISO 18451-1 — Pigmente, Farbstoffe und Füllstoffe – Begriffe – Teil 1: Allgemeine Begriffe (L-40, L-53)
DIN EN ISO 2808 — Beschichtungsstoffe – Bestimmung der Schichtdicke (L-66, L-68)
DIN EN ISO 2813 — Beschichtungsstoffe – Bestimmung des Glanzwerts (20°/60°/85°) (L-80, L-155)
DIN EN ISO 3219 (Reihe) — Rheologie: Teil 1 Begriffe und Formelzeichen, Teil 2 Allgemeine Grundlagen der Rotations- und Oszillationsrheometrie (beide 2021); ersetzt die zurückgezogene DIN EN ISO 3219:1994 „Kunststoffe – Polymere/Harze in flüssigem, emulgiertem oder dispergiertem Zustand“ (L-178, L-179)
DIN EN ISO 3251 (L-01, L-168)
DIN EN ISO 4618 — Beschichtungsstoffe: Begriffe (L-01, L-39)
DIN EN ISO 6270 — Beschichtungsstoffe – Beständigkeit gegen Feuchtigkeit (Kondenswasserklima) (L-99, L-159)
DIN EN ISO 8130-6 (L-98, L-128)
ISO 3251 (L-151, L-167)
ISO 9117-1 (L-153, L-167)
ISO/CIE 11664-4 (L-162, L-163)
ANSI/ESD S541 (L-139)
ASTM D1200 (L-151)
ASTM E313 (L-166)
DIN 4102-2 (L-138)
DIN 5033-1 (L-164)
DIN 51562 — Viskosimetrie: Messung der kinematischen Viskosität mit dem Ubbelohde-Kapillarviskosimeter (L-178)
DIN 53015 — Viskosimetrie: Messung der Viskosität mit dem Kugelfallviskosimeter nach Höppler (L-178)
DIN 53019 — Viskosimetrie: Messung von Viskositäten und Fließkurven mit Rotationsviskosimetern (L-178)
DIN 55945 (L-77)
DIN 6167 (L-166)
DIN 68861 (L-124)
DIN EN 1062 — Beschichtungsstoffe für mineralische Untergründe und Beton im Außenbereich (L-81)
DIN EN 13381-8 — Beitrag zum Feuerwiderstand tragender Bauteile – Teil 8: Reaktive Ummantelung von Stahlbauteilen (L-138)
DIN EN 13501-2 — Klassifizierung zum Brandverhalten – Teil 2: mit Feuerwiderstandsprüfungen (L-138)
DIN EN 13892-3 — Prüfverfahren für Estrichmörtel und Estrichmassen – Teil 3: Bestimmung des Verschleißwiderstandes nach Böhme (L-108)
DIN EN 14522 — Bestimmung der Zündtemperatur von Gasen und Dämpfen (L-170)
DIN EN 1542 (L-108)

DIN EN 16165 (L-108)
DIN EN 16516 — Bauprodukte: Bewertung der Freisetzung von gefährlichen Stoffen — Bestimmung von Emissionen in die Innenraumluft (Referenzverfahren der ChemVerbotsV für Formaldehyd, Grenzwert 0,1 ppm) (L-122)
DIN EN 1839 — Bestimmung der Explosionsgrenzen und der Sauerstoffgrenzkonzentration von Gasen und Dämpfen (L-170)
DIN EN 23270 (ISO 3270) (L-157)
DIN EN 61340-4-5 (L-139)
DIN EN 71-3 (L-42)
DIN EN IEC 61340-5-1 (L-139)
DIN EN ISO 11997 — Beschichtungsstoffe – Beständigkeit bei zyklischen Korrosionsbedingungen (L-159)
DIN EN ISO 11998 (L-55)
DIN EN ISO 12460-3 — Holzwerkstoffe – Formaldehydabgabe – Teil 3: Gasanalyse-Verfahren (L-122)
DIN EN ISO 12944-6 (L-159)
DIN EN ISO 13736 — Bestimmung des Flammpunktes im geschlossenen Tiegel nach Abel (L-170)
DIN EN ISO 14040 — Umweltmanagement: Ökobilanz — Grundsätze und Rahmenbedingungen (L-177)
DIN EN ISO 14044 — Umweltmanagement: Ökobilanz — Anforderungen und Anleitungen (L-177)
DIN EN ISO 14577 (L-157)
DIN EN ISO 15091 (L-67)
DIN EN ISO 1522 — Beschichtungsstoffe – Pendeldämpfungsprüfung (Pendelhärte) (L-157)
DIN EN ISO 1628-2 — Kunststoffe: Bestimmung der Viskosität von Polymeren in verdünnter Lösung durch ein Kapillarviskosimeter, Teil 2: Poly(vinylchlorid)-Harze (K-Wert) (L-05)
DIN EN ISO 16474 — Beschichtungsstoffe – Künstliche Bewitterung und Bestrahlung (L-158)
DIN EN ISO 182-1 (L-106)
DIN EN ISO 182-2 (L-106)
DIN EN ISO 182-3 (L-106)
DIN EN ISO 22479 — Korrosion von Metallen und Legierungen – Schwefeldioxid-Prüfung in feuchter Atmosphäre (Verfahren mit festem Gasvolumen); Nachfolgenorm der zurückgezogenen DIN 50018 (Kesternich-Prüfung) (L-159)
DIN EN ISO 2535 (L-128)
DIN EN ISO 2719 — Bestimmung des Flammpunktes im geschlossenen Tiegel nach Pensky-Martens (L-170)
DIN EN ISO 2810 — Beschichtungsstoffe – Freibewitterung (L-158)
DIN EN ISO 2815 (L-157)
DIN EN ISO 3233 (L-168)
DIN EN ISO 3668 — Beschichtungsstoffe – Visueller Vergleich der Farbe von Beschichtungen (L-163)
DIN EN ISO 4624 (L-156)
DIN EN ISO 6721-1 — Kunststoffe: Bestimmung dynamisch-mechanischer Eigenschaften, Teil 1 Allgemeine Grundlagen (Speicher- und Verlustmodul) (L-179)
DIN EN ISO 7783 — Beschichtungsstoffe – Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit (L-81)
DIN EN ISO 8130 (Reihe) — Beschichtungspulver: Prüfverfahren (u. a. Teil 6: Bestimmung der Gelierzeit bei vorgegebener Temperatur) (L-97)
DIN EN ISO 8501 (Reihe) — Vorbereitung von Stahloberflächen vor dem Auftragen von Beschichtungsstoffen: Visuelle Beurteilung der Oberflächenreinheit; Teil 1: Rostgrade und Oberflächenvorbereitungsgrade (L-64)
DIN EN ISO 8503 (L-64)
DIN EN ISO 9117 — Beschichtungsstoffe – Trocknungsprüfungen (L-69)
DIN EN ISO 9117-5 — Trocknungsprüfungen – Teil 5: modifiziertes Bandow-Wolff-Verfahren (L-153)
DIN EN ISO 9223 (L-99)
DIN ISO 13320 — Partikelmessung: Partikelgrößenanalyse durch Laserbeugung (L-180)
DIN ISO 22412 — Partikelmessung: Partikelgrößenanalyse durch dynamische Lichtstreuung (DLS/PCS) (L-180)
DIN ISO 5725 (L-167)
DIN ISO 8296 (früher DIN 53364) (L-126)
DIN ISO 9277 (L-45)

ISO 12944-5 (L-101)
ISO 1514 (L-66)
ISO 1519 (L-110)
ISO 1520 (L-110)
ISO 1522 (L-167)
ISO 1524 (L-167)
ISO 16474 (L-167)
ISO 22196 — Messung der antibakteriellen Aktivität auf Kunststoffen und anderen nicht-porösen Oberflächen (L-129)
ISO 2409 (L-167)
ISO 2431 (L-151)
ISO 27447 — Prüfverfahren für die antibakterielle Wirkung photokatalytischer Halbleitermaterialien unter UV-Bestrahlung (L-129)
ISO 2808 (L-167)
ISO 2813 (L-167)
ISO 4624 (L-167)
ISO 554 (L-153)
ISO 6272 (L-110)
ISO 6504 (L-167)
ISO 9117-3 (L-153)
ISO 9117-4 (L-153)
ISO 9227 (L-167)
ISO/CIE 11664-6 (L-163)

## Rechtsvorschriften und Regelwerke (34)

ChemVOCFarbV — Lösemittelhaltige Farben- und Lack-Verordnung: Verordnung zur Begrenzung der Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen durch Beschränkung des Inverkehrbringens lösemittelhaltiger Farben und Lacke (L-116, L-168, L-171, L-176)
Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 (CLP) — Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen (L-14, L-18, L-170, L-171)
31. BImSchV — Verordnung zur Begrenzung der Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen bei der Verwendung organischer Lösemittel in bestimmten Anlagen („Lösemittelverordnung“) (L-168, L-171, L-176)
Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) — Verordnung zum Schutz vor Gefahrstoffen (L-171, L-172, L-173)
TRGS 900 — Arbeitsplatzgrenzwerte (L-83, L-172, L-173)
ADR — Europäisches Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (L-170, L-172)
EU-Richtlinie 2004/42/EG — Begrenzung von VOC-Emissionen durch organische Lösemittel in bestimmten Farben und Lacken (L-168, L-176)
TA Luft — Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft) (L-168, L-176)
TRGS 430 — Isocyanate: Gefährdungsbeurteilung und Schutzmaßnahmen (Ausgabe Juli 2024, zuletzt geändert Dezember 2025) (L-83, L-173)
TRGS 727 — Vermeidung von Zündgefahren infolge elektrostatischer Aufladungen (L-139, L-172)
12. BImSchV — Störfall-Verordnung (L-176)
4. BImSchV — Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen (L-176)
ASR A1.5 — Technische Regeln für Arbeitsstätten: Fußböden (Fassung März 2022); Anhang 2 ordnet die Bewertungsgruppen der Rutschhemmung den Arbeitsbereichen zu und hat die zurückgezogene DGUV Regel 108-003 (früher BGR 181) abgelöst (L-108)
AVV — Abfallverzeichnis-Verordnung (Abfallschlüssel/AVV-Nummern) (L-175)
AwSV — Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (L-174)
BImSchG — Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (L-176)
Berichtigung zur Delegierten Verordnung (EU) 2023/707 (Corrigendum 32023R0707R(01), veröffentlicht am 18.11.2024) — Korrektur der Übergangsregelungen für Gemische (L-171)
BetrSichV — Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Verwendung von Arbeitsmitteln (L-172)

Delegierte Verordnung (EU) 2023/707 der Kommission — Änderung der CLP-Verordnung: neue Gefahrenklassen ED, PBT/vPvB, PMT/vPvM (L-171)
EuPIA Exclusion Policy / Charter (Fassung 2026) — Ausschlussliste für Rohstoffe in Druckfarben (L-149)
EuPIA Good Manufacturing Practice (GMP), 5. Fassung 2025 — Gute Herstellungspraxis für Druckfarben für Lebensmittelverpackungen (L-149)
EuPIA — European Printing Ink Association: Leitlinien und Merkblätter für Druckfarben (L-140)
KrWG — Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (L-175)
TRGS 201 — Einstufung und Kennzeichnung bei Tätigkeiten mit Gefahrstoffen (L-171)
TRGS 510 — Lagerung von Gefahrstoffen in ortsbeweglichen Behältern (L-172)
TRGS 559 — Quarzhaltiger Staub (L-109)
TRGS 720 — Gefährliche explosionsfähige Gemische: Allgemeines (L-172)
TRGS 906 — Verzeichnis krebserzeugender Tätigkeiten oder Verfahren nach § 3 Abs. 2 Nr. 3 GefStoffV (L-109)
VdL-RL 08 (L-168)
Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (REACH), Anhang II — Anforderungen an das Sicherheitsdatenblatt (L-171)
Verordnung (EU) Nr. 528/2012 über die Bereitstellung auf dem Markt und die Verwendung von Biozidprodukten (Zulassung, Artikel-95-Liste, Kennzeichnung behandelter Waren nach Artikel 58) (L-129)
VerpackG — Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die hochwertige Verwertung von Verpackungen (L-175)
WHG — Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (L-174)
ZTV-ING, Teil 4 Abschnitt 3 — Korrosionsschutz von Stahlbauten (Ingenieurbauten) (L-99)

## Register und weitere Regelwerke (2)

Ausbildungsrahmenplan Lacklaborant — Anlage 3 der Verordnung über die Berufsausbildung im Laborbereich Chemie, Biologie und Lack (ChemBioLackAusbV) vom 25. Juni 2009 (BGBl. I S. 1600), zuletzt geändert durch Verordnung vom 10. Februar 2022 (BGBl. I S. 174); Abschlussprüfung Lacklaborant: §§ 21 und 22 (L-61, L-62, L-63)
RAL — öffentliches Farbregister (z. B. RAL Classic) (L-165)

# Über den Autor

Michael Dreyer wurde 1961 in Duisburg geboren. Von 1977 bis 1980 absolvierte er bei der GEHOLIT+WIEMER Lack- und Kunststoff-Chemie GmbH an der Niederlassung Duisburg eine Ausbildung zum Lacklaboranten und arbeitete dort anschließend von 1980 bis 1984 als Lacklaborant im Bereich Industrielacke und schwerer Korrosionsschutz. Parallel erwarb er 1982 bis 1984 an der Fachoberschule für Technik und Gestaltung in Krefeld die Fachhochschulreife. Von 1984 bis 1988 studierte er Chemieingenieurwesen an der Fachhochschule Niederrhein (Fachbereich Chemie, Studienrichtung technische Chemie) mit dem Studienschwerpunkt Lack- und Anstrichtechnik. Als Diplomingenieur (FH) kehrte er 1988 zu GEHOLIT+WIEMER zurück und war dort bis 1998 in den Segmenten Industrielack und schwerer Korrosionsschutz tätig. Von 1998 bis 2024 arbeitete er bei der Wacker Chemie AG in Burghausen als chemischer Sachbearbeiter für pyrogene Kieselsäure in Beschichtungsstoffen und Kompositen. Seit 2024 ist er im Ruhestand. Über seine Labor- und Entwicklungstätigkeit hinaus war Michael Dreyer als Ausbilder für Lacklaboranten tätig und gab sein Fachwissen an den Berufsnachwuchs weiter.

# Schlusswort

Als ich selbst zum Lacklaboranten ausgebildet wurde, gab es kein Werk, das mir die Lacktechnik so an die Hand gab, wie ich sie gebraucht hätte. Das Wissen war vorhanden — aber verstreut über Vorlesungen, Herstellerunterlagen, Normen und die Erfahrung der Kollegen. Man musste es sich Stück für Stück selbst zusammentragen. Dieses Kompendium ist das Werk, das ich mir damals gewünscht hätte.

Es richtet sich zuerst an die, die heute anfangen: an Auszubildende und an alle, die sich auf die Prüfung zum Lacklaboranten vorbereiten. Ihnen soll es die Lacktechnik nicht als Sammlung von Einzelheiten zeigen, sondern als Zusammenhang — vom Bindemittel über Pigment und Additiv bis zu Prüfung, Recht und Sicherheit. Zugleich soll es dem Praktiker ein kompaktes Nachschlagewerk sein, das den aktuellen Wissensstand bündelt.

Ein Kompendium ist nie fertig. Die Lacktechnik verändert sich — weg vom Lösemittel, weg vom Chromat, hin zu wässrigen, festkörperreichen und funktionellen Systemen, unter immer neuen Regeln. Dieses Werk soll mit ihr Schritt halten und über App und Website denselben Inhalt auf unterschiedlichen Wegen erreichbar machen.

Fast fünf Jahrzehnte habe ich in diesem Fach gearbeitet und Lacklaboranten ausgebildet. Was ich dabei gelernt habe, gebe ich hier weiter — in der Hoffnung, dass es denen, die nach mir kommen, den Einstieg leichter macht, als er für mich war. Am Ende zählt nicht, was auf dem Papier steht, sondern was daraus im Kopf und in der Hand wird. Der Rest ist Neugier und Übung.

### Rückmeldungen willkommen

Dieses Kompendium lebt vom Weiterdenken. Über Anregungen, Hinweise und Kritik freue ich mich ausdrücklich — auch und gerade dort, wo etwas fehlt, zu knapp geraten oder verbesserungswürdig ist. Jeder sachliche Hinweis aus Ausbildung, Labor und Praxis hilft, das Werk genauer und nützlicher zu machen. Schreiben Sie mir gern an marionmichaeldreyer@gmail.com.