

# HANSER



## Leseprobe

zu

## „Verfahren in der Beschichtungs- und Oberflächentechnik“

von Hansgeorg Hofmann und Jürgen Spindler

Print-ISBN: 978-3-446-46455-1

E-Book-ISBN: 978-3-446-46498-8

Weitere Informationen und Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-46455-1>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

# Vorwort

Eine wesentliche Voraussetzung dafür, ein Lehrbuch zu einem derart umfangreichen Gebiet, das Kenntnisse der Physik, Chemie und Werkstofftechnik vereinigt, vorzulegen, ist die langjährige Erfahrung in der Ausbildung von Studenten auf den Gebieten der Oberflächen- und Werkstofftechnik.

Die praktischen Zielstellungen der Oberflächentechnik sind äußerst vielfältig – angefangen vom Korrosionsschutz über die Erhöhung der Verschleißfestigkeit einer Oberfläche. 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, Prüfmethoden für Schichten und Oberflächen und Aspekte des Umweltschutzes und der Arbeitssicherheit.*

Es ist nicht 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, Prozessplanung, 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 auf [www.hs-mittweida.de/bandotec](http://www.hs-mittweida.de/bandotec) sollen unser Grundanliegen *Darstellung des Zusammenhangs zwischen grundsätzlichen chemischen und physikalischen Stoffeigenschaften und den erzielbaren Änderungen von Oberflächeneigenschaften* unterstützen.

Es ist unser Ziel, nicht sämtliche Verfahren zur Beschichtung in der Oberflächentechnik hinsichtlich aller Aspekte der Verfahrensdurchführung und der erzielbaren Resultate umfassend in diesem Buch abzuhandeln. Gerade deshalb halten wir unser Buch für die Ausbildung in den Studiengängen Elektrochemie, der Physikalischen Chemie, der Werkstoffwissenschaft, Kunststofftechnik, Schweißtechnik, Leiterplattentechnik u. a. m. für besonders geeignet.

Ein Vorwort ist auch geeignet, 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. Auch die in Vorbereitung der vierten Auflage erhaltenen Hinweise fanden Berücksichtigung. Uns ist aber auch bestätigt worden, dass das Anliegen dieses Buches eben nicht darin bestehen kann, ein Grundlagenlehrbuch vorzulegen, dafür gibt es genügend Spezialliteratur.

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, insbesondere das Kapitel „Strukturierte Oberflächen“, notwendig durch die in den letzten Jahren erfolgten rasanten Neuentwicklungen, aktualisiert und durch neue bildliche Darstellungen ergänzt.

Es ist uns nach wie vor ein Anliegen, Herrn Andreas Eysert für die metallografischen Aufnahmen und Herrn Enrico Gehrke für die REM-Bilder zu danken.

Die Autoren bedanken sich auch beim Hanser Verlag, namentlich Natalia Silakova-Herzberg und Christina Kubiak und ihren Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern für die gute Zusammenarbeit.

Mittweida, im Frühjahr 2020

*Hansgeorg Hofmann  
Jürgen Spindler*

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Vorwort</b> .....	<b>5</b>
<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
<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
<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

## **5** Abscheidung nichtmetallischer Schichten ..... 138

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

## **6** Verfahren zur Herstellung von Konversionsschichten ..... 187

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

<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	222
7.3	Anwendung von Strukturierungstechniken	227
7.3.1	Struktur- und Formteilätzen	227
7.3.2	Drucken von Pasten	230
7.3.3	LIGA-Verfahren	231
7.3.4	Leiterplattentechnik	234
<b>8</b>	<b>Prüfmethoden für Schichten und Oberflächen</b>	<b>241</b>
8.1	Chemische Zusammensetzung	242
8.1.1	Elektronen-Strahl-Mikroanalyse (ESMA)	242
8.1.2	Atom-Absorptions-Spektroskopie (AAS)	243
8.1.3	UV- und IR-Spektroskopie	244
8.1.4	Kolorimetrie	247
8.2	Korrosionsverhalten	247
8.2.1	Kondenswasserklimaprüfung	247
8.2.2	Salzsprühnebeltest	247
8.2.3	Bewitterungsversuche	248
8.3	Schichtdicke	248
8.3.1	Mikroskopisches Verfahren	249
8.3.2	Coulometrisches Verfahren	250
8.3.3	Elektromagnetische Messung	251
8.3.4	Beta-Rückstreuverfahren	252
8.3.5	Röntgenfluoreszenz-Analyse (RFA)	252
8.3.6	Interferenzmessverfahren	253
8.3.7	Quarzmonitorverfahren	254
8.4	Haftung	254
8.4.1	Gitterschnittprüfung	255
8.4.2	Tiefungsprüfung nach ERICHSEN	256
8.4.3	Biegeversuch	256
8.4.4	Stirnabzugverfahren	256
8.4.5	Schälverfahren (Peel-Test)	257
8.5	Porendichte	258
8.5.1	Ferroxyltest	259
8.5.2	Test mit Diacetyldioxim (Dimethylglyoxim)	259
8.6	Morphologie und Topologie	260
8.7	Optisches Erscheinungsbild von Schichten	261
8.8	Benetzbarkeit	263

---

<b>9</b>	<b>Aspekte des Umweltschutzes und der Arbeitssicherheit . . . . .</b>	<b>266</b>
9.1	Regenerierung und Entsorgung von Reinigungs- und Entfettungslösungen . . . . .	266
9.1.1	Organische Lösungsmittel . . . . .	266
9.1.2	Verminderung, Regenerierung und Entsorgung alkalisch wässriger Reinigungslösungen . . . . .	268
9.1.3	Verminderung, Regenerierung und Entsorgung von wässrigen Reinigungslösungen, die Dispergiermittel enthalten . . . . .	269
9.1.4	Regenerierung und Entsorgung von wässrigen Beiz- und Neutralisierlösungen . . . . .	270
9.1.5	Regenerierung von Spülwässern . . . . .	270
9.1.5.1	Ionenaustauschkreislaufverfahren . . . . .	271
9.1.5.2	Kreislaufverfahren mit Verdampfung . . . . .	271
9.1.5.3	Umkehrosmose im Kreislaufverfahren . . . . .	272
9.1.5.4	Kaskadenspülverfahren . . . . .	272
9.1.6	Metallrückgewinnung aus wässrigen Lösungen . . . . .	273
9.2	Entgiftung von Abwässern . . . . .	273
9.2.1	Cyanidentgiftung . . . . .	273
9.2.2	Chromatentgiftung . . . . .	274
9.3	Organische Beschichtung und Umweltschutz . . . . .	274
9.4	Arbeitssicherheit . . . . .	275
<b>■</b>	<b>Übergreifende Literatur . . . . .</b>	<b>279</b>
<b>■</b>	<b>Bildnachweis . . . . .</b>	<b>280</b>
<b>■</b>	<b>Sachwortverzeichnis . . . . .</b>	<b>281</b>

# 1

## Einführung

Jeder Gegenstand steht über seine Oberfläche in Wechselwirkung mit der Umgebung. Vor-dergründig 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“.

Reinigen, Entfetten, Beizen und Ätzen sind 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, pulveriger 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 Elektronenstrahlolithografie 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**

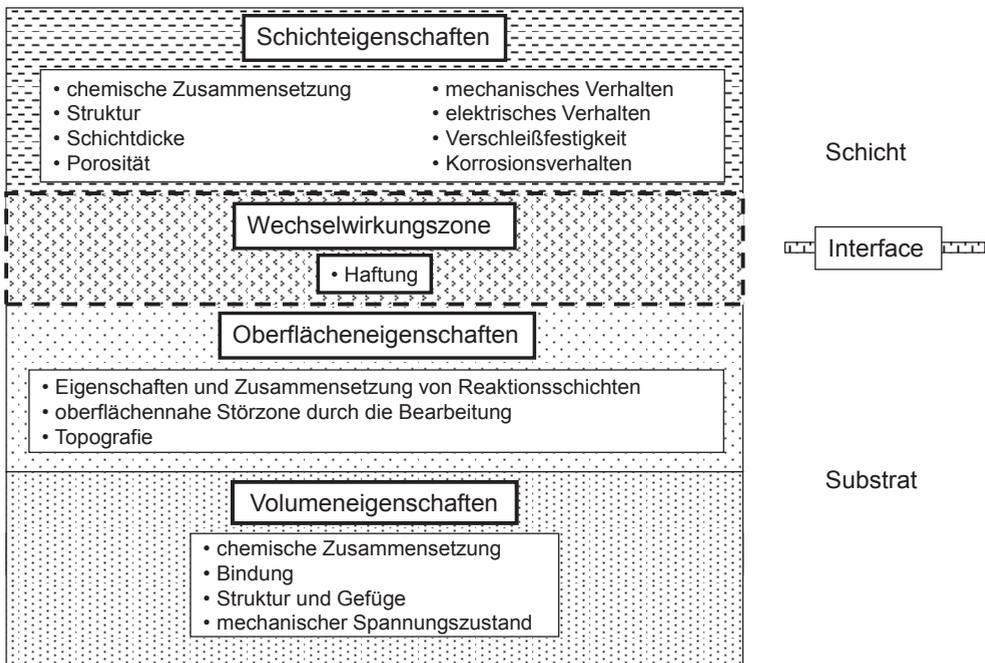
#### Aufgaben und Ziele der Beschichtungs- und Oberflächentechnik

- 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.

# 2

## Aufbau und Eigenschaften oberflächennaher Werkstoffbereiche

In vielen Lehrbüchern der Oberflächentechnik stehen die Verfahren der Schichtbildung und die Methoden zur Bestimmung von Schichteigenschaften im Vordergrund. Um aber Zusammenhänge zwischen Technologie und Eigenschaften erfassen zu können, sind genauere Kenntnisse zu den Eigenschaften der Substratwerkstoffe und ihrer oberflächennahen Bereiche erforderlich. Den gesamten Komplex Substrat - Oberfläche - Schicht soll Bild 2.1 veranschaulichen.

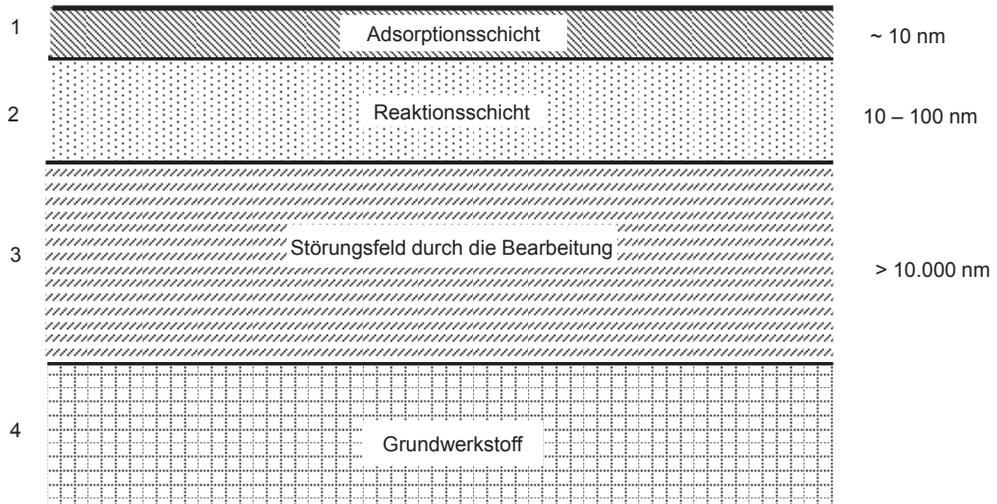


**Bild 2.1:** Strukturschema der äußeren Bereiche eines beschichteten Substrates

Dieses Schema umfasst die physikalischen und chemischen Verhältnisse einer Werkstückoberfläche nach erfolgter oberflächentechnischer Bearbeitung. Im Bild 2.2 ist der Zustand des Werkstückes vor der Vorbehandlung skizziert. Unter Substrat soll der Werkstoffzustand unterhalb von Fremd- und Deckschichten verstanden werden (Grundwerkstoff). Die Bereiche 1, 2 und 3 lassen sich zum Begriff **Randzone** zusammenfassen.

Als Substratwerkstoffe sollen die Werkstoffgruppen Metalle, Kunststoffe, Keramiken und Gläser näher charakterisiert werden. Ihre Eigenschaften resultieren immer aus dem Bin-

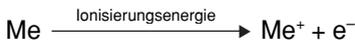
dungszustand zwischen den elementaren Bausteinen (Atome, Ionen, Moleküle) sowie ihrer räumlichen Anordnung und Verteilung; zu beachten ist dabei, dass die unmittelbar die Oberfläche bildenden Bausteine nichtabgesättigte Bindungszustände besitzen. Als Folge davon findet zur Absättigung dieser Bindung die Wechselwirkung mit der Umgebung statt. Für die oben genannten Substratwerkstoffe erfolgt im Weiteren eine modellhafte Darstellung der Bindungsarten und resultierenden Ordnungszustände im festen Zustand.



**Bild 2.2:** Oberflächennahe Bereiche eines Substrates  
 1 H<sub>2</sub>O, organische Substanzen, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> u. a.  
 2 Oxide, Sulfide, Carbonate u. a.  
 3 mechanische und thermische Bearbeitung  
 4 Substrat

## ■ 2.1 Metallische Werkstoffe

Im Vergleich zu den Edelgasen und Nichtmetallen besitzen die Metalle eine geringere Ionisierungsenergie. Zur Ionisierung eines Metallatoms muss ein Elektron unter Energiezufuhr die Hülle verlassen.



Diese Elektronen gehören keiner Elektronenhülle eines benachbarten Atoms mehr an und sind somit keinem speziellen Atom zuordenbar. Die Metallbindung beruht auf der elektrostatischen Wechselwirkung zwischen den Metallkationen, oft auch in diesem Zusammenhang als positive Atomrümpfe bezeichnet, und im Festkörperverband beweglichen Elektronen (Leitungselektronen). Mit einer Bindungsenergie von ca. 200 kJ · mol<sup>-1</sup> zählt die Metallbindung zu den schwächeren Hauptvalenzen. In Analogie zur Gastheorie nennt man die sogenannten „frei“ beweglichen Elektronen auch Elektronengas. Die wellenmechanische Theorie der Metallbindung geht bei der Bildung des kristallinen Festkörpers von der Aufweitung diskreter Energieniveaus des Einzelatoms zu Energiebändern aus. Dabei bildet

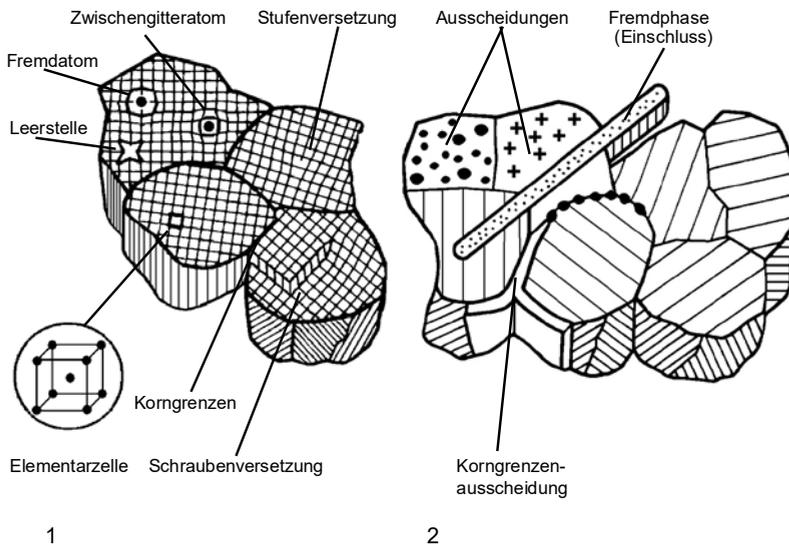
sich das sog. Leitungsband, in dem unter Aufnahme von Energie diese Leitungselektronen verschiebbar werden. Bei der Metallbindung handelt es sich um eine ungerichtete Bindung. In einem Volumenelement des metallischen Festkörpers lässt sich deshalb eine maximale Packungsdichte erreichen. Es bilden sich die bekannten Gitterstrukturen, wie kubisch flächenzentriert, kubisch raumzentriert und hexagonal. Außerdem ergibt sich hieraus die relativ leichte Austauschbarkeit der Metallkationen gegen andere mit ähnlichem Atomvolumen und gleicher Valenzelektronenzahl.

Mit diesem Modell der Metallbindung lassen sich die für die Oberflächentechnik bedeutsamen Eigenschaften der Metalle ableiten. Das Elektronengas ist hauptsächlich verantwortlich für die hervorragende Leitfähigkeit der meisten Metalle für Strom und Wärme sowie ihren metallischen Glanz. Die hohe Packungsdichte und Austauschbarkeit der Atomrümpfe im Metallgitter wird zum strukturbestimmenden Faktor und erklärt die Möglichkeit der Legierungsbildung und die Duktilität (Verformbarkeit).

Hinsichtlich ihrer Struktur sind Metalle kristalline Werkstoffe, deren Bausteine dreidimensional, sich periodisch wiederholend, in Form einer Fernordnung vorliegen. Das entspricht der Vorstellung von einem Idealgitter. Das Realgitter weicht von diesem Modell ab und besitzt Gitterfehler (Defekte), wie:

- Punktdefekte (Leerstelle, Zwischengitteratom, Fremdatom),
- Liniendefekte (Versetzungen),
- Flächendefekte (Korngrenzen, Phasengrenze u. a.) wie im Bild 2.3 (1) veranschaulicht.

Neben den Gitterfehlern in atomaren Bereichen entstehen in Metallen technischer Reinheit zusätzlich makroskopische Defekte (Volumendefekte), wie Einschlüsse, Ausscheidungen u. a. (siehe Bild 2.3 (2))

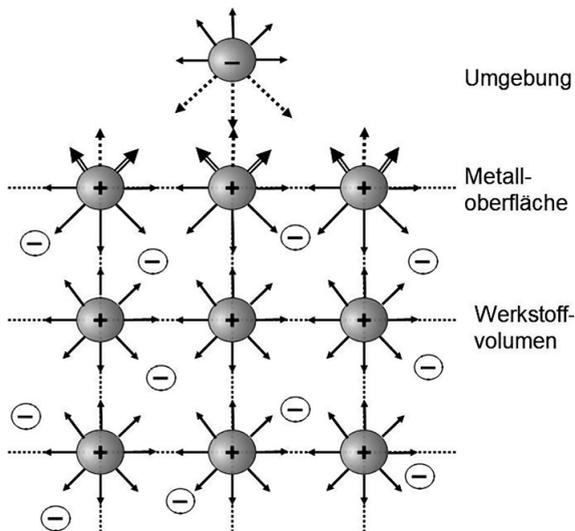


**Bild 2.3:** Strukturdefekte in Metallen (nach SCHREIBER)

- 1: Gitterfehler in einem reinen Metall
- 2: Gefüge in einem Metall technischer Reinheit

Jede Abweichung vom idealen Metallgitter verursacht eine Abweichung vom Gleichgewichtsabstand und führt damit zur Ausbildung eines Spannungszustandes im atomaren Bereich. Das wirkt sich insbesondere auf das mechanische Verhalten der Metalle und in bedeutendem Maße auf die elektrische Leitfähigkeit aus. Gitterfehler beeinflussen auch das Korrosionsverhalten. Die in der Praxis eingesetzten Metalle sind in den allermeisten Fällen polykristallin. Sie bilden einen Verband vieler kleiner Kristalle, die man als Kristallite oder Körner bezeichnet. Die Bildung der Kristallite beginnt an einem Keim, sodass z. B. in einer Schmelze gleichzeitig viele Kristallite wachsen. Mit Abschluss der Kristallisation stoßen also einzelne zufällig orientierte Kristallbereiche gegeneinander. Es entstehen Grenzbereiche (Korngrenze) mit vom Korninneren abweichender Anordnung. Jeder Kristallit ist in sich anisotrop, d. h. die Eigenschaften sind richtungsabhängig. Ein polykristallines Material mit einer Vielzahl unterschiedlich orientierter Kristallite verhält sich quasiisotrop. In den Korngrenzen finden wir eine Anhäufung von Gitterfehlern, wie Punkt- und Liniendefekte. Die Korngrenze, ein Gebiet mit gestörter interatomarer Ordnung, stellt einen Bereich mit erhöhtem Energieinhalt dar. Sie unterscheidet sich deshalb in den chemischen und physikalischen Eigenschaften vom Korninneren. Korngrenzen führen zur Erhöhung des elektrischen Widerstandes, zur Behinderung von Verformungsvorgängen, zu erhöhter chemischer Reaktionsfähigkeit und zur Ausbildung von Diffusionswegen.

Während die Bindungen zwischen den Atomrümpfen im Inneren des Metallgitters abgesättigt sind, trifft das für die Oberfläche und auch den oberflächennahen Bereich nicht zu. Sie verfügen nach außen hin über noch bindungsfähige Elektronenzustände (freie Oberflächenenergie) und bewirken die Ausbildung von Bindungen mit zur Verfügung stehenden Atomen, Ionen oder Molekülen an der Grenzfläche zwischen Metalloberfläche und Umgebung (siehe Bild 2.4).



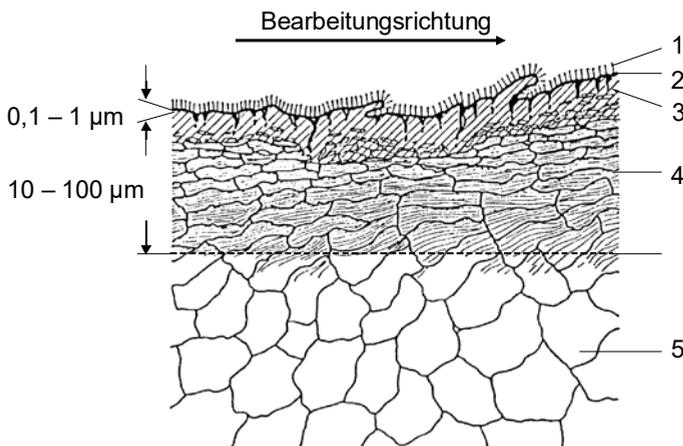
**Bild 2.4:** Wechselwirkung der freien Metalloberfläche mit anderen Medien

Für die Beurteilung von Bindungszuständen ergibt sich die Notwendigkeit, in Haupt- und Nebenvalenz zu differenzieren. Hauptvalenzen sind die Ionen-, Atom- und Metallbindung. Zu den Nebenvalenzen zählen schwache elektrostatische Wechselwirkungen, z. B. zwischen Dipolen und sehr schwache elektrostatische Wechselwirkungen durch LONDON- oder Dispersionskräfte. Nebenvalente Bindungskräfte werden auch zwischenmolekulare Bindungen genannt.

Ein besonderes Merkmal der Metalloberfläche besteht in der Anwesenheit frei verschiebbarer Elektronen im Leitungsband. Nähert sich eine elektrische Ladung der Metalloberfläche auf den Abstand  $a$ , so verteilen sich die Elektronen innerhalb eines oberflächennahen Bereiches neu. Ihre ursprünglich homogene Verteilung wird gestört und es kommt zur Ausbildung eines COULOMB-Feldes. Das Metall wirkt wie eine entgegengesetzte Ladung im Abstand  $a$  von der Oberfläche. Diese Vorstellung von jener Spiegel- oder Bildladung führt für den Fall der Annäherung einer negativen Ladung zur Anziehung durch die sog. Bildkraft.

Insgesamt kommt es also an Metalloberflächen durch COULOMB-Kräfte der Atomrümpfe und der Bildladung zur elektrostatischen Wechselwirkung mit geladenen Teilchen, die sich der Oberfläche annähern.

Jede Bearbeitung des Metalls führt zu nachhaltigen Änderungen von Struktur und Gefüge. Eine bildliche Darstellung der realen Werkstückoberfläche nach erfolgter Bearbeitung zeigt Bild 2.5. Bei einigen Fertigungsverfahren (Walzen, Schmieden) werden Kristallite erzeugt, die bevorzugt in Bearbeitungsrichtung orientiert sind, es entsteht die Textur. Orientierte Strukturen entstehen ebenfalls z. B. beim Gießen.



**Bild 2.5:** Beispiel der bearbeiteten Werkstückoberfläche eines Metalls  
 1 Fett- oder Ölfilm 2 Adsorptions- und Reaktionsschicht (1 + 2 bilden die äußere Grenzschicht) 3 Übergangszone 4 innere Grenzschicht 5 ungestörtes Metallgefüge

Als Folgen einer Bearbeitung sind neben der Formgebung weiterhin zu berücksichtigen:

- Änderung des elektrochemischen Potentials,
- Verfestigung,

- anisotropes Verhalten der Metalle mit Textur,
- Änderung des Oberflächenprofils.

Das elektrochemische Potenzial verändert sich zu negativeren Werten und damit wird die Oberfläche korrosionsanfälliger. So muss man von einem hochlegierten Chromnickelstahl mit hoher Korrosionsbeständigkeit die Verformungsrandzone entfernen, um die ursprüngliche Korrosionsfestigkeit wiederherzustellen, z. B. durch elektrochemisches Polieren.

In der Folge der Verfestigung bilden sich in der Oberflächenzone mechanische Spannungen aus, die bei einer Beschichtung zur ungenügenden Haftung zwischen Oberfläche und Schicht führen können. Um dem vorzubeugen, baut man durch geeignete Wärmebehandlungsverfahren, wie Spannungsarmglühen und Rekristallisieren, derartige Spannungen ab.

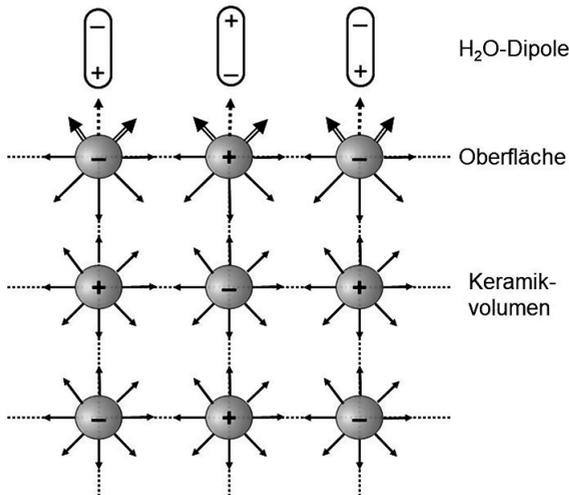
Anisotropie in der Oberflächenschicht bewirkt bei Ätzprozessen eine unterschiedliche Angriffsgeschwindigkeit und damit eine unterschiedlich große Ätzrate.

Bei der Bearbeitung von Oberflächen durch Verformen entsteht durch abrasiven und/oder adhäsiven Verschleiß die Profiländerung. Die damit verbundene Vergrößerung der geometrischen hin zur wahren Oberfläche kann zur Erhöhung der Haftung von Beschichtungen auf solchen Oberflächen genutzt werden. Ein weiterer Beitrag kann sich durch die mechanische Verankerung ergeben.

## ■ 2.2 Nichtmetallisch anorganische Werkstoffe

Im engeren Sinne handelt es sich hier um keramische Werkstoffe und Gläser. In beiden Werkstoffgruppen findet man sowohl Ionen- als auch Atombindungen (= Kovalenz) vor. Keramiken sind vom Bindungstyp her ionisch, aber auch durch polarisierte Kovalenzen gekennzeichnet. Der dominierende Bindungstyp in Oxidkeramiken, z. B. in  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - und  $\text{ZrO}_2$ -Keramik, ist die Ionenbindung. Die Elektronegativitätsdifferenz der Bindungspartner entscheidet über die Ausbildung einer Ionenbindung oder einer polarisierten Kovalenz. Als Richtwert gilt eine Differenz im Bereich um 1,7. Liegt die Elektronegativitätsdifferenz der Bindungspartner unter 1,7, bilden sich im Gitter keine Ionen mehr, es entstehen polarisierte Atombindungen, wie z. B. in Carbiden ( $\text{SiC}$ ,  $\text{WC}$ ) und Nitriden ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{TiN}$ ).

Ionenbindungen entstehen durch Abgabe und Aufnahme von Elektronen zwischen den sich bindenden Teilchen, es entstehen dadurch Kat- bzw. Anionen, deren Ionenladungen zwischen eins und drei liegen können. Um jedes einzelne Ion bildet sich im Idealfall ein kugelsymmetrisches elektrostatisches Feld. Infolge der Coulombschen Anziehung zwischen vielen entgegengesetzt geladenen Ionen entsteht das Ionengitter. So beschränkt sich also die Bindung eines einzelnen Kations nicht auf ein bestimmtes einzelnes Anion, sondern sie besteht gleichmäßig mit allen benachbarten Anionen und umgekehrt. Die Ionenbindung stellt demzufolge eine ungerichtete Bindung dar. An der Oberfläche werden die elektrostatischen Ladungen infolge des Fehlens der Partnerionen nur teilweise abgesättigt. Eine solche Oberfläche zeigt immer das Bestreben, mit geladenen Teilchen aus der Umgebung zu wechselwirken. Demgemäß können sich z. B. Wasserdipole nebenvalent an die Oberfläche einer solchen Keramik binden, was hydrophile Verhalten entspricht (siehe Bild 2.6).



**Bild 2.6:** Wechselwirkung einer ionischen Keramikoberfläche mit Wasser (Als Ladungsverhältnis für diesen Modellfall gilt Kation : Anion = 1 : 1)

Werden die Elektronen nur anteilig abgegeben und aufgenommen, entsteht eine polarisierte Atombindung und im Ergebnis ein polarisiertes Atomgitter. Die bindenden Orbitale überlappen sich im Sinne der Atombindung, aber infolge der vorhandenen Elektronegativitätsunterschiede ist diese polarisiert. Auf der Oberfläche einer derartigen Keramik wirken darum schwächere elektrostatische Kräfte im Vergleich zum Ionengitter.

Aufgrund des Fehlens „frei“ beweglicher Elektronen im Gitter sind Keramiken elektrisch nichtleitend und infolge der relativ hohen Bindungsenergie sind die Gitterbausteine in den Ionengittern bzw. polarisierten Atomgittern schwer gegeneinander verschiebbar. Keramiken sind hart, spröde und wenig duktil sowie thermisch hoch belastbar. Da keramische Werkstoffe prinzipiell durch Sinterprozesse aus pulverförmigen Ausgangsstoffen hergestellt werden, sind sie porös. Neben der Vergrößerung der wahren Oberfläche bedeutet Porigkeit den Einschluss von Flüssigkeiten und Gasen. Wird eine solche Oberfläche ohne entsprechende Maßnahmen beschichtet, kann das beim Erwärmen zum Abheben der Schicht führen. Andererseits kann die Porosität unter der Voraussetzung einer „sauberen“ Oberfläche zur mechanischen Verankerung beitragen und damit die Haftung erhöhen.

Gläser enthalten als bestimmende Bausteine (Nahordnung) SiO<sub>4</sub>-Tetraeder und Alkali- und Erdalkalioxide. Die SiO<sub>4</sub>-Tetraeder bilden miteinander ein Netzwerk, das durch den Einbau der Alkali- und Erdalkali-Kationen gestört wird (Netzwerkzähler). Im Gegensatz dazu kann sich im Quarzkristall ein ungestörtes Raumnetz von SiO<sub>4</sub>-Tetraedern ausbilden. Diese Zusammenhänge soll das Bild 2.7 veranschaulichen.

# Sachwortverzeichnis

## A

- Abfall 266
- Abfallverbrennung 267
- Abkochen 37
- Abluft 266
- ABS 102
- Abscheidung (electroless plating)
  - außenstromlose 63
  - autokatalytische 63
  - chemische Metallisierung 63
  - chemisch-reduktive 63
- Abscheidungskonstante 74
- Abscheidungsverfahren 12
  - chemische 12
  - physikalische 12
- Abscheidung, zementative 97
- ABS-Effekt 104
- Abstritzen 38
- Abtragen, mechanisches 175
- Abtragverfahren 33
- Abwasser 266
- ACC-Beschichtung (Autophoretic Coating Chemicals) 171
- ACC-Technik 156
- Additive 150, 157
- Additivtechnik 13, 211, 238
- Adhäsion 26
- Adsorbat 27
- Adsorbens 27
- Adsorpt 27
- Adsorption 26
- Adsorptionsmittel 27
- Adsorptiv 27
- AFM 260
- Airless-Spritzen 166
- Aktivator 211
  - ionogener 99
  - kolloidaler 99
- Aktivierung 99
- Aktivität, biochemische 13
- Aktivkohle 266
- Algen 35
- Alitieren 132
- Alkydharze 144
- Alucoat 124
- Aluminal 124
- Aluminieren 132
- Aluminiumoxid 123
- Anionen 67
- Anionenaustauscher 271
- Anoden
  - inerte 82
  - lösliche 82
- Anodenschlamm 89
- Antiausschwimm-Mittel 157
- Antifoulingmittel 157
- Äquipotenziallinien 79
- Aquokomplex 68
- Arbeitssicherheit 275
- Atom-Absorptions-Spektroskopie (AAS) 243
- Atomgitter 21
- Atomic Force Mikroskopie 260
- ATR-Technik 246
- Ätzen 33, 210f., 222f., 226f., 231, 239
- Ätzmittel 224, 229
- Ätzreaktionen 224
- Ätzresist 215, 221
- Ätzverfahren 211, 222, 226
- Aufdampfen 107, 181
- Aufstäuben 108
- Auftraglöten 129
- Auftragschweißen 129
- Ausschleppverlust 55
- außenstromlose Metallabscheidung 211
- Autokatalyse 95
- Azofarbstoffe 206

## B

- Baktericid 157
- Bakterien 35
- Bandverzinkung 114, 121
- Basecoat 134
- Basismaterial 234, 235, 239
- Beizen 33, 46, 53
  - anodisches 48
  - elektrolytisches 48
  - katodisches 48

Beizreaktion 188  
 Bekeimung 95  
 Benetzbarkeit 13, 263  
 Benetzung 26  
 Benetzungsrandwinkel 26  
 Benetzungstest 36  
 Bereiche, kristalline 25  
 Beschichtung, außenstromlose 99  
 Beta-Rückstreuverfahren 252  
 Bewitterungsversuche 248  
 Biegeversuch 256  
 bifunktionell 139  
 Bindemittel 150, 230 f.  
 – 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 261  
 Chemical Vapour Deposition 107  
 Chemisorption 27, 180  
 Chrom-Aluminieren 132  
 Chromat 193  
 Chromatentgiftung 274  
 Chromatieren 121, 187, 193  
 Chromit 193  
 Chromitierung 193  
 Chrommasken 213  
 Chromschwefelsäure 103  
 constant force mode 261  
 constant height mode 261  
 Copolymerisate 148 f.  
 Coulomb-Kräfte 19  
 CVD 107, 181  
 CVD-Verfahren 27, 176, 181  
 Cyanidentgiftung 273

## D

Daniell-Element 63  
 Deckfähigkeit 81  
 Deckschichten 15  
 Deckvermögen 158, 261 f.  
 Dekapieren 46, 50  
 Dekoration und Ästhetik 13  
 Desorption 267

Diacetyldioxim 259  
 Dichte 154  
 Dickschichtpassivierung 193  
 Diffusionspolarisation 77  
 Diodensputteranlage 112  
 Dipol 24  
 Dipole 152  
 Dipolmolekül 155  
 Direktbelichtung 213 f.  
 Direktstrukturierung 214  
 Dispergierhilfen 157  
 Dispergiermittel 269  
 Dispersion 134  
 Dispersionskräfte 19  
 Dispersionssschichten 91, 100  
 Dissoziationsgleichgewicht 67  
 Dissoziationsgrad 70  
 Doppelschicht, elektrische 65, 75  
 Doppelseitige LP 234  
 Drahtflammspritzen 127  
 Driftgeschwindigkeit 70  
 Druckknopfeffekt 24, 104  
 Druckluftstrahlen 45  
 Druckmedien 221  
 Duktilität 59, 256  
 Duplexsystem 121  
 Durchschlagfestigkeit 259  
 Durchtrittspolarisation 77  
 Duomere 25

## E

ECD 63  
 Edelmetall 23  
 EDX 242  
 Einbrennen 180, 231  
 Einbrennlacke 194  
 Einebnung 81  
 Einkomponentensystem 162  
 Eisblumen 117  
 electroless plating 63  
 Elektrochemisches Abtragen 227  
 Elektrochemisches Äquivalent 64  
 Elektronegativitätsdifferenz 20  
 Elektronengas 16  
 Elektronenstrahlolithografie 13  
 Elektronen-Strahl-Mikroanalyse (ESMA) 242  
 Elektropolieren 50  
 Elektrottauchlackieren 168  
 Eloxalschicht 199 ff.  
 Eloxieren 187  
 Eloxier-Verfahren 202  
 Email 176  
 Emailfritte 177  
 Emailleschichten 176

Emaillieren 176, 178  
 Emulgatoren 164  
 Energiebänder 16  
 Energy Dispersive X-Ray-Analysis 242  
 Entfetten 33, 36  
 - elektrolytisches 38  
 Entfetter 52  
 Entfettungslösungen , 52  
 Entfettungsvorgang 266  
 Entgiftung 273  
 Entlacken 175  
 Entlackung, pyrolytische 175  
 Entmetallisierung 50  
 Entsorgung 270  
 Entwickeln 215, 219  
 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 261  
 Faserverstärkung 25  
 FCKW-Halon-Verbotsordnung 39  
 Feinleitertechnik 213  
 Fernordnung 17  
 Ferroxylltest 259  
 Fertigungsverfahren 11  
 - Beschichten 11  
 - Fügen 11  
 - Stoffeigenschaft ändern 11  
 - Trennen 11  
 - Umformen 11  
 - Urformen 11  
 Festschmierstoffe 36  
 Fette 35  
 Feueraluminieren 123  
 Feuerverzinken 114  
 Feuerverzinnen 122 f.  
 Filmbildung 161  
 Filmjustage 218  
 Filtration 270  
 FI-Typ 78  
 Flammpunkt 154  
 Flammgespritzen 126  
 Fließspülbad 56  
 Flotation 269  
 Fluidisierung 172  
 Fluoreszenzstrahlung 252  
 Flüssigresist 215

Flussmittel 35  
 Fluxen 115  
 Formteilätzen 227  
 Fotodruck 214, 228  
 Fotofestresist 215, 217  
 Fotolithografie 13, 210 f., 214, 227 f., 232, 238  
 Fotometrie 247  
 Fotoplotter 212  
 Fotosolubilisierung 217  
 Fototool 214, 228  
 Fourier-IR-Spektroskopie 246  
 Fransen-Micelle 25  
 Fremdatom 17  
 Fremdschichten 15  
 Fritten 178  
 FT-Typ 78  
 Füllstoffe 25, 138, 150, 161  
 Fungicid 157

## G

Galvannealing 121  
 Galvanoformung 91  
 Galvanoplastik 64, 90  
 Galvanoresist 219  
 Galvanotechnik 63  
 Gasabgabe 109  
 Gelbchromatierung 193  
 Gerber-Daten 212  
 Gestelltechnik 87, 91  
 Gitterschnittprüfung 255  
 Glanzbildner 81  
 Glanzbildung 81  
 Glanzgrad 261 f.  
 Glanznickelelektrolyte 64  
 Glanzzusätze 81  
 Gleitmittel 36  
 Gleitschleifen 39, 44  
 Gleitspanen 44  
 Glimmentladungspasma 112  
 Glycerol 268  
 Graphitierung 91  
 Grenzspannung 201  
 Grenzstromdichte 83  
 Gruppe, chromophore 158

## H

Haftfähigkeit 254  
 Haftoxide 180  
 Haftung 14, 254  
 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 268  
 Heißrollenlaminate 217  
 Heißspritzverfahren 156  
 Helligkeit 261 f.  
 Helmholtzsche Doppelschicht 75  
 High-Solids 155 f., 166  
 High-Solids-Lacke 274  
 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, 270  
 – katodische 161  
 Innenmetallisierung 96  
 Integralfärben 202  
 Interface 109  
 Interfacezone 112  
 Interferenz 253  
 Interferenzfärben 206  
 Interferenzmessverfahren 253  
 Ionenaustauscherharze 270  
 Ionenaustauschkreislaufverfahren 271  
 Ionenbeweglichkeit 71  
 Ionenplattieren 108, 113  
 Ionenstrahlätzen 211, 226 f.  
 Ionenstrahlithografie 211  
 IR-Spektroskopie 244  
 Isocyanate 156  
 isotropen Ätzen 223

## J

Jet-Plating 90, 92

## K

Kalomelektrode 83  
 Kalorisieren 132  
 Kaltaufschweißen 182  
 Kaltbrünierschichten 195  
 Kaltpressschweißen 129  
 Kaltreiniger 268  
 Kanigen-Vernicklungs-Verfahren 65  
 Kaskadenspülung 56  
 Kaskadenspülverfahren 271 f.  
 Kationen 67  
 Kationenaustauscher 271  
 Katodenzerstäubung 108  
 Keime 18, 99  
 kernkatalysiertes Trägermaterial 211  
 Kesternicht-Test 247  
 Kohlenwasserstoffe (HKW), halogeniert 38  
 Kohlenwasserstoffe (KW) 38  
 Kollisionsgeschwindigkeit 130  
 Kolorimetrie 247  
 Komplexbildner 37  
 Kondensationsreaktion 139  
 Kondenswasserklimatestung 247  
 Kontaktwinkel 263  
 Konversionsschichten , 53  
 Korbtechnik 87  
 Korngrenzen 17  
 Korngröße 42  
 Koronapulversprühsystem 173  
 Korrosionsbeständigkeit 59  
 Korrosionsschutz 12  
 Korrosionsschutzpigmente 160  
 Korrosionsverhalten 247  
 Korund 41  
 Kovalenz, polarisierte 20  
 Kreislaufverfahren 271  
 Kreislaufverfahren mit Verdampfung 271  
 Kristallisationspolarisation 77  
 KTL-Schichten 170  
 Kugelstrahlen 45  
 Kühlmittel 36  
 Kunststoff 23, 54  
 – thermoplastischer 24  
 Kunststoffmetallisierung 102

## L

Lack 138  
 Laminieren 215, 217, 219  
 Läppen 44  
 Laser-Direkt- Imaging (LDI) 228  
 Laserstrukturierung 210  
 Latexsystem 164  
 Leadframes 228

Leerstelle 17  
 Leiterplatte 210, 234  
 Leitfähigkeit, spezifische 70  
 Leitfähigkeitsverhalten 13  
 Leitsalze 67  
 Leitungsband 17  
 Leitungselektronen 16  
 Lichtbogenspritzen 127  
 Lichtschutzmittel 157  
 Lichtstreuung 158  
 Lichtwellenleitertechnik 104  
 Lift-Off-Verfahrens 212  
 Liganden 68  
 LIGA-Technik 214  
 LIGA-Verfahren 91, 231, 233, 239  
 Londonkräfte 19  
 Löslichkeitsprodukt 190  
 Lösungsmittel 150, 216, 230  
 - organische 38, 138  
 Lotpasten 221, 231  
 Lötstopmmaske 215  
 LW-Verfahren 197

## M

Magnetfeldunterstützung 112  
 Magnetronsputter-PVD 112  
 Magnetspeichern 210  
 Makromolekül 24  
 MBV-Verfahren 197  
 Mehrfachschichtsysteme (CMM) 94  
 Mehrfachspülkaskade 56  
 Melamin-Formaldehyd-Harze (MF-Harze) 141  
 Messung, elektromagnetische 251  
 Metallabscheidung  
 - außenstromlose 91, 94  
 - elektrochemische 63  
 - laserinduzierte 100  
 Metallbindung 16  
 Metallfärben 196  
 Metallfärbetechniken 187  
 Metallisierung  
 - autokatalytische 63  
 - chemische 63  
 - chemisch-metallische 63  
 Metallisierung, selektive 96  
 Metallmasken 210f.  
 Metallrückgewinnung 273  
 Metallspritzen 124  
 Metalux®-Verfahren 197  
 Mikrosiebe 91  
 Mittlere freie Weglänge 109  
 Molmasse 152  
 Monomere 139

Morphologie 260  
 Multilayer-LP 234

## N

Nachbehandlung 30  
 Nassätzverfahren 223  
 Nasslacke 138, 150, 161  
 Nasslackieren 165  
 Nassstrahlen 45  
 Nebenvalenz 19  
 Negativresist 215, 217  
 Nernstsche Potenzialgleichung 65  
 Netzmittel 157  
 Netzwerkwandler 21  
 Neutralisieren 46  
 NiB-Schichten 96  
 NiP-Schichten 96  
 Normalpotenzial 119  
 Normalspannung 256  
 Novolacke 140  
 numerische Apertur 214

## O

Oberfläche  
 - geometrische 255  
 Oberflächenenergie  
 - freie 18  
 - spezifische 27  
 Oberflächenrelief 33  
 Oberflächenspannung 27, 37  
 Oberflächenumwandlung 30  
 Öle 35  
 Olivchromatierung 193  
 optische Lithografie 214  
 Orbital 21  
 Organosole 164  
 Overspray 166, 274f.  
 Oxidation  
 - anodische (ANOX-Verfahren) 198  
 - elektrolytische (ELOXAL-Verfahren) 198  
 Oxide 30  
 Oxidkeramik 20  
 Oxidnetzwerk 105

## P

Panel plating 235  
 Pattern plating 235  
 Peel-Test 257  
 Permanent-Resists 211  
 Permeat 269, 272  
 PFOS 86, 273

- 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 211, 223, 227  
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  
Polymerfilm 214f.  
Polymerfritte 230  
Polymerisate 148  
Polymerisation 139  
Polymersysteme  
- anionische 155  
- kationische 155  
Polyurethane (PUR) 146  
Porendichte 258  
Porosität 21  
Positivresist 215  
Potenzial, elektrochemisches 20  
Printer 218  
Profilogramme 50  
Prüfmethoden  
- zerstörende 241  
- zerstörungsfreie 241  
Pull-off 256  
Pulse-Plating 91, 93  
Pulverflammspritzen 127  
Pulverlacke 155f., 161, 274  
Pulverlackieren 172, 275  
Pulversintern 172  
Pulversinterverfahren 156  
Pulversprühen 156, 165  
- elektrostatisches 172  
PVD 107  
PVD-Verfahren 27, 176
- Q**
- Quarzmonitorverfahren 254  
Querschleife 249
- R**
- Randwinkel 27, 263  
Randwinkelmessung 263  
Randzone 15, 33  
Rapid Prototyping 214  
Rasterelektronenmikroskop (REM) 242  
Rasterfotoplotter 212  
Rasterkraftmikroskopie 260  
Rasterplotter 212  
Reaktionspolarisation 77  
Realgitter 17  
Reflexionsvermögen 59, 253  
Reflow-Löten 231  
Regenerierung 266, 270  
Reinigung 35  
Reinigungseffekt 30  
Reinzinkschicht 117  
Resistbild 210  
Resistmasken 227  
Resole 139  
Retentat 269  
Röntgenfluoreszenz-Analyse (RFA) 243, 252  
Röntgenlithografie 211, 214  
Roststabilisierung 50  
Rostumwandlung 50  
Rückgewinnung 266  
Rückhaltung 266  
Rücklösen 200  
Rücklösevermögen 201  
Rücksprühneffekt 174  
Rückstreuelektronen 260  
Ruß 35
- S**
- Salze 35  
Salzsprühnebeltest 247  
Sand 35  
Sandwichstrukturen 183  
Schälverfahren 257  
Schichtanalytik 242  
Schichtdicke 14, 248  
Schichten  
- anorganische 181  
- nichtmetallische organische 138

Schlacke 35  
 Schleifen 39  
 Schleuderverzinken 114  
 Schmiermittel 36  
 Schutzkolloid 99  
 Schwarzchromatierung 193  
 Schwarzoxidieren 197  
 Schwingquarz 254  
 Sealing 203  
 Sedimentation 269  
 Seifen 268  
 Sekundärelektrone 260  
 Semiadditivtechnik 212, 235, 238  
 Sendzimier-Schichten 122  
 Sensibilisierung 107  
 Sherardisieren 133  
 Siccative 157  
 Siebdruck 214 f., 220, 227, 238, 240  
 Siebdruckschablone 220  
 Siedebereich 154  
 Silikonharzlacke 145  
 Silikonöle 36  
 Siliziumcarbid 41  
 Sinterprozesse 21  
 SMD-Kleber 221, 238  
 Sol-Gel-Verfahren 107  
 Solvatation 151  
 Solvathüllen 152  
 Spanen 33  
 Sperrschicht 199  
 Sphärolithe 25, 104  
 Spot-Plating 92  
 Spreiten 263  
 Sprengplattieren 130  
 Spritzspülen 56  
 Spritzverfahren 128, 165, 191  
 - pneumatisches 165  
 Spritzverzinkung 54  
 Spritzzusatz 125  
 Sprühen, elektrostatisches 167  
 Spülen 46, 54  
 Spülkriterium 54, 270  
 Sputterätzen 226  
 Sputtern 108, 112, 181  
 - reaktives 113  
 Stabilität, thermische 59  
 Stammlack 162  
 Standspüle 55 f.  
 Staub 35  
 Stern-Graham-Modell 75  
 Stirnabzugverfahren 256  
 Stoffe, amorphe 22  
 Störzone 30  
 Strahlentrostung 45  
 Strahlverfahren 33

Streufähigkeit 81 f.  
 Stromausbeute 82  
 Stromdichte-Potenzial-Kurven 77, 82  
 Stückverzinken 114  
 Substrat 15  
 Subtraktivtechnik 13, 210, 237 ff.  
 Sulfide 30  
 System  
 - disperses 152  
 - kolloiddisperses 152  
 System Fe-Zn 116

## T

Tampongalvanik 90, 92  
 Tape Test 255  
 Target 112  
 Tauchlackieren  
 - anodisches 168  
 - autophoretisches 168  
 - katodisches 168  
 Tauchlackierung, kationische 156  
 Tauchlackierverfahren 168  
 Tauchspülen 56  
 Temperaturwechselbeständigkeit 180  
 Tenside 37, 269  
 Testflüssigkeit 263  
 Teststifte 263  
 Testtinten 263  
 Textur 19  
 Thioharnstoffharze 141  
 thixotropes Verhalten 221  
 Thixotropierungsmittel 157  
 Tiefätzen 229  
 Tieftemperaturentlackung 176  
 Tiefung 256  
 Tiefungsprüfung nach Erichsen 256  
 Topcoat 134  
 Top Coats 194  
 Topografie  
 - spezielle 13  
 Topologie 260  
 Transparentchromatierung 194  
 Transparenz 158  
 Tribopulversprühsystem 173 f.  
 Triborohr 174  
 Trockenätzen 211, 226, 239  
 Trockenätzverfahren 223  
 Trockenresist 211, 215, 217  
 Trockenverzinken 115  
 Trocknung  
 - chemische 162  
 - oxidative 162  
 - physikalische 161  
 Trommeltechnik 87, 91

**U**

Überführungszahl 71  
Überspannung 76  
UD-Typ 78  
Ultrafiltration 269  
Ultraschall 36  
Umkehrosiose 271f.  
Umpolbeizen 48  
Umweltschutz 274  
Unterätzung 223  
UV-Lithografie 214  
UV-Spektroskopie 244  
UV-Strahlung 248

**V**

Vakuumplumaspritzen 127  
Verankerung, mechanische 29  
Verbrennungsgas 126  
Verdampfungsgeschwindigkeit 110  
Verdünnungsgrad 55  
Verdunstungszahl VZ 154  
Verfahren  
– chemisch-thermische 132  
– coulometrisches 250  
– elektromagnetisches 251  
– magnetinduktives 251  
– mechanische 39  
– mikroskopisches 249  
– spektroskopische 242  
Verhalten  
– anisotropes 20  
– optisches 13  
Verschleiß  
– abrasiver 182  
– adhäsiver 182  
Verschleißverhalten 13  
Verschleißwiderstand 59  
Versetzen 17  
Versiegelung 194, 205  
Verzinken 115  
VOC (volatile organic compounds) 155  
Volumendiffusion 109  
Vorbehandlung 30

**W**

Wachse 35  
Wachstumstyp 78  
Walzplattieren 129f.  
Wanderungsgeschwindigkeit 70  
Wasserhaut  
– permanente 22  
– temporäre 23  
Wasserlacke 155f., 274  
Wasserstoffversprödung 134  
Wasserstoffüberspannung 77  
Watts-Typ 64  
Wave Length Dispersive X-Ray-Analysis 242  
WDX 242  
Wechselwirkung, interionische 71  
Weichsegment 104  
Weißblech 123  
Weißrost 120  
Wellenzahl 246  
Wirbelbadverfahren, elektrostatisches 175  
Wirbelbett 172  
Wirbelpulver 173  
Wirbelsintern 172  
Wirbelstromverfahren 251  
Wirksubstanz 219, 230

**X**

Xenon-Test 248

**Z**

Zementation 69, 270  
Zentrifugation 269  
Zerstäubergase 125  
Zinkasche 115  
Zinkdruckguss 54  
Zinkkrätze 115  
Zink-Lamellenabscheidung 133, 194  
Z-Typ 78  
Zweikomponentensystem 162  
Zwischengitteratom 17