



Leseprobe

Hansgeorg Hofmann, Jürgen Spindler

Verfahren in der Beschichtungs- und Oberflächentechnik

ISBN (Buch): 978-3-446-44141-5

ISBN (E-Book): 978-3-446-44183-5

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-44141-5>

sowie im Buchhandel.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b> .....	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>Aufbau und Eigenschaften oberflächennaher Werkstoffbereiche</b> .....	<b>15</b>
	2.1 Metallische Werkstoffe .....	16
	2.2 Nichtmetallisch anorganische Werkstoffe .....	20
	2.3 Nichtmetallisch organische Werkstoffe .....	23
	2.4 Vorgänge an Grenzschichten .....	26
	Literatur .....	29
<b>3</b>	<b>Vor-, Zwischen- und Nachbehandlung</b> .....	<b>30</b>
	3.1 Reinigen und Entfetten .....	35
	3.2 Verändern der Topographie .....	39
	3.2.1 Mechanische Verfahren .....	39
	3.2.1.1 Schleifen, Bürsten und Polieren .....	40
	3.2.1.2 Oberflächenbehandlung durch Strahlmittel .....	45
	3.2.2 Chemisch-physikalische Verfahren .....	46
	3.2.2.1 Beizen .....	46
	3.2.2.2 Elektropolieren .....	50
	3.2.2.3 Substrattypische Oberflächenvorbehandlung .....	52
	3.3 Spülen .....	54
	Literatur .....	58
<b>4</b>	<b>Abscheidung von Metallschichten</b> .....	<b>59</b>
	4.1 Beschichten durch ECD .....	63
	4.1.1 Einleitung .....	63
	4.1.2 Grundlagen der ECD-Technik mit Außenstrom .....	65
	4.1.3 Grundlagen der außenstromlosen Metallabscheidung .....	94
	4.2 Abscheidung aus der Gasphase .....	107
	4.3 Schmelztauschichten .....	114
	4.3.1 Feuerverzinken .....	114
	4.3.2 Feuerverzinnen .....	122
	4.3.3 Feualuminieren .....	123
	4.4 Metallspritzen .....	124
	4.4.1 Flamm-spritzen .....	126
	4.4.2 Lichtbogenspritzen .....	127

4.4.3	Plasmaspritzen	127
4.4.4	Auftragschweißen und Auftragslöten	129
4.5	Plattieren	129
4.5.1	Walzplattieren	130
4.5.2	Sprengplattieren	130
4.6	Chemisch-thermische Verfahren	132
4.6.1	Aluminieren	132
4.6.2	Inchromieren	132
4.6.3	Sherardisieren	133
4.7	Zink-Lamellenabscheidung	133
	Literatur	136
<b>5</b>	<b>Abscheidung nichtmetallischer Schichten</b>	<b>138</b>
5.1	Nichtmetallische organische Schichten	138
5.1.1	Bindemittel für Lacke	139
5.1.1.1	Polykondensate	139
5.1.1.2	Polyaddukte	146
5.1.1.3	Polymerisate und Copolymerisate	148
5.1.2	Weitere Lackkomponenten	150
5.1.2.1	Lösungsmittel	150
5.1.2.2	Additive	157
5.1.2.3	Pigmente	158
5.1.3	Vorgang der Filmbildung	161
5.1.4	Verfahren zur Herstellung organischer Beschichtungen	165
5.1.4.1	Nasslackieren	165
5.1.4.2	Pulverlackieren	172
5.1.5	Entlacken	175
5.2	Nichtmetallische anorganische Schichten	176
5.2.1	Emaillieren	176
5.2.2	Abscheidung nichtmetallischer anorganischer Schichten aus der Gasphase	181
	Literatur	185
<b>6</b>	<b>Verfahren zur Herstellung von Konversionsschichten</b>	<b>187</b>
6.1	Phosphatieren	188
6.2	Chromatieren	193
6.3	Brünieren	194
6.4	Metallfärben	196
6.5	Elektrolytische Oxidation von Aluminium	197
6.5.1	Schichtbildung	199
6.5.2	Eloxier-Verfahren	202
6.5.3	Färben von Eloxalschichten	205
	Literatur	208

<b>7</b>	<b>Strukturierte Oberflächen</b>	<b>210</b>
7.1	Verfahrensprinzipien	210
7.2	Strukturübertragung	212
7.2.1	Fotovorlage	212
7.2.2	Fotolithografie	214
7.2.3	Siebdruck	220
7.2.4	Ätzverfahren	221
7.3	Anwendung von Strukturierungstechniken	226
7.3.1	Struktur- und Formteilätzen	226
7.3.2	Drucken von Pasten	228
7.3.3	LIGA-Verfahren	230
7.3.4	Leiterplattentechnik	232
	Literatur	235
<b>8</b>	<b>Prüfmethoden für Schichten und Oberflächen</b>	<b>236</b>
8.1	Chemische Zusammensetzung	237
8.1.1	Elektronen-Strahl-Mikroanalyse (ESMA)	237
8.1.2	Atom-Absorptions-Spektroskopie (AAS)	238
8.1.3	UV- und IR-Spektroskopie	239
8.1.4	Kolorimetrie	242
8.2	Korrosionsverhalten	242
8.2.1	Kondenswasserklimaprüfung	242
8.2.2	Salzsprühnebeltest	242
8.2.3	Bewitterungsversuche	243
8.3	Schichtdicke	243
8.3.1	Mikroskopisches Verfahren	244
8.3.2	Coulometrisches Verfahren	245
8.3.3	Elektromagnetische Messung	246
8.3.4	Beta-Rückstreuverfahren	247
8.3.5	Röntgenfluoreszenz-Analyse (RFA)	247
8.3.6	Interferenzmessverfahren	248
8.3.7	Quarzmonitorverfahren	249
8.4	Haftung	249
8.4.1	Gitterschnittprüfung	250
8.4.2	Tiefungsprüfung nach ERICHSEN	251
8.4.3	Biegeversuch	251
8.4.4	Stirnabzugverfahren	251
8.4.5	Schälverfahren (Peel-Test)	252
8.5	Porendichte	253
8.5.1	Ferroxylytest	254
8.5.2	Test mit Diacetyldioxim (Dimethylglyoxim)	254
8.6	Morphologie und Topologie	255
8.7	Optisches Erscheinungsbild von Schichten	256
8.8	Benetzbarkeit	258
	Literatur	259

<b>9</b>	<b>Aspekte des Umweltschutzes und der Arbeitssicherheit . . . . .</b>	<b>261</b>
9.1	Regenerierung und Entsorgung von Reinigungs- und Entfettungslösungen . . . . .	261
9.1.1	Organische Lösungsmittel . . . . .	261
9.1.2	Verminderung, Regenerierung und Entsorgung alkalisch wässriger Reinigungslösungen . . . . .	263
9.1.3	Verminderung, Regenerierung und Entsorgung von wässrigen Reinigungslösungen, die Dispergiermittel enthalten . . . . .	264
9.1.4	Regenerierung und Entsorgung von wässrigen Beiz- und Neutralisierlösungen . . . . .	265
9.1.5	Regenerierung von Spülwässern . . . . .	265
9.1.5.1	Ionenaustauschkreislaufverfahren . . . . .	266
9.1.5.2	Kreislaufverfahren mit Verdampfung . . . . .	266
9.1.5.3	Umkehrosmose im Kreislaufverfahren . . . . .	267
9.1.5.4	Kaskadenspülverfahren . . . . .	267
9.1.6	Metallrückgewinnung aus wässrigen Lösungen . . . . .	268
9.2	Entgiftung von Abwässern . . . . .	268
9.2.1	Cyanidentgiftung . . . . .	268
9.2.2	Chromatentgiftung . . . . .	269
9.3	Organische Beschichtung und Umweltschutz . . . . .	269
9.4	Arbeitssicherheit . . . . .	270
	Literatur . . . . .	272
<b>■</b>	<b>Übergreifende Literatur . . . . .</b>	<b>274</b>
<b>■</b>	<b>Bildnachweis . . . . .</b>	<b>275</b>
<b>■</b>	<b>Sachwortverzeichnis . . . . .</b>	<b>276</b>

# Vorwort

Die Autoren des Buches „Verfahren der Oberflächentechnik“ können auf eine mehr als dreißigjährige Erfahrung in der Ausbildung von Studenten auf den Gebieten der Oberflächen- und Werkstofftechnik zurückgreifen. Dies ist eine wesentliche Voraussetzung dafür, ein Lehrbuch zu einem derart umfangreichen Gebiet, das Kenntnisse der Physik, Chemie und Werkstofftechnik vereinigt, vorzulegen.

Praktische Zielstellungen der Oberflächentechnik sind äußerst vielfältig – angefangen vom Korrosionsschutz über die Erhöhung der Verschleißfestigkeit einer Oberfläche bis hin zum gefälligen Äußeren. Unter dem Begriff Oberflächentechnik verstehen die Autoren aber nicht nur auftragende Techniken wie Schichtabscheidung, sondern darüber hinaus abtragende und umwandelnde Verfahren. Will man ihre Vielfalt nicht nur aneinanderreihend beschreiben, sondern ihre technologischen Gemeinsamkeiten und Unterschiede sowie die Ursachen der Schichteigenschaften verstehen, muss man auf den Kenntnissen zum spezifischen physikalischen und chemischen Verhalten der verschiedenen Substratoberflächen aufbauen und darauf zurückgreifen können. Die Autoren betrachten deshalb die Charakterisierung der Oberflächen einzelner Werkstoffgruppen als Ausgangspunkt für das Verständnis der behandelten Kapitel, wie

*Aufbau und Eigenschaften oberflächennaher Werkstoffbereiche, Vor-, Zwischen- und Nachbehandlung, Schichtabscheidung, Verfahren zur Herstellung von Konversionsschichten, strukturierte Oberflächen, Prüfmethode für Schichten und Oberflächen und Aspekte des Umweltschutzes und der Arbeitssicherheit.*

Es ist keinesfalls ausreichend, unter dem Begriff der Oberflächentechnik lediglich Vorbehandlung, Beschichten und Schichtumwandlung zu verstehen. Erst durch die Einbeziehung der Strukturierungsverfahren wird der heute erreichte Stand der Oberflächentechnik erfassbar. Die Autoren sehen in der Aufnahme eines solchen Kapitels einen bedeutenden Faktor zur Vermittlung eines Gesamtüberblicks der Oberflächentechnik. Ebenso trifft das auf die Kapitel der Prüfung von Schichteigenschaften und des Umweltschutzes und der Arbeitssicherheit zu.

Das Buch verfolgt keinesfalls das Ziel, die zu den genannten Verfahren eingesetzten Anlagen, Geräte usw. detailliert zu beschreiben. Technologische Angaben werden nur in dem für das Verfahrensverständnis notwendigen Umfang gebracht. Umso größeren Wert haben die Autoren auf die bildhafte Veranschaulichung der Veränderung von Werkstückoberflächen gelegt.

Die Abbildungen im Lehrbuch und auch die Visualisierung durch die Bildfolgen sowie zusätzliche Übungsaufgaben als Multiple-Choice-Tests mit Lösungen in [www.hs-mittweida.de/](http://www.hs-mittweida.de/bandotec)bandotec sollen unser Grundanliegen:

*Darstellung des Zusammenhangs zwischen grundsätzlichen chemischen und physikalischen Stoffeigenschaften und den erzielbaren Änderungen von Oberflächeneigenschaften,*

unterstützen.

Uns erscheint das Vorwort als eine geeignete Stelle, all denen herzlich zu danken, die in den zahlreich dem Verlag zugesandten Rezensionen ihre Meinungen, Kritiken und Anregungen mitgeteilt haben. Sehr viele Einschätzungen heben die gute Eignung des Buches als begleitende Literatur für das Studium der Beschichtungs- und Oberflächentechnik bei der Ausbildung von Ingenieuren hervor. Die darin enthaltenen Hinweise fanden Berücksichtigung. Uns ist aber auch bestätigt worden, dass das Anliegen dieses Buches eben nicht darin bestehen kann, ein Grundlagenlehrbuch vorzulegen. Hierfür gibt es genügend Spezialliteratur wie Lehrbücher der Elektrochemie, der Physikalischen Chemie, der Werkstoffwissenschaft, Kunststofftechnik, Schweißtechnik, Leiterplattentechnik, um nur einige zu nennen.

Es kann darum nicht Ziel sein, sämtliche Verfahren zur Beschichtung und der Oberflächentechnik hinsichtlich aller Aspekte der Verfahrensdurchführung und der erzielbaren Resultate umfassend in diesem Buch abzuhandeln. Gerade deshalb halten wir unser Buch für die Bachelorausbildung in den oben als Beispiel genannten Studiengängen für besonders geeignet.

Um die Aneignung des Stoffes zur erleichtern, sind am Ende eines jeden Kapitels Schwerpunkte und Literaturangaben zusammengefasst. In der hier vorliegenden Auflage haben die Autoren die Verfahren aktualisiert und durch neue bildliche Darstellungen ergänzt. Es ist uns deshalb ein Anliegen, Herrn Andreas Eysert für die metallografischen Aufnahmen und Herrn Enrico Gehrke für die REM-Bilder zu danken.

An dieser Stelle möchten sich die Autoren ausdrücklich für die gute Zusammenarbeit bei der Lektorin Frau Christine Fritsch für die aufmerksame Korrektur und bei Frau Katrin Wulst für die satztechnische Bearbeitung bedanken.

Mittweida im Sommer 2014

*Hansgeorg Hofmann  
Jürgen Spindler*

# 1

## Einführung

Jeder Gegenstand steht über seine Oberfläche in Wechselwirkung mit der Umgebung. Vordringend betrachten wir dabei die Oberfläche von Werkstücken. Sie kann sowohl organischer als auch anorganischer Natur sein. Hauptsächlich handelt es sich um Metall, Kunststoff, Keramik oder Glas. Als Konsequenz daraus folgt:

*Eine Oberfläche befindet sich immer in Wechselwirkung mit der Umgebung, verbunden mit einer Veränderung ihrer Eigenschaften. Durch eine gezielte Oberflächenveränderung lässt sich ein neues Oberflächenverhalten schaffen.*

Oberflächentechnik beinhaltet sowohl den Schichtauftrag auf eine geeignete Substratoberfläche als auch die gezielte Veränderung der vorhandenen Oberfläche.

Durch sie wird die Werkstückoberfläche so modifiziert, dass sich insbesondere definierte mechanische, optische, elektrische und chemische Eigenschaften ergeben, die das Grundmaterial ohne diese Behandlung nicht aufweisen würde.

Bei der Einteilung der Fertigungsverfahren nach DIN 8580: 2003-09 sind Urformen (1), Umformen (2), Trennen (3), Fügen (4), Beschichten (5) und Stoffeigenschaftändern (6) Hauptgruppen. Von den 6 Hauptgruppen berühren unser Anliegen im Wesentlichen die Hauptgruppen 3, 5 und 6, den Schwerpunkt aber bildet die Hauptgruppe 5 „Beschichten“.

Das Reinigen, das Entfetten, das Beizen und Ätzen ist eingeordnet in die Hauptgruppe 3 „Trennen“ und muss damit in einem Lehrbuch der Oberflächentechnik Berücksichtigung finden. Ausgangspunkt für die garantierbare Qualität einer durch ein Verfahren der Oberflächentechnik erreichten Erzeugnisoberfläche ist die Schaffung eines definierten Oberflächenzustandes.

*Stoffeigenschaftändern* bedeutet in der Oberflächenrandzone durch Umlagern, Aussondern oder Einbringen von Stoffteilchen Stoffeigenschaften verändern. Beim Stoffeigenschaftändern wird das Substrat in der Hauptsache durch mechanische und thermische Einwirkung in seiner Struktur bzw. dem Gefüge verändert, durch thermo-chemische Einwirkung bzw. durch Materialaufnahme von außen (Diffusion) in der Zusammensetzung. Die Hauptgruppe 6 bleibt Lehrbüchern zur Eigenschaftsänderung metallischer Werkstoffe vorbehalten.

Die Hauptgruppe 5 „Beschichten“ beinhaltet das Merkmal den „Zusammenhalt (zwischen Substrat und Schicht) vermehren“. Bei der Beschichtung wird das Material, das die gewünschten Eigenschaften aufweist, zusätzlich als Schicht auf den Grundkörper aufgebracht. Es entstehen Verbunde, wobei das Volumen des Werkstückes den Festigkeits- und Zähigkeitsanforderungen (mechanisches Verhalten) genügt, während die aufgetragenen Schichten darüber hinausgehende spezifische Anforderungen erfüllen müssen, wie Korrosions- und Verschleißverhalten, elektrische Leitfähigkeit, Reflexionsvermögen und dekorative Wirkung.

Eine ausreichende Haftung der Schicht auf dem Grundkörper ist deshalb die Voraussetzung für die Funktion dieser Verbunde, auch beim Auftreten mechanischer Spannungen, z. B. hervorgerufen durch unterschiedliche thermische Ausdehnung.

Verfahren zur Herstellung funktioneller und dekorativer Oberflächen sind Schlüsseltechnologien im modernen Maschinen- und Anlagenbau, im Fahrzeugbau, der Medizintechnik, der Raumfahrt sowie in der Elektrotechnik/Elektronik. Sie finden ihren Einsatz aber traditionell auch in der Schmuck- und Bekleidungsbranche sowie bei der Herstellung von Möbeln, Gebrauchsgegenständen und Verpackungsmaterialien. Durch Veredeln der Oberfläche werden viele Produkte erst einsetzbar oder konkurrenzfähig. Die Attraktivitätserhöhung eines Erzeugnisses und das damit verbundene wirtschaftliche Ergebnis übersteigen die durch die Oberflächentechnik verursachten Aufwendungen – Oberflächentechnik ist in jedem Falle ein Gewinn. Man kann diese Aussage durch das folgende Beispiel verdeutlichen:

Um einem Kontakt die Gebrauchswerteigenschaften von Gold zu verleihen, muss er nicht aus massivem Gold bestehen, es genügt eine Vergoldung in geringer Schichtdicke.

Für das Beschichten von Oberflächen kann man verschiedene Ordnungsprinzipien wählen. Nach DIN EN 8580 sind die Verfahren nach den physikalisch-chemischen Vorgängen im schichtbildenden Werkstoff beim Beschichten gegliedert in Gruppen:

Gruppencharakteristik	Verfahrensbeispiele (Untergruppe)
5.1 flüssiger, 5.2 plastischer oder 5.3 breiiger Zustand	Tauchen, Spritzen, Streichen, Drucken
5.4 körniger, pulvriger Zustand	Wirbelsintern, Pulverspritzen, thermisches Spritzen
5.6 Schweißen, 5.7 Löten	Auftragschweißen, Auftragslöten
5.8 gas- oder dampfförmiger Zustand	PVD (Vakuumbedampfen und -bestäuben), CVD
5.9 ionisierter Zustand	Galvanisieren, außenstromlose Verfahren, Eloxieren, KTL

Die Gruppe 5.5 entfällt in der Norm, da Beschichten aus dem spanförmigen Zustand nicht vorkommt.

Um Schichtbildung und damit verbundene Schichteigenschaften verstehen zu können, muss man den Werkstoff, aus dem die Schicht besteht, charakterisieren. Gleiche Bedeutung besitzt der Substratwerkstoff, weil aus der Art der Bindungen und der Anordnung der Bausteine in oberflächennahen Bereichen das typische Verhalten von Oberflächen resultiert und sich damit der Schichtbildungsmechanismus ergibt. Für die metallischen, nichtmetallisch organischen und nichtmetallisch anorganischen Schichten sind deshalb die Wechselwirkungen zwischen Schicht und Substratoberfläche herauszuarbeiten.

Zur Herstellung funktioneller Schichten kommen chemische und physikalische Abscheidungsverfahren zur Anwendung, ebenso wie Verfahren und Methoden zur Oberflächenumwandlung mit folgenden Zielen:

- Korrosionsschutz
- Verschleißverhalten
- Leitfähigkeitsverhalten, elektrisch und thermisch
- optisches Verhalten
- Dekoration und Ästhetik
- Benetzbarkeit
- biochemische Aktivität
- spezielle Topografie

Zunehmend gewinnen Bestrebungen an Bedeutung, die eine Senkung des Energieaufwandes, des Materialeinsatzes und der Personalkosten bewirken. Die Beachtung aller drei Komponenten bei der Verfahrensauswahl bewirkt einen systemischen Ansatz. Das führt u. a. dazu, die teilweise umweltbelastenden sowie material- und energieintensiven Technologien durch neue Verfahren zu ersetzen bzw. etablierte den genannten Forderungen entsprechend anzupassen.

Bei Abscheidungsverfahren mit wässrigen Elektrolyten steht die Verminderung der Spülwassermenge im Vordergrund; neue Elektrolytrezepturen führen zu niedrigeren Arbeitstemperaturen. Die Absenkung der Arbeitstemperaturen in thermischen Verfahrensschritten, wie z. B. Einbrennen, ist eine weitere Möglichkeit zur Energieeinsparung. In der Beschichtungs- und Oberflächentechnik kommen in unterschiedlichem Umfang umwelt- und gesundheitsschädigende Stoffe zum Einsatz. Es gilt, diese zu minimieren bzw. sie völlig zu vermeiden.

Die Wettbewerbsfähigkeit angewandeter Verfahren hängt mit ab von den Möglichkeiten Prozessabfälle, Spülwasser und Inhaltsstoffe aus ausgearbeiteten Elektrolyte in den Prozess zurückzuführen, Wertstoffe zurückzugewinnen sowie deren Entgiftung.

Für die Herstellung von Gerätesystemen der Informationstechnik, der Mechatronik und der Mikrosystemtechnik sind strukturierte Schichtareale notwendig. Deshalb ist es sinnvoll, Verfahren zur Strukturierung von Schichten zu behandeln. Zur Strukturierung eignen sich zwei prinzipielle Wege; gezieltes Abtragen von Material aus einer geschlossenen Schicht (*Subtraktivtechnik*) oder strukturiertes Abscheiden des Schichtwerkstoffes (*Additivtechnik*).

Mit dem geeigneten „Werkzeug“ lässt sich das Schichtmaterial in vorherbestimmten Bereichen abtragen. Die Ausdehnung der Bereiche korrespondiert wesentlich mit dem gewählten „Werkzeug“. Durch mechanische Verfahren sind Strukturbreiten im Bereich von 50 µm realisierbar. Mittels Laserabtrag erreicht man geringere Strukturbreiten bis etwa 15 µm. Erfolgt das Abtragen durch Ätzmittel, würde der Schichtwerkstoff „flächig“ abgetragen. Eine Struktur lässt sich auf diese Weise durch Anwendung einer strukturierten Maske erzielen. Mithilfe der Fotolithografie und Elektronenstrahlithografie können derartige Masken, je nach angewandter Strahlung, bis in den Nanometerbereich strukturiert werden. Strukturen beim Auftragen des Schichtwerkstoffes lassen sich mit Maskentechnik bzw. Drucktechnik herstellen. Die laseraktivierte Schichtabscheidung stellt ein weiteres Additivverfahren dar.

Durch ständige Überwachung der Betriebsparameter im Verlaufe der Schichtherstellung wird die Reproduzierbarkeit der Schichteigenschaften gewährleistet. Dazu steht eine Vielzahl von analytischen und den Prozess steuernden Methoden und Geräten zur Verfügung. Rechnergestützt wird gleichzeitig eine hohe Anzahl von Parametern erfasst, verarbeitet und zur Prozesssteuerung verwendet. Eine Behandlung dieses Komplexes würde weit über das Anliegen dieses Buches hinausgehen.

Um die Einhaltung der vorgegebenen Schichteigenschaften (Zielgrößen) nachzuweisen und die Reproduzierbarkeit der ausgewählten Technologie überprüfen zu können, kommt den Methoden zur Charakterisierung der Schicht ebenfalls große Bedeutung zu. Sie sind deshalb unverzichtbarer Bestandteil eines Lehrbuches der Oberflächentechnik. Mit an vorderster Stelle, hinsichtlich ihrer Bedeutung für die Schichtqualität stehen Haftung, Schichtdicke und Perfektion der Schicht.

Als fachübergreifende Disziplin umfasst die Oberflächentechnik die Vorbehandlung, die Verfahren zur Schichtherstellung, die Fertigungskontrolle und die Werkstoffprüfung sowie den Umweltschutz und das Recycling.

### **Zusammenfassung**

#### Aufgaben und Ziele der Beschichtungs- und Oberflächentechnik

- Oberflächentechnik beinhaltet sowohl Schichtauftrag als auch gezielte Veränderung der vorhandenen Oberfläche.
- Von sechs Hauptgruppen der Fertigungsverfahren nach DIN 8580:2003-09 tangieren die Oberflächentechnik insbesondere das Trennen, das Beschichten und das Stoffeigenschaftändern.
- Bei der Beschichtung entstehen Verbunde aus dem Werkstück (Grundkörper) und einer Schicht, wobei der Grundkörper hauptsächlich mechanische und die Beschichtungen zusätzliche Anforderungen erfüllen.
- Ein systemischer Ansatz bei der Verfahrensauswahl führt zur Substitution umweltbelastender sowie material- und energieintensiver Technologien.
- Viele Anwendungen von beschichteten Bauteilen bedingen die Erzeugung strukturierter Schichtareale.
- Zum Nachweis der Schichteigenschaften und der Reproduzierbarkeit der angewandten Technologie kommen zahlreiche Untersuchungsmethoden zum Einsatz.

# 3

## Vor-, Zwischen- und Nachbehandlung

Für die Nutzung der Verfahren der Oberflächentechnik ist es unerlässlich, die Substrate vorzubehandeln, wobei die Vorbehandlung (engl. *pretreatment*) selbst sich aus mehreren Schritten zusammensetzen kann. Die gewählte Verfahrensweise ist abhängig u. a. von der Zusammensetzung des Grundwerkstoffes und dem Anlieferungszustand, das heißt von der Art und Stärke der Deck- und Fremdschichten sowie den Störzonen durch die Bearbeitung. Die auf der Werkstückoberfläche auszubildenden dauerhaften Schichten für Korrosions- und Verschleißschutz oder dekoratives Aussehen verlangen deshalb eine sorgfältige Vor- und häufig auch noch eine Nachbehandlung.

Unter Vorbehandlung (Vorbearbeitung) versteht man die Vorbereitung von Werkstücken für das Aufbringen, Umwandeln oder Abtragen von Schichten durch Verfahren der Beschichtungs- und Oberflächentechnik sowie die Erzeugung bestimmter Oberflächenstrukturen und -morphologien. Sie dienen der Schaffung einer definierten Werkstückoberfläche, die Voraussetzung ist für haftfeste Beschichtungen oder Oberflächenumwandlungen. Unter Nutzung dieser Verfahren entstehen Werkstückoberflächen mit reproduzierbaren Eigenschaften als Ausgang für die angestrebte Oberflächenqualität.

Eventuell auf der Metalloberfläche verbleibende Schichten, z. B. Wachs- oder Ölfilme, aber auch Reaktionsprodukte, wie Oxide und Sulfide, wirken als Trennschicht zwischen Metall und Beschichtung und beeinträchtigen oder verhindern so die Haftung der Schicht. Welche Vorbehandlungsverfahren (siehe Bild 3.1) auszuwählen sind, hängt von der Art der Substratmaterialien, wie Metalle, Keramiken, Gläser, Kunststoffe, ihren Verunreinigungen und der Oberflächentopographie (Ebenheit, Welligkeit, Rauigkeit) ab.

Obwohl einer optimalen Vorbehandlung der Erzeugnisse, die mit Verfahren der Oberflächentechnik bearbeitet werden sollen, allergrößte Bedeutung zukommt, gestatten die Verfahren zur Bewertung der Ergebnisse von Vorbehandlungen oft nur eine „gut - schlecht“-Aussage. Tabelle 3.1 enthält eine Übersicht zur Ermittlung des Reinigungseffektes.

### 3.2.2 Chemisch-physikalische Verfahren

Von diesen Verfahren zur Vorbehandlung sollen das Beizen, Brennen, Dekapieren, Neutralisieren und Spülen ausführlicher dargestellt werden.

Durch die Wärmebehandlung und das Umformen, ebenso wie durch das Trennen, aber auch während der Lagerung, bilden sich auf der Werkstückoberfläche Deckschichten, wie Oxide, Oxidhydrate oder Salze, z. B. Silikate, Carbonate oder Sulfide und es können Verarbeitungsrückstände verbleiben. Diese Deckschichten müssen entfernt werden, um so eine aktive Oberfläche zu erhalten. Für das Entfernen dieser Schichten werden üblicherweise Lösungen anorganischer Säuren und Säuregemische verwendet. Ihre Konzentration wird in Abhängigkeit von der Art und Stärke der Deckschicht und der Art des Grundmetalls gewählt. Oxidschichten amphoterer Metalle wie Aluminium werden dagegen mit alkalischen Lösungen entfernt.

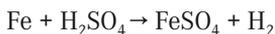
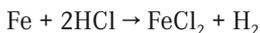
Durch das nachfolgende Neutralisieren werden in Poren, Rissen oder Sacklöchern der Oberfläche anhaftende Filmreste der Beizlösungen in leicht lösliche Salze überführt und durch ein anschließendes Spülen entfernt.

Bei Nichtbeachtung des Grundwerkstoffes ist natürlich nicht nur der gewünschte Angriff der Deckschichten möglich, sondern auch dessen Auflösung. Für alle chemisch-physikalischen Verfahren ist deshalb die Werkstoffart zu berücksichtigen. So sind z. B. Zinn, Zink und deren Legierungen sowie Aluminium stark alkaliempfindlich.

#### 3.2.2.1 Beizen

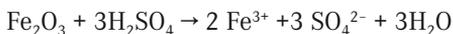
Es dient besonders der Entfernung von Zunder und Rost auf Eisenwerkstoffen durch die Anwendung von Beizmitteln. Beim Beizen mit nichtoxidierenden Säuren (z. B. Salzsäure) wird die Zunderschicht durch Wasserstoffentwicklung an der Oberfläche des Metallteils „abgesprengt“. Gleichzeitig aber besteht die Gefahr der Wasserstoffaufnahme durch den Werkstoff (Beizsprödigkeit). So ist z. B. bei hochfesten Schrauben daher ein Wasserstoffentspröden durch nachträgliche Wärmebehandlung der Werkstücke vorzusehen.

*Beizen unter Auflösen des Metalls*

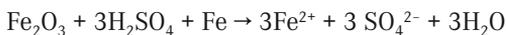


*Beizen unter Rostauflösung*

(nicht reduktive Auflösung)

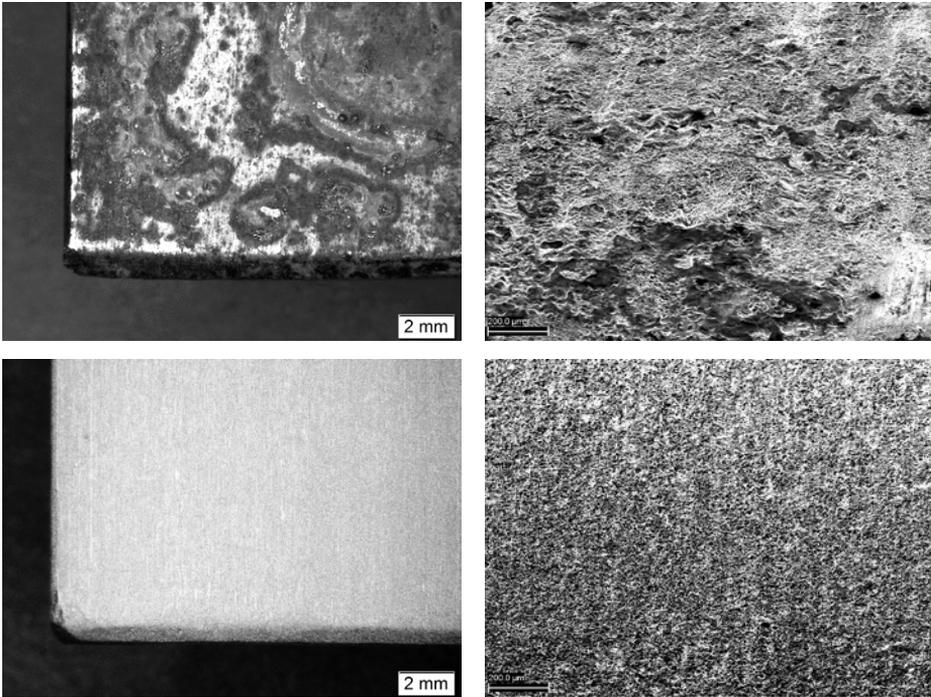


(reduzierend, unter Beteiligung des metallischen Eisens)



Die letzte Gleichung zeigt, dass die Eisen(III)-schicht unter gleichzeitigem Angriff des Grundmaterials in Lösung geht. Von größter Bedeutung ist deshalb die Einwirkungsdauer der Säure.

Es werden hauptsächlich kontinuierliche Tauch- oder Sprühverfahren in Trommel- oder Gestelltechnik zur serienmäßigen Entzunderung und Entrostung möglichst gleichartiger Bauteile und Werkstücke angewendet. Die Beizzeit ist von der Rostzusammensetzung abhängig. Arbeitsbedingungen für Beizbäder s. Tabelle 3.9. Das Bild 3.10 zeigt die Beizwirkung an einem Baustahl.



**Bild 3.10:** Beizen eines Baustahles

oben: Ausgangszustand (verrostet), unten: Nach Beizen mit HCl (konz.) bei RT, 5 min.  
links: Makrofotos, rechts: REM

Nach dem Beizen sind Spülen und Neutralisation der behandelten Flächen notwendig. Beizmittel- und Eisenkonzentration müssen laufend analytisch überwacht werden. Die Anlagen müssen gegen die eingesetzten Beizmittel beständig sein. Als Werkstoffe kommen deshalb Keramik, PVC, Gummi, säurefeste Steine und hochlegierte Stähle zum Einsatz.

**Tabelle 3.9:** Arbeitsbedingungen von Beizen

Beizmedium	Konzentration [%]	Temperatur [°C]	Ausarbeitung [%]
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	5 – 20	40 – 80	2,8
HCl	10 – 20	25 – 30	3 – 5
H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	15	ca. 40	3 – 4

Man kann ausgearbeitete Bäder durch Aufheizen oder Nachschärfen (Zugabe von Säure) aktivieren. Beim Beizen werden nicht nur die Korrosionsprodukte abgetragen; auch das Grundmetall wird angegriffen, dadurch entstehen Materialverluste an Beizgut und Beizmittel. Sparbeizen nennt man das Säurebeizen unter Verwendung von Inhibitoren. Inhibitoren vermindern den Angriff der Beizsäuren auf das Grundmetall und senken somit die Materialverluste. Sie werden als industriell gefertigte „Sparbeizzusätze“ den Beizbädern in geringer Konzentration zugesetzt.

### **Elektrolytisches Beizen**

Beim elektrolytischen Beizen in verdünnten Säuren oder Alkalilösungen werden die Werkstücke als Katode (katodisches Beizen) oder Anode (anodisches Beizen) an eine Gleichstromquelle geschaltet.

*Katodisches Beizen:* Starke Wasserstoffbildung am Werkstück bewirkt ein Absprennen von Zunder und teilweise die Reduktion von Oxiden (Gefahr der Wasserstoffversprödung durch Wasserstoffaufnahme).

*Anodisches Beizen:* Der Zunder wird durch Sauerstoffentwicklung abgesprengt. Es tritt zwar keine Wasserstoffversprödung auf, aber stärkerer Metallabtrag durch das in Lösung gehen der Anode.

*Umpolbeizen:* Das Werkstück wird durch Umpolen in kurzen Zeitabständen abwechselnd als Katode und Anode geschaltet. Die vorerwähnten Nachteile des katodischen und anodischen Beizens verringern sich deutlich.

### **Entmetallisieren**

Aus den verschiedensten Gründen kann es erforderlich werden, metallische Beschichtungen vor einer Weiterbearbeitung von den Werkstücken zu entfernen. Gründe dafür können unter anderem sein:

- Fehlerhafte Schichten, ungenügende Haftung, Blasen, kein Glanz, hohe Porosität
- Aufarbeitung von Gegenständen mit gealterter Metalloberfläche zur Neubeschichtung

Eine gleichmäßige Auflösung der Metallschichten kann nur dann erfolgen, wenn Fremdschichten, insbesondere Fette, Wachse und Lacke, aber auch Deckschichten, z.B. Oxide, vorher vollständig entfernt wurden.

Zur Entmetallisierung kommen chemische und elektrolytische Verfahren zum Einsatz (siehe Tabellen 3.10 und 3.11). Die früher angewandten mechanischen Methoden, wie Schleifen oder Bürsten, haben ihre Bedeutung verloren.

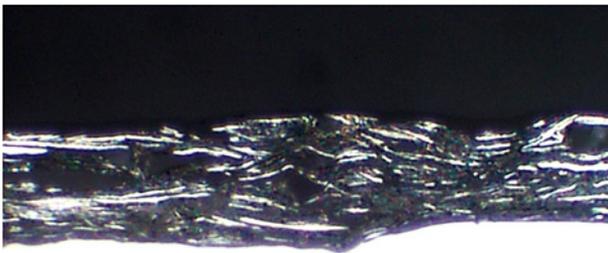
dabei dem Alitieren. In Abhängigkeit von der Zusammensetzung des Grundwerkstoffes, insbesondere des C-Gehaltes, kommt es neben der Diffusion zur Ausbildung einer Reaktionszone. Bei Stählen mit erhöhtem C-Anteil entsteht in der Reaktionszone Chromcarbid, welches das Fortschreiten der Diffusionszone behindert. Die hohe Härte des Chromcarbids mit  $>2000$  HV erhöht die Verschleißfestigkeit gegenüber abrasiver Beanspruchung. Die erzielbaren Schichtdicken liegen für unlegierte Stähle bei 10 bis 20  $\mu\text{m}$ , bei niedriglegierten Stählen  $>100$   $\mu\text{m}$  und bei Nickelwerkstoffen zwischen 25 bis 75  $\mu\text{m}$ .

### 4.6.3 Sherardisieren

Mithilfe dieses Verfahrens werden auf Kleinteilen aus Stahl Zinkschichten aufgebracht, die sich durch Feuerverzinkung nicht kostengünstig herstellen lassen. Der Verfahrensablauf ist dem des Kalorierens beim Aluminieren vergleichbar. Die vorbehandelten Teile bettet man in einer Trommel in eine Mischung aus Zinkpulver und Sand ein und erhitzt auf 350 bis 420  $^{\circ}\text{C}$ . Durch das in die Stahloberfläche eindiffundierende Zink entstehen fest haftende Schichten mit einer Dicke zwischen 10 und 50  $\mu\text{m}$ . Allerdings muss man dabei beachten, dass Schichten über 25  $\mu\text{m}$  zur Rissbildung neigen. Als Schichtfolge ergibt sich: Stahl,  $\Gamma$ - und  $\delta$ -Schicht (siehe Bild 4.50: Zustandsdiagramm Fe-Zn). Sherardisieren findet Anwendung zur Beschichtung von Normteilen, wie Stiften, Muttern und Schrauben sowie Kleinteilen aus Stahlblech bzw. Guss.

## ■ 4.7 Zink-Lamellenabscheidung

Für die Beschichtung von Verbindungselementen, hauptsächlich in der Automobilindustrie, hat sich das Verfahren zur nichtelektrolytischen Abscheidung einer Zink-Aluminium-Lamellenschicht auf eisenhaltigen Substraten etabliert, mit dem Ziel einer verschleiß- und korrosionsfesten Beschichtung. Die Schicht besteht aus Zink- und Aluminiumlamellen in einer anorganischen Matrix (siehe Bild 4.55).



10  $\mu\text{m}$

**Bild 4.55:** Zink-Lamellenschicht auf Stahl

Die Anforderungen der Zinklamellenbeschichtungen für Verbindungselemente ohne Gewinde sind in DIN EN 13858:2006 enthalten.

In den 1970 Jahren begann in den USA die Entwicklung der Zink-Lamellenbeschichtung, zunächst unter Verwendung Cr(VI)-haltiger Verbindungen, ab etwa Mitte 1995 begann die Entwicklung Cr(VI)-freier Produkte. Das Verbot von sechswertigen Chromverbindungen in Korrosionsschutzschichten im Rahmen der EU-Altauto-Richtlinie (Juli 2007) hat in den letzten Jahren zur verstärkten Entwicklung und Anwendung neuer Cr(VI)-freier Korrosionsschutzsysteme geführt, wie auch die Zink-Lamellenabscheidung.

Vor der unmittelbaren Beschichtung erfolgt eine Reinigung und Vorbehandlung der Oberfläche in alkalischer Lösung und gegebenenfalls eine Phosphatierung. Sowohl diese Vorbehandlung als auch die nicht-elektrolytische Abscheidung verhindern die Wasserstoffversprödung.

Das Schichtsystem entsteht aus einer wässrigen Dispersion beim Eintauchen oder Sprühen auf der Oberfläche des eisenhaltigen Werkstückes. Im nachfolgenden Schritt „Einbrennen“ (200 – 300 °C) reagieren die Bestandteile des auf dem Grundwerkstoff adsorbierten Films zu einer Oxidmatrix, die sowohl die Lamellen untereinander als auch das Gesamtsystem mit der Werkstückoberfläche festhaftend verbindet. Neben der so hergestellten Grundschicht (Basecoat) bewirkt eine zusätzliche Deckschicht (Topcoat) den erhöhten Korrosionsschutz.

Die Korrosionsschutzwirkung von Zink-Lamellenschichten hat mehrere Ursachen, u. a. wie den Barriereeffekt durch die Ausbildung übereinanderliegender Lamellen aus Zink und Aluminium. Sie behindern das Eindringen von z. B. Wasser und Chloriden. Außerdem besteht ein katodischer Schutz, da Zink und Aluminium ein negativeres Standardpotenzial gegenüber Eisen haben. Darüber hinaus enthält die Matrix Korrosionsinhibitoren.

### Zusammenfassung

#### Metallschichten

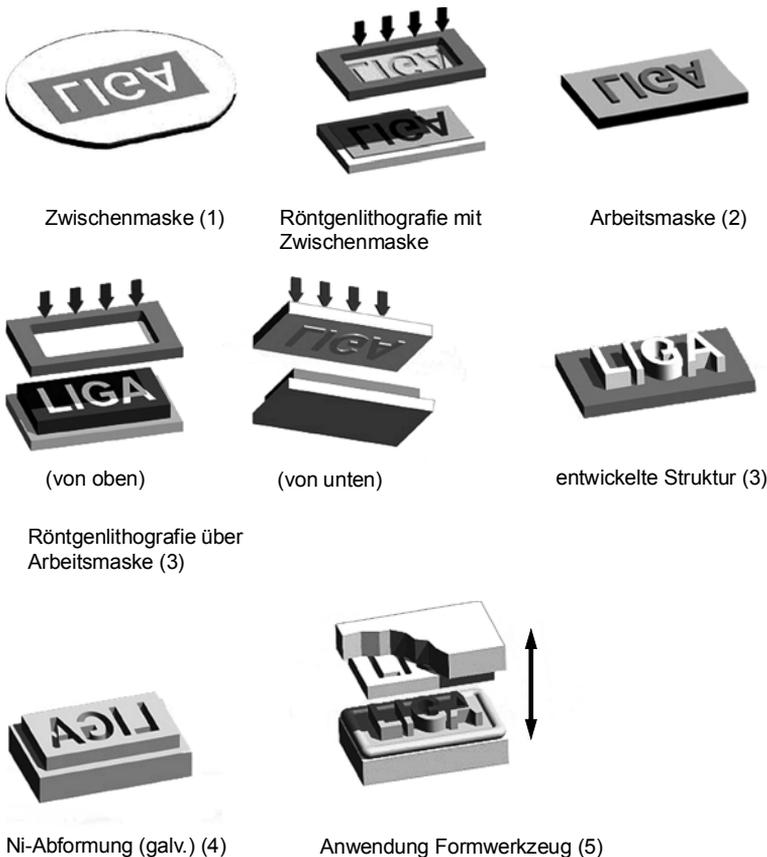
- Metalle lassen sich als Schicht auf einem Substrat (Trägerwerkstoff) mithilfe unterschiedlicher Verfahren aus wässrigen Lösungen, aus der Schmelze, der Gasphase und aus einem Plasma abscheiden.
- Die galvanische Abscheidung ist im Wesentlichen charakterisiert durch die Vorgänge
  - im Elektrolytvolumen,
  - an der Phasengrenze Katode/Elektrolyt,
  - auf der Katodenoberfläche,
  - an der Anode und
  - der Polarisation.
- Die quantitative Beschreibung der galvanischen Abscheidung erfolgt hauptsächlich durch die Größen:
  - Ionenkonzentration der Kationen, Dissoziationskonstante,
  - Wanderungsgeschwindigkeit und Beweglichkeit der Ionen und Abscheidungskonstante (FARADAYSche Gesetze).

- Stromdichte-Potenzialkurven charakterisieren die Arbeitsweise eines Elektrolyten.
- Vielfalt an Anlagentechnik und eingesetzter Elektrolyte resultieren aus den Geometrien der Substrate und den unterschiedlichen Anwendungsgebieten der galvanisch beschichteten Teile.
- Zur Erzielung geeigneter Schichtdicken, der Erhöhung der Abscheidungsgeschwindigkeit sowie spezifischer Eigenschaften stehen geeignete Verfahren zur Verfügung.
- Eine Metallisierung nichtleitender Substrate, wie Keramik, Gläser und Kunststoffe aus wässrigen Lösungen ermöglicht die außenstromlose Metallabscheidung, unter der Voraussetzung, dass die Oberfläche durch „Bekeimung“ aktiviert ist und Schichtmetall autokatalytisch wirkt.
- Metallisierungen aus der Gasphase erfolgen durch die PVD- und CVD-Techniken.
- Schmelztauschichten entstehen beim Eintauchen des metallischen Werkstücks in die Schmelze des Schichtwerkstoffes (z. B. Zn, Sn, Al und deren Legierungen). Bevorzugte Trägerwerkstoffe sind Stähle und Cu-Legierungen.
- Durch Metallspritzen entstehen Schichten mit hohem Verschleiß- und Korrosionsschutz. Aufgrund der Variationsbreite der Energiequellen ergibt sich die Möglichkeit, Schichtwerkstoffe mit niedrigen bzw. sehr hohen Schmelzpunkten einzusetzen.
- Plattierte Bauteile sind Verbundwerkstoffe, hergestellt durch metallurgische Verfahren, die aus dem Grundstoff und mindestens einer Lage des Schichtwerkstoffes bestehen. Durch die plastische Verformung beider Teile während des Plattierens ergibt sich ein äußerst fester Verbund.
- Eine Erweiterung des Einsatzes von Metallschichten ergibt sich aus der Forderung nach immer feiner werdenden Strukturen, geringeren Schichtdicken und Vergrößerung des Werkstoffspektrums. Verbunden ist das mit der Einhaltung hoher Reinheiten des Schichtwerkstoffes und der Umgebung sowie der Perfektion der Schichtausbildung (Pinholes, Einschlüsse, Reaktionsprodukte).
- Die Weiterentwicklung von Verfahren zur Metallabscheidung beinhaltet
  - die Beschränkung des Einsatzes von toxischen Stoffen,
  - die Kreislaufführung der Hilfsstoffe,
  - die Rückgewinnung von Wertstoffen, Wasser und Energie und
  - die strukturierte Abscheidung.
- Für Erzeugnisse, in denen thermische Stabilität, elektrische Leitfähigkeit, mechanische Belastbarkeit, verbunden mit Duktilität bzw. Härte und Metallglanz oder Reflexionsvermögen durch die Beschichtung erreicht werden müssen, kommen nur Metallabscheidungsverfahren infrage.

### 7.3.3 LIGA-Verfahren

Eine Möglichkeit, sehr genaue zwei- und zweieinhalbdimensionale Strukturen herzustellen, bietet das LIGA-Verfahren. Es kombiniert die Möglichkeiten von Lithografie und galvanischer Aufbautechnik. Der Begriff LIGA fasst die Prozessschritte Lithografie, Galvanik, und Abformung zusammen. In einem Lithografieprozess wird ein Fotoresist aus Kunststoff auf einer leitenden Unterlage mit harter Röntgenstrahlung belichtet, meist am Synchrotron.

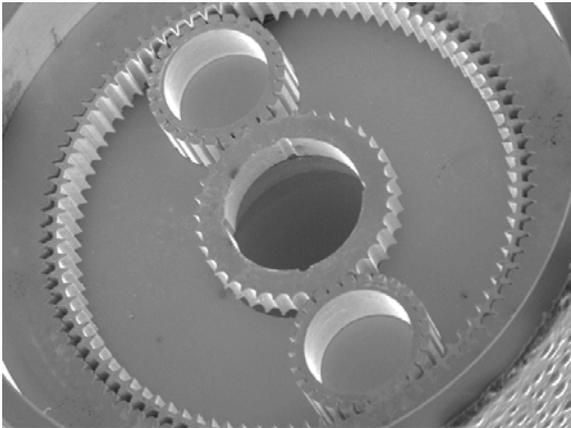
Den schematischen Ablauf des LIGA-Verfahrens verdeutlicht Bild 7.25.



**Bild 7.25:** Prozessschritte des LIGA-Verfahrens (© IMK/KIT)

Der eigentliche Strukturierungsvorgang erfolgt durch Fotolithografie mit Fotoresist durch Röntgen- oder Elektronenstrahlung auf einem leitfähigen Substrat. Damit entsteht eine Grundstruktur, deren Zwischenräume galvanisch aufgefüllt werden, bis über dem Fotoresist eine geschlossene Schicht entsteht. Für die Abscheidung von Nickel kommen Sulfamat-elektrolyte, für Kupfer Sulfamat- oder Fluorboratelektrolyte und Gold ebenfalls Sulfamat-elektrolyte zur Anwendung. Die Sulfamatelektrolyte erlauben es, bei einer hohen Abscheiderate spannungsarme Metallschichten abzuscheiden. Ein Hauptproblem besteht aber hier in der ausreichenden Benetzung und Durchflutung der Gräben und Spalten. Nach dem Auf-

füllen der Galvanoform setzt man die galvanische Abscheidung fort, um dadurch die Resiststruktur mit Metall überwachsen zu lassen. Nach dem Herauslösen der Resiststruktur liegt eine Metallform vor. Ein Abformen dieser metallischen Mikrostrukturen mit einem Kunststoff liefert einen Formkörper zur unmittelbaren Verwendung oder zur erneuten Metallisierung. Aspektverhältnisse von 1 : 100 bei Wandstärken von wenigen Mikrometern lassen sich in optischer Qualität selbst bei der zweiten galvanischen Abformung noch herstellen. Die „Bauhöhen“ reichen bis zu 1 mm. Durch mehrfache schräge Belichtung lassen sich auch mehr als zweidimensionale Strukturen herstellen.



**Bild 7.26:** Mit dem LIGA-Verfahren hergestelltes Micro Harmonic Drive Getriebe (Wellenbohrung zentrale Achse 1,5 mm)  
© Micromotion GmbH

Typische Anwendungen sind Mikrozahnräder, Filterstrukturen, Fluidkanäle und optische Spiegelgitter. Das Bild 7.26 zeigt ein nach dieser Technik hergestelltes miniaturisiertes Getriebe.

Die Herstellung der ersten galvanischen Abformung ist vergleichsweise sehr teuer. Erst durch die vielfache Abformung in Kunststoff und eine zweite galvanische Abformung kommt man zu relativ preisgünstigen Massenteilen höchster Präzision. Ursprünglich wurde das Verfahren vom Kernforschungszentrum in Karlsruhe entwickelt, um Kanalstrukturen für Uran-Anreicherungsanlagen herzustellen. Heute wird das LIGA-Verfahren für viele kommerzielle Anwendungen in der Mikrotechnik genutzt (vgl. Abschnitt 4.1.2).

Zusammengefasst gliedert sich das LIGA-Verfahrens nach den Angaben des KIT/IMK in die fünf Hauptschritte:

1. „Schreiben“ einer Zwischenmaske (ZM) mit etwa 2 µm hohen Goldabsorberstrukturen mittels Elektronenstrahlolithografie und Goldgalvanik auf einem Si-Wafer mit Ti-Hilfschicht.
2. Kopieren der Zwischenmaske in eine Arbeitsmaske (AM) mit etwa 25 µm hohen Goldabsorberstrukturen durch Röntgentiefenlithografie und Goldgalvanik.
3. Kopieren der Arbeitsmaske in bis zu 3000 µm dicke Kunststoffschichten mithilfe der Röntgentiefenlithografie und chemischem Auflösen („entwickeln“) der bestrahlten Bereiche.
4. Galvanisches Abscheiden von Metallen wie Gold, Nickel oder Kupfer in diese Strukturen.

5. Die nach Schritt (4) hergestellten metallischen Mikrostrukturen eignen sich als Prägewerkzeuge. So lassen sich große Stückzahlen von Mikrobauteilen durch Abformen in Kunststoffe bei erhöhten Temperaturen fertigen.

Das LIGA-Verfahren und die damit hergestellten Strukturen sind gekennzeichnet durch:

- Vielfältigkeit der Formen für Mikrostrukturen
- „aspect ratio“ bis über 100 (Strukturhöhe (-tiefe) relativ zu deren Breite)
- parallele, nahezu senkrechte Seitenwände
- optisch glatte (d.h. glänzende) Wände, (z. B. für optische Spiegel einsetzbar)
- hohe laterale Maßhaltigkeit
- Strukturdetails bis in den Bereich von 50 nm

### 7.3.4 Leiterplattentechnik

Für die Herstellung aller Arten von Leiterplatten bildet die Strukturierung der Kupferauflage bzw. die Abscheidung strukturierter Schichten auf Basismaterial die Verfahrensgrundlage. Zur Unterscheidung haben sich die Begriffe durchkontaktierte und nichtdurchkontaktierte Leiterplatte als praktikabel durchgesetzt. Gleichzeitig damit erweitern sich die Arten der Leiterplatten in Einseiten- oder Einebenenplatten und Mehrebenen- sowie Mehrlagenschaltungen. Um die jeweilige Schaltungsebene herzustellen, stehen hierfür verschiedene Techniken zur Auswahl. Letztendlich aber liegt eine strukturierte Ebene vor, die entweder sofort weiterverarbeitet werden kann (Bestückung, Montage) oder mehrere zusammengehörige zur Mehrlagenplatte (Multilayer) verpresst, gelocht bzw. gebohrt und durchkontaktiert werden.

Beim Subtraktivverfahren und der Metallresisttechnik sind zur Belichtung Filmpositive einzusetzen. Filmpositive sind, von der Schichtseite betrachtet, seitenverkehrt, dabei muss die Schichtseite im aufgeklebten Zustand nach „unten“ in Richtung Fotoresist zeigen, um Abbildungsfehler, wie Überstrahlungen u. Ä. während des Belichtungsvorganges zu vermeiden.

In der Leiterplattentechnik sind die Subtraktivverfahren die am meisten angewandten zur Herstellung von durchkontaktierten Platten und Innenlagen für Multilayer (siehe Bild 7.27). Zwei Verfahrensvarianten, die Resist-Technik (Pattern plating) und die Tenting-Technik (Panoel plating) kommen vorwiegend zum Einsatz. Als Resistmaterial bei der Resist-Technik verwendet man Metallresist (z. B. Pb/Sn, Au), Fotopolymere und sogenannte siebdruckbare Ätzreserven und für die Tenting-Technik spezielle Fotoresiste.

Für Additiv-Leiterplatten benötigt man Trägermaterialien, die vor dem eigentlichen Leiterzugaufbau an den Stellen katalysiert werden, die im Weiteren die Strukturen bilden, wie z. B. kernkatalysiertes Basismaterial oder Basismaterial mit Haftschrift für Katalysatorkeime. Die Semiadditivtechnik ist im Verfahrensablauf stark an die Metallresisttechnik angelehnt. Ein Vergleich des Ablaufes der drei prinzipiellen Verfahren gibt das Schema in Bild 7.28.

### 9.1.6 Metallrückgewinnung aus wässrigen Lösungen

NE-metallhaltige Lösungen, insbesondere aus der Galvanik, werden elektrolytisch aufgearbeitet, sodass ein Metallrecycling in marktfähiger Form möglich ist. Bei der Gewinnungselektrolyse besteht das prinzipielle Problem in der kontinuierlichen Abreicherung der Metallionen im Elektrolyt. Damit ist eine ständige Änderung der Elektrolysebedingungen verbunden. Es sind drei Zellentypen zu unterscheiden, zur Abscheidung aus:

- cyanidischen Lösungen, z. B. Ag, Cu, Zn und Messing,
- schwefelsauren Elektrolyten, z. B. Cu, Ni und
- chloridhaltigen Lösungen durch Membranelektrolyse, z. B. Cu, Ni.

Mit dieser sehr umweltfreundlichen Methode können sowohl Konzentrate als auch verdünnte Lösungen ohne Chemikalieneinsatz abgereichert werden.

## ■ 9.2 Entgiftung von Abwässern

Bei der galvanischen Beschichtung ist die Verwendung cyanidischer und chromathaltiger Elektrolyte nach wie vor nicht vermeidbar. Aufgrund der hohen Giftigkeit muss ihre vollständige Beseitigung im Abwasser durch Entgiftung erfolgen. Problematisch ist zusätzlich im Falle der Hartverchromung der Einsatz von PFOS. Eine Möglichkeit zur Vermeidung von PFOS besteht z. B. in der Verwendung ionischer Flüssigkeiten der Firma IOLITEC GmbH & Co. KG, Denzlingen.

Bei der Wahl zwischen chemischen oder elektrolytischen Entgiftungs- bzw. Rückgewinnungsverfahren kommt den elektrolytischen die größere Bedeutung zu. Die Verwendung chemischer Verfahren hat fast immer den Nachteil, dass der Abwasserkreislauf und die Abluft zusätzlich belastet werden, was zu einer Erhöhung der Abwasser- und Deponiekosten führt.

### 9.2.1 Cyanidentgiftung

Die Giftigkeit des Cyanidions beruht auf der Bildung eines sehr stabilen Komplexes mit den Eisenionen des Hämoglobins, die dadurch ihre Fähigkeit für den Sauerstofftransport verlieren. Darüber hinaus komplexieren sie Schwermetallionen und erschwert so deren Abtrennung. Cyanidische Elektrolyte sind für die galvanischen Abscheidung, vorwiegend für Zink, Kupfer, Silber und Gold, wegen ihrer einfachen Handhabung und kalkulierbaren Galvanisierungsergebnissen unverzichtbar. Unterschiedliche Abwasserzusammensetzung und Cyanidgehalt erlauben kein universelles Entgiftungsverfahren. Das Prinzip der Cyanidentgiftung besteht bevorzugt in der Oxidation des Cyanidstickstoffes mit verschiedenen Oxidationsmitteln zu verschiedenen Oxidationsstufen.

#### 1. Oxidation mit Natriumhypochlorit (NaOCl)

Bei pH 10 entstehen als Endprodukte  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{N}_2$  und  $\text{NaCl}$ .

## 2. Oxidation mit Wasserstoffperoxid, evtl. mit UV-Unterstützung

Es erfolgt eine direkte Oxidation bis zum Cyanat, ohne die Zwischenstufe  $\text{CNCl}$ , bei der UV-unterstützten Reaktion bis zum  $\text{CO}_2$  und  $\text{N}_2$ .

## 3. Elektrolytische Oxidation

Die anodische Oxidation zu  $\text{CO}_2$  und  $\text{N}_2$  arbeitet gegenüber 1. ohne Aufsalzung. Allerdings bilden sich bei hohen Chloridgehalten Chlor-Sauerstoff-Verbindungen.

Durch Zugabe von Fe(II)- und Fe(III)-Salzen zu cyanidhaltigen Abwässern bildet sich der schwerlösliche Komplex  $\text{Fe}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3$  (Berliner Blau), z. B. bei Überschuss von Fe(III)-Ionen.

### 9.2.2 Chromatentgiftung

Chrom in der Oxidationsstufe +6 liegt im Abwasser als Chromation  $\text{CrO}_4^{2-}$  oder als Dichromation  $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$  vor. Chrom(VI)-Ionen stammen aus Verchromungselektrolyten, Chromatierlösungen und Eloxierselektrolyten. Die Reduktion des Chromates führt zu der um den Faktor 100 weniger giftigen Chromitstufe (+3). In Abhängigkeit vom pH-Wert des Abwassers erfolgt die Reduktion in der Hauptsache mit drei verschiedenen Reduktionsmitteln.

#### 1. Im sauren Bereich mit Natriumhydrogensulfit ( $\text{NaHSO}_3$ )

Es ist das am häufigsten angewandte Verfahren.

#### 2. Im neutralen bis schwach alkalischen Bereich mit Natriumdithionit ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ )

Dieses Reduktionsmittel ist verhältnismäßig teuer, führt aber zur nahezu quantitativen Reduktion des Chromates und findet Anwendung bei geringen Chromatkonzentrationen.

#### 3. Im alkalischen Bereich mit Fe-(II)-Salzen

Das Verfahren ist dann zu empfehlen, wenn Eisenionen gleichzeitig mit zu entfernen sind.

Eine „indirekte Entgiftung“ stellt die Entfernung der Cr(VI)-Ionen mithilfe von Ionenaustauschern dar. Damit ergibt sich die Möglichkeit der unmittelbaren Rückgewinnung des Chromates.

## ■ 9.3 Organische Beschichtung und Umweltschutz

Zur Verwirklichung von ökologisch vertretbaren Wegen des Beschichtens mit organischen Polymeren ergeben sich zwei Wege:

- Minimierung oder Vermeidung der Verwendung von organischen Lösungsmitteln,
- Verminderung des Overspray und/oder
- Recycling des Overspray.

Eine Verringerung des Lösungsmittelanteils ergibt sich beim Einsatz von High-Solids-Lacken, Wasserlacken und Pulverlacken. Beträgt z. B. der Lösungsmittelanteil in Wasserlacken noch

# Sachwortverzeichnis

## A

- Abfall 261
- Abfallverbrennung 262
- Abformung 230
- Abkochen 37
- Abluft 261
- ABS 102
- Abscheidung, zementative 97
- Abscheidung (electroless plating)
  - außenstromlose 63
  - autokatalytische 63
  - chemische Metallisierung 63
  - chemisch-reduktive 63
- Abscheidungskonstante 74
- Abscheidungsverfahren 12
  - chemische 12
  - physikalische 12
- ABS-Effekt 104
- Abspritzen 38
- Abtragen, mechanisches 175
- Abtragverfahren 33
- Abwasser 261
- ACC-Beschichtung (Autophoretic Coating Chemicals) 171
- ACC-Technik 156
- Additive 150, 157
- Additivtechnik 13, 210
- Adhäsion 26
- Adsorbat 27
- Adsorbens 27
- Adsorpt 27
- Adsorption 26
- Adsorptionsmittel 27
- Adsorptiv 27
- AFM 255
- Airless-Spritzen 166
- Aktivator
  - ionogener 99
  - kolloidaler 99
- Aktivierung 99
- Aktivität, biochemische 13
- Aktivkohle 261
- Algen 35
- Alitieren 132
- Alkydharze 144
- Alrock-Verfahren 197
- Alucoat 124
- Aluminal 124
- Aluminieren 132
- Aluminiumoxid 123
- Anionen 67
- Anionenaustauscher 266
- Anoden
  - inerte 82
  - lösliche 82
- Anodenschlamm 89
- Antiausschwimm-Mittel 157
- Antifoulingmittel 157
- Apertur, numerische 214
- Äquipotenziallinien 79
- Aquokomplex 68
- Arbeitssicherheit 270
- Atom-Absorptions-Spektroskopie (AAS) 238
- Atomgitter 21
- Atomic Force Mikroskopie 255
- ATR-Technik 241
- Ätzen 33
- Ätzresists 215, 221
- Ätzverfahren 221, 225
- Aufdampfen 107, 181
- Aufstäuben 108
- Auftraglöten 129
- Auftragschweißen 129
- Ausschleppverlust 55
- Autokatalyse 95
- Azofarbstoffe 206

## B

- Baktericid 157
- Bakterien 35

Bandverzinkung 114, 121  
Basecoat 134  
Basismaterial 232  
Beizen 33, 46, 53, 265  
- anodisches 48  
- elektrolytisches 48  
- katodisches 48  
Beizreaktion 188  
Bekeimung 95  
Belichten 217  
Benetzbarkeit 13, 258  
Benetzung 26  
Benetzungsrandwinkel 26  
Benetzungstest 36  
Bereiche, kristalline 25  
Beschichtung, außenstromlose 99  
Beta-Rückstreuverfahren 247  
Bewitterungsversuche 243  
Biegeversuch 251  
bifunktionell 139  
Bindemittel 150, 229  
- amorphe 152  
- teilkristalline 152  
Bindungsenergie 16  
Bindungskräfte, zwischenmolekulare  
151  
Bindungszustand 15  
Böhmit 204  
Brechungsindex 154  
Brennen 46  
BR-Typ 78  
Brünieren 187, 194  
Bürsten 39

**C**

Cantilever 256  
Chemical Vapour Deposition 107  
Chemisorption 27, 180  
Chrom-Aluminieren 132  
Chromat 193  
Chromatentgiftung 269  
Chromatieren 121, 187, 193  
Chromit 193  
Chromitierung 193  
Chromschwefelsäure 103  
constant force mode 256  
constant height mode 256  
Copolymerisate 148, 149  
Coulomb-Kräfte 19  
CVD 107, 181

CVD-Verfahren 27, 176, 181  
Cyanidentgiftung 268

**D**

Daniell-Element 63  
Deckfähigkeit 81  
Deckschichten 15  
Deckvermögen 158, 256, 257  
Dekapieren 46, 50  
Dekoration und Ästhetik 13  
Desorption 262  
Diacetyldioxim 254  
Dichte 154  
Dickschichtpassivierung 193  
Dickschichttechnik 228  
Diffusionspolarisation 77  
Diodensputteranlage 112  
Dipol 24  
Dipole 152  
Dipolmolekül 155  
Direct Wire 214  
Dispergierhilfen 157  
Dispergiermittel 264  
Dispersion 134  
Dispersionskräfte 19  
Dispersionsschichten 91, 100  
Dissoziationsgleichgewicht 67  
Dissoziationsgrad 70  
Doppelschicht, elektrische 65, 75  
Drahtflammspritzen 127  
Driftgeschwindigkeit 70  
Druckknopfeffekt 24, 104  
Druckluftstrahlen 45  
Druckmedien 221  
Druckpasten 228  
Duktilität 59, 251  
Duplexsystem 121  
Durchschlagfestigkeit 254  
Durchtrittspolarisation 77  
Duromere 25

**E**

ECD 63  
Edelmetall 23  
EDX 237  
Einbrennen 180  
Einbrennlacke 194  
Einebnung 81  
Einkomponentensystem 162

Eisblumen 117  
 Elektrochemisches Äquivalent 64  
 Elektronegativitätsdifferenz 20  
 Elektronengas 16  
 Elektronenstrahlolithografie 13, 231  
 Elektronen-Strahl-Mikroanalyse (ESMA)  
   237  
 Elektronenstrahlung 230  
 Elektropolieren 50  
 Elektrotacklackieren 168  
 Eloxalschicht 199, 200, 201  
 Eloxieren 187  
 Eloxier-Verfahren 202  
 Email 176  
 Emailfritte 177  
 Emailleschichten 176  
 Emaillieren 176, 178  
 Emulgatoren 164  
 Energiebänder 16  
 Energy Dispersive X-Ray-Analysis 237  
 Entfetten 33, 36  
   - elektrolytisches 38  
 Entfetter 53  
 Entfettungslösungen 53, 261  
 Entfettungsvorgang 261  
 Entgiftung 268  
 Entlacken 175  
 Entlackung, pyrolytische 175  
 Entmetallisierung 50  
 Entsorgung 265  
 Entwickeln 218  
 Entwicklung 220  
 Epoxidharze (EP) 147  
 EW-Verfahren 197

## F

Faraday-Käfig 167  
 Faradaykonstante 74  
 Faradaysches Gesetz 64, 74  
 Farbanodisieren 202  
 Farbe 138, 158  
 Färben, elektrolytisches 206  
 Farbton 256  
 Faserverstärkung 25  
 FCKW-Halon-Verbotsordnung 39  
 Feinleitertechnik 213  
 Fernordnung 17  
 Ferroxytest 254  
 Fertigungsverfahren 11  
   - Beschichten 11

  - Fügen 11  
   - Stoffeigenschaft ändern 11  
   - Trennen 11  
   - Umformen 11  
   - Urformen 11  
 Festresists 215  
 Festschmierstoffe 36  
 Fette 35  
 Feueraluminieren 123  
 Feuerverzinken 114  
 Feuerverzinnen 122, 123  
 Filmbildung 161  
 Filmpositive 232  
 Filtration 265  
 FI-Typ 78  
 Flammpunkt 154  
 Flammgespritzen 126  
 Fließspülbad 56  
 Flotation 264  
 Fluidisierung 172  
 Fluoreszenzstrahlung 247  
 Flussmittel 35, 229  
 Fluxen 115  
 Fotodruck 227  
 Fotolacke 214  
 Fotolithografie 13, 214, 227  
 Fotomaske (Fototool) 214  
 Fotometrie 242  
 Fotopolymere 232  
 Fotoresists 214, 215, 226  
 Fototool 227  
 Fotovorlage 212  
 Fourier-IR-Spektroskopie 241  
 Fransen-Micelle 25  
 Fremdatom 17  
 Fremdschichten 15  
 Fritte 229  
 Fritten 178  
 FT-Typ 78  
 Füllstoffe 25, 138, 150, 161  
 Fungicid 157

## G

Galvanik 230  
 Galvannealing 121  
 Galvanoformung 91  
 Galvanoplastik 64, 90  
 Galvanoresists 215  
 Galvanotechnik 63  
 Gasabgabe 109

Gelbchromatierung 193  
Gerber-Daten 213  
Gestelltechnik 87, 91  
Gitterschnittprüfung 250  
Glanzbildner 81  
Glanzbildung 81  
Glanzgrad 256, 257  
Glanznickelelektrolyte 64  
Glanzzusätze 81  
Glasfritte 229  
Gleitmittel 36  
Gleitschleifen 39, 44  
Gleitspanen 44  
Glimmentladungsplasma 112  
Glycerol 263  
Graphitierung 91  
Grenzspannung 201  
Grenzstromdichte 83  
Gruppe, chromophore 158

**H**

Haftfähigkeit 249  
Haftoxide 180  
Haftung 14, 249  
Halbleitertechnik 222  
Harnstoffharze (UF) 141  
Härte 59  
Härter 148, 162  
Hartsegment 104  
Hartstoffschichten 176, 182  
Hartzinkschichten 117, 122  
Hauptvalenz 19  
Hautverhütungsmittel 157  
H-Brückenbindung 157  
Heißbelotung 123  
Heißbrünieren 195  
Heißentfettung 263  
Heißspritzverfahren 156  
Helligkeit 256, 257  
Helmholtzsche Doppelschicht 75  
High-Solids 155, 156, 166  
High-Solids-Lacke 269  
Hochfrequenzplasma 181  
Hochgeschwindigkeits-Strömungszellen 90, 92  
Hochrotationsverfahren 168  
Hochtemperaturverzinken 117  
Hot Air Levelling 123  
Hydratation 67, 204  
Hydrolyse 182

Hydroniumionen 71  
Hydrosol 99  
Hypophosphit 65

**I**

Idealgitter 17  
Inchromieren 132  
Inhibitoren 37, 150, 265  
- katodische 161  
Innenmetallisierung 96  
Integralfärben 202  
Interface 109  
Interfacezone 112  
Interferenz 248  
Interferenzfärben 206  
Interferenzmessverfahren 248  
Ion Beam Etching 225  
Ionenätzen, reaktives 226  
Ionenaustauscherharze 265  
Ionenaustauschkreislaufverfahren 266  
Ionenbeweglichkeit 71  
Ionenplattieren 108, 113  
Ionenstrahlätzen 225  
- reaktives 226  
Ionenstrahlen 225  
Ionenstrahlolithografie 214  
IR-Spektroskopie 239  
Isocyanate 156

**J**

Jet-Plating 90, 92

**K**

Kalomelektrode 83  
Kalisieren 132  
Kaltaufschweißen 182  
Kaltbrünierschichten 195  
Kaltpressschweißen 129  
Kaltreiniger 263  
Kanigen-Vernicklungs-Verfahren 65  
Kaskadenspülung 56  
Kaskadenspülverfahren 266, 267  
Kationen 67  
Kationenaustauscher 266  
Katodenzerstäubung 108  
Keime 18, 99  
Kesternicht-Test 242  
Kohlenwasserstoffe (HKW), halogeniert 38

Kohlenwasserstoffe (KW) 38  
Kollisionsgeschwindigkeit 130  
Kolorimetrie 242  
Komplexbildner 37  
Kondensationsreaktion 139  
Kondenswasserklimaprüfung 242  
Kontaktwinkel 258  
Konversionsschichten 53, 187  
Korbtechnik 87  
Korngrenzen 17  
Korngröße 42  
Koronapulversprühsystem 173  
Korrosionsbeständigkeit 59  
Korrosionsschutz 13  
Korrosionsschutzpigmente 160  
Korrosionsverhalten 242  
Korund 41  
Kovalenz, polarisierte 20  
Kreislaufverfahren 266  
Kreislaufverfahren mit Verdampfung 266  
Kristallisationspolarisation 77  
KTL-Schichten 170  
Kugelstrahlen 45  
Kühlmittel 36  
Kunststoff 23, 54  
- thermoplastischer 24  
Kunststoffmetallisierung 102

**L**

Lack 138  
Laminieren 216  
Läppen 44  
Latexsystem 164  
Leerstelle 17  
Leiterplattentechnik 232  
Leitfähigkeit, spezifische 70  
Leitfähigkeitsverhalten 13  
Leitsalze 67  
Leitungsband 17  
Leitungselektronen 16  
Lichtbogenspritzen 127  
Lichtschutzmittel 157  
Lichtstreuung 158  
Lichtwellenleitertechnik 104  
Lift-Off-Verfahren 211  
Liganden 68  
LIGA-Technik 214  
LIGA-Verfahren 91, 230  
Lithografie 230

Londonkräfte 19  
Löslichkeitsprodukt 190  
Lösungsmittel 138, 150, 229  
- organische 38  
Lotpasten 221, 229  
Lötstopplack 221  
LW-Verfahren 197

**M**

Magnetfeldunterstützung 112  
Magnetronsputter-PVD 112  
Makromolekül 24  
Mastertool (MT) 214  
MBV-Verfahren 197  
Mehrfachschichtsysteme (CMM) 94  
Mehrfachspülkaskade 56  
Melamin-Formaldehyd-Harze (MF-Harze) 141  
Messung, elektromagnetische 246  
Metallabscheidung  
- außenstromlose 91, 94, 212  
- elektrochemische 63  
- laserinduzierte 100  
Metallbindung 16  
Metallfärben 196  
Metallfärbetechniken 187  
Metallisierung, selektive 96  
Metallresisttechnik 232  
Metallrückgewinnung 268  
Metallspritzen 124  
Mikrosiebe 91  
Mittlere freie Weglänge 109  
Molmasse 152  
Monomere 139  
Morphologie 255  
Multilayer 232

**N**

Nachbehandlung 30  
Nassätzen 222  
Nassätzung 223  
Nassätzverfahren 222  
Nasslacke 138, 150, 161  
Nasslackieren 165  
Nassstrahlen 45  
Nebenvalenz 19  
Negativresists 215  
Nernstsche Potenzialgleichung 65  
Netzmittel 157

Netzwerkwandler 21  
Neutralisieren 46  
NiB-Schichten 96  
NiP-Schichten 96  
Normalpotenzial 119  
Normalspannung 251  
Novolacke 140

**O**

Oberfläche  
- geometrische 250  
- wahre 215  
Oberflächenenergie  
- freie 18  
- spezifische 27  
Oberflächenrelief 33  
Oberflächenspannung 27, 37  
Oberflächenumwandlung 30  
Öle 35  
Olivchromatierung 193  
Orbital 21  
Organosole 164  
Overspray 166, 269, 270  
Oxidation  
- anodische (ANOX-Verfahren) 198  
- elektrolytische (ELOXAL-Verfahren) 198  
Oxide 30  
Oxidkeramik 20  
Oxidnetzwerk 105

**P**

Paneel plating 232  
Pattern plating 232  
Peel-Test 252  
Permanent-Resist 211  
Permeat 264, 267  
PFOS 86, 268  
Pfropf-Copolymerisat 104  
Phase, intermetallische 116  
Phenolharze (PF) 139  
Phosphatieren 121, 187, 192  
Phosphatierung 188  
Phosphatschichten 188  
Physical Vapour Deposition 107  
Physisorption 27, 180  
Pigmente 138, 150, 158  
- anorganische 159  
- organische 159  
Pilze 35

Pittingbildung 191  
Plasmaätzen 226  
Plasma Etching 226  
Plasmagestützte PVD- und CVD-Verfahren  
183  
Plasmareinigen 50  
Plasmaspritzen 127  
Plasmaverfahren 33  
Plastomere, teilkristalline 104  
Plattieren 129  
Polarisation 73, 76  
Polierelektrolyte 52  
Polieren 39  
Polierfilm 51  
Polyaddition 139  
Polyaddukte 146  
Polyamide (PA) 142  
Polyblend 25  
Polyesterharze 142  
- gesättigte 143  
- ungesättigte 143  
Polykondensation 139  
Polymerfritte 229  
Polymerisate 148  
Polymerisation 139  
Polymerpasten 229  
Polymersysteme  
- anionische 155  
- kationische 155  
Polyurethane (PUR) 146  
Porendichte 253  
Porosität 21  
Positivresists 215  
Potenzial, elektrochemisches 20  
Printer 217  
Profilogramme 50  
Prüfmethoden  
- zerstörende 236  
- zerstörungsfreie 236  
Pull-off 251  
Pulse-Plating 91, 93  
Pulverflammspritzen 127  
Pulverlacke 155, 156, 161, 269  
Pulverlackieren 172, 270  
Pulversintern 172  
Pulversinterverfahren 156  
Pulversprühen 156, 165  
- elektrostatisches 172  
PVD 107  
PVD-Verfahren 27, 176  
Pylumin-Verfahren 197

## Q

Quarzmonitorverfahren 249  
 Querschleife 244

## R

Rakel 220  
 Randwinkel 27, 258  
 Randwinkelmessung 258  
 Randzone 15, 33  
 Rapid Prototyping 214  
 Rasterelektronenmikroskop (REM) 237  
 Rasterfotoplotter 213  
 Rasterkraftmikroskopie 255  
 Reactive Ion Beam Etching 226  
 Reactive Ion Etching 226  
 Reaktionspolarisation 77  
 Realgitter 17  
 Reflexionsvermögen 59, 248  
 Reflow-Löten 229  
 Regenerierung 261, 265  
 Reinigung 35  
 Reinigungseffekt 30  
 Reinzinkschicht 117  
 Resistbild 210  
 Resistmasken 226  
 Resist-Technik 232  
 Resole 139  
 Retentat 264  
 RIP-Programm (Raster Image Prozessor)  
 213  
 Röntgenfluoreszenz-Analyse (RFA) 238,  
 247  
 Röntgenlithografie 214  
 Röntgenstrahlung 230  
 Röntgentiefenlithografie 231  
 Roststabilisierung 50  
 Rostumwandlung 50  
 Rückgewinnung 261  
 Rückhaltung 261  
 Rücklösen 200  
 Rücklösevermögen 201  
 Rücksprüheffekt 174  
 Rückstreuelektronen 255  
 Ruß 35

## S

Salze 35  
 Salzsprühnebeltest 242

Sand 35  
 Sandwichstrukturen 182  
 Schablonendruck 229  
 Schälverfahren 252  
 Schichtanalytik 237  
 Schichtdicke 14, 243  
 Schichten  
 - anorganische 181  
 - nichtmetallische organische 138  
 Schlacke 35  
 Schleifen 39  
 Schleuderverzinken 114  
 Schmiermittel 36  
 Schutzkolloid 99  
 Schwarzchromatierung 193  
 Schwarzoxidieren 197  
 Schwingquarz 249  
 Sealing 203  
 Sedimentation 264  
 Seifen 263  
 Sekundärelektrone 255  
 Semiadditivtechnik 211, 232  
 Sendzimier-Schichten 122  
 Sensibilisierung 107  
 Sherardisieren 133  
 Siccative 157  
 Sieb 220  
 Siebdruck 215, 220, 226  
 Siebdruckrahmen 220  
 Siebdruckverfahren 227  
 Siedebereich 154  
 Silikonöle 36  
 Silikonharzlacke 145  
 Siliziumcarbid 41  
 Sinterprozesse 21  
 SMD-Kleber 221  
 Sol-Gel-Verfahren 107  
 Solvatation 151  
 Solvathüllen 152  
 Spanen 33  
 Sperrschicht 199  
 Sphärolithe 25, 104  
 Spot-Plating 92  
 Spreiten 258  
 Sprengplattieren 130  
 Spritzspülen 56  
 Spritzverfahren 128, 165, 191  
 - pneumatisches 165  
 Spritzverzinkung 54  
 Spritzzusatz 125  
 Sprühen, elektrostatisches 167

Spülen 46, 54  
Spülkriterium 54, 265  
Sputterätzen 225  
Sputter Etching 225  
Sputtern 108, 112, 181  
- reaktives 113  
Stabilität, thermische 59  
Stammlack 162  
Standspüle 55, 56  
Staub 35  
Stern-Graham-Modell 75  
Stirnabzugverfahren 251  
Stoffe, amorphe 22  
Störzone 30  
Strahlentrostung 45  
Strahlverfahren 33  
Streifefähigkeit 81, 82  
Strippen 212  
Stromausbeute 82  
Stromdichte-Potenzial-Kurven 77, 82  
Strukturätzen 228  
Stückverzinken 114  
Substrat 15  
Subtraktivtechnik 13, 210  
Subtraktivverfahren 232  
Sulfide 30  
Suntest 243  
System  
- disperses 152  
- kolloiddisperses 152  
System Fe-Zn 116

**T**

Tampongalvanik 90, 92  
Tape Test 250  
Target 112  
Tauchlackieren  
- anodisches 168  
- autophoretisches 168  
- katodisches 168  
Tauchlackierung, kationische 156  
Tauchlackierverfahren 168  
Tauchspülen 56  
Temperaturwechselbeständigkeit 180  
Tenside 37, 264  
Tenting-Technik 232  
Testflüssigkeit 258  
Teststifte 258  
Testtinten 258  
Textur 19

Thioharnstoffharze 141  
Thixotropierungsmittel 157  
Tiefätzen 228  
Tiefemperaturlackung 176  
Tiefung 251  
Tiefungsprüfung nach Erichsen 251  
Topcoat 134  
Top Coats 194  
Topografie  
- spezielle 13  
Topologie 255  
Trägermaterial, kernkatalysiertes  
211  
Transparentchromatierung 194  
Transparenz 158  
Tribopulversprühsystem 173, 174  
Triborohr 174  
Trockenätzen 225  
Trockenätzverfahren 222  
Trockenresist 211  
Trockenverzinken 115  
Trocknung  
- chemische 162  
- oxidative 162  
- physikalische 161  
Trommeltechnik 87, 91

**U**

Überführungszahl 71  
Überspannung 76  
UD-Typ 78  
Ultrafiltration 264  
Ultraschall 36  
Umkehrosiose 266, 267  
Umpolbeizen 48  
Umweltschutz 269  
Unterätzung 222, 228  
UV-Spektroskopie 239  
UV-Strahlung 243

**V**

Vakuumaufdampfen 212  
Vakuumpulvermaspritzen 127  
Vektorplotter 213  
Verankerung, mechanische 29  
Verbrennungsgas 126  
Verdampfungsgeschwindigkeit 110  
Verdünnungsgrad 55  
Verdunstungszahl VZ 154

## Verfahren

- chemisch-thermische 132
- coulometrisches 245
- elektromagnetisches 246
- magnetinduktives 246
- mechanische 39
- mikroskopisches 244
- spektroskopische 237

## Verhalten

- anisotropes 20
- optisches 13

## Verschleiß

- abrasiver 182
- adhäsiver 182

## Verschleißverhalten 13

## Verschleißwiderstand 59

## Versetzung 17

## Versiegelung 194, 205

## Verzinken 115

## VOC (volatile organic compounds) 155

## Volumendiffusion 109

## Vorbehandlung 30

**W**

## Wachse 35

## Wachstumstyp 78

## Walzplattieren 129, 130

## Wanderungsgeschwindigkeit 70

## Wasserhaut

- permanente 22
- temporäre 23

## Wasserlacke 155, 156, 269

## Wasserstoffversprödung 134

## Wasserstoffüberspannung 77

## Watts-Typ 64

## Wave Length Dispersive X-Ray-Analysis 237

## WDX 237

## Wechselwirkung, interionische 71

## Weichsegment 104

## Weißblech 123

## Weißrost 120

## Wellenzahl 241

## Wirbelbadverfahren, elektrostatisches 175

## Wirbelbett 172

## Wirbelpulver 173

## Wirbelsintern 172

## Wirbelstromverfahren 246

## Wirksubstanz 229

**X**

## Xenon-Test 243

**Z**

## Zementation 69, 265

## Zentrifugation 264

## Zerstäubergase 125

## Zinkasche 115

## Zinkdruckguss 54

## Zinkkrätze 115

## Zink-Lamellenabscheidung 133, 194

## Z-Typ 78

## Zweikomponentensystem 162

## Zwischengitteratom 17