

Andreas Hänsel
Jorge Prieto (Hrsg.)

Industrielle Beschichtung von Holz und Holzwerk- stoffen im Möbelbau



HANSER

Hänsel/Prieto (Hrsg.)

**Industrielle Beschichtung von Holz und
Holzwerkstoffen im Möbelbau**

Andreas Hänsel / Jorge Prieto (Hrsg.)

Industrielle Beschichtung von Holz und Holzwerkstoffen im Möbelbau

Mit 233 Bildern und 66 Tabellen



Fachbuchverlag Leipzig
im Carl Hanser Verlag

Herausgeber:

Prof. Dr. Andreas Hänsel, BA Sachsen/Staatliche Studienakademie, Dresden

Dipl.-Chem.-Ing. Jorge Prieto, Oskar Nolte GmbH, Kirchlengern



Alle in diesem Buch enthaltenen Informationen, Verfahren und Darstellungen wurden nach bestem Wissen erstellt und mit Sorgfalt getestet. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Buch enthaltenen Informationen mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Art aus der Benutzung dieses Programm-Materials oder Teilen davon entsteht.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

ISBN 978-3-446-45093-6
E-Book-ISBN 978-3-446-45667-9

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.
Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag
© 2019 Carl Hanser Verlag München
www.hanser-fachbuch.de
Lektorat: Manuel Leppert, M. A.
Herstellung: Katrin Wulst
Einbandrealisierung: Stephan Rönigk
Satz: Kösel Media GmbH, Krugzell
Druck und Bindung: Hubert & Co. GmbH & Co. KG BuchPartner, Göttingen

Printed in Germany

Inhalt

1	Prüfverfahren in der Oberflächentechnik	13
1.1	Einleitung	13
1.2	Technologische Messungen	17
1.3	Möbelspezifische Prüfungen	31
1.4	Weitere Prüfverfahren	39
1.5	Eignung von Messsystemen	41
1.6	Lehrfilme	43
1.7	Literatur	44
2	Beschichtungsstoffe	48
2.1	Feste Beschichtungsmaterialien	48
2.1.1	Furnier	48
2.1.2	Folien	55
2.1.2.1	Aufbau einer Dekorfinishfolie	57
2.1.2.2	Herstellung von Dekorfinishfolien	57
2.1.2.2.1	Materialien und Rohstoffe	58
2.1.2.2.2	Dekorentwicklung	60
2.1.2.2.3	Druckprozess	63
2.1.2.2.4	Lackierprozess	65
2.1.2.3	Verarbeitung und Anwendung von Dekorfolien	69
2.1.2.3.1	Beschichtung von Flächen mit Dekorfinishfolien in Flachpressen und Kaschieranlagen	70
2.1.2.3.2	Beschichtung von Profilen mit Dekorfinishfolien in Ummantelungsanlagen	74
2.1.2.3.3	Beeinträchtigungen und Fehler während der Verarbeitungsprozesse von Dekorfinishfolien	78
2.1.2.4	Ausblick	80
2.1.3	Pulverlacke	81
2.2	Flüssige Beschichtungssysteme für den Möbelbau	86
2.2.1	Lösemittelhaltige Lacktechnologien	88

2.2.1.1	Cellulosenitrat-Lacke (CN-Lacke)	88
2.2.1.1.1	Eigenschaften von CN-Lacken	93
2.2.1.1.2	Anwendungsbeispiel und Tipps im Umgang mit CN-Lacken	94
2.2.1.2	Säurehärtende Lacke (SH-Lacke)	95
2.2.1.2.1	Bestandteile von SH-Lacken	96
2.2.1.2.2	Eigenschaften und Anwendungsbeispiel	98
2.2.1.3	Zweikomponenten-Polyurethan-Lacke (2K-PUR-Lacke)	99
2.2.1.3.1	Bestandteile von 2K-PUR-Lacken	99
2.2.1.3.2	Verarbeitung und Eigenschaften von 2K-PUR-Lacken	103
2.2.1.3.3	Hochglänzende Oberflächen	105
2.2.2	Lösemittelarme und lösemittelfreie Lacktechnologien	106
2.2.2.1	Ungesättigte Polyesterlacke (UP-Lacke)	106
2.2.2.1.1	Bestandteile von UP-Lacken	106
2.2.2.1.2	Anwendungs- und Verarbeitungshinweise	111
2.2.2.2	UV-härtende- und elektronenstrahlhärtende Lacke (UV-/ESH-Lacke)	113
2.2.2.3	Pigmentierte UV-Beschichtungen	145
2.2.2.4	Öle und Wachse	147
2.2.2.5	Wasserlacke	158
2.2.2.6	Holzbeizen	174
2.3	Leime und Klebstoffe	181
2.3.1	Kleben als Fügechnik	181
2.3.1.1	Adhäsion und Kohäsion	181
2.3.1.2	Thermomechanisches Verhalten von Polymeren	183
2.3.1.3	Aushärtemechanismen	185
2.3.2	Stoffliche Zusammensetzung von Klebstoffen	186
2.3.3	Breitflächenbeschichtung	188
2.3.3.1	Beschichtungstechniken	188
2.3.3.2	Postforming	189
2.3.3.3	Klebstofftypen	189
2.3.4	Schmalflächenbeschichtung	195
2.4	Literatur	197
3	Applikationsverfahren	205
3.1	Verfahren zur Breitflächenbeschichtung	205
3.1.1	Beschichtungen in stationären Pressen	205
3.1.2	Industrielle Kaschierung	207
3.1.2.1	Kaltkaschierung	207
3.1.2.2	Warmkaschieren	212
3.1.2.3	Thermokaschieren	212

3.1.2.4	Flatlamination als Sonderform der Kaschierung	213
3.1.3	Ummantelung	213
3.1.4	Beschichtung mit Melamindekoren in der Kurztaktpresse	219
3.2	Materialien und Verfahren zur Schmalflächenbeschichtung	220
3.2.1	Materialien zur Schmalflächenbeschichtung	221
3.2.1.1	Thermoplastische Kantenbänder zur Schmalflächen- beschichtung	221
3.2.1.2	Duroplastische Kantenbänder zur Schmalflächen- beschichtung	226
3.2.1.3	Furnier- und Massivholzkantenbänder zur Schmal- flächenbeschichtung	227
3.2.2	Verfahren zur Schmalflächenbeschichtung	228
3.2.2.1	Schmalflächenbeschichtung mittels Schmelz- klebstoffen	228
3.2.2.2	Nullfugentechnologien Laser, NIR, Hotair, Plasma, Mikrowelle	230
3.2.2.3	Sonderverfahren	234
3.2.3	Maschinen zur Schmalflächenbeschichtung	238
3.2.3.1	Handmaschinen zur Schmalflächenbekantung	238
3.2.3.2	Maschinen für die Durchlauffertigung	238
3.2.3.3	Maschinen für die Stationärfertigung	240
3.3	Beschichtung von Oberflächen mit Lacken	241
3.3.1	Theoretische Grundlagen	241
3.3.2	Beschichtungsverfahren	246
3.3.2.1	Spritzen	246
3.3.2.2	Lackgießen	257
3.3.3	Walzen von Lacken	259
3.3.4	Weitere Auftragsverfahren	262
3.4	Verfahren zur Pulverbeschichtung	264
3.4.1	Technologie	266
3.4.2	Bauteilanforderungen und Schichtaufbauten	270
3.4.3	Verfahrenstypische Oberflächenfehler und spezielle Prüfverfahren	271
3.5	Drucken	272
3.5.1	Historische Entwicklung	272
3.5.2	Druckverfahren	273
3.5.2.1	Druckformgebundene Verfahren	274
3.5.2.2	Nichtdruckformgebundene Verfahren (Non-Impact-Druck/Digitaldruck)	282
3.5.2.2.1	Inkjetdruck	283
3.5.3	Erkennen von Druckfehlern	288

3.5.4	Taktile Simulationen von Oberflächen auf Basis des Digitaldrucks (Elevated Printing)	289
3.5.5	Ausblick	294
3.6	Literatur	294
4	Schleifen und Polieren	298
4.1	Schleifen	298
4.1.1	Grundprinzipien	298
4.1.2	Schleifmittel auf Unterlage	301
4.1.3	Schleifverfahren und -maschinen	305
4.1.3.1	Allgemeine Prozesszusammenhänge	305
4.1.3.2	Modelle zur Prozessauslegung	307
4.1.3.3	Holzschliff	308
4.1.3.4	Lackzwischen Schliff	311
4.1.4	Bewertung des Arbeitsergebnisses	312
4.1.4.1	Oberflächengüte nach dem Holzschliff	312
4.1.4.2	Oberflächengüte nach dem Lackzwischen Schliff	313
4.1.4.3	Prozesskenngrößen	314
4.2	Polieren	314
4.2.1	Grundprinzipien	315
4.2.2	Poliermittel, Polituren und Politurträger	315
4.2.3	Poliervverfahren	316
4.2.4	Bewertung des Arbeitsergebnisses	316
4.3	Literatur	317
5	Trocknung und Härtung von Lackfilmen	318
5.1	Grundlagen	318
5.2	Lufttrocknung und konvektive Trocknung	320
5.3	Trocknung mit entfeuchteter Luft	324
5.4	Strahlungstrocknung	325
5.4.1	Trocknung mit Infrarotstrahlung (IR)	326
5.4.2	Härtung mit UV-Strahlung	328
5.4.3	Trocknung mit Elektronenstrahlen	335
5.5	Elektrische Trocknungsverfahren	336
5.6	Fehler bei der Lacktrocknung	337
5.7	Literatur	338

6	Brand- und Explosionsschutz in Lackierereien	340
6.1	Grundbegriffe im Explosionsschutz	340
6.2	Abgrenzung und Begriffsdefinition	342
6.2.1	Explosionsschutz	342
6.2.2	Brandschutz	342
6.3	ATEX-Produktrichtlinie und ATEX-Betriebsrichtlinie	344
6.4	Anwendung des Explosionsschutzes	344
6.5	Definition von Ex-Zonen (Zoneneinteilung)	346
6.6	Einsatzbereiche von Geräten und Komponenten	347
6.7	Explosionstechnische Kennzahlen	347
6.8	Schutzprinzipien	349
6.9	Zündschutzarten	350
6.10	Maßnahmen im Explosionsschutz	352
6.11	Übersicht des Regelwerks	357
7	Simulation von Beschichtungs- und Trocknungsprozessen	359
7.1	Simulation und Simulationsarten	359
7.2	Berechnung zur Simulation von Beschichtungsvorgängen	360
7.3	Einsatzgebiete der Simulation	362
7.3.1	Simulation in der Lackiertechnik	363
7.3.2	Numerische Simulation von Trocknungsvorgängen	367
7.4	Zusammenfassung	370
7.5	Literatur	372
8	Optimierung von Beschichtungsprozessen	373
8.1	Allgemeine Aspekte bei Beschichtungsprozessen	373
8.2	Analyse des Ist-Zustands	373
8.3	Betriebswirtschaftliche Bewertung	375
8.4	Zusammenhänge zwischen Ziel- und Einflussgrößen	377
8.5	Auswahl von Beschichtungsstoffen	379
8.6	Planung von Lackieranlagen	380
8.7	Literatur	381

9	Industrie 4.0 in der Oberflächentechnik	383
9.1	Zum Begriff Industrie 4.0	383
9.2	Wandel in den Produktionsfaktoren und Motivation für neue Konzepte	384
9.3	Definition Industrie 4.0 und Cyber-physische Systeme	385
9.4	Spezielle Herausforderungen in der Oberflächentechnik	386
9.5	Industrie 4.0 in der Möbelindustrie	386
9.6	Praxisbeispiele	387
9.7	Literatur	391
	Index	393

Vorwort

Für den Bereich der Beschichtung von Oberflächen mit Lacken existieren zahlreiche Fachbücher. Im Bereich der Möbelfertigung sind jedoch nur wenige aktuelle Lehrbücher oder Monographien bekannt. Darüber hinaus ist in der Möbelindustrie auch der Einsatz fester Beschichtungsmaterialien bedeutsam. Für den Anwender überschneiden sich häufig stoffliche, anlagentechnische und verfahrenstechnische/technologische Einflüsse bei der Gestaltung moderner Lackierprozesse.

Die Autoren haben deshalb versucht, die relevanten Themen aus verschiedenen Blickwinkeln auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen zu betrachten, um dem Leser ein Verständnis der Komplexität zu vermitteln. Im Autorenkollektiv haben sich Hochschullehrer, Wissenschaftler und Praktiker aus der Industrie zusammengefunden und teilweise nach längerer Diskussion übereinstimmende Standpunkte erreicht. Dennoch übersehen sie nicht, dass in Hinsicht auf evtl. künftige Auflagen neue Schwerpunktsetzungen und Ergänzungen erforderlich sein können.

Unser besonderer Dank gilt den Kollegen, die uns im Prozess der Entstehung dieses Buchs mit Hinweisen und konstruktiven Kommentaren unterstützt haben. Stellvertretend seien an dieser Stelle die Herren Dr. Rico Emmler (IHD), Axel Steuernagel (UV-Technik Meyer), Ulrich Schneider (Heraeus Noblelight), Martin Drescher (Westland Gummiwerke), Holger Scherrenbacher (Klebchemie M.G. Becker GmbH & Co. KG), Tobias Feifel (Nolte Möbel GmbH & Co. KG) und Ulrich Bens (Siempelkamp Maschinen- und Anlagenbau GmbH & Co. KG) genannt.

Die Herausgeber möchten weiterhin an dieser Stelle ihren Mitarbeitern danken, die sie bei der Manuskriptbearbeitung unterstützten. Ein besonders herzlicher Dank gilt Herrn B. Eng. Martin Schallhammer (Staatliche Studienakademie Dresden) für die umfangreichen Arbeiten bei der Zusammenfassung und Fertigstellung des Gesamtmanuskripts sowie Herrn B. Eng. Martin Rößler und Frau Manuela Slopianka. Auch dem Carl Hanser Verlag, insbesondere Frau Alexandra Fritsch, Herrn Manuel Leppert und Frau Katrin Wulst, danken wir für die verständnisvolle Unterstützung dieses Buchprojekts.

Dresden, im August 2018

Andreas Hänsel

Jorge Prieto

1

Prüfverfahren in der Oberflächentechnik

Andreas Hänsel, Gerhard Görmar

■ 1.1 Einleitung

Oberflächen bestimmen wesentlich das Erscheinungsbild sowie die Akzeptanz des Endprodukts beim Kunden. Nicht umsonst stellen Reklamationen in diesem Bereich einen großen Teil aller Beanstandungen dar. Neue Materialien und Technologien – teilweise mit engeren Verarbeitungsfenstern – erfordern ein tieferes Verständnis von Produkten und Prozessen, um letztere fähig, beherrscht und stabil führen zu können. Eine wesentliche Voraussetzung dafür sind die durch Prüfungen und Messungen gewonnen Daten.

Der Markt für Möbelbeschichtungen

Der deutsche Möbelmarkt hat gegenwärtig ein Volumen von ca. 31 Mrd. €. Beim Verbrauch pro Kopf liegt Deutschland mit 383 € p. a. weltweit an der Spitze. Der Lackeinsatz in dieser Branche liegt bei 60 000 t pro Jahr, wobei 37 % auf den Wohnmöbelbereich, 40 % auf Küchen- und 23 % auf Büromöbel entfallen [GAG 2017a].

In den letzten 20 Jahren entwickelte sich Asien zum größten Möbelproduzenten der Welt. Im Länderranking folgen auf die Volksrepublik China die USA, Deutschland und Italien. Global dominieren im Bereich Möbel lösemittelhaltige Lacke den Markt, die nach Prognosen für 2018 einen Anteil von ca. 57 % haben werden. Tendenziell werden wasserbasierte und strahlenhärtende Lacke größere Marktanteile einnehmen. Für 2018 gehen die Schätzungen von ca. 42 % aus. Pulverlacke nehmen gegenwärtig mit einem Marktanteil von 1 % eine Nischenstellung ein, der künftige Marktanteil wird hier bei maximal 5 % gesehen [GAG 2017b].

Für die Holzinnenbeschichtung von Möbeln sind weltweit diverse Lacktechnologien im Einsatz, die innerhalb der Regionen und Länder sehr unterschiedlich favorisiert werden. In Bild 1.1 ist der globale industrielle Wood Coatings Markt 2016 nach Lacktechnologien für die Innenbeschichtungen mit einer Gesamttonnage von 2430 kt dargestellt [PRI 2007]. In dieser Übersicht sind die Regionen Europa, Mittlerer Osten-Afrika (MEA), Nord- und Südamerika bzw. Asia-Pazifik berücksichtigt worden. Wenn der Holzlackanteil der ost-europäischen Länder wie z. B. Bulgarien, Polen, Rumänien, Russland, Slowenien, Tschechi-

sche Republik, Ukraine, Ungarn u. a. dazu gezählt werden, kann von einem europäischen Holzlackmarkt von weit über 500 000 t ausgegangen werden. Die in den letzten Jahren veröffentlichten globalen und europäischen Holzlackmarktdaten sind in Abhängigkeit der verwendeten Datenbasis sehr unterschiedlich. Die veröffentlichten Marktdaten geben jedoch – unabhängig von der ausgewiesenen Tonnage – wichtige Informationen, um die Technologien und Bedürfnisse der Märkte besser verstehen bzw. Trends erkennen zu können.

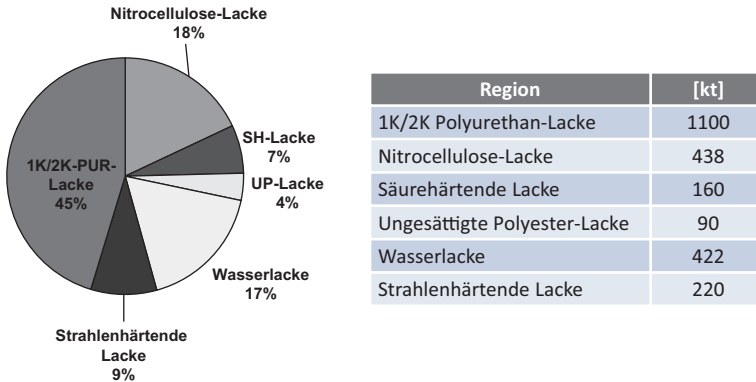


Bild 1.1 Globaler industrieller Holzlackmarkt 2016 nach [PRI 2017]

So analysierte z. B. Gagro [GAG 2017c] auf Basis verschiedener Marktstudien¹ die Tendenzen, Herausforderungen und Triebkräfte für den Sektor Holzlacke. Zu den wesentlichen Aspekten zählen demnach u. a.:

- Innovationen bei acrylharzbasierten Holzlacken und steigende Nachfrage nach UV-härtenden Systemen
- strengere Vorschriften von Seiten des Gesetzgebers
- ein langsames Marktwachstum in Westeuropa
- Probleme in Verbindung mit dem Lackauftrag (Applikation)
- individuelle Lackformulierungen

Möbel sind eine Gruppe von Einrichtungsgegenständen, die neben dekorativen Aufgaben auch unterschiedliche Zwecke erfüllen müssen. Sie „sind zunächst *Gebrauchsobjekte, die sich vor allem über ihre Funktionalität definieren*“ [HAC 2011]. Entsprechend dieser Funktionalität werden unterschiedliche Anforderungen an ihre Oberflächen gestellt.

Für die Möbel, wie auch für alle zu ihrer Herstellung verwendeten Materialien lassen sich allgemein folgende Anforderungsprofile beschreiben, die mehr oder weniger durch die eingesetzten Oberflächenmaterialien definiert werden:

- dekorative Anforderungen (werden durch Design, Farbe, äußeres Erscheinungsbild und Form bestimmt, sowie die möglichen Veränderungen dieser Eigenschaften über ihre Gebrauchsdauer)

¹⁾ Wood Coating Resin Market – Global Forecast to 2020 (Markets and Markets) und Global Wood Coatings Market 2015–2019 (TechNavio).

- Schutz, Funktionalität und Gebrauchstauglichkeit (z. B. Haltbarkeiten gegenüber chemischen und mechanischen Beanspruchungen, aber auch gegenüber Wärme entsprechend ihres Verwendungszwecks und ihrer Verwendungsdauer)
- Verarbeitbarkeit der Materialien im Produktionsprozess
- Produktsicherheit (einschließlich umwelt- und gesundheitsrelevanter Anforderungen an die Produkte)

Bei der Herstellung werden im großen Umfang verschiedene Hölzer sowie Holzwerkstoffe verwendet. Daneben kommen auch Kunststoff, Metalle und mineralische Werkstoffe zum Einsatz. Meistens erfolgt während der Verarbeitung dieser Werkstoffe eine Beschichtung ihrer Oberflächen, die an die jeweiligen notwendigen Anforderungen während des Gebrauchs der Möbel angepasst ist.

Unter Beschichtungsstoffen versteht man nach DIN EN ISO 4618 bzw. DIN 55945 flüssige, pastöse oder pulverförmige Stoffe, die eine deckende Beschichtung mit schützender dekorativer oder spezifischen technischen Eigenschaften ergeben. In einem weiteren Sinne gehören jedoch auch das Aufbringen von bedruckten und lackierten Bahnmaterialien wie Metallfolien, Kunststofffolien, Dekorfinishfolien (IHD Güterichlinie 2010) und Furnieren in diesen Bereich. Die Oberflächenbeschichtung von Holz und Holzwerkstoffen kann deshalb grundsätzlich in drei Hauptgruppen eingeteilt werden (Bild 1.2). Die dabei zum Einsatz kommenden Stoffe, Maschinen und Technologien sollen in den folgenden Kapiteln näher dargestellt werden.

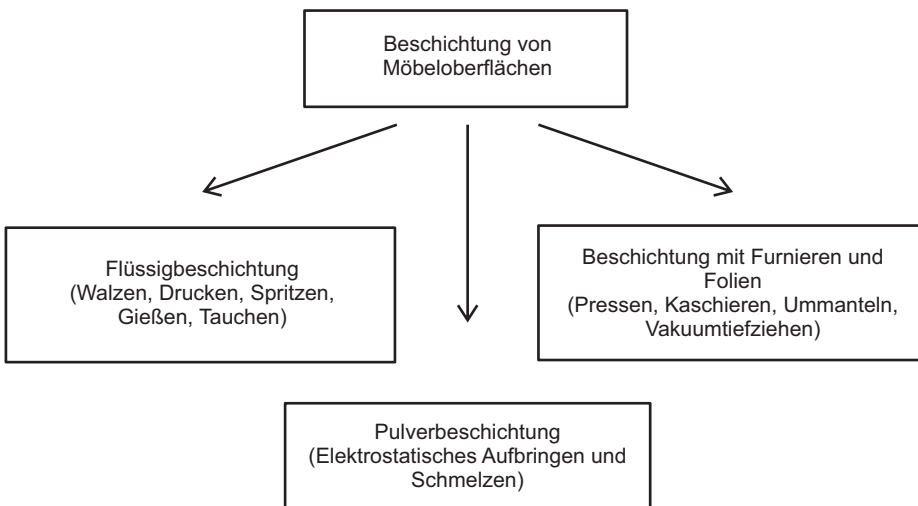


Bild 1.2 Hauptgruppen der Oberflächenbeschichtung von Möbeln

Prüfverfahren zur Qualitätssicherung

Die Summe der Eigenschaften, die die Qualität eines Erzeugnisses bzw. die Gebrauchstauglichkeit oder ästhetische Erscheinung einer Oberfläche bestimmt, wird durch Faktoren definiert, die auf prüftechnische Daten, Nutzungserfahrungen und Kundenwünsche

zurückgeführt werden können. Subjektive Ansichten führen in diesem Zusammenhang häufig zu Fehleinschätzungen hinsichtlich der Mangelhaftigkeit eines Produkts (Kunde) oder auch der richtigen Führung eines technologischen Prozesses (Hersteller), wobei Letzteres wiederum zu Fehlern am Produkt, Nacharbeit oder Ausschuss führen kann. Definierte Eigenschaften einer Ware bedürfen deshalb einer Absicherung durch reproduzierbare Mess- bzw. Prüfverfahren. Während unter einem Messvorgang die Informationsgewinnung hinsichtlich der Quantität einer Messgröße im Vergleich zu einem vorgegebenen Maß (z. B. physikalische Einheit) verstanden wird², erfolgt beim Prüfen ein Vergleich des gewonnenen quantitativen Messwerts eines einzelnen Objekts oder einer Gruppe von Objekten mit dem vorgegebenen Sollwert des jeweiligen Qualitätsparameters. Für eine erfolgreiche Prüfung bzw. Messung müssen die angewandten Verfahren eine Reihe von Forderungen erfüllen. Dazu gehören u. a.:

- Sicherung definierter Prüfbedingungen (z. B. klimatische Bedingungen)
- Vermeidung systematischer Fehler sowie des Ausschlusses des Auftretens von Fehlern durch die Art und Weise der Probennahme bzw. die Auswahl der Messgenauigkeit
- Erreichen einer hin- und ausreichenden Genauigkeit des Messergebnisses

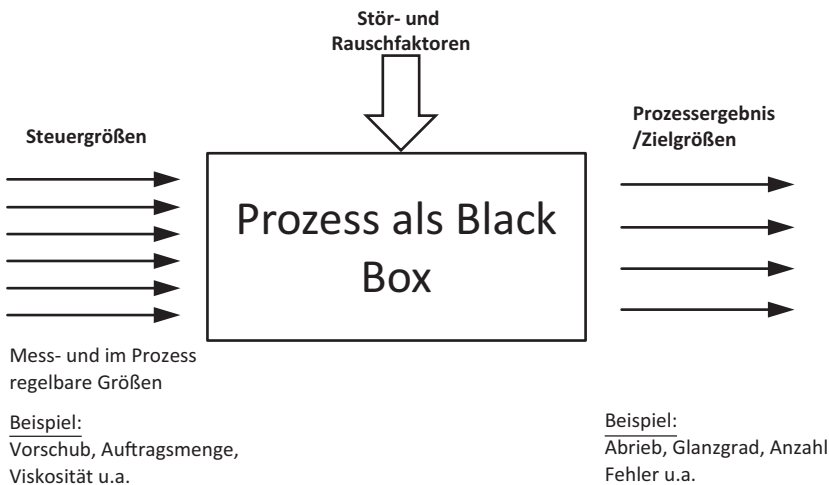


Bild 1.3 Ursache-/Wirkungsbeziehungen zwischen technologischen Einflussgrößen und Produkteigenschaften (Zielgrößen)

Messen und Prüfen bilden im Produktionsprozess die Grundlage für verschiedenste Entscheidungen, indem die gewonnenen Daten in einen umfassenden Zusammenhang gestellt werden. Bild 1.3 verdeutlicht die Komplexität des Zusammenwirkens von einzelnen Einflüssen wie Störgrößen (die Abweichungen vom Sollzustand des Produkts bewirken, messbar sind und in der Regel nicht beeinflusst werden können), Rauschfaktoren (die messbar sind und sich im Versuch, jedoch nicht im Prozess kontrollieren lassen) und Steuergrößen (die frei einstellbar sind und optimale Werte für den Prozess bzw. sein Produkt sichern) im Hinblick auf das Erreichen eines gewünschten Prozessergebnisses (Ziel-

²⁾ Vgl. DIN 1319-1:1995-01, Grundlagen der Meßtechnik – Teil 1: Grundbegriffe.

größe(n)). Ohne deren messtechnische Erfassung bzw. prüftechnische Bewertung können moderne Prozesse, insbesondere unter dem Aspekt zunehmend engerer technologischer Fenster, nicht effektiv geführt werden. Der folgende Abschnitt gibt einen Überblick von Mess-/Prüfverfahren, die stoffliche und technologische Einfluss- und Zielgrößen während des Produktionsprozesses charakterisieren, die eine Bewertung der Produkteigenschaften gestatten und für den Anwender von besonderer Bedeutung sein können.

■ 1.2 Technologische Messungen

In der Möbelindustrie werden neben Melaminbeschichtungen vor allem pigmentierte und nicht pigmentierte Farben und Lacke für die Beschichtung verwendet. Darüber hinaus kommen auch andere flüssige Materialien, wie z. B. Klebstoffe, zum Einsatz. Dabei handelt es sich meist um wasser- oder lösemittelbasierende Systeme, die im flüssigen Verarbeitungszustand durch verschiedene Kenngrößen charakterisiert werden können:

- Dichte (z. B. wichtig beim Befüllen von Dosieranlagen)
- Viskosität bzw. Auslaufzeit (wichtiger Verarbeitungsparameter)
- Festkörper des Lacks (zur Berechnung der Wirtschaftlichkeit bzw. der möglichen Schichtdicke der Beschichtung)

Entsprechend der vorstehenden Ausführungen ist bei der Verarbeitung flüssiger Materialien (Lacke, Öle, Leime usw.) die Charakterisierung von deren Stoff- und Verarbeitungseigenschaften von sowohl technologischer als auch betriebswirtschaftlicher Bedeutung. Nachfolgend sollen die für den Verarbeiter wichtigsten Kenngrößen und deren Messung in konzentrierter Form dargestellt werden.

Dichte und nichtflüchtige Anteile (nfA)

Physikalisch ist die Dichte als das Verhältnis der Masse eines Körpers zu seinem Volumen definiert.³ Sie wird ausschließlich durch das jeweilige Material bestimmt. Zur raschen Bestimmung der Dichte von flüssigen Materialien in der praktischen Anwendung dient das sogenannte Pyknometer, das die exakte Einstellung eines definierten Volumens ermöglicht. Es besteht aus einem Gefäß, das mit einem Schliffstopfen verschlossen wird, der eine Öffnung aufweist. Das exakte Füllvolumen ist erreicht, wenn beim Einsetzen des Stopfens in das gefüllte Pyknometer Flüssigkeit (z. B. Lack) durch diese Öffnung austritt. Bei der Dichtebestimmung von Flüssigkeiten erfolgen eine Temperierung von leerer und gefüllter Messeinrichtung sowie jeweils deren Gewichtsbestimmung. Die Dichte berechnet sich dann aus:

$$\rho_{\text{FL}} = \frac{m_2 - m_0}{m_1 - m_0} \cdot \rho_{\text{W}} \quad (1.1)$$

Es bedeuten: ρ_{FL} , ρ_{W} : Dichte Flüssigkeit, Wasser; $m_{0,1,2}$: Masse des leeren, des mit Wasser, des mit der zu untersuchenden Flüssigkeit gefüllten Pyknometers

³⁾ Vgl. DIN 1306:1984-06, Dichte; Begriffe, Angaben.

Nichtflüchtige Anteile (nfA) in Lacken werden in der Literatur auch als Festkörper (FK) oder Einbrennrückstand bezeichnet. Ihre Bestimmung ist z. B. im Rahmen der Minderung von Emissionen organischer Bestandteile während des Lackierprozesses durch einen sogenannten spezifischen Reduzierungsplan von Bedeutung (31. BImSchV). Zugleich werden die Gebrauchseigenschaften von der Dicke des trockenen Lackfilms mitbestimmt. Ein geringer FK-Anteil führt zwangsläufig zu niedrigeren Schichtdicken des trockenen Lacks auf der Oberfläche und verändert damit ggf. dessen Beständigkeit gegenüber chemischen und mechanischen Beanspruchungen. Eine Definition der nichtflüchtigen Anteile erfolgt in DIN EN ISO 4618 als „*Masserückstand, der nach dem Verdunsten (flüchtiger Bestandteile - Anm. des Verfassers) unter festgelegten Bedingungen erhalten bleibt.*“ Seine Bestimmung ist in DIN EN ISO 3251 beschrieben. Entscheidend sind dabei die Temperatur und die Trocknungsdauer, die je nach Art des zu untersuchenden Lacks variieren, bei denen ein Verdunsten flüchtiger Bestandteile aus der Probe in einem Wärmeschrank erfolgt. Übliche Prüfbedingungen liegen bei 105 °C über eine Zeitdauer von 60 Minuten bei einer Einwaage von $(1 \pm 0,1)$ g, wobei diese Bedingungen zwischen Lieferanten und Verarbeiter vereinbart werden können. Die Berechnung erfolgt, indem die Masse der Einwaage des zu untersuchenden Stoffs durch die Masse nach der Trocknung dividiert und mit 100 multipliziert wird. Entsprechend des Anteils an nichtflüchtigen Anteilen erfolgt häufig eine Unterteilung in sogenannte Low oder Medium Solids (Festkörperanteil bis ca. 55%) und High Solids (Festkörperanteile 55 – 80%), der allerdings keine verbindliche Definition zugrunde liegt.

Viskosität und Auslaufzeit

Die Viskosität ist ein Maß für die innere Reibung einer Flüssigkeit. Je höher die Viskosität, umso dickflüssiger ist das jeweilige Fluid. Die physikalischen Zusammenhänge beschreibt das Newton'sche Parallel-Plattenmodell (Bild 1.4a). Durch das planparallele Verschieben der oberen gegenüber der unteren Platte entstehen in der dazwischen befindlichen Flüssigkeit lamellenförmige Schichten, zwischen denen sich ein Geschwindigkeitsgradient ausbildet, sodass sich diese gegeneinander verschieben. Gleichzeitig bewirkt die Kraft F das Entstehen einer Schubspannung. Der Gradient der Geschwindigkeit im Inneren der Flüssigkeit senkrecht zur Strömungsrichtung wird als Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ bezeichnet, die Viskosität mit η und die Schubspannung mit τ^4 . Damit lautet das Newton'sche Fließgesetz:

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (1.2)$$

Für diese Stoffe stellt die Viskosität eine Konstante dar, die nur von Temperatur und Druck abhängig ist. Den Temperatureinfluss beschreibt nachstehende Beziehung, bei der T_0 und T_1 die Temperatur im Ausgangs- bzw. Endzustand beschreiben und a ein stoffabhängiger Koeffizient ist:

$$\eta(T_1) = \eta(T_0) \cdot e^{-a(T_1 - T_0)} \quad (1.3)$$

Die meisten Beschichtungsmaterialien weichen von der Annahme Newton'schen Verhaltens ab und zeigen kein proportionales Verhalten zwischen Schubspannung und Scher-

⁴⁾ Siehe dazu DIN 1342-1:2003-11, Viskosität Teil 1: Rheologische Begriffe.

geschwindigkeit. Damit verliert die Viskosität ihre Eigenschaft, eine Stoffkonstante zu sein. Bild 1.4b zeigt einen Überblick ausgewählter Fließanomalien. Thixotropes Verhalten ist für Lackierprozesse von besonderer Bedeutung.

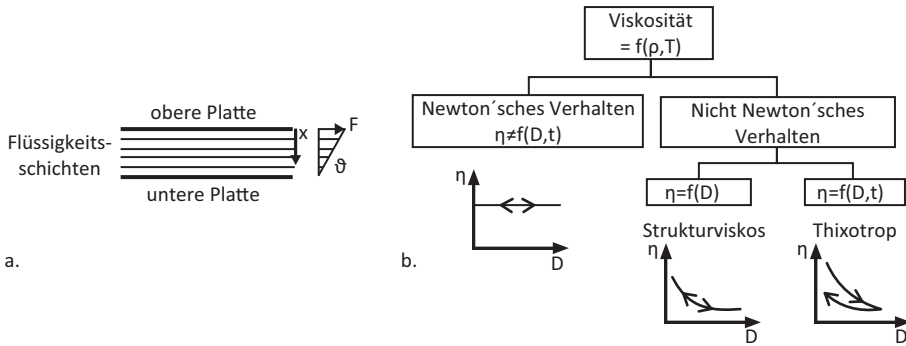


Bild 1.4 a. Newton'sches Fließverhalten, b. ausgewählte Fließanomalien

Abweichungen von Sollwerten im Fließverhalten können zu Fehlern im Beschichtungsprozess führen. Unter industriellen Bedingungen erfolgt in der Regel mittels eines Auslaufbechers nach DIN EN ISO 2431 die Bestimmung der Auslaufzeit in Sekunden. Dabei muss beachtet werden, dass Messungen mit unterschiedlichen Durchmessern der Auslaufdüsen (4 mm, 5 mm, 6 mm u. a.) erfolgen können. Diese müssen entsprechend der Messaufgabe zuvor definiert sein. Der Einsatz anderer Auslaufbecher (z. B. nach der zurückgezogenen Norm DIN 53211) führt zu Unterschieden in den gemessenen Werten. Es muss deshalb eine genaue Abstimmung der einzusetzenden Messeinrichtung für die Messung des zu untersuchenden Materials erfolgen. Die Konstruktion des Bechers bewirkt eine annähernd laminare Strömung in der Auslaufdüse. Für die Messung wird die Auslaufdüse zugehalten und der Auslaufbecher vollständig gefüllt. Im Moment des Öffnens der Düse wird vom Anwender mittels einer Stoppuhr die Zeit gemessen, bis die auslaufende Flüssigkeit das erste Mal abreißt. Mit diesem Verfahren können weder die tatsächliche Viskosität noch weitere rheologische Eigenschaften bestimmt werden. Die maximal erreichbare Scherrate liegt beim Auslaufbecher bei maximal 200 s^{-1} . Damit ist u. a. das thixotrope Verhalten von Wasserlacken nicht messbar. Mithilfe eines Rotationsviskosimeters ist es möglich, das komplexe rheologische Verhalten eines solchen Lacks zu beschreiben. Bei diesem Verfahren dreht sich ein Rotationskörper mit steigender Drehzahl in einem mit Lack gefüllten Behälter. Aus der gemessenen Kraft kann die Viskosität berechnet werden.⁵ Es ist möglich die mittels Rotationsviskosimeters gemessene Viskosität in Auslaufsekunden umzurechnen:

$$t = \frac{16 \cdot V \cdot L \cdot \eta}{\pi \cdot r^4 \cdot \rho \cdot g \cdot h_0} \quad (1.4)$$

Es bedeuten: t: Auslaufzeit; V: Volumen des Auslaufbechers; L: Länge der Auslaufdüse; η : Viskosität; r: Radius der Auslaufdüse; g: Erdbeschleunigung; h_0 : Füllhöhe

⁵⁾ Eine umfassende Darstellung der Messmethoden sowie ihrer Vor- und Nachteile findet sich in [MEZ 2016].

Bild 1.5 zeigt einen Vergleich des rheologischen Verhaltens eines UV-Lacks gegenüber einem Wasserlack.

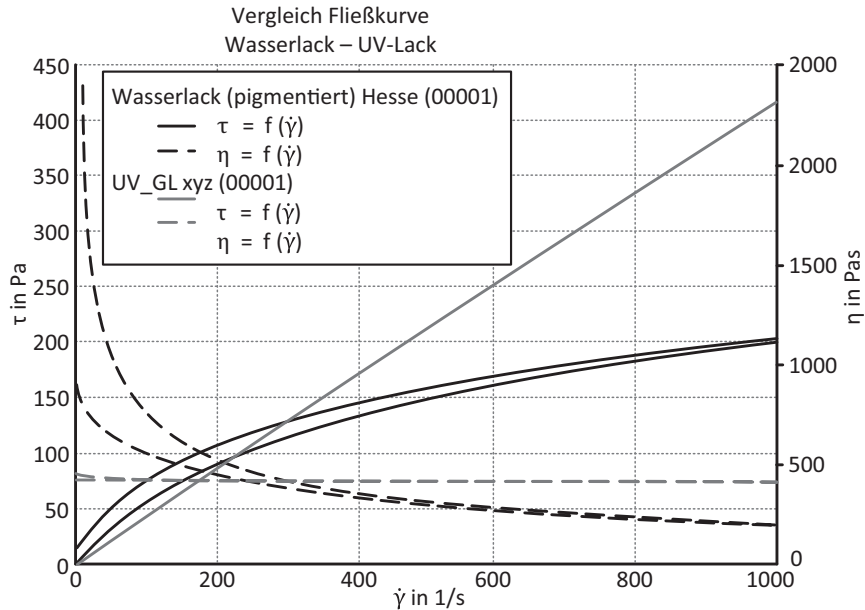


Bild 1.5 Vergleich der Fließkurven eines pigmentierten Wasserlacks und eines UV-Lacks (Messgerät: HAAKE Mars 60, 25 °C, Messgeometrie C35 2°/Ti – 02150498)

Oberflächenspannung

Oberflächen- und Grenzflächenphänomene sind beim Lackieren, Kleben oder Drucken hinsichtlich Haftung und Benetzung von Bedeutung. Als Oberfläche wird in diesem Zusammenhang die an ein Gas grenzende sichtbare Fläche eines Festkörpers oder einer Flüssigkeit verstanden, während die Kontaktfläche zwischen zwei – z.B. festen und flüssigen Stoffen – als Grenzfläche bezeichnet wird.

Ursache der Oberflächenspannung sind zwischenmolekulare Wechselwirkungen, die an der Oberfläche einer Flüssigkeit oder eines Festkörpers mit Molekülen des umgebenden Gases stattfinden. Daraus resultiert eine nach innen, senkrecht zur Oberfläche gerichtete Kraft. Die Bewegung von Molekülen aus dem Inneren an die Oberfläche erfordert eine Arbeit, die gegen die Resultierende der Molekülkräfte gerichtet ist. Diese Arbeit bezogen auf die dabei gebildete Fläche ist die Oberflächenspannung bzw. -energie. Sie stellt eine Materialkenngröße dar, die ursächlich dafür ist, ob eine feste Oberfläche von einer Flüssigkeit (z.B. Lack) benetzt wird oder abperlt. Die Oberflächenspannung von Flüssigkeiten lässt sich direkt, die von Festkörpern nur indirekt messen. Dazu stehen verschiedene Methoden zur Verfügung, die alle darauf basieren, dass der Winkel einer Flüssigkeit bekannter Oberflächenspannung bestimmt wird, der beim Aufbringen auf die Festkörperoberfläche entsteht (Bild 1.6). Der Winkel zwischen der Tangente der Tropfen- und der Festkörperoberfläche wird als Benetzungs- oder Randwinkel bezeichnet. Der Randwinkel

ist ein Maß für die Benetzung. Für seine Messung ist es erforderlich, dass die Prüf­flüssigkeit eine höhere Ober­flächen­spannung aufweist als der Festkörper. Dies verdeutlicht nach­stehende Gleichung zur Berechnung der Grenz­flächen­spannung nach YOUNG wie folgt [NEU 1999]:

$$\sigma_{sl} = \sigma_s - \sigma_l \cdot \cos \Theta \quad (1.5)$$

Es bedeuten: σ_{sl} : Grenz­flächen­spannung in mJ/m^2 ; σ_s : Festkörperober­flächen­spannung in mJ/m^2 ; σ_l : Flüssigkeitsober­flächen­spannung in mJ/m^2 ; Θ : Kontaktwinkel in Grad

Sind beide Ober­flächen­spannungen gleich, findet eine voll­ständige Benetzung statt. Bei Randwinkeln $< 30^\circ$ kann eine gute Benetzung erwartet werden (Bild 1.6b).

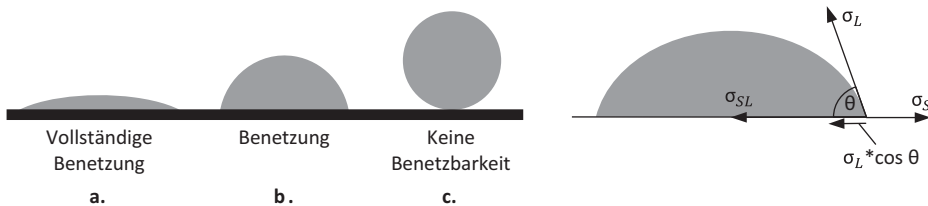


Bild 1.6 Physikalische Grundlagen zur Messung der Ober­flächen­spannung

Bei Holzober­flächen wird der Randwinkel durch die Werkstoffstruktur (z. B. Faserrichtung, Porigkeit) sowie ggf. durch die bei der Bearbeitung entstandenen Strukturen (z. B. Rauigkeit) beeinflusst. Um reproduzierbare Mess­er­gebnisse hinsichtlich Kontaktwinkel und weiterer physikalischer Ober­flächen­eigenschaften zu erhalten, sind Vor­be­handlungen der Proben (z. B. eine Verdichtung der Holz­zellen an der Außen­fläche) sinnvoll.

Zur Messung der Ober­flächen­spannung von Flüssigkeiten werden verschiedene Methoden genutzt. Dazu gehören:

- Ringmethode: Ein an einer Waage befestigter Ring wird in die zu messende Flüssigkeit eingetaucht und im Anschluss langsam aus dieser herausgezogen. Die Kraft beim Abriss der sich dabei bildenden Lamelle wird gemessen.
- Wilhelmy-Plättchen-Methode: Ein Platin-Plättchen bekannter Abmessungen wird auf die Flüssigkeit aufgesetzt, wobei sich eine Lamelle bildet. Das Plättchen wird langsam aus der Flüssigkeit gezogen und die Kraft gemessen, bei der die Lamelle reißt.
- Methode des hängenden Tropfens⁶⁾: Mit einem Spritzenmodul wird ein Tropfen der zu prüfenden Flüssigkeit aus einer Nadel dosiert. Die sich ausbildende Tropfenform wird im Wesentlichen von der Erdanziehungskraft und der Ober­flächen­spannung bestimmt, die damit abhängig vom Gleichgewichtszustand der beiden Kräfte ist. Die Ober­flächen­spannung kann mit der Young-Laplace-Gleichung berechnet werden [NEU 1996], (Bild 1.7).

⁶⁾ Siehe DIN 55660-3:2011-12, Beschichtungsstoffe – Benetzbarkeit – Teil 3: Bestimmung der Ober­flächen­spannung von Flüssigkeiten mit der Methode des hängenden Tropfens.

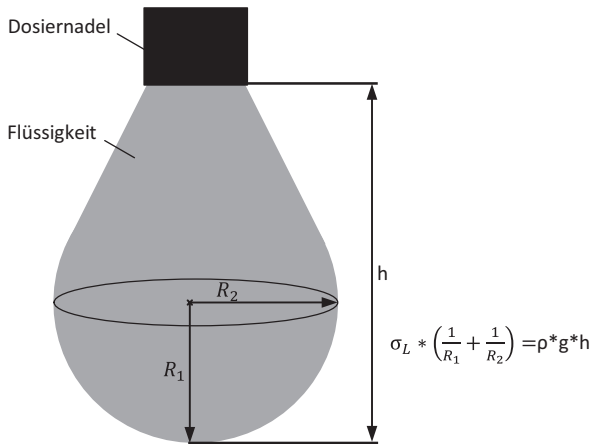


Bild 1.7 Bestimmung der Oberflächenspannung von Lacken nach der Methode des hängenden Tropfens

Um die Oberflächenspannung an festen Körpern häufig zu messen, stehen ebenfalls verschiedene Methoden zur Verfügung. Für die praktische Anwendung ist insbesondere die Methode des liegenden Tropfens (Sessile Drop Methode) geeignet. Dabei wird eine Flüssigkeit bekannter Oberflächenspannung mittels einer Kanüle auf die zu untersuchende Oberfläche aufgebracht und im Anschluss der Kontaktwinkel gemessen. Um einen messbaren Randwinkel zu errechnen, muss die Oberflächenspannung der Messflüssigkeit größer als die des Festkörpers sein. Man unterscheidet dabei:

- statische Randwinkelmessung: Ein Tropfen Messflüssigkeit wird aufgetragen und anschließend der sich kaum ändernde Randwinkel gemessen.
- dynamische Randwinkelmessung: Der Tropfen wird stetig dosiert. Nimmt sein Volumen zu, breitet er sich auf der Oberfläche aus – Benetzung –, und es wird der sogenannte Vorrückwinkel gemessen; wird das Volumen verkleinert – Entnetzung – kann der sogenannte Rückzugswinkel gemessen werden. Die tatsächliche Oberflächenspannung liegt zwischen diesen beiden Werten.

In der Industrie greift man zur Messung der Oberflächenenergie von Festkörpern häufig auf Testtinten oder -stifte entsprechend ISO 8296 zurück. Dabei handelt es sich um Prüf- flüssigkeiten mit einer definierten Oberflächenspannung. Sie sind z. B. im Bereich von 30 mN/m bis 44 mN/m in 2er Schritten verfügbar. Sofern eine vollständige Benetzung der Oberfläche durch die Tinte erfolgt (d. h. der aufgebrauchte Strich steht länger als 3 Sekunden ohne sich zusammenzuziehen), ist die Oberflächenenergie der Oberfläche gleich oder größer als die der Prüftinte. Andernfalls weist sie einen kleineren Wert auf⁷.

⁷⁾ Siehe z. B. Werksnorm IHD-W-459. Die Norm ist frei verfügbar unter www.decorfinishfolien.de.

Applikationseigenschaften

Zur Beurteilung der Eigenschaften von Beschichtungen während der Bearbeitung bzw. zur Beurteilung der Effektivität einzelner Verfahren werden unterschiedliche Methoden angewandt, die teilweise in Normen beschrieben sind.⁸

Durch das gezielte Erzeugen unterschiedlicher Lackdicken (streifen- oder keilförmig) können die Grenzen für eine sichere Prozessführung beurteilt werden. So kann das Verlaufen (Ausgleich von Unebenheiten im Lackfilm, die bei der Applikation entstehen) bzw. Ablaufen (Lackierfehler, der zu einer unregelmäßigen Oberfläche führt, wie z. B. Läufer oder Gardinen, vor allem an senkrechten Flächen oder Kanten) unterschiedlicher Lacke und Auftragsmengen beurteilt werden. Bei Prüfrakeln zum Auftrag unterschiedlicher Lackdicken gilt die Nassschichtdicke (Spalthöhe), bei der kein vollständiges Ablaufen in die darunterliegende dünnere Schicht erfolgt, als Grenze der ablaufreifen Benetzung (Ablaufindex).

Weiterhin erlaubt der Vergleich unterschiedlicher Lackfilmdicken eine Beurteilung, wann eine kritische Nasslackdicke hinsichtlich Farbstabilität und Deckvermögen (bei pigmentierten Lacken), dem Anlöseverhalten (ungewolltes Lösen der oberen Schichten eines Grundlacks bei einer Überlackierung), der Oberflächenstruktur oder der Benetzung erreicht ist. Dazu werden charakteristische Bewertungsparameter grafisch gegen die Dicke des Lackfilms aufgetragen und das entstehende Bild beurteilt. Parameter können z. B. die Helligkeit (siehe Unterabschnitt: Beurteilung von Farben) oder die Wellenlänge der Oberflächenstruktur sein. Analog kann die kritische Schichtdicke, die zum Auftreten von Kocher oder Nadelstichen⁹ führt, ermittelt werden. Voraussetzung für den Erfolg all dieser Untersuchungen ist, dass die Trocknungsprozesse konstant sind und die tatsächlichen Gegebenheiten (realer Prozess) widerspiegeln.

Nass- und Trockenfilmdicke

Die Kontrolle der auf das Bauteil aufgetragenen Menge an Lack (Nassfilmdicke) ist für die weitere Bearbeitung (Trocknung, Zwischenschliff) und die Gebrauchseigenschaften (z. B. Beständigkeit gegen chemische Beanspruchung) von Bedeutung. Wesentliche Messverfahren sind im Normenwerk beschrieben.¹⁰ Die gravimetrische Methode, bei der aus der Massedifferenz von unbeschichteter und beschichteter Probe eine Berechnung der Schichtdicke erfolgt, ist für saugfähige Untergründe wie z. B. Holz nur bedingt geeignet. Bild 1.8 zeigt typische Messprinzipien. Bei einem Messkamm erfolgt die Bestimmung der Lackdicke durch Benetzung der zwischen den Aufsetzzähnen (Referenzebene) befindlichen Messzähne. Die Auflösung dieses Verfahrens ist sehr grob, sodass die Filmdicke mehr geschätzt wird. Alternativ erfolgt die Messung mit einem Doppelrad (Bild 1.8b), bei dem die Benetzung einer exzentrischen Innenscheibe, die zwischen zwei konzentrischen Rädern gelagert ist, zur Bestimmung herangezogen wird. Die beträgt hier 2,5% des jeweiligen Skalenendwerts. Bei beiden Verfahren ist das Ergebnis stark vom Zeitpunkt der Messung abhängig.

⁸ Siehe z. B. DIN EN ISO 28199:2010-01, Beschichtungsstoffe – Beurteilung applikationsbedingter Eigenschaften von Beschichtungssystemen oder DIN EN 13966:2003-09, Bestimmung des Auftragswirkungsgrades von Spritz- und Sprüheräten für Beschichtungsstoffe.

⁹ Kocher entstehen im Lackfilm durch Ausgasungen (Luft, Lösemittel u. a.). Die Verfestigung des Lacks verhindert deren Aufplatzen und Verlaufen. Nadelstiche erscheinen als Poren im Lack. Die Ursachen sind komplex.

¹⁰ Siehe z. B. Din EN ISO 2808:2007-05, Beschichtungsstoffe – Bestimmung der Schichtdicke.

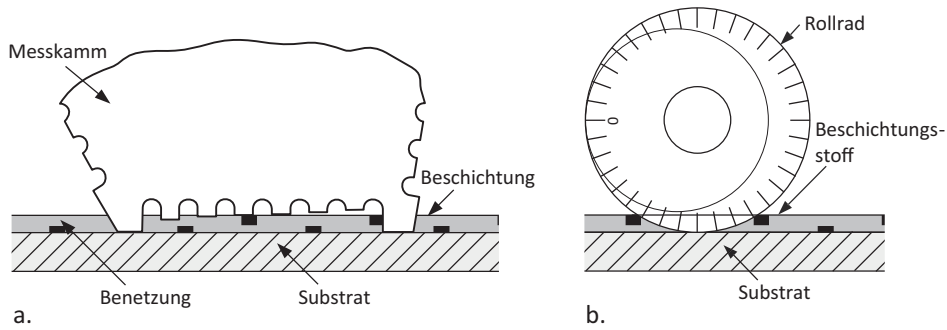


Bild 1.8 Mechanische Verfahren zur Bestimmung der Nassfilmdicke (links: Messkamm; rechts: Doppelrad) nach DIN EN ISO 2808

Andere Verfahren (z. B. Ultraschall) können bei Untergründen aus Holz erhebliche Abweichungen von den realen Werten zeigen.

Für die Messung der Trockenfilmdicke stehen zerstörende und nicht zerstörende Verfahren zur Verfügung, wobei die physikalischen Eigenschaften des Holzes wiederum Grenzen setzen. Grundsätzlich eignen sich Ultraschallmessgeräte, die neben der Gesamtschichtdicke auch die Bestimmung einzelner Schichten erlauben. Deren Messprinzip besteht darin, dass der Ultraschall an einer Schichtgrenze teilweise reflektiert wird. Der andere Teil durchläuft die neue Schicht, bis sich an einer weiteren Grenzfläche der Vorgang wiederholt. Die auf diese Weise entstehenden dickenabhängigen Phasenverschiebungen der reflektierten Wellen werden zur Messung genutzt. Grobporige Hölzer und lösemittelhaltige Lacke können größere Messabweichungen hervorrufen. Genutzt werden als zerstörende Verfahren u. a.:

- Keilschnittverfahren: Einbringen eines definierten keilförmigen Schnitts bis zum Trägermaterial (Substrat); Berechnung der Schichtdicke aus der geometrischen Beziehung am entstandenen Keil (Bild 1.9a)
- Keilschliffverfahren: definierter keilförmiger Anschliff von oben, wodurch eine horizontale „Ausbreitung“ der Lackfilmdicke auf der Fläche erfolgt, die eine Vergrößerung um den Faktor 50 bewirkt (Bild 1.9b), [LUK 2013]
- Anschliffverfahren: Anschliff der Schmalfläche einer Probe mit feiner werdendem Schleifpapier (P 200 → P 500 → P 1000 → P 3000) und Ausmessen unter einem Mikroskop (Bild 1.9c)

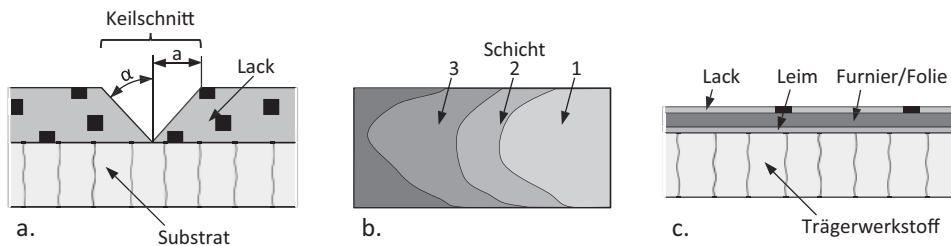


Bild 1.9 Zerstörende Verfahren zur Bestimmung der Lackfilmdicke: a. Keilschnittverfahren, b. Keilschliffverfahren, c. Anschliffverfahren

Filmbildung und Trocknungsgrad

Unter Filmbildung wird der Übergang des flüssigen Beschichtungsmaterials in einen festen Zustand, der die erforderlichen Gebrauchseigenschaften aufweist, verstanden. Um eine solche zu erreichen, muss das Beschichtungsmaterial einen Rohstoff enthalten, der aufgrund seiner Beschaffenheit bzw. Zusammensetzung einen geschlossenen Film bilden kann. Dieser wird auch als Filmbildner oder Bindemittel bezeichnet [MIS 2007]. Dieser Vorgang kann sowohl als physikalische Trocknung (z.B. CN-Lacke) oder als chemische Härtung – auch als Vernetzung bezeichnet (z.B. PUR-Lacke, strahlenshärtende Lacke) – oder als Kombination aus beiden erfolgen. Die physikalische Trocknung ist dabei durch eine Verdunstung des Lösemittels gekennzeichnet, während die chemische Härtung durch Änderungen im molekularen Gefüge der Filmbildner charakterisiert ist [GOL 2002]. Bei der Härtung werden erst durch chemische Reaktionen zwischen gleichartigen (z.B. Strahlenshärtung) oder unterschiedlichen Molekülen (z.B. Alkydharz-, Melamin oder Epoxidharzsysteme) mit kleinen bzw. mittleren Molekülmassen neue große Moleküle bzw. Molekülnetzwerke erzeugt¹¹. Tabelle 1.1 gibt einen Überblick möglicher Methoden zur Beurteilung der Filmbildung bei einem konventionell physikalischen und einem chemisch vernetzenden, strahlenshärtenden System.

Tabelle 1.1 Verfahren zur Beurteilung von Filmbildungsprozessen

Messprinzip	Eignung zur Bewertung der Filmbildung	
	konventionell trocknend	strahlenshärtend
Viskositätsänderung	+	-
Änderung der Oberflächenspannung	+	(+)
Trockenzeitrekorder	+	-
Physikalische Kenngrößen (z. B. Bandow-Wolff-Verfahren, Stapelfestigkeit, Pendeldämpfung)	+	+
Anlöseverhalten	+	+
Anfärbeverhalten	+	+
Spektroskopie	+	+

+: geeignet, -: nicht geeignet, (+): bedingt geeignet

Trocknungsprüfungen werden in verschiedenen Normen beschrieben¹². Der Trocknungsprozess sollte dabei den realen Bedingungen weitgehend entsprechen, um aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen. Phänomenologisch werden z.B. die Zustände staubtrocken, griffest, durchgetrocknet und stapelfähig verwendet.

Von technologischem Interesse ist die Bestimmung der *Stapelfähigkeit* (Blockfestigkeit), die eine Beurteilung der Trocknungszeit dahingehend erlaubt, ob der erreichte Trocknungsgrad ausreichend ist, um zwei beschichtete Flächen, wenn sie unter Druck miteinander in Berührung kommen, ohne auftretende Haftungen und daraus resultierende Schäden stapeln zu können. Dazu werden zwei Flächen kreuzweise übereinander gelagert und für

¹¹) Siehe Pkt. 2.74 in DIN EN ISO 4618:2015-01, Beschichtungsstoffe – Begriffe.

¹²) Siehe DIN EN ISO 9117 Teil 1–6, Beschichtungsstoffe – Trocknungsprüfungen.

eine bestimmte Zeit mit einem Gewicht teilweise bei erhöhten Temperaturen (z. B. 60 °C mit und ohne Befeuchtung) beschwert. Im Anschluss erfolgt die Beurteilung nach dem Trennen der Kontaktfläche hinsichtlich eingetretener Beschädigungen¹³.

Eine relativ differenzierte Aussage über den erreichten Trocknungsgrad erlaubt das abgewandelte *Bandow-Wolff-Verfahren*, das sieben Trocknungsgrade unterscheidet. Dabei werden zunächst Glasperlen auf die Oberfläche aufgetragen, die sich rückstandslos mit einem Pinsel entfernen lassen müssen (Trocknungsgrad 1). In der Folge wird die Prüffläche mit einer Papierscheibe belegt und diese mit einer Gummischeibe abgedeckt. Auf diese kommen für eine Minute Gewichte, wobei nach Ablauf der Zeit und Entfernung des Gewichts die Probe aus 30 mm Höhe auf eine Unterlage fällt. Je nachdem ob das Papier an der Beschichtung haftet und Veränderungen auf deren Oberfläche erkennbar sind oder nicht, erfolgt die Einstufung zu einem Trocknungsgrad. Die Belastung steigt dabei von 20 g, über 200 g auf 2 kg und 20 kg an. Zur Bestimmung des viskoelastischen Verhaltens und damit indirekt des Vernetzungsgrads von Lacken eignet sich auch die Methode der *Pendeldämpfung*¹⁴. Ihre Anwendung für diesen Zweck wurde schon frühzeitig in der Literatur beschrieben (z. B. [SCH 1977]). Das Messprinzip besteht darin, dass auf eine ausgehärtete Lackschicht die Stützkugeln eines Pendels aufgesetzt werden, das im Anschluss ausgelenkt wird. Die Schwingungsdauer bzw. die Anzahl der Schwingungen zwischen der Auslenkung aus dem Lot (6° beim König- oder 12° beim Persoz-Pendel) bis zum Erreichen eines Grenzwerts der Schwingungsamplitude (Unterschreitung der Auslenkung von 3° bzw. 4°) gestattet eine Aussage über die Härte der Beschichtung, die allerdings von der Dicke der Lackschicht und dem Substrat beeinflusst werden kann. Von der DIN EN ISO 1522 werden deshalb als Substrat eine Glasplatte sowie eine Mindestschichtdicke von 30 µm vorgegeben. Je weicher der untersuchte Lackfilm ist, desto größer ist die Dämpfung und umso geringer die Schwingungsdauer.

Zur Beurteilung des Aushärtungsgrads eignen sich weiterhin diverse Härtemessverfahren¹⁵, die durch das Eindringen eines Prüfstempels (z. B. Pyramide, Kugel, Kegel) in die Lackschicht charakterisiert sind. Für reproduzierbare Messungen sollte die Eindringtiefe nicht größer als 1/12 der Filmdicke sein [GOL 2002]. Ein solches Verfahren ist die Bestimmung der *Universalhärte* nach MARTENS. Dabei dringt ein pyramidenförmiger Diamant definierter Geometrie innerhalb bestimmter Kraftbereiche in den Lack ein, wobei die Kraft beim Eindringen und Herausziehen gemessen wird. Das Verhältnis von Kraft zu Eindringtiefe dient zur Bestimmung der Härte, deren Aufzeichnung über die Prüfdauer gestattet neben einer Aussage bezüglich der Aus- bzw. Durchhärtung eine Beurteilung der Anteile plastischer und elastischer Verformungen (Bild 1.10). Je tiefer das Eindringen des Stempels in die Beschichtung, desto weicher der Lackfilm. Allerdings werden mitunter gegenläufige Ergebnisse zum Pendeldämpfungsversuch beobachtet.

Zur Beurteilung des Aushärtungsgrads von Lacken eignen sich auch die Verfahren der Spektroskopie, die auf funktionelle chemische Gruppen ansprechen und deren strukturelle Veränderungen widerspiegeln. Dazu wird eine elektromagnetische Strahlung – z. B.

¹³ Siehe auch DIN SPEC 91033:2014-02, die allerdings auf Anwendungen im Außenbereich abstellt.

¹⁴ Siehe DIN EN ISO 1522:2007-04, Beschichtungsstoffe – Pendeldämpfungsprüfung.

¹⁵ Siehe DIN EN ISO 14577: 2012-04, Instrumentierte Eindringprüfung zur Bestimmung der Härte und anderer Werkstoffparameter.

nach deren Wellenlänge – zerlegt. Die Verteilung der Intensität der gemessenen physikalischen Größe ist das sogenannte Spektrum.

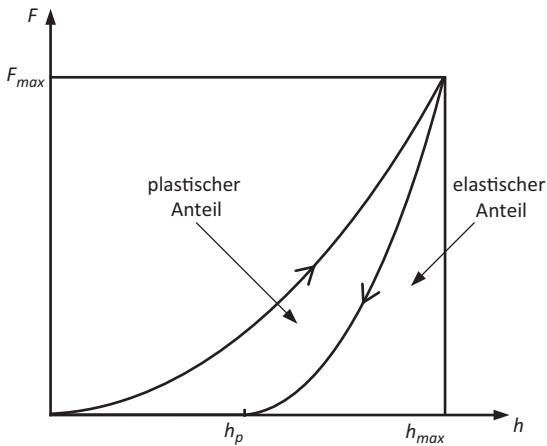


Bild 1.10 Bestimmung des plastischen und elastischen Anteils einer Beschichtung beim Universalhärteverfahren

Zur Analyse von Lackfilmen kommen die verschiedenen Verfahren der Absorptionsspektroskopie zum Einsatz. Eines davon ist die ATR-Spektroskopie (Attenuated Total Reflection), die den Effekt der abgeschwächten Totalreflexion nutzt. Sie ermöglicht die Untersuchung und Charakterisierung von Proben, die mit einfacher Transmissionstechnik nicht zugänglich wären. Physikalische Grundlage sind die Effekte bei der Reflektion von Strahlung an der Grenze zwischen zwei optisch verschieden dichten Medien. Auch bei Totalreflektion dringt ein Teil der elektromagnetischen Energie infolge der Welleneigenschaften des Lichts in das optisch dünnere Medium ein und wird dadurch geringfügig versetzt. Die Aussagen begrenzen sich deshalb auf den Bereich der Eindringtiefe der infraroten Strahlung in den Lack, die berechnet werden kann [POP 1980]. Dabei stellt das Messergebnis einen Mittelwert über eben diese Eindringtiefe dar. Das Verfahren eignet sich sehr gut zur Beurteilung des Aushärtungsgrads an Lackoberflächen. Ein Aushärtungsprofil über die Lackschichtdicke kann durch schichtweises Abtragen, z.B. mittels eines Mikrotoms, und Messung an der jeweils neu entstandenen Oberfläche erfolgen. Zur Vertiefung wird auf die spezielle Fachliteratur verwiesen [GÜN 2003].

Haftung auf Untergründen

Eine mechanische Beanspruchung des Verbunds von Beschichtungsstoff und Trägerwerkstoff durch innere Spannungen oder äußere Krafteinwirkung kann zu deren Enthftung führen (z. B. Entfernen der Klebepunkte von Preisauszeichnungen). Dabei sind Adhäsionsversagen zwischen Beschichtungsstoff und Trägerwerkstoff oder Kohäsionsversagen im Beschichtungsstoff möglich. Ein häufig angewandtes Prüfverfahren zur Bestimmung der Haftfestigkeit ist die *Gitterschnittprüfung*. Dabei werden rechtwinklig zueinander sechs parallele – bis auf den Trägerwerkstoff durchgehende – Schnitte im Beschichtungsmaterial angebracht. Die Bewertung der Haftung erfolgt nach der Größe der aus dem Gitter heraus-

gebrochenen Teile in fünf Klassen. Eine Modifikation durch Aufbringen und anschließendes Abziehen eines Klebebands ist gebräuchlich.¹⁶ Dabei ist zu beachten, dass das Klebeband genau definiert werden muss, um vergleichende Aussagen – z.B. zwischen Vertragsparteien – zu gewährleisten. Weiterhin sind *Abreißprüfungen* üblich. Hierbei wird ein Prüfstempel aufgeklebt und in einer Prüfmaschine die Kraft bestimmt, die notwendig ist, einen Bruch (wie oben beschrieben) herbeizuführen. Eine Variante besteht im Drehen des Prüfstempels und der Messung des maximalen Drehmoments, aus dem sich eine Schubspannung berechnen lässt. Eine Beeinflussung des Versuchsergebnisses durch den verwendeten Klebstoff kann nicht immer ausgeschlossen werden. In der Literatur werden weitere Verfahren wie z.B. verschiedene Abschälmethoden beschrieben [GOL 2002].

Zur Analyse von Haftungsverlusten eignen sich die oben genannten Verfahren der Infrarotspektroskopie ebenfalls. Infolge der Wechselwirkung von IR-Strahlung mit den zu untersuchenden Stoffen werden deren chemische Bestandteile zu mechanischen Schwingungen angeregt, das ein stofftypisches Infrarotspektrum – quasi einen Fingerprint – erzeugt. Zur Auswertung kann auf umfangreiche Datenbanken zurückgegriffen werden.

Überarbeitbarkeit und Überlackierbarkeit

Unter Überlackierbarkeit bzw. Überarbeitbarkeit wird die Eigenschaft verstanden, auf eine Lackschicht weitere Schichten eines anderen bzw. des gleichen Beschichtungsstoffs auftragen zu können, ohne dass Schäden innerhalb des Beschichtungssystems auftreten. Dazu werden Probestellen nach der Trocknung der ersten Lackschicht mit Schleifpapier (P 400) auf einer Teilfläche angeschliffen, gereinigt und im Anschluss mit dem neuen Lack beschichtet. Sowohl während des Lackauftrags als auch während der anschließenden Trocknung werden das Auftreten von Lackierfehlern und die Zeit bis zu ihren evtl. Auftreten dokumentiert. Eine Untersuchung von Lackaufbauten mit mehreren Schichten ist analog möglich.¹⁷ Das Ergebnis ist sehr stark vom Prüfer sowie auch vom Trägerwerkstoff abhängig. Eine weitere einfache Prüfung der Voraussetzungen für eine erfolgreiche Überlackierung ist die bereits beschriebene Messung der Oberflächenenergie mittels Prüftinten (Richtwert: $> 36 \text{ m} \cdot \text{N/m}$).

Beurteilung von Farben

Der Mensch verfügt über keine objektive „Farbskala“, wodurch sich die Beurteilung und Kommunikation von Farbeindrücken problematisch gestalten kann. Die im menschlichen Auge entstehende Farbempfindung wird durch Strahlung im Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichts (380 nm bis 780 nm) ausgelöst. Die Wahrnehmung von Farben hängt von der Strahlungsfunktion der Lichtquelle, den Absorptions-, Reflexions- und Transmissionseigenschaften des beleuchteten Körpers (Remission) sowie der spektralen Empfindlichkeit des Empfängers ab. Insofern ist der menschliche Farbeindruck auch von subjektiven Faktoren abhängig (Alter, Geschlecht, „Tagesform“). Das menschliche Auge verfügt über drei Reizzentren unterschiedlicher spektraler Empfindlichkeit (rot-, grün- und blauempfindlich). Von einem Körper mit einem wellenlängenabhängigen Reflexionsfaktor (R) wird Licht in Abhängigkeit der Strahlungsfunktion der Lichtquelle (S) als Produkt von S

¹⁶⁾ Siehe DIN EN ISO 2409:2013-06, Beschichtungsstoffe – Gitterschnittprüfung.

¹⁷⁾ Siehe DIN EN ISO 16927:2014-06, Beschichtungsstoffe – Prüfung der Überarbeitbarkeit und Überlackierbarkeit einer Beschichtung.

und R reflektiert, in den Reizzentren aufgenommen und vom menschlichen Gehirn zum Farbeindruck, bestehend aus den Normfarbwerten X,Y, und Z, verarbeitet. Um die Charakterisierung des Farbeindrucks zu objektivieren, sind deshalb die Lichtquellen von Farbmessgeräten genormt¹⁸ (z.B. D 65 für mittleres Tageslicht, TL 84 für Kaufhauslicht u.a.). Verbindet man die zu einer bestimmten Wellenlänge gehörigen spektralen Reflexionswerte zu einer Kurve, gibt diese eine Farbe eindeutig wieder¹⁹.

Mithilfe der Farbmatrik werden Maßbeziehungen zwischen Farben hergestellt, die bewirken, dass messtechnisch ermittelte Ergebnisse in der Größenordnung und der Relation dem visuellen Farbeindruck entsprechen. Die Normfarbwerte X, Y und Z bilden die Basis der Farbmatrik. Sie besitzen jedoch keine direkte Information (z. B. bzgl. Buntton, Farbsättigung usw.) über das gemessene Objekt. Zur Veranschaulichung erfolgt deshalb die Umrechnung in andere Farbsysteme. Das gebräuchlichste Farbsystem ist das CIEL*a*b*-System, das dem subjektiven Farbempfinden angepasst ist. Darin wird jede Farbe in einem durch die kartesischen Koordinaten L*, a* und b* aufgespannten Raum beschrieben (weitere Informationen siehe z. B. [GOL 2002]). Es wird dabei sichergestellt, dass gleiche Farbdifferenzen ΔL^* , Δa^* , Δb^* zwischen zwei Farben eines Farbtons der gleichen visuellen Empfindung entsprechen wie die analoge Differenz eines anderen Farbtons. Auf der a*-Achse wird die rot-grün und auf der b*-Achse die gelb-blau-Dimension dargestellt (Bild 1.11). Auf der von den Achsen aufgespannten Ebene können alle Farbtöne abgebildet werden. Am Achsenschnittpunkt befindet sich der sogenannte Unbuntpunkt. Durch diesen verläuft senkrecht zur beschriebenen Ebene die Helligkeitsachse L*. Mit zunehmendem Abstand von der L*-Achse steigt die Farbsättigung. Farborte, die kreisförmig um die L*-Achse angeordnet sind, besitzen die gleiche Buntheit C* (Chroma).

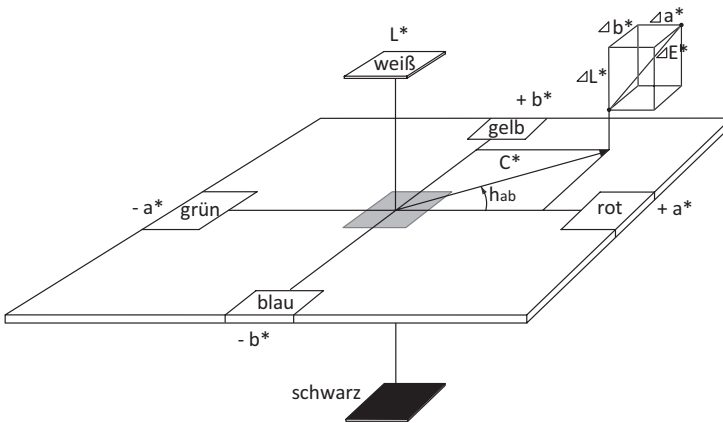


Bild 1.11 Das CIEL*a*b*-System nach [BER 2002]

¹⁸⁾ Siehe DIN 5033-7:2014-10, Farbmessungen – Messbedingungen für Körperfarben.

¹⁹⁾ Für die genormte Bewertung von Möbeloberflächen bzgl. ihres Reflexionsgrades bzw. der Farbe und eingesetzter Messmethoden siehe DIN EN 13721:2014-02, Möbel – Bewertung des Oberflächenreflexionsgrades.