

FARBEUNDLACK // BIBLIOTHEK



# Filmbildung

PETER MISCHKE // BERND STREHMEL  
2., ÜBERARBEITETE AUFLAGE



Peter Mischke/Bernd Strehmel

# Filmbildung

in modernen Lacksystemen

2., überarbeitete Auflage

Umschlagsbild: Vege/Adobe Stock

Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek  
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Peter Mischke und Bernd Strehmel  
Filmbildung in modernen Lacksystemen,  
2., vollständig überarbeitete Auflage  
Hannover: Vincentz Network, 2018  
Farbe und Lack Bibliothek  
ISBN 978-3-86630-595-3

© 2018 Vincentz Network GmbH & Co. KG, Hannover  
Vincentz Network, Postfach 6247, 30062 Hannover, Germany

Das Werk einschließlich seiner Einzelbeiträge aus Abbildungen ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwendung außerhalb der engen Grenzen des Urhebergesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für die Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Warenzeichen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Namen ohne weiteres von jedermann benutzt werden dürfen. Vielmehr handelt es sich häufig um geschützte, eingetragene Warenzeichen.

Das Verlagsverzeichnis schickt Ihnen gern:  
Vincentz Network, Plathnerstr. 4c, 30175 Hannover, Germany  
Tel. +49 511 9910-033, Fax +49 511 9910-029  
E-mail: [buecher@farbeundlack.de](mailto:buecher@farbeundlack.de), [www.farbeundlack.de](http://www.farbeundlack.de)

Satz: Vincentz Network, Plathnerstr. 4c, 30175 Hannover, Germany  
Druck: BWH GmbH, Hannover, Germany

**FARBEUNDLACK // BIBLIOTHEK**

**Peter Mischke/Bernd Strehmel**

# **Filmbildung**

**in modernen Lacksystemen**

**2., überarbeitete Auflage**

## Auf ein Wort

Um es gleich vorweg zu sagen: Mit Filmbildung ist hier nicht „Bildung durch Filme“ gemeint, wie man nach Eingabe dieses Begriffs in eine gut bekannte Internet-Suchmaschine meinen könnte. Es geht hier natürlich um die Bildung von Filmen aus Beschichtungsstoffen, vor allem bei Lacken. Eine Studentin fragte mich bei der Abfassung der ersten Auflage:



„Kann man denn darüber ein ganzes Buch schreiben“? Diese Frage traf genau ins Schwarze. Denn in der Tat findet man in gängigen Lacklehrbüchern unter der Überschrift bzw. dem Stichwort Filmbildung meistens nur ein paar Seiten. Doch bei genauerem Hinsehen fällt auf, dass die Filmbildung in der Fachliteratur und in Fachgesprächen über Beschichtungstechnologie natürlich fast ständig behandelt oder wenigstens tangiert wird, ohne dass einem dies explizit bewusst (gemacht) wird. Und damit ist auch schon eine Problematik angesprochen, die der Behandlung dieses Themas innewohnt: Wie grenzt man den Stoff gegen die Gebiete Applikation, Chemie/Rezeptierung und Messtechnik bzw. gegen die übrige aktuelle Literatur über Lacke ab. Wie weit soll man neueste Spezialentwicklungen berücksichtigen. Und nicht zuletzt: Wo liegt der optimale Pfad zwischen praxisorientierter Anschaulichkeit und wissenschaftlicher Tiefe. Als Alleinautor der ersten Auflage bin ich mit der Intention an die Abfassung des Buches gegangen, die Grundprinzipien der Filmbildung in großer Breite und thematischer Ausgewogenheit darzustellen, ohne dabei zu sehr in andere Reviere einzudringen, zu theoretisch zu werden oder reine Spezialitäten anzuhäufen. Dabei habe ich meine eigenen Fachkenntnisse und didaktischen Erfahrungen aus der Hochschullehre ebenso eingebracht wie zahlreiche Informationen aus mir direkt zugänglichen Monographien und Zeitschriften wie „Farbe und Lack“.

Nach einer kurzen Klärung der wichtigsten beschichtungstechnologischen Grundbegriffe wird die Applikation als erster Schritt zu einer fertigen Beschichtung vorgestellt. Dann werden physikalische Aspekte der Trocknung behandelt. Breiten Raum nimmt der vor allem polymer- und physikochemisch orientierte Grundlagenteil in der Mitte des Buches ein. Dadurch soll auch der nicht akademisch-chemisch vorgebildete Leser in die Lage versetzt werden, die folgenden spezielleren Inhalte des Buches zu verstehen, ohne dazu erst ein umfangreiches Lehrbuchstudium absolvieren zu müssen. In der zweiten Hälfte des Buches werden die grundlegenden Filmbildeprinzipien bzw. Beschichtungssysteme behandelt. Über die Untersuchungsmethoden zur Filmbildung wird im Anhang 4 ein kurzer Überblick geliefert.

Doch wer sollte dieses Buch nun warum lesen? Für wen ist es geschrieben?

Da wären u.a. zu nennen die

- Studierenden in beschichtungstechnologischen Fach- und Hochschulstudiengängen, die ihre Kenntnisse zwischen reiner Technik einerseits und reiner Lackchemie andererseits vertiefen und abrunden wollen;
- fachlichen Ein- und Umsteiger, die ein gut durchlesbares, nicht mit Einzelfakten und/oder Spezialisierungen überfrachtetes Lehrbuch suchen;
- Fachleute aus der betrieblichen Beschichtungspraxis, die über ihre Praxiserfahrung hinaus die Frage „Warum...“ stellen, um die vielen beobachteten Einzeleffekte besser einordnen und bei Problemen gezielter eingreifen zu können.

---

Schließlich kann das Buch für besonders interessierte Laboranten und Techniker interessant sein, wenn sie ein tieferes Verständnis der Filmbildemechanismen erlangen wollen.

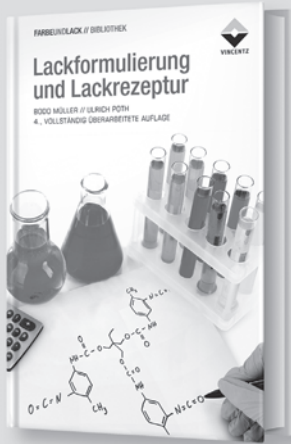
Für die nun vorliegende zweite Auflage wurden einige Korrekturen, im Wesentlichen aber Ergänzungen, Aktualisierungen und kleinere Textverbesserungen vorgenommen. Besonders zu erwähnen ist die hinzugekommene Mitwirkung von Prof. Dr. Bernd Strehmel von der Hochschule Niederrhein als Coautor. Er hat insbesondere großen Wert auf die Integration neuer Technologien der photonischen Trocknung gelegt. Sie kann chemisch und physikalisch erfolgen. Interessant sind dabei in jedem Fall Betrachtungen zu LEDs und selbstverständlich die Lasertrocknung.

Wir hoffen, dass auch die zweite Auflage viel Freude und Erkenntnis beim Lesen bringt.

Willich und Krefeld, im Juli 2018

Peter Mischke und Bernd Strehmel

# Wir empfehlen auch folgende Bücher:



## Lackformulierung und Lackrezeptur

BODO MÜLLER UND  
ULRICH POTH

Die Entwicklung von Lacken ist ein kreativer Prozess – und erfordert gleichzeitig eine solide wissenschaftliche Basis. Genau diese Basis liefert das Buch „Lackformulierung und Lackrezeptur“ – mit allen wichtigen physikalischen und chemischen Grundlagen, um erfolgreich praxisingerechte Formulierungen zu entwickeln.

4., überarbeitete Auflage, 2017 // 324 Seiten // gebunden 169,- € // **Bestell-Nr.: 875** eBook: 875\_EBOOK



## BASF Handbuch Lackiertechnik

ARTUR GOLDSCHMIDT UND  
HANS-JOACHIM STREITBERGER

Das Standardwerk der industriellen Lackiertechnik kombiniert wichtiges Basiswissen von der Lackherstellung bis zum Lackierprozess. Neue Rohstoffe, Verfahren und Applikationstechniken werden umfassend beschrieben. Die Pflichtlektüre für die Lackbranche!

2., überarbeitete Auflage, 2014  
863 Seiten // gebunden // 179,- €  
**Bestell-Nr.: 682** // eBook: 682\_EBOOK



## Synthetische Bindemittel für Beschichtungssysteme

ULRICH POTH

Synthetische Bindemittel verständlich und praxisnah: Ulrich Poth zeigt in seinem neuen Buch die wesentlichen chemischen Grundlagen, Hauptanwendungsgebiete und Applikationstechniken auf. Die anschauliche Vermittlung von Struktur-Wirkungsbeziehungen sowie zahlreiche Formulierungshilfen machen das Werk zu einem unverzichtbaren Fachbuch für die Praxis.

2015 // 408 Seiten // gebunden // 159,- €  
**Bestell-Nr.: 597** // eBook: 597\_EBOOK



## Funktionelle Beschichtungen

VOLKMAR STENZEL UND NADINE REHFELD

Das Buch gibt einen tiefen Einblick in die Formulierung funktioneller Überzüge mit Fokus auf organisch-basierten Materialien. Auch hebt es die letzten Entwicklungen der verschiedenen Technologien und neuartigen Oberflächenfunktionen hervor, die Dekoration, Korrosionsschutz und Oberflächenschutz betreffen.

2013 // 202 Seiten // gebunden // 159,- €  
**Bestell-Nr.: 593** // eBook: 593\_EBOOK

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einführung.....</b>	<b>11</b>
1.1	Grundbegriffe .....	11
1.2	Allgemeine Zusammensetzung von Beschichtungsstoffen .....	13
1.3	Allgemeine Rezepturdaten.....	14
1.4	Grundlegende physikalische Eigenschaften.....	17
1.4.1	Dichte.....	17
1.4.2	Viskosität und Fließverhalten .....	17
1.4.3	Oberflächenspannung.....	19
1.5	Klassifizierung der Filmbildung.....	20
<b>2</b>	<b>Applikation .....</b>	<b>21</b>
2.1	Streichen, Rollen, Walzen, Gießen, Fluten .....	21
2.1.1	Streichen und Rollen.....	21
2.1.2	Walzen.....	21
2.1.3	Gießen .....	22
2.1.4	Fluten .....	22
2.2	Tauchlackieren (Tauchen) .....	23
2.2.1	Konventionelles Tauchlackieren.....	23
2.2.2	Elektrotauchlackieren.....	23
2.2.3	Autophorese.....	26
2.3	Spritzlackieren.....	26
2.3.1	Pneumatisches Spritzen (Druckluft-Spritzen).....	27
2.3.2	Hydraulisches Spritzen (Airless-Spritzen) .....	28
2.3.3	Heißspritzen.....	28
2.3.4	Spritzen mit überkritischem Kohlendioxid .....	29
2.4	Elektrostatisches Lackieren .....	30
2.4.1	Elektrostatisch unterstützte konventionelle Spritzverfahren .....	31
2.4.2	Elektrostatische Hochrotationsverfahren .....	31
2.4.3	Rein elektrostatische Verfahren.....	32
2.4.4	Besondere Effekte des elektrostatischen Lackierens.....	32
2.5	Sonstige Applikationsverfahren für flüssige und pastöse Materialien .....	33
2.6	Allgemeine Applikationsbedingungen .....	34
2.7	Pulverlack-Applikation .....	34
2.7.1	Pulverlacke.....	34
2.7.2	Elektrostatisches Pulversprühen.....	35
2.7.3	Pulversinter-Verfahren .....	37
<b>3</b>	<b>Untergrundbenetzung, Verlaufen, Ablaufen, Kantenflucht.....</b>	<b>39</b>
3.1	Untergrundbenetzung.....	39
3.2	Verlaufen.....	42
3.3	Ablaufen.....	46
3.4	Kantenflucht.....	47



<b>4</b>	<b>Physikalisch-technische Prinzipien der Lacktrocknung und -härtung .....</b>	<b>49</b>
4.1	Konvektionstrocknung .....	49
4.2	Infrarottrocknung .....	53
4.2.1	Physikalische Grundlagen .....	53
4.2.2	Technische Infrarotstrahler.....	54
4.2.3	Strahlungseintrag in das Lackierobjekt.....	55
4.2.4	Lasertrocknung.....	59
4.3	Chemische Trocknung.....	61
4.3.1	Allgemeines zur chemischen Trocknung mit photonischen Quellen .....	61
4.3.2	UV-Strahler .....	64
4.3.3	UV-Strahlungsintensität und -dosis .....	67
<b>5</b>	<b>Allgemeine Grundlagen zum Verständnis der Filmbildung .....</b>	<b>71</b>
5.1	Polymere .....	71
5.1.1	Grunddefinitionen.....	71
5.1.2	Homo- und Copolymere .....	73
5.1.3	Mittlere Molmasse.....	74
5.1.4	Polymergrundtypen.....	75
5.1.5	Molekülknäuel.....	75
5.1.6	Zwischenmolekulare Kräfte und Aggregatstrukturen .....	76
5.1.7	Polymernetzwerke .....	78
5.1.8	Glasübergang .....	80
5.2	Lösemittel und Polymerlösungen.....	83
5.2.1	Lösemittel .....	83
5.2.2	Polymerlösungen.....	86
5.3	Wässrig-disperse Systeme .....	92
5.3.1	Grundbegriffe und Einteilung .....	92
5.3.2	Echte und kolloidale Lösungen .....	93
5.3.3	Primärdispersionen.....	95
5.3.4	Sekundärdispersionen und Emulsionen.....	96
5.4	Diffusion.....	96
5.5	Grundprinzipien organisch-chemischer Reaktionen .....	98
5.5.1	Allgemeines .....	98
5.5.2	Grundsätzliches zum Ablauf organisch-chemischer Reaktionen .....	99
5.5.3	Chemische Kinetik .....	101
5.5.4	Polare Reaktionen .....	103
5.5.5	Radikalische Reaktionen .....	104
5.5.6	Pericyclische Reaktionen .....	105
<b>6</b>	<b>Physikalische Trocknung.....</b>	<b>107</b>
6.1	Physikalische Trocknung aus Lösungen.....	107
6.1.1	Lösemittelübergang Film-Umgebungsluft und Wärmebilanz.....	107
6.1.2	Zeitlicher Verlauf des Trocknungsprozesses.....	109
6.1.3	Lösemittelauswahl .....	113
6.1.4	Abdunstvorgänge bei wässrigen Systemen .....	114
6.1.5	Filmbildner für physikalisch trocknende Lacke.....	116
6.2	Physikalische Filmbildung aus Dispersionen .....	117

6.2.1	Wässrige Primärdispersionen .....	117
6.2.2	Wässrige Sekundärdispersionen .....	123
6.2.3	Emulsionen .....	124
6.2.4	Nichtwässrige disperse Systeme .....	126
<b>7</b>	<b>Oxidative Vernetzung (oxidative Trocknung).....</b>	<b>127</b>
7.1	Allgemeines und Bindemitteltypen.....	127
7.2	Mechanismen der oxidativen Vernetzung .....	130
7.2.1	Isolierte Doppelbindungen .....	130
7.2.2	Konjugierte Doppelbindungen .....	132
7.3	Sikkative.....	133
7.4	Hautverhinderung.....	135
7.5	Einflüsse auf die oxidative Trocknung .....	136
<b>8</b>	<b>Härtung von Nasslacken durch Stufenreaktionen.....</b>	<b>137</b>
8.1	Allgemeines .....	137
8.2	Polyaddition und Polykondensation .....	137
8.2.1	Formale Prinzipien der Molekülvergrößerung und Vernetzung.....	139
8.2.2	Physikalisch-chemische Grundprinzipien der Vernetzung.....	143
8.3	Wichtige Vernetzungsreaktionen (Auswahl) .....	147
8.4	Ausgewählte Vernetzungsreaktionen im Detail .....	153
8.4.1	Vernetzung durch Polyurethanbildung.....	153
8.4.2	Vernetzung von Epoxidharzen .....	159
8.4.3	Härtung von Harzpolyolen mit Formaldehyd-Kondensationsharzen.....	164
8.4.4	Vernetzung von Kieselsäureestern und Sol-Gel-Materialien .....	168
8.4.5	Allgemeines zu High-Solid-Lacken .....	169
<b>9</b>	<b>Filmbildung von Pulverlacken .....</b>	<b>171</b>
9.1	Allgemeines zu Pulverlacken und ihrer Verfilmung .....	171
9.2	Bindemittel und ihre Vernetzungsreaktionen.....	172
9.2.1	Hybridpulver.....	172
9.2.2	Epoxidpulver .....	173
9.2.3	Polyesterpulver .....	173
9.2.4	Acrylatpulver.....	175
9.2.5	Allgemeines zur Gelierung und Vernetzung .....	176
9.3	Chemisch-physikalische Aspekte der Filmbildung.....	176
9.3.1	Physikalische Grundprinzipien.....	176
9.3.2	Wirkung von Additiven, Mattierung.....	179
<b>10</b>	<b>Filmbildung durch Polymerisation .....</b>	<b>183</b>
10.1	Allgemeine Polymerisationsmechanismen.....	183
10.2	Strahlenthärtung .....	193
10.2.4	Wässrige Bindemittel.....	204
10.2.5	Dual Cure.....	205
10.3	Härtung ungesättigter Polyester.....	205

<b>11</b>	<b>Jenseits der Filmbildung: Selbstheilung .....</b>	<b>209</b>
11.1	Selbstheilung von oberflächlichen Kratzspuren.....	209
11.2	Strukturelle Selbstheilung.....	210
<b>Anhang 1:</b>	<b>Zur Orchard-Gleichung .....</b>	<b>212</b>
<b>Anhang 2:</b>	<b>Zur WLF-Gleichung .....</b>	<b>214</b>
<b>Anhang 3:</b>	<b>Zur Gelpunkt-Theorie von Flory und Stockmayer.....</b>	<b>216</b>
<b>Anhang 4:</b>	<b>Prüfmethoden zur Filmbildung.....</b>	<b>218</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>224</b>
	<b>Autoren .....</b>	<b>231</b>
	<b>Index .....</b>	<b>232</b>

# 1 Einführung

## 1.1 Grundbegriffe

Das Erzeugen fester, haftender, organisch-chemisch basierter Schichten bzw. Filme auf verschiedensten Untergrundmaterialien (Substraten) nennt man **Beschichten**. (Anorganische Schichten nennt man Überzüge; sie sind nicht Gegenstand dieses Buches.) Das gebrauchsfertige Ergebnis ist die Beschichtung; sie kann, je nach eingesetztem **Beschichtungsstoff**, z.B. einem Lack, einer Dispersionsfarbe, einer Bodenbeschichtungsmasse oder einer Spachtelmasse dekorativ, schützend oder sonst wie funktionell sein. Vor und direkt nach dem Applizieren (Auftragen) ist der Beschichtungsstoff flüssig, pastös oder – wie bei Pulverlacken – pulverförmig. Der Übergang in die fertige Beschichtung erfordert eine Verfestigung des Beschichtungsstoff-Films, welche **Filmbildung**, **Verfilmung** oder (anwendungstechnisch) **Trocknung** genannt wird. Die genannten Begriffe und weitere Fachbegriffe der Beschichtungstechnik sind im Wesentlichen in den Normen DIN EN ISO 4618 (2014) und ergänzend in DIN 55945 (2007) definiert.

In DIN EN ISO 4618 ist die Filmbildung als „Übergang eines aufgetragenen Beschichtungsstoffes vom flüssigen oder bei Pulverlacken über den flüssigen in den festen Zustand“ definiert. Im ersten Fall spricht man laut der Norm auch von „Trocknung“, welche sich wiederum in die „physikalische Trocknung“ durch Verdunsten des Lösemittels (DIN 55945) und/oder die „Härtung“ durch chemische Molekülvergrößerung (DIN EN ISO 4618) gliedert. Damit ein Beschichtungsstoff überhaupt verfilmen kann, muss er eine Substanz enthalten, die schon für sich allein, d.h. ohne die Anwesenheit der übrigen chemischen Bestandteile, in der Lage ist, einen Film zu bilden. Diese Substanz heißt **Filmbildner** oder **Bindemittel**.

In älteren Normen-Ausgaben, z.B. in DIN 55945 (1988-12 und früheren), waren die Begriffe „Bindemittel“ und „Filmbildner“ deutlich unterschiedlich definiert. In den o.g. Normen ist der Begriff „Filmbildner“ jedoch nicht mehr enthalten, wohl weil er sich in der Praxis nie durchgesetzt hat. Für „Bindemittel“ steht in DIN EN ISO 4618: „nichtflüchtiger Anteil der Gesamtheit der Bestandteile der flüssigen Phase eines Beschichtungsstoffes.“<sup>1</sup> Was genau mit „Bindemittel“ im konkreten Zusammenhang gemeint ist, ergibt sich meist klar aus dem Kontext. Es sind allgemein die filmbildenden (und bindenden) Bestandteile der Formulierung wie Lackharze, Dispersionen bzw. dispergierte Poly- oder Oligomere oder reaktive Monomere, d.h. die Substanzen, die klassisch als Filmbildner zu bezeichnen wären.

Das Bindemittel (der Filmbildner) bestimmt in den meisten Fällen die Grundeigenschaften der Beschichtung. Seine Aufgabe ist, einen mehr oder weniger festen Film zu bilden und dabei – sofern vorhanden – die übrigen Bestandteile der Rezeptur einzubetten bzw. aneinander zu binden. Es handelt sich i.d.R. um organisch-chemische Stoffe sehr unterschiedlicher Molekülgröße. Je nach Beschaffenheit, Löse-/Verdünnungszustand bzw. Herstellungsverfahren spricht man von **Harzen**, z.B. Alkydharzen, Epoxidharzen, Melaminharzen usw., die in 100%iger Form, gelöst oder dispergiert vorliegen können, oder von **Kunststoffdispersionen (Polymerdispersionen)**.

<sup>1</sup> Hiernach enthielte ein Pulverlack kein Bindemittel!?

Bindemittel aus kleinen bis mittelgroßen Molekülen, entsprechend (mittleren) molaren Massen von einigen hundert bis ca. 10.000 g mol<sup>-1</sup>, müssen bei der Filmbildung chemisch in große Moleküle bzw. Molekülnetzwerke umgewandelt werden. Man spricht hier von **Härtung**. Bindemittel aus großen bzw. langen Molekülen (Makromolekülen) können auch ohne

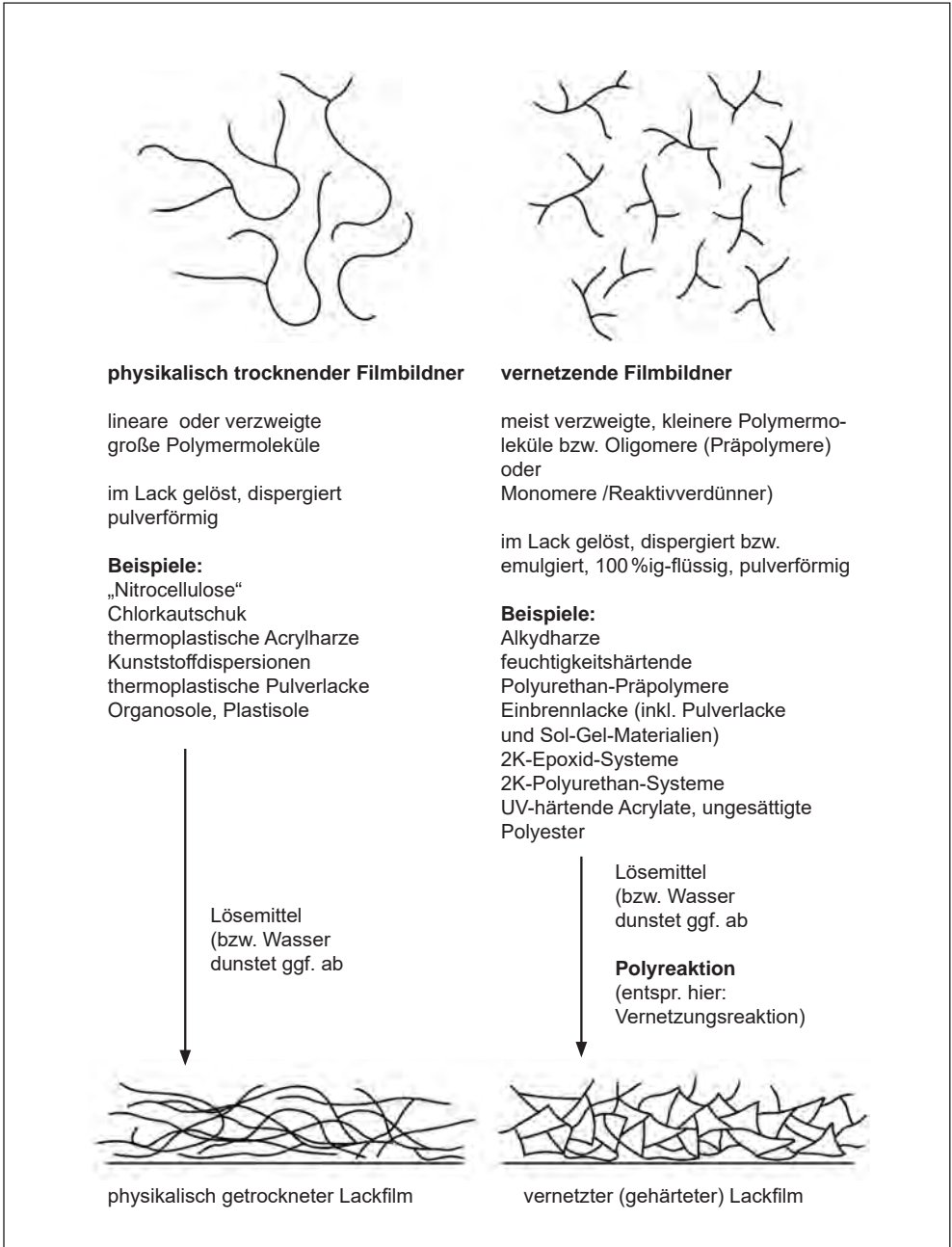


Abbildung 1.1: Filmbildung durch physikalische Trocknung (links) und Härtung (rechts)

chemische Reaktion ausreichend feste Filme bilden; dies geschieht dadurch, dass das Löse- bzw. Dispersionsmittel, in dem sie sich primär befinden, bei der Filmbildung lediglich verdunstet und die langen Fadenmoleküle sich dabei – ähnlich den Fäden in einem Wattebausch – verfilzen. Diesen Filmbildeprozess nennt man **physikalische Trocknung**. Der Zusatz „physikalische“ darf hier nicht weglassen werden, da eine „Trocknung“ auch eine Härtung beinhalten kann. Bei den meisten Filmbildungen durch Härtung läuft – besonders im Anfangsstadium – eine zusätzliche physikalische Trocknung bzw. Antrocknung ab. In Abbildung 1.1 sind die beiden grundlegenden Filmbildemechanismen schematisch dargestellt.

Tabelle 1.1: Allgemeine, stoffliche Zusammensetzung von Beschichtungsstoffen

<b>Beschichtungsstoff</b>	
<b>nicht flüchtiger Anteil</b>	<b>flüchtiger Anteil</b>
Bindemittel	Lösemittel bzw. Dispersionsmittel
Pigmente	flüchtige Additive
Filmbildner	
nicht flüchtige Additive	(beim Einbrennen meist flüchtige Spaltprodukte)

## 1.2 Allgemeine Zusammensetzung von Beschichtungsstoffen

Zur Verarbeitung eines Beschichtungsstoffes, den man für eine bestimmte Aufgabe ausgesucht bzw. erhalten hat, kann man sich mit Hilfe der Gebrauchsanleitung bzw. des technischen Merkblattes über die Art der Anwendung incl. der Trocknung informieren. Auch grobe Hinweise zur chemischen Zusammensetzung und zu möglichen Gesundheitsgefahren sowie zur Entsorgung stehen im Merkblatt bzw. auf dem Gebinde.

Im Folgenden wird der stoffliche Aufbau von Beschichtungsstoffen in sehr allgemeiner Form kurz besprochen. Speziellere Angaben und fachliche Vertiefungen folgen im Buch dort, wo sie zum Verständnis der Filmbildung notwendig und sinnvoll sind.

Tabelle 1.1 gibt einen Überblick über die allgemeine, stoffliche Zusammensetzung von Beschichtungsstoffen.

Einschränkend sei gesagt, dass nicht alle Beschichtungsstoffe sämtliche Stoffgruppen aus Tabelle 1.1 enthalten. So enthält ein Klarlack keine Pigmente und Füllstoffe (im klassischen Sinne), ein Pulverlack keine Lösemittel. Die in Tabelle 1.1 genannten Bestandteile außer Bindemittel sind im Folgenden kurz beschrieben.

### Pigmente

Dies sind sehr feinteilige, im Anwendungsmedium – d.h. in den flüssigen Bestandteilen des Beschichtungsstoffes – praktisch unlösliche, farbgebende und/oder korrosionsschützende und/oder anderweitig funktionell wirkende Pulver. Beispiele: Titandioxid (Weißpigment), Ruß (Schwarzpigment), Chinacridon-Pigment (Buntpigment), Perlglanzpigment (Effektpigment), Zinkphosphat (Korrosionsschutzpigment).

### Füllstoffe

Auch Füllstoffe sind im Anwendungsmedium praktisch unlösliche Pulver, welche dem Beschichtungsstoff mehr Volumen bzw. Füllvermögen („Fülle“) verleihen und bestimmte techno-

logische Eigenschaften ergeben oder verbessern. Typische technologische Wirkungen sind: Änderung des Fließverhaltens, Rissunterdrückung (Armierung), Verbesserung von Schleifbarkeit, Haftfestigkeit und Wetterbeständigkeit, Mattierung u.a.m. Ausschlaggebend für die Wirkung eines Füllstoffes sind in erster Linie die Teilchengröße und die Teilchenform (isometrisch, lamellar, nadelförmig). Beispiele: Kreide, Talkum, Faserfüllstoffe.

### Additive

Additive, klassisch auch „Hilfsstoffe“, sind der Rezeptur in relativ kleinen Mengen zugegebene Wirksubstanzen, die bei Herstellung und/oder Applikation des Beschichtungsstoffes bestimmte Eigenschaften hervorrufen bzw. verbessern oder die Filmeigenschaften gezielt beeinflussen. Additive haben unterschiedliche Flüchtigkeiten, d.h. sie verbleiben bei der Filmbildung entweder im Film oder verlassen ihn mehr oder weniger vollständig. Beispiele: Dispergieradditive (nicht flüchtig), Slip-Additive (nicht flüchtig), Katalysatoren (überwiegend nicht flüchtig), Entschäumer (überwiegend nicht flüchtig), Hautverhinderungsmittel (flüchtig), Filmbildehilfsmittel (flüchtig).

### Lösemittel

Hierunter versteht man Flüssigkeiten, die ein Bindemittel echt, d.h. molekulardispers, auflösen. Lösemittel (im weiteren Sinne) sind organische Flüssigkeiten oder ggf. auch Wasser. Beispiele: Xylol (aromatischer Kohlenwasserstoff), Butylacetat (Ester), Methyisobutylketon (Keton), Butylglykol (Etheralkohol), Butanol (Alkohol).

Wird das Lösemittel dem Beschichtungsstoff vor der Verarbeitung zur Einstellung der Viskosität zugesetzt, so spricht man von **Verdünnungsmittel** oder **Verdünnner**, falsch: „Verdünnung“. **Reaktivverdünner** sind Verdünnungsmittel, die bei der Filmbildung praktisch vollständig chemisch in den Film eingebaut werden; sie gehören damit zum Bindemittel.

### Dispersionsmittel

Im Gegensatz zu Lösemitteln sind dies Flüssigkeiten, meist Wasser, die ein Bindemittel nicht molekulardispers gelöst, sondern in Form submikroskopischer Partikel bzw. Tröpfchen enthalten. Das Gesamtsystem wird **Dispersion** genannt und ist – im Unterschied zu einer Lösung – i.d.R. mehr oder weniger trübe. Auch ein Dispersionsmittel kann als Verdünnungsmittel fungieren. So wird z.B. eine Innenwand-Dispersionsfarbe vor dem Rollen häufig mit etwas Wasser auf die optimale Konsistenz eingestellt.

## 1.3 Allgemeine Rezepturdaten

Ausgehend von der in Tabelle 1.2 dargestellten, einfachen Lackrezeptur seien im Folgenden die wichtigsten allgemeinen Rezepturdaten erläutert.

Der **nicht flüchtige A+nteil**, **nfA** (auch noch: **Festkörper**, **FK**) ist der

– Massenanteil des Beschichtungsstoffes, der nach definierter Trocknung übrigbleibt.

Zur Bestimmung des nfA wird gemäß DIN EN ISO 3251 eine genau eingewogene Menge des Beschichtungsstoffes, z.B. 2 g, unter definierten (vereinbarten) Bedingungen, z.B. während einer Stunde im Lacktrockenschrank bei 130 °C, in einem Dosendeckel getrocknet und Zurückgewogen. Falls bei der Trocknung durch chemische Reaktionen Spaltprodukte abgegeben werden, erhält man je nach Trocknungstemperatur bzw. -dauer evtl. deutlich unterschiedliche nfA-Werte.

Aus der Rezeptur der Tabelle 1.2 errechnet sich der theoretische nFA folgendermaßen:

$$60\% \cdot 0,75 + 27\% = 72,0\%$$

Die Additive werden dabei nicht mitberücksichtigt, wenn es sich um geringe Mengen handelt.

Der nFA ist von zentraler anwendungstechnischer Bedeutung, denn er besagt, wieviel Filmmasse nach der Trocknung einer eingesetzten Lackmasse auf dem Lackierobjekt verbleibt. Das **Pigment-Bindemittel-Verhältnis** beträgt in der Beispiel-Rezeptur

$$27,0 : (60 \cdot 0,75) = 0,60 = 3 : 5$$

Die **Pigment-Volumen-Konzentration, PVK** ist der

– Volumenanteil der Pigmente und Füllstoffe am Trockenfilmvolumen.

Die PVK errechnet sich aus

$$PVK = \frac{V_p + V_f}{V_p + V_f + V_B}$$

Gleichung 1.1

wobei:  $V_p$  Pigmentvolumen,  $V_f$  Füllstoffvolumen,  $V_B$  Bindemittelvolumen

Das Bindemittelvolumen umfasst hier das Volumen aller nicht flüchtigen Anteile des Trockenfilms ohne Pigmente und Füllstoffe; es gehören also auch Härter, Reaktivverdünner und ggf. Weichmacher dazu.

Die Volumina sind aus den Massenanteilen in der Rezeptur und den zugehörigen Dichten zu berechnen; letztere sind in den Merkblättern der Rohstoffe angegeben. Im Beispiel Tabelle 1.2 ist die Dichte des Harzes  $1,04 \text{ g cm}^{-3}$  und die Dichte des Pigmentes  $4,1 \text{ g cm}^{-3}$ .<sup>2</sup>

Damit errechnet sich die PVK zu

$$PVK = \frac{\frac{27,0}{4,1} \cdot 100\%}{\frac{27,0}{4,1} + \frac{60 \cdot 0,75}{1,04}} = 13,2\%$$

Die **kritische Pigment-Volumen-Konzentration, KPVK** ist die

– PVK, bei der das Bindemittelvolumen gerade eben noch ausreicht, um die Freiräume zwischen den Pigment- und Füllstoffteilchen auszufüllen.

<sup>2</sup> In diesem Buch werden zusammengesetzte Einheiten in Potenzschreibweise notiert, also z.B.  $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$  (Joule pro Kilogramm und Kelvin) statt  $\text{J}/(\text{kg K})$



# Einführung

Um die KPVK zu berechnen, benötigt man die Größe des Hohlraumvolumens des in der Rezeptur vorliegenden Pigmentes bzw. der Pigment-/Füllstoff-Mischung. Ein gängiges Maß dafür ist die **Ölzahl** (DIN EN ISO 787-5). Darunter versteht man die Masse an Leinöl, die zur Anteigung von 100 g Pigment bzw. Füllstoff (ggf. ihrer Mischung) zu einer stockigen, nicht schmierenden Paste benötigt wird. Entsprechende Zahlen werden in der Rezeptierpraxis statt mit Leinöl auch direkt mit den verwendeten Bindemittel-Lösungen oder Wasser ermittelt. Obwohl die Ölzahlwerte schlecht reproduzierbar sind, hat die Ölzahl wegen ihrer direkten Verwendbarkeit zur Rezepturberechnung bzw. -entwicklung nach wie vor große Bedeutung. Mittels der Ölzahl lässt sich die KPVK nach der folgenden, leicht herleitbaren Formel abschätzen.

$$KPVK = \frac{100\%}{1 + \frac{\rho_P \cdot OZ}{100 \rho_L}} \quad \text{Gleichung 1.2}$$

- $\rho_P$  Dichte des Pigmentes/Füllstoffes
- OZ Ölzahl des Pigmentes/Füllstoffes
- $\rho_L$  Dichte des Leinöls (0,935 g cm<sup>-3</sup>)

Nach dieser Formel berechnet sich die KPVK der Beispielrezeptur zu

$$K = \frac{100\%}{1 + \frac{4,1 \cdot 20}{100 \cdot 0,935}} = 53,3\%$$

Sind mehrere Pigmente bzw. Füllstoffe vorhanden, so ist für  $\rho_P$  die durchschnittliche Dichte der Mischung einzusetzen; die Ölzahl muss von der kompletten Mischung experimentell bestimmt werden, da sich die Packung (Raumerfüllung) aus den Einzeldaten nicht vorausberechnen lässt.

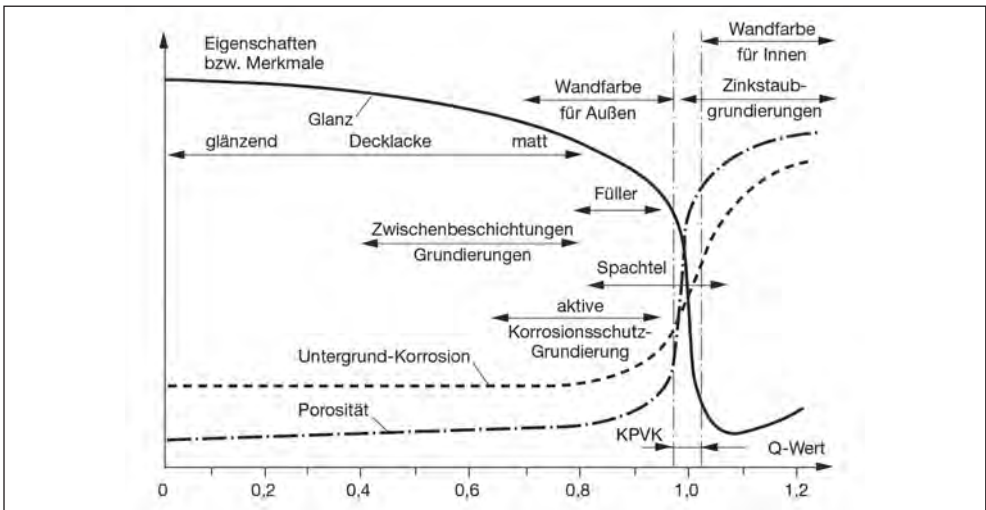


Abbildung 1.2: Verschiedene Beschichtungsstoffe und Beschichtungseigenschaften mit zugehörigen Q-Wert-Bereichen, aus<sup>[3]</sup>

Der **Q-Wert** ist der

– Quotient PVK/KPVK ( $\cdot 100\%$ ).

Im Beispiel beträgt der Q-Wert

$$Q = \frac{13,2}{53,3} = 0,249 = 24,9\%$$

Rezepturen mit Q-Werten von unter 100% heißen **unterkritisch**. Hier ist mehr Bindemittel vorhanden, als zur Ausfüllung der Hohlräume notwendig ist. Der Trockenfilm ist daher nicht porös, also typisch lackartig. Beschichtungsstoffe mit Q-Werten über 100% werden **überkritisch** genannt. Die Filme sind porös, also z.B. saugend; als typische Beispiele seien Innenwand-Dispersionsfarben und Zinkstaubfarben genannt. In Abbildung 1.2 ist der Zusammenhang zwischen Q-Wert, Beschichtungseigenschaften und Typ des Beschichtungsmaterials qualitativ dargestellt.

## 1.4 Grundlegende physikalische Eigenschaften

### 1.4.1 Dichte

Die Dichte  $\rho$  ist der Quotient aus Masse  $m$  und Volumen  $V$ :  $\rho = m/V$ .

Die SI-Einheit ist  $\text{kg m}^{-3}$ ; in der Praxis wird aber vielfach die anschaulichere Einheit  $\text{g cm}^{-3}$  verwendet, wobei gilt:  $1 \text{ g cm}^{-3} = 1000 \text{ kg m}^{-3}$ . Veraltete Begriffe für Dichte sind „spezifisches Gewicht“ und „Wichte“.

### 1.4.2 Viskosität und Fließverhalten

Die Lehre vom Fließverhalten heißt **Rheologie**. Die wichtigste rheologische Größe ist die **dynamische Viskosität** (Zähflüssigkeit)  $\eta$  eines fließfähigen Stoffes (Fluids). Sie ist definiert als Quotient aus **Schubspannung**  $\tau$  und **Geschwindigkeitsgefälle** (Schergefälle)  $D$  bzw.  $\dot{\gamma}$ <sup>3</sup>:

$$\eta = \frac{\tau}{D} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$$

Gleichung 1.3

Die SI-Einheit ist Pa s (Pascal mal Sekunde, kurz: Pascal-Sekunde) oder der tausendste Teil davon: mPa s (Millipascal-Sekunde). Für die veraltete Einheit cP (Centipoise) gilt:  $1 \text{ cP} = 1 \text{ mPa s}$ .

Die Umformung obiger Gleichung in  $\tau = \eta D$  ermöglicht die Veranschaulichung der Definition: Die Schubspannung, d.h. die scherende Kraft pro Flächeneinheit der gescherten Schicht, ist umso höher, je zähflüssiger das Material ist und/oder je schneller man schert. Abbildung 1.3 zeigt die gedankliche „Versuchsapparatur“ zur Definition der dynamischen Viskosität. (Weiterführende Hinweise siehe z.B. „Das Rheologie Handbuch“ von T. G. Mezger.)

<sup>3</sup> Ein Punkt über einem Größensymbol bedeutet die Ableitung nach der Zeit (geteilt durch die Zeit, zeitliche Änderung).

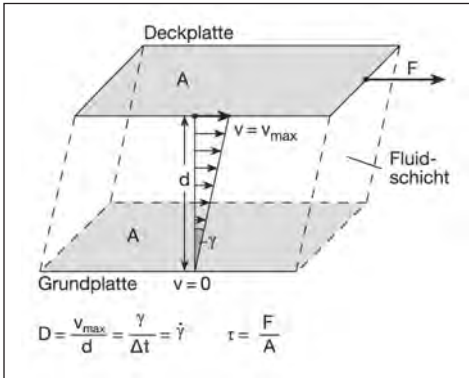


Abbildung 1.3: Gedankliche Messanordnung zur Definition der dynamischen Viskosität

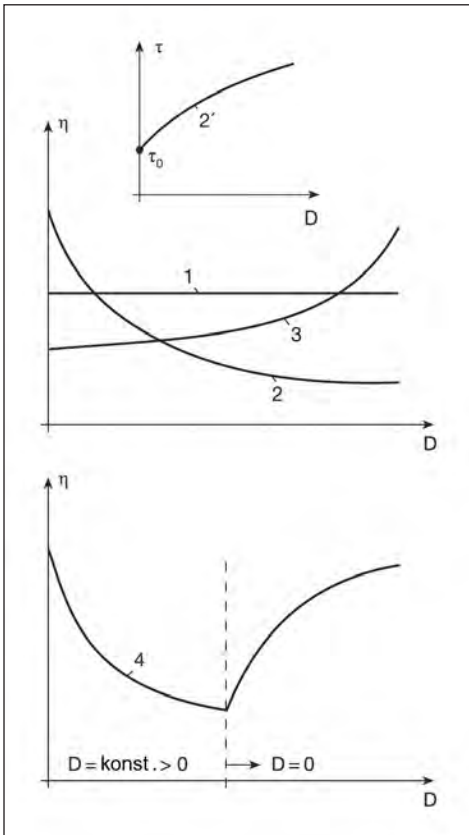


Abbildung 1.4: Grundlegende rheologische Verhaltensweisen von Beschichtungsstoffen: 1) newtonsch 2) strukturviskos (scherverdünnend, pseudoplastisch) 2') strukturviskos mit Fließgrenze (im  $\tau/D$ -Diagramm) 3) dilatant (scherverdickend) 4) thixotrop

In bestimmten Zusammenhängen ist die **kinematische Viskosität**  $\nu$  eine brauchbarere Größe. Man versteht darunter den Quotienten  $\nu = \eta/\rho$  aus dynamischer Viskosität und Dichte; SI-Einheit:  $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ .

Ist die Viskosität unabhängig vom Geschwindigkeitsgefälle, d.h. bei Änderung des Geschwindigkeitsgefälles konstant, so nennt man das Fließverhalten **newtonsch**. Beschichtungsmaterialien zeigen meist mehr oder weniger **nichtnewtonsch**es Fließverhalten, d.h. die Viskosität ist vom Geschwindigkeitsgefälle und evtl. von der Scherzeit abhängig. Dabei wird zwischen folgenden Erscheinungen unterschieden (s. auch Abbildung 1.4):

**Strukturviskosität (Pseudoplastizität, Scherverdünnung)**: Die Viskosität fällt bei steigendem Geschwindigkeitsgefälle. Die Viskositätsänderung ist voll reversibel und folgt der Änderung des Geschwindigkeitsgefälles praktisch ohne Zeitverzögerung.

**Dilatanz oder Scherverdickung** ist das Gegenteil der Strukturviskosität, d.h. man beobachtet einen Anstieg der Viskosität bei wachsender Scherung. Das i.d.R. unerwünschte, dilatante Verhalten zeigen mitunter sehr hoch konzentrierte Pigment- oder Polymerdispersionen.

**Thixotropie** liegt vor, wenn die Viskosität bei konstantem Geschwindigkeitsgefälle mehr oder weniger schnell asymptotisch abfällt und sich nach Ausschalten der Scherung wieder aufbaut. Die Thixotropie rührt vom reversiblen Ab- bzw. Aufbau von lockeren **Gelstrukturen** im Fluid her und kann gezielt durch entsprechende **Rheologieadditive** eingestellt werden.

**Rheopexie** ist das Gegenteil der Thixotropie, d.h. die Viskosität steigt bei konstanter, schwacher Scherung an. Es handelt sich um ein sehr selten vorliegendes Fließverhalten.

Eine **Fließgrenze** bedeutet, dass das Fluid erst nach Anlegen einer Mindestschubspannung fließt; sie tritt praktisch immer in Kombination mit Strukturviskosität oder Thixotropie auf. Das Vorhandensein einer

Fließgrenze heißt auch **Plastizität** und führt bei starker Ausprägung zur sog. Stockigkeit. Eine Fließgrenze kann mit einfachen Viskosimetern nicht direkt, sondern nur extrapolativ (rechnerisch) erfasst werden. Fließgrenzen zeigen vor allem Produkte mit hohen Volumenanteilen pigmentärer Komponenten wie Dicht- und Spachtelmassen, Kitte, Plastisole, Dispersionsfarben und Gele, die ja schon rein visuell ihr Standvermögen zu erkennen geben.

Das Fließverhalten von Beschichtungsstoffen ist von größter anwendungstechnischer Relevanz. In Hinblick auf die Filmbildung stehen als Rheologie-abhängige Prozesse, das sind i.d.R. erwünschtes Verlaufen und das unerwünschte Ablaufen von Lacken unter Bildung von „Läufern“ („Nasen“, „Gardinen“ usw.), im Vordergrund (s. Kapitel 3).

### 1.4.3 Oberflächenspannung

Die Oberflächenspannung einer Flüssigkeit  $\sigma_l$  oder eines Feststoffes (Festkörpers, Werkstoffes)  $\sigma_s$  ist die flächenbezogene Arbeit  $dW/dA$ <sup>4</sup>, die zur Vergrößerung der Oberfläche (bei konstanter Masse) um  $dA$  erforderlich ist, wobei man unter „Oberfläche“ die Grenzfläche zur angrenzenden Gasphase oder zum Vakuum versteht. Die SI-Einheit ist  $N\ m^{-1}$  (bzw.  $mN\ m^{-1}$ ).

Der Wortteil „...spannung“ rührt daher, dass der obigen Definition von  $\sigma$  eine andere, auf einer Kraft basierende, äquivalent ist:

$$\sigma = \frac{dW}{dA} = \frac{F\ ds}{L\ ds} = \frac{F}{L}$$

Die formal erhaltene Länge  $L$  heißt **Randlinie**. Abbildung 1.5 zeigt beispielhaft und schematisch, wie man die Oberfläche einer in einem Drahtbügel aufgespannten Flüssigkeitslamelle vergrößern kann. Eine Verschiebung des Spanndrahtes um  $ds$  nach unten bringt eine Oberflächenvergrößerung um  $dA = 2\ L\ ds$  mit sich (Vorder- und Rückseite). Dabei zieht die Lamelle mit der Kraft  $F = 2\ \sigma\ L$  den Drahtbügel nach oben. Somit ist die Arbeit  $dW = F\ ds = (2\ \sigma\ L)\ ds = \sigma\ (2\ L\ ds) = \sigma\ dA$  von außen zu leisten, und diese steckt dann als Oberflächenenergie in der hinzugekommenen Oberfläche  $dA$ .

Für die Praxis kann man die Oberflächenspannung allgemein als eine Kraft auffassen, die entlang jeder in oder am Rand einer Oberfläche existierenden materiellen oder auch nur gedachten Linie (Randlinie) angreift.

Bei der Filmbildung hängen vor allem die Untergrundbenetzung und der Verlauf von der Oberflächenspannung des Lackes ab. Zahlreiche weitere, meist unerwünschte Effekte wie Kantenflucht, Krater- und Schaumbildung stehen ebenfalls im Zusammenhang mit der Oberflächenspannung (s. Kapitel 3).

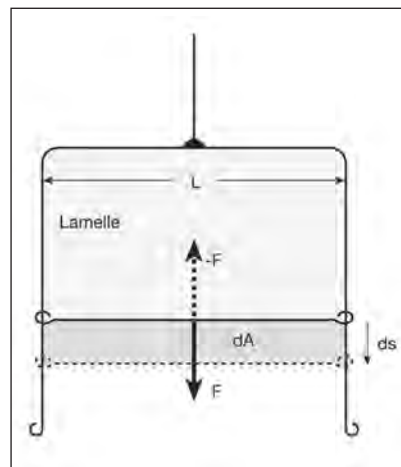


Abbildung 1.5: Oberflächenspannung einer Flüssigkeitslamelle in einem Drahtbügel (die Fläche  $dA$  gilt für Vorder- und Rückseite)

<sup>4</sup> Dort wo sinnvoll bzw. notwendig werden physikalische Größen bzw. ihre Änderungen direkt in Form der Differentiale ( $d \dots$  bzw.  $\partial \dots$ ) ausgedrückt.

## 1.5 Klassifizierung der Filmbildung

Die Filmbildung umfasst – je nach Art des Beschichtungsstoffes – verschiedene physikalische und chemische Einzelprozesse, die sich z.T. zeitlich überlagern und beeinflussen. Den Beschichtungsstoff-Klassen kann man die Filmbilde- bzw. Trocknungsarten wie im Folgenden aufgelistet zuordnen.

- **Physikalisch trocknende Beschichtungsstoffe**
  - Löse- oder dispersionsmittelhaltig (Bindemittel echt gelöst bzw. dispergiert)
  - Filmbildung allein durch Verdunsten des Lösemittels/Wassers bei verschiedenen Temperaturen und ggf. Luftfeuchtigkeiten
  - Beispiele: Cellulosenitrat- und Chlorkautschuk-Lacke, Dispersionsfarben.
- **Rein chemisch härtende Beschichtungsstoffe**
  - Löse- bzw. dispersionsmittelfrei, trotzdem fließfähig („flüssige 100 %-Systeme“)
  - Filmbildung durch selbstständig ablaufende, chemische Vernetzungsreaktion zwischen **Stammlack** und **Härter (Zweikomponenten-Systeme, 2K-Systeme)** oder durch Aktivierung der Vernetzung mittels Wärme, UV- oder Elektronenstrahlen (1K-Systeme)
  - Beispiele: 2K-Materialien auf Urethan- oder Epoxid-Basis zur Dickbeschichtung im Bauten- und Korrosionsschutz, heißhärtende 1K-Polyurethan-Beschichtungsmassen, strahlenhärtende Holz-/Möbellacke auf Acrylat-Basis.
- **Physikalisch (an)trocknende und chemisch härtende Beschichtungsstoffe**
  - Bindemittel echt gelöst oder dispergiert
  - Filmbildung anfangs partiell durch Verdunstung des Lösemittels/Wassers, im Wesentlichen jedoch durch chemische Vernetzung, 2K-kalt- oder 1K-heißhärtend
  - Beispiele: Die meisten Industrie und Fahrzeuglacke.
- **Oxidativ oder feuchtigkeitshärtende Beschichtungsstoffe**
  - Lösemittelfreie oder -haltige 1K-Beschichtungsstoffe, die – ggf. nach physikalischer Antrocknung – bei Raum- oder leicht erhöhter Temperatur mit Luftsauerstoff oder Luftfeuchtigkeit vernetzen
  - Beispiele: Malerlacke auf Alkydharz-Basis, feuchtigkeitshärtende Polyurethan-Bautenlacke.
- **Pulverlacke (Beschichtungspulver)**
  - Thermoplastische Pulver: Filmbildung rein physikalisch durch Aufschmelzen auf die vorgeheizten Objekte
  - Duromere (härtende) Pulver: Filmbildung durch chemische Vernetzung bei hoher Temperatur nach Aufschmelzen und Verfließen.

Zusammenfassend sei festgestellt, dass bei allen Trocknungsarten ein energetischer und vielfach auch ein stofflicher Austausch mit der Umgebung stattfindet. Somit sind die äußeren Bedingungen bei der Trocknung, d.h. der Zustand der Umgebung um das mit Lack beaufschlagte Objekt, bestimmend für den Ablauf des Filmbildeprozesses. Insbesondere gilt dies für die Art und Intensität des Energieeintrages in die frisch applizierte Schicht (s. Kapitel 4).

**Dr. Jörg Alfred Vogelsang,**  
**Head Corporate Analytics & Testing, Sika Technology AG**

Filmbildung ist eine der wichtigsten Prozesse, die die Beschichtungsstoffindustrie kennt. Denn bildet sich kein Film oder bildet er sich falsch, dann ist ein Beschichtungsschaden entstanden.

Mischke und Strehmel, beide in der Lackbranche sehr bekannte Experten, haben ein Lehrbuch über alle Aspekte der Filmbildung vorgelegt, das auf alle ihren Facetten eingeht und dabei die verschiedenen Applikationsarten, den Chemismus von Vernetzungsreaktionen, verschiedene Trocknungs- und Härtingsbedingungen auf dem aktuellen Stand des Wissens präsentiert.

Auch die physikalisch-chemischen Grundlagen wie Benetzung, klassische und thermodynamische Lösemiteleinflüsse sowie die Besonderheiten beim Verfilmen von Dispersionen werden sehr ansprechend diskutiert.

Das Buch ist eine Bereicherung für Interessierte oder Neueinsteiger der Lackbranche sowie eine gute Einführung in die Anwendungen der Polymerchemie für Studenten.



**VINCENTZ**  
Wir entwickeln Fachwissen

