

HANSER



Leseprobe

zu

„Galvanotechnik“

von Nasser Kanani

Print-ISBN: 978-3-446-46256-4

E-Book-ISBN: 978-3-446-46533-6

Weitere Informationen und Bestellungen unter
<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-46256-4>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

Vorwort zur ersten Auflage

Das vorliegende Buch stellt eine Einführung in die Grundlagen, Verfahren und Praxis der modernen Galvanotechnik dar. Darin werden folgende Fragenkomplexe in einem logischen Zusammenhang angesprochen, um den Wissenschaftlern und Praktikern, die auf diesem Gebiet tätig sind, die theoretischen Aspekte und die neuesten Entwicklungen effektiver vermitteln zu können:

Erstens: Was ist das Aufgabengebiet der Galvanotechnik? Wie reagiert sie auf die ständig anwachsenden Anforderungen aus der Praxis? Welche Beiträge leistet sie im Hinblick auf die immer knapper werdenden Rohstoff- und Energieressourcen?

Kapitel 1 versucht, diese Fragen zu beantworten, indem es die technologische Rolle der Galvanotechnik umreißt, ihren Stellenwert in der modernen Industriegesellschaft aufzeigt und ihre bisher erreichten ökonomischen und ökologischen Ziele erörtert.

Zweitens: Welche Werkstoffe lassen sich mit Hilfe galvanotechnischer Verfahren beschichten? Wie müssen die aus ihnen hergestellten Teile und Gegenstände konstruiert sein, damit sie nach der Beschichtung die an sie gestellten funktionellen und/oder dekorativen Anforderungen erfüllen können?

Die Beantwortung dieser Fragen ist Gegenstand von Kapitel 2, in dem der Aufbau und die Eigenschaften von Metallen, Legierungen und Kunststoffen diskutiert werden und die Bedeutung und die Notwendigkeit einer „galvanisiergerechten“ Konstruktion und Gestaltung der Teile aufgezeigt wird.

Drittens: Welche Abscheidungselektrolyte stehen für die Beschichtung von galvanisiergerecht konstruierten Teilen zur Verfügung und was sind ihre spezifischen Merkmale? Wie lassen sie sich den speziellen Gegebenheiten anpassen? Unter welchen Bedingungen arbeiten sie optimal? Welche Rolle kommt den Elektrolytzusätzen zu?

Diesen Fragen geht Kapitel 3 nach. Darin werden exemplarisch einige in der Praxis erprobte Abscheidungselektrolyte vorgestellt, ihre Einsatzgebiete geschildert und ihre optimalen Arbeitsbedingungen diskutiert.

Viertens: Welche Abscheidungsverfahren können herangezogen werden, um Teile, die oft aus verschiedenen Werkstoffen oder Werkstoffgruppen hergestellt wurden und unterschiedlichste Geometrie und Größe aufweisen, zu beschichten?

Kapitel 4 beschäftigt sich mit dieser Frage und stellt neben den klassischen Verfahren auch die neuesten Entwicklungen auf diesem Gebiet vor, mit deren Hilfe heute Schichten mit völlig neuen Eigenschaftsprofilen abgeschieden werden können.

Fünftens: Welche Vorgänge spielen sich während der ersten Stadien der Abscheidung ab? Inwieweit können sie die Mikrostruktur und damit die Eigenschaften der entstehenden Schicht beeinflussen? Besteht die Möglichkeit, diese Vorgänge gezielt zu steuern?

Dieses Thema wird in Kapitel 5 behandelt, welches die Prozesse der Keimbildung und des Keimwachstums aus atomistischer Sicht beschreibt und ihre Beeinflussung durch verschiedene Faktoren und Abscheidungsbedingungen untersucht.

Sechstens: Besteht die Möglichkeit, die Entstehung der ersten Kristallkeime und Cluster sowie den Prozess des Schichtwachstums direkt während des Abscheidungs Vorganges, d. h. in-situ zu beobachten und sie gegebenenfalls zu beeinflussen?

Kapitel 6 widmet sich dieser Frage; es stellt die seit einiger Zeit zur Verfügung stehenden Methoden zur in-situ Beobachtung dieser Prozesse vor und zeigt anhand von Beispielen, wie die Keimbildung und das Keimwachstum durch Zugabe von Additiven beeinflusst werden können.

Siebtens: Welche Mechanismen bewirken die Haftung zwischen der sich bildenden Schicht und dem Substrat? Wie lässt sich die Haftfestigkeit der abgeschiedenen Schicht auf dem Bauteil messen und optimieren?

Dies ist das Thema von Kapitel 7, in dem die Bedeutung der Haftung für die Funktionstüchtigkeit des beschichteten Bauteils hervorgehoben wird und die verschiedenen Methoden zur qualitativen oder quantitativen Bestimmung der Haftfestigkeit vorgestellt werden.

Achtens: Welche Bedeutung kommt der Schichtdicke und ihrer Verteilung auf dem beschichteten Teil zu? Welche sind die wichtigsten Verfahren zur Schichtdickenmessung in der galvanotechnischen Praxis? Besteht die Möglichkeit, die Dickenzunahme der Schicht direkt während des Abscheidungs Vorgangs zu messen?

Kapitel 8 geht auf diese Fragen ein und diskutiert neben den weit verbreiteten Verfahren zur Schichtdickenmessung auch die neuen Methoden, mit deren Hilfe eine in-situ Bestimmung der Schichtdicke bei der Leiterplattenherstellung möglich ist.

Neuntens: Welchen Einfluss übt die chemische Zusammensetzung der Schicht auf ihre Eigenschaften aus? Welche Bedeutung hat die Zusammensetzung der Schichtoberfläche

für die Funktionsfähigkeit der Schicht? Welche Methoden existieren, um die chemische Zusammensetzung der Schicht, insbesondere in oberflächennahen Bereichen zu bestimmen?

Diese Fragen werden in Kapitel 9 angesprochen. Darin werden die wichtigsten analytischen Methoden beschrieben, ihre Vor- und Nachteile herausgestellt und ihre Bedeutung und Aussagefähigkeit für die galvanotechnische Praxis überprüft.

Die einzelnen Kapitel sind zwar thematisch eng miteinander verbunden und logisch aufeinander aufgebaut, sie sind jedoch so konzipiert, dass sie jeweils eine selbständige und geschlossene Einheit bilden. So kann sich der Leser nur das oder die Kapitel zu Rate ziehen, in dem bzw. in denen die ihn interessierenden Themen behandelt werden. Die zahlreichen schematischen Darstellungen und Abbildungen in den einzelnen Kapiteln sollen dabei das Verständnis von z. T. komplexen Zusammenhängen erleichtern.

Dieses Buch wäre ohne jeden Zweifel nicht zustande gekommen, wenn Frau Dipl.-Ing. A. Espinosa, die ehemalige Chefredakteurin der Fachzeitschrift *Metalloberfläche*, und Herr Prof. Dr. W. Jantsch, der Herausgeber dieser Zeitschrift, den Autor nicht immer wieder dazu ermuntert hätten. Ihnen gilt der ganz besondere Dank des Autors.

Die zahlreichen Zeichnungen und Diagramme dieses Buches wurden mit großer Sorgfalt von Frau B. Huesmann (Atotech Marketing Service) angefertigt, wofür sich der Autor an dieser Stelle herzlich bedanken möchte. Auch den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern von Atotech Materials Science gegenüber fühlt sich der Autor zum aufrichtigen Dank verpflichtet für die Durchführung von Untersuchungen und Analysen, namentlich Frau M. Kußmann, Frau M. Larondelle, Frau L. Liske, Herrn D. Nitsche und Herrn Th. Posthumus.

Der Firma Atotech Deutschland GmbH möchte der Autor seine tiefe Dankbarkeit dafür aussprechen, dass er die Ergebnisse interner Untersuchungen und wissenschaftlicher Berichte für dieses Buch verwenden und die benötigten Arbeitsmittel benutzen durfte.

Abschließend möchte es der Autor freilich auf keinen Fall versäumen, den unten genannten Kollegen (alle Mitarbeiter der Firma Atotech Deutschland GmbH) dafür herzlich zu danken, dass sie sich der Mühe unterzogen haben, die einzelnen Kapitel dieses Buches kritisch durchzulesen: Herrn Dr. K.-H. Pietsch (Kapitel 1, 2, 4, 5, 7, 8 und 9), Herrn Dr. W. Richtering (Kapitel 3) und Herrn Dr. R. Vogel (Kapitel 6). Ihre wertvollen Hinweise und konstruktiven Vorschläge wurden weitestgehend berücksichtigt.

Vorwort zur dritten Auflage

Es steht wohl außer Frage, dass Werkstoffe im Allgemeinen und metallische Werkstoffe im Besonderen eine herausragende Rolle in unserer technisierten Welt spielen. So unterschiedlich die Werkstoffe auch hinsichtlich ihrer Mikrostruktur und Eigenschaften sein mögen – eines ist ihnen allen gemeinsam: die Oberfläche. Und gerade diese ist ihre *Achillesferse*. Denn, abgesehen davon, dass sich die Werkstoffoberfläche im Hinblick auf ihren atomaren Aufbau und ihre Eigenschaften gänzlich vom Werkstoffinnern unterscheidet, ist sie den Umwelteinflüssen schutzlos ausgesetzt und fungiert somit als Ausgangspunkt vieler Reaktionsprozesse, wie beispielsweise Korrosion und Verschleiß, die ausgehend von der Oberfläche ins Innere des Werkstoffs eindringen, seine Eigenschaften drastisch beeinträchtigen und ihn letztlich unbrauchbar machen. Es ist daher nicht verwunderlich, dass im Lauf der Zeit zahlreiche Verfahren mit dem Ziel entwickelt worden sind, die Werkstoffoberfläche vor schädlichen Umwelteinflüssen zu schützen und so die Lebensdauer des Werkstoffes zu verlängern.

Eines der wichtigsten und effektivsten Verfahren ist die Metallisierung der Werkstoffoberfläche, die u. a. chemisch oder elektrochemisch bewerkstelligt werden kann. Diese Vorgehensweise ist die Domäne der Galvanotechnik, die sich darüber hinaus auch mit der Untersuchung der Eigenschaften von abgeschiedenen Metallschichten beschäftigt und Maßnahmen zu ihrer Optimierung trifft. So bildet sie als Schlüssel- und Querschnittstechnologie die Grundlage der meisten Produktionsprozesse und Dienstleistungsvorgänge und durchdringt alle Bereiche der Gesellschaft und der Wirtschaft.

Der Wunsch des Carl Hanser Verlags, eine 3., aktualisierte und erweiterte Auflage dieses Buches herauszubringen, erfüllte mich daher mit Freude, und ich erklärte mich bereit, die gewünschte Erweiterung in Angriff zu nehmen.

Folgende Aktualisierungen wurden in der dritten Auflage vorgenommen:

Abschnitt 2.3.7.2, „Kupferlegierungen“, wurde ergänzt.

Kapitel 2, „Galvanisierbare Werkstoffe“, wurde um Abschnitt 2.5, „Verbundwerkstoffe“, und Abschnitt 2.6, „Keramische Werkstoffe“, erweitert. Dabei wurde Wert darauf gelegt, die Grundkenntnisse in diesen Fächern nur so weit zu besprechen, wie sie für den Galvanofachmann bzw. die Galvanofachfrau unerlässlich sind.

Abschnitt 3.4.2.6.8, „Einsatzgebiete“, in Abschnitt 3.4.2.6, „Chemische Verkupferung“, wurde um die Darlegung der chemisch-reduktiven Verkupferung der Bohrungen von Leiterplatten und Multilayern (Durchkontaktierung) ergänzt.

Eine der Anforderungen, die an chemisch oder elektrochemisch abgeschiedene Metallschichten gestellt werden, besteht darin, dass sie sich möglichst duktil verhalten. Mit anderen Worten wird von ihnen erwartet, dass sie die etwaigen plastischen Verformungen des Grundstoffes weitestgehend mitverfolgen, ohne dabei zu zerreißen oder abzuplatzen. Die Duktilität metallischer Schichten und ihre Messung mit Hilfe geeigneter Messverfahren wurden daher in der zweiten Auflage hinreichend diskutiert. In der vorliegenden Auflage wird diese Thematik in einem gesonderten Kapitel (Kapitel 16, „Bestimmung der Duktilität metallischer Schichten“) noch ausführlicher behandelt und durch Ergebnisse experimenteller Untersuchungen untermauert. Auch das Stichwortverzeichnis wurde entsprechend erweitert.

Zu den wichtigsten Eigenschaftsprofilen abgeschiedener Metallschichten zählt ihre Korrosionsbeständigkeit, d. h. ihre Fähigkeit, den Grundwerkstoff vor Korrosion zu schützen. Die sachgemäße Beurteilung der Korrosionsbeständigkeit solcher Schutzschichten setzt aber voraus, dass der Galvanofachmann bzw. die Galvanofachfrau die Mechanismen der elektrochemischen Korrosion kennt und mit den Methoden der Korrosionskontrolle und Korrosionsprüfung vertraut ist. Dieser Themenkomplex wird daher in dieser Auflage in einem neuen Kapitel (Kapitel 17, „Korrosionsbeständigkeit metallischer Schichten“) behandelt. Dabei wurde das Augenmerk hauptsächlich auf die Frage gerichtet, ob die aufgebrachte metallische Schutzschicht elektrochemisch edler oder unedler ist als der Grundwerkstoff. Dementsprechend wurden die notwendigen Maßnahmen zum Schutz des Grundwerkstoffs vor Korrosion diskutiert. Auch hier wurde das Stichwortverzeichnis entsprechend erweitert.

Es bleibt nur noch darauf hinzuweisen, dass die einzelnen Kapitel des vorliegenden Buches nach wie vor thematisch eng miteinander verbunden und logisch aufeinander aufgebaut sind. Sie sind jedoch so konzipiert, dass sie jeweils eine selbständige und geschlossene Einheit darstellen.

Berlin, April 2020

N. Kanani

Inhaltsverzeichnis

Vorwort zur ersten Auflage.....	V
Vorwort zur dritten Auflage	IX
Akronyme	XXVII
Formelzeichen, Symbole, Konstanten	XXXV
1 Galvanotechnik – eine Schlüsseltechnologie?.....	1
1.1 Einleitung.....	1
1.2 Beschichtungstechnologien.....	2
1.2.1 Aufdampfen.....	4
1.2.1.1 Chemical Vapor Deposition (CVD).....	4
1.2.1.2 Physical Vapor Deposition (PVD).....	5
1.2.1.3 Sputtern	6
1.2.2 Auftragen.....	6
1.2.2.1 Auftragschweißen.....	6
1.2.2.2 Schmelztauchen.....	7
1.2.2.3 Walzplattieren	8
1.2.3 Lackieren.....	8
1.2.3.1 Organische Lacke	9
1.2.3.2 Anorganische Lacke	9
1.2.3.3 Gleitlacke.....	9
1.2.4 Thermisches Spritzen	9
1.2.4.1 Atmosphärisches Plasmaspritzen (APS)	10
1.2.4.2 Niederdruck-Plasmaspritzen (LPPS).....	10
1.2.4.3 Flamm-spritzen	11
1.3 Galvanisieren	12
1.3.1 Galvanisierungsverfahren	12
1.3.1.1 Stückgalvanisierung.....	12
1.3.1.2 Massengalvanisierung.....	13
1.3.1.2.1 Trommelgalvanisierung	14
1.3.1.2.2 Glockengalvanisierung	14
1.3.1.3 Durchlaufgalvanisierung.....	14
1.3.1.4 Fertigungsintegrierte Galvanisierung.....	15
1.4 Galvanotechnik und ihre Schlüsselrolle	16
1.4.1 Metallische Schichten	18

1.4.1.1	Chromschichten	18
1.4.1.2	Edelmetallschichten	19
1.4.1.3	Nickelschichten	19
1.4.1.4	Zinkschichten	19
1.4.1.5	Schichtkombinationen	20
1.4.1.6	Legierungsschichten	20
1.4.1.7	Dispersionsschichten	21
1.4.1.8	Umwandlungsschichten	21
1.4.1.9	Anodierschichten	21
1.4.1.10	Galvanoformung	22
1.4.2	Anwendungsgebiete	22
1.5	Anforderungen an die Galvanotechnik	25
1.5.1	Qualität und Wirtschaftlichkeit	25
1.5.2	Ökologie und Umwelt	29
	Literaturverzeichnis	30
2	Galvanisierbare Werkstoffe	33
2.1	Einleitung	33
2.2	Metalle	33
2.2.1	Aufbau (Fernordnung)	34
2.2.2	Gitterbaufehler	37
2.2.2.1	Nulldimensionale Defekte	37
2.2.2.1.1	Leerstellen	37
2.2.2.1.2	Zwischengitteratome	39
2.2.2.2	Eindimensionale Defekte	40
2.2.2.2.1	Schraubenversetzungen	40
2.2.2.2.2	Stufenversetzungen	42
2.2.2.3	Zweidimensionale Defekte	46
2.2.2.3.1	Krongrenzen	47
2.2.2.3.2	Zwillingsgrenzen	50
2.2.2.4	Dreidimensionale Defekte	52
2.2.2.4.1	Blasen	52
2.2.2.4.2	Poren	52
2.2.2.4.3	Risse	52
2.2.2.5	Auswirkungen	52
2.2.2.5.1	Theoretische Zugfestigkeit	53
2.2.3	Bindungsmechanismus	57
2.2.3.1	Elektrische Leitfähigkeit	58
2.2.3.2	Thermische Leitfähigkeit	60

2.2.4	Gliederung.....	61
2.2.4.1	Nach Schmelzpunkt.....	62
2.2.4.2	Nach Dichte.....	63
2.3	Legierungen.....	63
2.3.1	Mischkristallbildung.....	64
2.3.1.1	Einlagerungsmischkristalle.....	64
2.3.1.2	Austauschmischkristalle.....	66
2.3.2	Eisenlegierungen (Stähle).....	69
2.3.2.1	Unlegierte Stähle.....	69
2.3.2.2	Niedriglegierte Stähle.....	70
2.3.2.3	Hochlegierte Stähle.....	70
2.3.2.4	Grundstähle.....	71
2.3.2.5	Qualitätsstähle.....	71
2.3.2.6	Edelstähle.....	72
2.3.2.7	Nichtrostende Stähle.....	72
2.3.2.8	Baustähle.....	73
2.3.2.9	Einsatzstähle.....	74
2.3.2.10	Schnellarbeitsstähle.....	74
2.3.3	Legierungselemente.....	75
2.3.4	Eigenschaften.....	77
2.3.5	Aluminiumlegierungen.....	77
2.3.5.1	Aluminium-Gusslegierungen.....	78
2.3.5.2	Aluminium-Knetlegierungen.....	79
2.3.5.3	Aushärtbare Aluminiumlegierungen.....	80
2.3.5.4	Nichtaushärtbare Aluminium-Knetlegierungen.....	80
2.3.6	Eigenschaften.....	81
2.3.7	Zink- und Kupferlegierungen.....	81
2.3.7.1	Zinklegierungen.....	81
2.3.7.2	Kupferlegierungen.....	83
2.3.7.2.1	Kupfer-Knetlegierungen.....	83
2.3.7.2.2	Kupfer-Gusslegierungen.....	85
2.3.7.2.3	Weitere Kupferlegierungen.....	86
2.3.8	Gitterbaufehler und sonstige Materialfehler.....	87
2.4	Kunststoffe.....	88
2.4.1	Aufbau (Nahordnung).....	89
2.4.2	Amorphe Polymere.....	90
2.4.3	Teilkristalline Polymere.....	92
2.4.4	Elektrisch leitende Polymere.....	96
2.4.4.1	Methoden der Leitfähigkeitserzeugung.....	97

2.4.4.1.1	Füllermethode	97
2.4.4.1.2	Dotierung	99
2.4.4.2	Thermische und zeitliche Stabilität	105
2.4.4.3	Anwendungsmöglichkeiten	108
2.4.5	Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS)	109
2.5	Verbundwerkstoffe	110
2.5.1	Klassifizierung	111
2.5.1.1	Teilchenverbundwerkstoffe	112
2.5.1.2	Faserverbundwerkstoffe	112
2.5.1.3	Schichtverbundwerkstoffe	113
2.5.1.4	Durchdringungsverbundwerkstoffe	114
2.6	Keramische Werkstoffe	114
2.6.1	Herstellung	115
2.6.2	Klassifizierung	116
2.6.2.1	Oxidkeramiken	116
2.6.2.2	Nichtoxidkeramiken	117
2.6.3	Eigenschaften	117
2.6.4	Anwendungsgebiete	119
	Literaturverzeichnis	119
3	Elektrolyte zur Abscheidung metallischer Schichten	123
3.1	Einleitung	123
3.2	Ionen im elektrischen Feld	124
3.3	Einfache und komplexe Ionen	127
3.4	Abscheidungselektrolyte	131
3.4.1	Galvanische Elektrolyte	131
3.4.1.1	Saure Elektrolyte	131
3.4.1.2	Neutrale Elektrolyte	133
3.4.1.3	Alkalische Elektrolyte	134
3.4.1.3.1	Cyanidhaltige Elektrolyte	134
3.4.1.3.2	Cyanidfreie Elektrolyte	136
3.4.1.4	Elektrolytzusätze	137
3.4.1.4.1	Glanzbildner	137
3.4.1.4.2	Einebner	141
3.4.1.4.3	Netzmittel/Tenside	144
3.4.1.5	Elektrolyteigenschaften	146
3.4.1.5.1	Elektrische Leitfähigkeit	146
3.4.1.5.2	Deckfähigkeit	150
3.4.1.5.3	Makro-Streufähigkeit	152

3.4.1.5.4	Mikro-Streufähigkeit	156
3.4.2	Außenstromlose Elektrolyte.....	157
3.4.2.1	Bestandteile.....	158
3.4.2.1.1	Metallsalze	158
3.4.2.1.2	Reduktionsmittel.....	160
3.4.2.1.3	Komplexbildner	162
3.4.2.1.4	Stabilisatoren	163
3.4.2.1.5	Beschleuniger.....	164
3.4.2.1.6	pH-Regulatoren	164
3.4.2.2	Abscheidungsgeschwindigkeit	165
3.4.2.3	Schichtzusammensetzung	166
3.4.2.4	Elektrolytüberwachung.....	166
3.4.2.4.1	Temperatur	167
3.4.2.4.2	pH-Wert	168
3.4.2.5	Chemische Vernicklung	169
3.4.2.5.1	Nickelsalz.....	169
3.4.2.5.2	Reduktionsmittel.....	170
3.4.2.5.3	Komplexbildner	170
3.4.2.5.4	Stabilisatoren	171
3.4.2.5.5	Beschleuniger.....	171
3.4.2.5.6	pH-Regulatoren	171
3.4.2.5.7	Netzmittel	172
3.4.2.5.8	Prozessablauf.....	172
3.4.2.5.9	Standzeit	173
3.4.2.5.10	Einsatzgebiete	175
3.4.2.6	Chemische Verkupferung.....	175
3.4.2.6.1	Kupfersalz	175
3.4.2.6.2	Komplexbildner	175
3.4.2.6.3	Reduktionsmittel.....	177
3.4.2.6.4	Stabilisatoren	177
3.4.2.6.5	pH-Regulatoren	178
3.4.2.6.6	Kupferbäder	178
3.4.2.6.7	Reaktionsablauf.....	179
3.4.2.6.8	Einsatzgebiete	180
	Literaturverzeichnis	183
4	Verfahren zur Abscheidung metallischer Schichten.....	187
4.1	Einleitung.....	187
4.2	Chemische Metallabscheidung	187

4.2.1	Reduktionsverfahren	188
4.2.1.1	Abscheidung von Metallschichten	189
4.2.1.2	Abscheidung von Legierungsschichten	190
4.2.1.3	Abscheidung von Dispersionsschichten	192
4.2.1.3.1	Hartstoffe	194
4.2.3.1.2	Trockenschmierstoffe	195
4.2.1.4	Schichtdickenverteilung	196
4.3	Elektrochemische Metallabscheidung	198
4.3.1	Gleichstromverfahren	200
4.3.1.1	Abscheidung von Metallschichten	202
4.3.1.2	Abscheidung von Legierungsschichten	205
4.3.1.2.1	Abscheidung von Messing	210
4.3.1.3	Abscheidung von Dispersionsschichten	216
4.3.1.4	Abscheidung von „Sandwich-Schichten“	221
4.3.1.5	Schichtdickenverteilung	223
4.3.2	Pulsstromverfahren	228
4.3.2.1	Abscheidung von Metallschichten	231
4.3.2.2	Abscheidung von Legierungsschichten	234
4.3.2.3	Abscheidung von Multilayern	236
4.3.2.4	Abscheidung von Dispersionsschichten	240
4.3.2.5	Schichtdickenverteilung	241
4.3.3	Laserinduzierte Metallabscheidung	244
4.3.3.1	Elektrochemische Methode	244
4.3.3.2	Chemische Methode	250
4.3.3.3	Oberflächenmorphologie	250
4.3.3.4	Anwendungsgebiete	250
	Literaturverzeichnis	252
5	Atomistische Deutung der Schichtenentstehung	257
5.1	Einleitung	257
5.2	Wanderung der Metallionen im Elektrolyten	257
5.2.1	Transportmechanismen	259
5.2.1.1	Konvektion	259
5.2.1.2	Diffusion	260
5.2.1.3	Migration	261
5.3	Hydratationsverhalten von Metallionen	262
5.3.1	Entladung von Metallionen	265
5.4	Phasengrenze Kathode/Elektrolyt	266
5.4.1	NERNSTSche Diffusionsschicht	267

5.4.1.1	Gleichstrom-Elektrolyse	267
5.4.1.2	Pulsstrom-Elektrolyse	270
5.4.2	Elektrolytische Doppelschicht	271
5.4.2.1	Gleichstrom-Elektrolyse	273
5.4.2.1.1	HELMHOLTZ-PERRIN-Modell	273
5.4.2.1.2	GOUY-CHAPMAN-Modell	274
5.4.2.1.3	STERN-GRAHAM-Modell	276
5.4.2.2	Pulsstrom-Elektrolyse	279
5.4.3	Reaktionshemmungen	280
5.4.3.1	Überspannungen	280
5.4.3.1.1	Konzentrationsüberspannung	281
5.4.3.1.2	Reaktionsüberspannung	281
5.4.3.1.3	Diffusionsüberspannung	282
5.4.3.1.4	Durchtrittsüberspannung	282
5.4.3.1.5	Widerstandsüberspannung	283
5.4.3.1.6	Kristallisationsüberspannung	283
5.5	Elektrokristallisation	284
5.5.1	Keimbildung	285
5.5.1.1	Homogene Keimbildung	285
5.5.1.2	Heterogene Keimbildung	287
5.5.2	Keimbildung auf der Kathodenoberfläche	290
5.5.2.1	Nulldimensionale Keime	292
5.5.2.2	Eindimensionale Keime	292
5.5.2.3	Zweidimensionale Keime	292
5.5.2.4	Dreidimensionale Keime	293
5.5.2.4.1	Kugelförmige Keime	295
5.5.2.4.2	Scheibenförmige Keime	296
5.5.2.4.3	Ellipsoidförmige Keime	297
5.5.3	Keimwachstum	297
5.5.3.1	KOSSEL-STRANSKI-Modell	298
5.5.3.2	Wachstumstypen	299
5.5.3.2.1	Feldorientierter Isolationstyp (FI-Typ)	300
5.5.3.2.2	Basisorientierter Reproduktionstyp (BR-Typ)	300
5.5.3.2.3	Feldorientierter Texturtyp (FT-Typ)	301
5.5.3.2.4	Unorientierter Dispersionstyp (UD-Typ)	302
5.5.3.2.5	Zwillingsübergangstyp (Z-Typ)	302
5.5.3.3	FRANK-Modell	303
5.5.4	Einflussparameter	306
5.5.4.1	Substrat	306

5.5.4.1.1	VOLMER-WEBER-Wachstumsmodell	307
5.5.4.1.2	FRANK-VAN-DER-MERWE-Wachstumsmodell	308
5.5.4.1.3	STRANSKI-KRASTANOV-Wachstumsmodell	308
5.5.4.2	Fremdatome	308
5.5.4.3	Stromdichte	309
5.6	Whisker	311
5.6.1	Whiskerbildung	313
5.6.2	Whiskerwachstum	314
5.6.2.1	Diffusionsgesteuertes Wachstum	314
5.6.2.2	Stressinduziertes Wachstums	315
5.6.2.3	Spiralförmiges Wachstum	316
5.6.3	Bedeutung	317
5.6.3.1	Zinn-Whisker	317
	Literaturverzeichnis	320
6	In-situ Beobachtung der Schichtenstehung	323
6.1	Einleitung	323
6.2	Rastersondenmikroskopie (SPM)	323
6.2.1	Rastertunnelmikroskopie (STM)	326
6.2.1.1	Grundlagen, Verfahren	327
6.2.1.2	In-situ Rastertunnelmikroskopie	336
6.2.1.2.1	VOLMER-WEBER-Mechanismus	338
6.2.1.2.2	FRANK-VAN-DER-MERWE-Mechanismus	340
6.2.1.2.3	STRANSKI-KRASTANOV-Mechanismus	341
6.2.1.2.4	Einfluss von Elektrolytzusätzen	343
6.2.1.2.5	Oberflächentopographie	346
6.2.1.2.6	Wachstumsspiralen	350
6.2.2	Rasterkraftmikroskopie (RKM)	352
6.2.2.1	Grundlagen, Verfahren	352
6.2.2.2	In-situ Rasterkraftmikroskopie	358
6.2.2.2.1	Oberflächenvorbehandlung	359
6.2.2.2.2	Oberflächenaktivierung	362
6.2.2.2.3	Durchkontaktierung von Leiterplatten	363
6.2.2.2.4	Oberflächenmorphologie	365
	Literaturverzeichnis	368
7	Bestimmung der Haftfestigkeit metallischer Schichten	373
7.1	Einleitung	373
7.2	Metall/Metall-Haftung	374

	7.2.1 Diffusionstheorie.....	374
7.3	Polymer/Metall-Haftung	382
	7.3.1 „Druckknopf“-Theorie	383
	7.3.2 Benetzungstheorie	386
	7.3.3 Elektrostatische Theorie	386
7.4	Prüfmethoden	388
	7.4.1 Qualitative Prüfverfahren	389
	7.4.1.1 Biege-Test.....	390
	7.4.1.2 Dornbiege-Test	390
	7.4.1.3 Gitterschnitt-Test.....	390
	7.4.1.4 Reib-Test.....	391
	7.4.1.5 Feil-Test	391
	7.4.1.6 Hammerschlag-Test	392
	7.4.1.7 Tiefungs-Test.....	392
	7.4.1.8 Elektrolytischer Test.....	393
	7.4.1.9 Torsions-Test.....	394
	7.4.1.10 Wickel-Test	394
	7.4.2 Quantitative Prüfverfahren.....	395
	7.4.2.1 Abschäl-Test	395
	7.4.2.2 Kobaltkegel-Test.....	397
	7.4.2.3 OLLARD-Test	398
	7.4.2.4 Abzugversuch.....	399
	7.4.2.5 Ritz-Test	401
	7.4.3 Zerstörungsfreie Prüfverfahren	403
	7.4.3.1 Thermoschock-Test	403
	7.4.3.2 Ultraschall-Test	405
	7.4.3.3 Schallemissions-Test.....	407
	7.4.3.4 Ultraschallmikroskopie	409
	Literaturverzeichnis	411
8	Bestimmung der Dicke metallischer Schichten	413
8.1	Einleitung.....	413
8.2	Definitionen nach DIN EN ISO 2064	413
	8.2.1 Wesentliche Fläche	413
	8.2.2 Referenzfläche	413
	8.2.3 Messstelle	414
	8.2.4 Schichtdicke	414
	8.2.5 Örtliche Schichtdicke.....	414
	8.2.6 Kleinste örtliche Schichtdicke.....	414

8.2.7	Größte örtliche Schichtdicke	414
8.2.8	Mindestschichtdicke	414
8.2.9	Höchstschichtdicke	414
8.3	Theoretische Abschätzung	415
8.4	Experimentelle Bestimmung	420
8.4.1	Zerstörende Verfahren	422
8.4.1.1	Mikroskopische Verfahren	422
8.4.1.1.1	Querschliffverfahren	427
8.4.1.1.2	Schrägschliffverfahren	436
8.4.1.1.3	Einschliffverfahren	439
8.4.1.2	Coulometrisches Verfahren	443
8.4.1.2.1	STEP-Test	448
8.4.2	Zerstörungsfreie Verfahren	452
8.4.2.1	Wirbelstromverfahren	453
8.4.2.2	Röntgenfluoreszenz-Verfahren	460
8.4.2.2.1	Kontinuierliche Messung	466
8.4.2.2.2	Standardfreie Messung	468
8.4.3	In-situ-Verfahren	470
8.4.3.1	Inselmethode	470
8.4.3.2	Optipulse-Methode	474
8.4.3.2.1	Optimierungsmaßnahmen	475
8.4.3.2.2	Wirksame Pulsform	476
8.4.3.2.3	Zugabe von Additiven	477
8.4.3.2.4	Beeinflussung der Kupferqualität	478
8.4.3.2.5	Bestimmung der Schichtdicke	480
	Literaturverzeichnis	481
9	Bestimmung der Zusammensetzung metallischer Schichten	483
9.1	Einleitung	483
9.1.1	Auflösungsvermögen	488
9.1.2	Informationstiefe	489
9.1.3	Nachweisgrenze	492
9.1.4	Empfindlichkeit	492
9.2	Massenspektrometrische Methoden	492
9.2.1	Ionenstreuungs-Spektrometrie (ISS)	494
9.2.2	Sekundärionen-Massenspektrometrie (SIMS)	498
9.2.2.1	Stationäre Sekundärionen-Massenspektrometrie (SSIMS)	502
9.2.2.2	Dynamische Sekundärionen-Massenspektrometrie (DSIMS)	502
9.2.3	Sekundärneutralteilchen-Massenspektrometrie (SNMS)	505

9.2.3.1	Direkte Beschussmethode (DBM).....	507
9.2.3.2	Separate Beschussmethode (SBM).....	507
9.2.3.3	Externe Beschussmethode (EBM).....	507
9.3	Elektronenspektroskopische Methoden	511
9.3.1	AUGER-Elektronenspektroskopie (AES).....	513
9.3.1.1	Raster-AUGER-Mikroanalyse (SAM)	519
9.3.2	Elektronenspektroskopie für chemische Analyse (ESCA).....	520
9.3.2.1	Ultraviolett-Photoelektronenspektroskopie (UPS).....	521
9.3.2.2	RÖNTGEN-Photoelektronenspektroskopie (XPS)	522
9.4	Mikroanalyse.....	527
9.4.1	Energiedispersive Röntgenanalyse (EDX)	532
9.4.1.1	Qualitative EDX-Analyse	535
9.4.1.1.1	Punktanalyse	537
9.4.1.1.2	Linienanalyse	537
9.4.1.1.3	Elementsverteilungsbild	538
9.4.1.2	Quantitative EDX-Analyse.....	540
9.4.1.2.1	Ordnungszahl-Korrekturfaktor	541
9.4.1.2.2	Absorptions-Korrekturfaktor	541
9.4.1.2.3	Fluoreszenz-Korrekturfaktor	542
9.4.2	Wellenlängendispersive Röntgenanalyse (WDX).....	543
9.4.2.1	BRAGGSches Reflexionsgesetz	544
9.4.2.2	WDX vs. EDX.....	549
9.5	Glimmentladungsspektroskopie (GDOES)	549
	Literaturverzeichnis	557
10	Darstellung der Gitterstruktur metallischer Schichten	563
10.1	Einleitung.....	563
10.2	Raumgitter	564
10.3	Gittertypen von Metallschichten.....	565
10.3.1	Kubisches Gitter.....	565
10.3.1.1	Kubisch-primitiv	566
10.3.1.2	Kubisch-raumzentriert.....	568
10.3.1.3	Kubisch-flächenzentriert.....	571
10.3.1.3.1	Diamantgitter	574
10.3.2	Hexagonales Gitter	575
10.3.2.1	Hexagonal-primitiv	575
10.3.2.2	Hexagonal dichtester Packung	576
10.3.3	Tetragonales Gitter	582
10.4	Indizierung von Gitterebenen und Richtungen	584

10.4.1	MILLERSche Indizierung.....	584
10.4.2	MILLER-BRAVAIS-Indizierung.....	590
10.5	Gleitsysteme	595
10.5.1	Kubisch-raumzentriertes Gitter	596
10.5.2	Kubisch-flächenzentriertes Gitter	597
10.5.3	Hexagonales Gitter	599
10.6	Gittertypen von Legierungsschichten	602
10.6.1	Austauschmischkristalle.....	602
10.6.2	Einlagerungsmischkristalle	604
10.6.2.1	Gitterlücken.....	605
10.6.2.1.1	Tetraederlücken	605
10.6.2.1.2	Oktaederlücken	606
	Literaturverzeichnis	608
11	Bestimmung der Eigenspannungen metallischer Schichten	609
11.1	Einleitung.....	609
11.1.1	Chemische Fehlordnungen.....	609
11.1.2	Strukturelle Fehlordnungen.....	610
11.2	Arten von Eigenspannungen	612
11.2.1	Eigenspannungen 1. Art.....	612
11.2.1.1	Eigendruckspannung.....	613
11.2.1.2	Eigenzugspannung	613
11.2.2	Eigenspannungen 2. Art.....	614
11.2.3	Eigenspannungen 3. Art.....	615
11.3	Epitaxie-Effekte.....	617
11.4	Messverfahren	618
11.4.1	Zweistreifen-Methode.....	619
11.4.2	Spiralkontraktometer.....	621
11.4.3	Disk-Tensometer	624
11.4.4	IS-Meter TM	626
11.4.5	In-situ-Messsystem MSM 200.....	628
11.4.6	Röntgenographische Bestimmung	630
11.4.6.1	$\sin^2\psi$ -Verfahren	631
11.5	Reduzierung/Beseitigung	634
11.5.1	Thermische Nachbehandlung	634
11.5.2	Optimierung der Zusammensetzung.....	635
	Literaturverzeichnis	636

12	Bestimmung der mechanischen Eigenschaften metallischer Schichten...	639
12.1	Einleitung.....	639
12.2	Elastisches Verhalten.....	639
12.2.1	Normalbeanspruchung.....	640
12.2.1.1	Spannungs-Dehnungs-Diagramm.....	641
12.2.2	Scherbeanspruchung.....	642
12.2.2.1	Zusammenhang zwischen Schub- und Zugspannung.....	645
12.3	Plastisches Verhalten.....	646
12.3.1	Mechanismus.....	648
12.3.2	HALL-PETCH-Beziehung.....	651
12.4	Mikrohärte.....	652
12.4.1	Messmethoden.....	653
12.4.1.1	VICKERS-Verfahren.....	653
12.4.1.2	KNOOP-Verfahren.....	656
12.4.1.3	Instrumentierte Eindringprüfung.....	658
12.4.1.3.1	MARTENS-Härte.....	662
12.4.1.3.2	Eindringhärte.....	664
12.4.1.3.3	Eindringmodul.....	664
12.4.1.3.4	Verformungsarbeit.....	665
	Literaturverzeichnis.....	666
13	Untersuchung des Verschleißverhaltens metallischer Schichten.....	667
13.1	Einleitung.....	667
13.2	Reibung.....	667
13.2.1	Reibungszahl.....	669
13.2.2	Reibungszustände.....	671
13.2.2.1	Festkörperreibung.....	671
13.2.2.2	Flüssigkeitsreibung.....	671
13.2.2.3	Grenzreibung.....	671
13.2.2.4	Mischreibung.....	671
13.2.2.5	Gasreibung.....	672
13.2.2.6	STRIBECK-Kurve.....	672
13.2.3	Maßnahmen zur Reibungsverminderung.....	674
13.3	Verschleiß.....	675
13.3.1	Verschleißbetrag.....	676
13.3.1.1	Verschleiß-Messgrößen.....	676
13.3.2	Verschleißmechanismen.....	677
13.3.2.1	Adhäsion.....	678
13.3.2.2	Abrasion.....	680

13.3.2.3	Tribooxidation	682
13.3.2.4	Oberflächenzerrüttung	683
13.3.3	Verschleißprüfung.....	684
13.3.3.1	Modellversuche	685
13.3.3.1.1	Falex-Tester	685
13.3.3.1.2	TABER-Abraser	686
13.3.3.1.3	Gekreuzte Zylinder	687
13.3.3.1.4	Stift-Scheibe-Tribometer	688
13.3.3.1.5	TOG-Prüfstand	690
	Literaturverzeichnis	692
14	Bestimmung der physikalischen Eigenschaften metallischer Schichten ..	693
14.1	Einleitung	693
14.2	Schmelzpunkt	693
14.3	Dichte.....	694
14.3.1	Bestimmung durch Wägung	695
14.3.2	Bestimmung mit Pyknometer	695
14.3.3	Bestimmung mit hydrostatischer Waage.....	696
14.4	Reflexionsvermögen	698
14.5	Elektrische Eigenschaften	703
14.5.1	Spezifischer elektrischer Widerstand.....	703
14.5.2	Spezifische elektrische Leitfähigkeit.....	705
14.5.3	Kontaktwiderstand	706
14.6	Thermische Leitfähigkeit.....	706
14.6.1	Thermischer Ausdehnungskoeffizient	708
14.7	Magnetische Eigenschaften	709
14.7.1	Magnetisierung	710
14.7.2	CURIE-Temperatur	712
14.8	Benetzbarkeit	713
14.8.1	Oberflächenenergie	714
14.8.1.1	YOUNGSche Gleichung	715
14.8.1.1.1	Bestimmung des Benetzungswinkels	718
14.8.2	Lötbarkeit.....	719
14.8.2.1	Prüfmethoden.....	721
14.8.2.1.1	Benetzungswaage	722
14.8.3	Schweißbarkeit.....	724
14.8.4	Bondbarkeit.....	726
	Literaturverzeichnis	729

15	Einfluss metallischer Schichten auf Bauteileigenschaften.	731
15.1	Einleitung	731
15.2	Wasserstoffversprödung	732
15.2.1	Mechanismus	735
15.3	Dauerwechselfestigkeit	740
15.3.1	WÖHLER-Kurve	742
15.4	Porigkeit	744
15.4.1	Nachweismethoden	747
15.4.1.1	Ferroxyl-Test	747
15.4.1.2	Salzsprühtest	747
15.4.1.3	KESTERNICH-Test	749
15.4.1.4	Acrylamid-Gel-Test	750
	Literaturverzeichnis	752
16	Bestimmung der Duktilität metallischer Schichten.	753
16.1	Einleitung	753
16.2	Messverfahren	754
16.2.1	Duktilitätsmessung am Substrat-Schicht-Verbund	756
16.2.1.1	Der einfache Biegetest	757
16.2.1.2	Der Biegeversuch	758
16.2.1.3	Der zylindrische Dornbiegeversuch	759
16.2.1.4	Der konische Dornbiegeversuch	760
16.2.1.5	Der Spiralbiegeversuch	760
16.2.1.6	Der Drei-/Vier-Punkt-Biegeversuch	761
16.2.1.7	Der mechanische Wölbungsversuch	762
16.2.2	Duktilitätsmessung an Schichtfolien	765
16.2.2.1	Herstellung von Schichtfolien	765
16.2.2.2	Der Zugversuch	766
16.2.2.3	Der Tiefungsversuch	768
16.2.2.4	Der hydraulische Wölbungsversuch	768
16.2.2.5	Hydraulischer Wölbungsversuch vs. Zugversuch	774
	Literaturverzeichnis	776
17	Korrosionsbeständigkeit metallischer Schichten.	777
17.1	Einleitung	777
17.2	Die Triebkraft der Korrosion	778
17.3	Korrosionsmechanismen	778
17.3.1	Chemische Korrosion	778
17.3.2	Elektrochemische Korrosion	780

17.3.2.1	Galvanische Elemente	780
17.3.2.2	Korrosionselemente	786
17.4	Korrosionsschutz	787
17.4.1	Metallische Überzüge	789
17.4.1.1	Korrosionsverhalten	791
17.5	Korrosionsprüfungen	793
	Literaturverzeichnis	794
	Stichwortverzeichnis	795

abläuft. Stört man diesen Gleichgewichtszustand, indem man die überschüssigen Elektronen mittels eines Drahtes der Metallelektrode entzieht und so den Ladungsüberschuss abbaut, dann werden mehr und mehr Metallionen die Metallelektrode verlassen und ins Elektrolyttinnere wandern. Folglich setzt eine verstärkte anodische Metallauflösung ein. Führt man umgekehrt der Metallelektrode über eine Spannungsquelle Elektronen zu, so werden an der Grenzfläche Metall/Elektrolyt immer mehr Metallionen entladen, die sich dann auf der Elektrodenoberfläche niederschlagen.

Die elektrochemische Metallabscheidung beruht nun darauf, dass die zur Entladung der Metallionen benötigten Elektronen im Gegensatz zur Reduktionsabscheidung nicht von einem Reduktionsmittel, sondern von einer externen Spannungsquelle zur Verfügung gestellt werden. Aus diesem Grund wird dieses Metallisierungsverfahren vielfach auch als „Metallabscheidung mit Fremdstrom“ oder „galvanische Metallabscheidung“ bezeichnet. Je nachdem ob man dabei mit Gleich- oder Pulsstrom arbeitet, unterscheidet man zwischen Gleichstrom- und Pulsstromverfahren.

4.3.1 Gleichstromverfahren

Von einer Gleichstrom-Elektrolyse spricht man, wenn zwei Metallelektroden, die über eine äußere Spannungsquelle leitend miteinander verbunden sind, in eine Elektrolytlösung tauchen [4.7]. Der prinzipielle Aufbau einer Gleichstrom-Elektrolysezelle ist in Abb. 4.10 dargestellt.

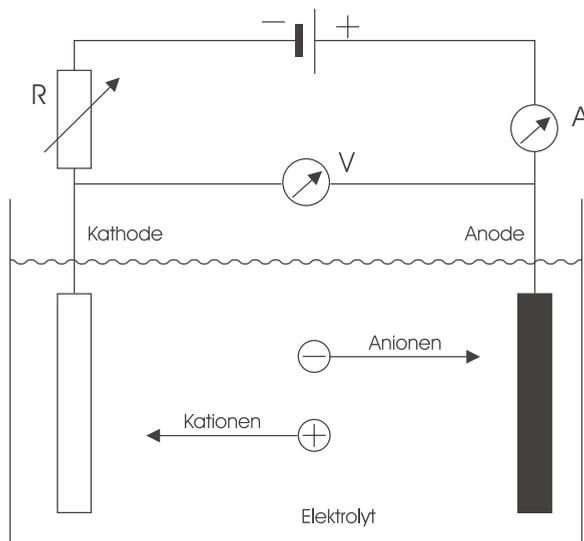


Abb. 4.10: Prinzipieller Aufbau einer Gleichstrom-Elektrolysezelle

Das Ausmaß der anodischen Metallauflösung bzw. der kathodischen Metallabscheidung lässt sich nun durch das Anlegen einer äußeren elektrischen Spannung stark beeinflussen. Als Folge stellt sich an der Phasengrenze Kathode/Elektrolyt eine andere, vom Gleichgewichtspotential verschiedene Potentialdifferenz ($\varepsilon \neq \varepsilon_{\text{Me/Me}^{z+}}$) ein, und die Bedingung $|i_k| = |i_n|$ verliert ihre Gültigkeit. Die Differenz zwischen dem tatsächlich herrschenden Potential und dem Gleichgewichtspotential bezeichnet man als Überspannung η . Es gilt also:

$$\eta = \left| \varepsilon - \varepsilon_{\text{Me/Me}^{z+}} \right| \quad (4.12)$$

Je nachdem ob dabei das Gleichgewichtspotential in anodischer oder kathodischer Richtung überschritten wird, spricht man von anodischer (η_a) bzw. kathodischer Überspannung (η_k). Unter der Annahme, dass der Durchtritt der Ladungsträger durch die elektrolytische Doppelschicht (Durchtrittsreaktion) der einzige Mechanismus ist, der das Ausmaß des reversiblen Kathodenprozesses bestimmt, lässt sich mit der so genannten Durchtrittsüberspannung η_D jene zusätzliche Spannung definieren, die zur Überwindung dieser Barriere aufgebracht werden muss. Sie tritt vor allem bei Elektroden mit geringer Austauschstromdichte auf. Die anodische Metallauflösung und die kathodische Metallabscheidung lassen sich nun durch folgende Exponentialfunktionen mathematisch beschreiben:

$$i_a = i^\circ \times e^{\frac{\alpha \cdot z \cdot F}{RT} \eta_D} \quad (4.13)$$

$$i_k = -i^\circ \times e^{\frac{-(1-\alpha) \cdot z \cdot F}{RT} \eta_D} \quad (4.14)$$

In diesen Gleichungen stellt α einen Symmetriekoeffizienten dar, der alle Zahlenwerte zwischen 0 und 1 annehmen kann. Er ist ein Maß für die Potentialabhängigkeit der Durchtrittsgeschwindigkeit. In diesem Sinne wird er auch als Ladungsdurchtrittsfaktor bezeichnet. Ferner bedeuten F die FARADAYSche Konstante (96 490 C/mol), R die universelle Gaskonstante (8,135 J/mol · K) und T die absolute Temperatur in K. Bei vorgegebener Stromdichte hängt die Durchtrittsüberspannung gemäß folgender Beziehung von der Austauschstromdichte ab:

$$\eta_D = \frac{RT}{(1-\alpha) \cdot z \cdot F} \cdot \ln \left(\frac{i^\circ}{i_k} \right) \quad (4.15)$$

Dies ist übrigens der Grund dafür, dass eine Verringerung der Austauschstromdichte, z. B. durch Vergiftung der Kathodenoberfläche, eine Erhöhung der Überspannung erfordert.

Abb. 4.11 gibt den Verlauf der Stromdichte-Potential-Kurven für die anodische Metallauflösung bzw. kathodische Metallabscheidung in Abhängigkeit von der Potentialänderung wieder.

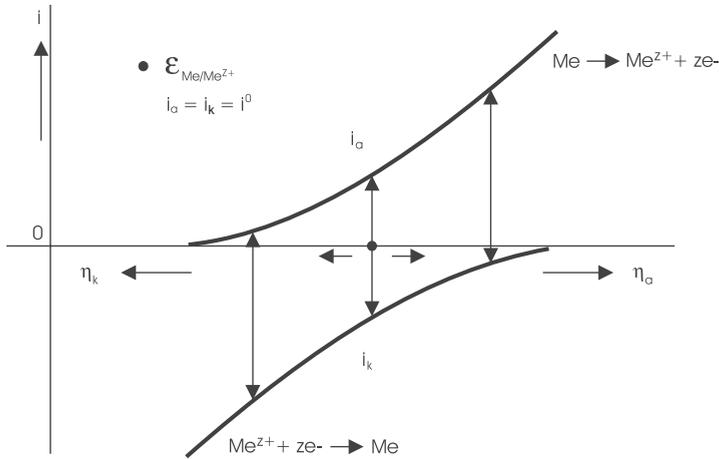


Abb. 4.11: Verlauf der anodischen Metallauflösung bzw. kathodischen Metallabscheidung in Abhängigkeit von der Potentialänderung

4.3.1.1 Abscheidung von Metallschichten

Beim Anlegen einer elektrischen Spannung zwischen den beiden Elektroden der Elektrolysezelle entsteht ein Elektronenfluss, der von der Anode über den äußeren Verbindungsdraht zur Kathode fließt (Elektronenleitung). Dabei geht die Anode in Lösung, und die entstandenen Kationen wandern zur Kathode. Die in der Elektrolytlösung vorhandenen Anionen bewegen sich umgekehrt in Richtung der Anode. Der Stromtransport im Elektrolyten erfolgt somit durch die Bewegung der positiv bzw. negativ geladenen Ionen (Ionenleitung).

Entscheidend für den Prozess der elektrochemischen Metallabscheidung sind nun der Antransport und die Nachlieferung der positiv geladenen Metallionen aus dem Inneren der Elektrolytlösung zur Kathode. Das Ausmaß dieses Stofftransportes wird durch die hydrodynamischen Bedingungen bestimmt, unter denen der Elektrolyt an der Kathode vorbeibewegt wird. Der Antransport von entladbaren Metallionen aus dem Inneren der Elektrolytlösung zur Kathode erfolgt hauptsächlich über drei Bewegungsmechanismen, die als Migration, Konvektion und Diffusion bekannt sind (s. Abschnitt 5.2.1).

Maßgeblich für die kathodische Abscheidung von Metallschichten ist Gl. (4.14). Bei den folgenden Überlegungen wird daher eine Darstellungsweise dafür gewählt, die es erlaubt,

die für die Metallabscheidung charakteristischen Größen $\varepsilon_{\text{Me/Me}^{z+}}$, i° und α graphisch zu ermitteln. Zu diesem Zweck trägt man, wie in Abb. 4.12 geschehen, den natürlichen Logarithmus der kathodischen Stromdichte als Funktion der Potentialänderung auf.

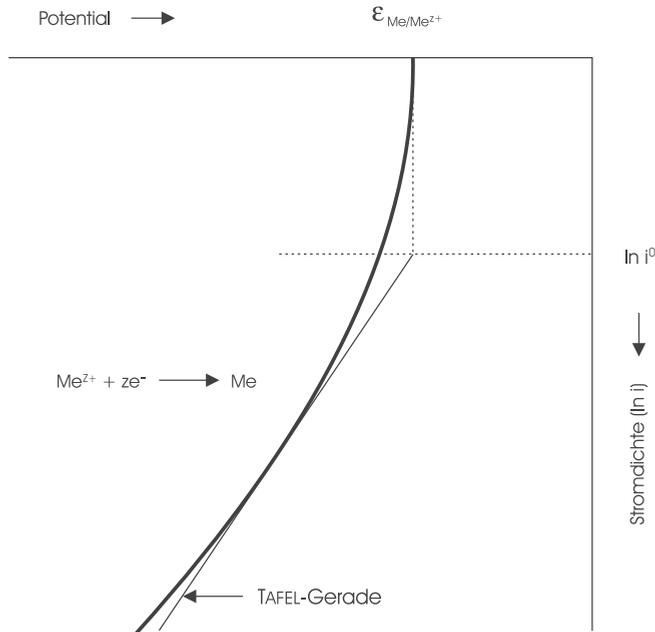


Abb. 4.12: Abhängigkeit der kathodischen Stromdichte vom Potential; graphische Ermittlung von $\varepsilon_{\text{Me/Me}^{z+}}$, i° und α durch Tangentenkonstruktion

Wie aus dieser Darstellung hervorgeht, lässt sich die Lage des Gleichgewichtspotentials durch die Asymptote der logarithmischen Funktion $\ln i$ ermitteln. Die dazugehörige Austauschstromdichte kann durch die Tangentenkonstruktion bestimmt werden. Sie ergibt sich aus dem Schnittpunkt der Asymptote mit der an die Stromdichte-Potential-Kurve angelegten Tangente. Diese, deren Steigung dem Durchtrittskoeffizienten α proportional ist, wird als TAFEL-Gerade bezeichnet.

Die kathodische Metallabscheidung wird durch die Entladung der Metallionen initiiert, die sich in unmittelbarer Nähe der Grenzfläche Kathode/Elektrolyt befinden. Der Durchtritt der Ladungsträger durch die elektrolytische Doppelschicht ist daher zu Beginn des Abscheidungsvorgangs der geschwindigkeitsbestimmende Prozessschritt. Mit zunehmender Verarmung des Kathodenraums an entladbaren Metallionen kann der Prozess der Metallabscheidung nur noch durch die Nachlieferung von Kationen aus der Elektrolytlösung weiter in Gang gehalten werden. Die kathodische Metallabscheidung

wird daher im Verlauf der Elektrolyse mehr und mehr durch diffusionsbedingte Transportvorgänge gesteuert. Für den Fall, dass die Diffusion der Metallionen zur Kathode zum geschwindigkeitsbestimmenden Prozessschritt wird, erhält man den in Abb. 4.13 wiedergegebenen Verlauf für die Stromdichte-Potential-Kurve.

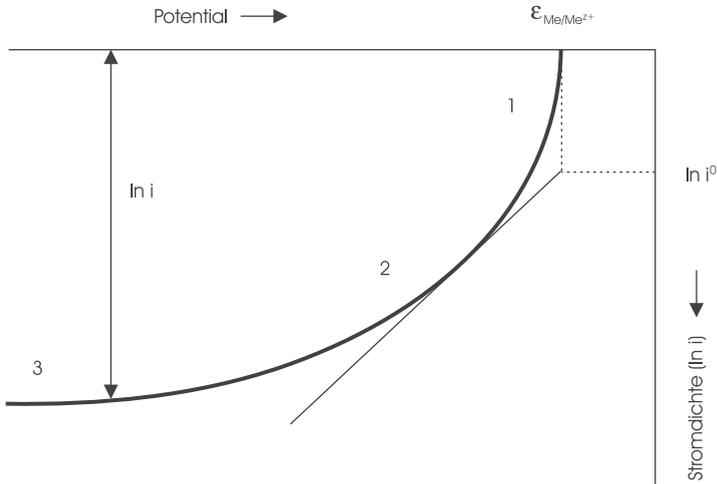


Abb. 4.13: Verlauf der Stromdichte-Potential-Kurve bei durchtrittsgesteuerter (1) und diffusionskontrollierter (3) Metallabscheidung; (2): beide Mechanismen wirksam

In der Praxis muss man davon ausgehen, dass sich nur bestimmte Metalle aus wässrigen Elektrolyten elektrochemisch abscheiden lassen. Sie sind im Periodensystem der Elemente in Abb. 4.14 durch Umrandung hervorgehoben.

Ia	IIa	IIIa	IVa	Va	VIa	VIIa	VIII	IIb	IIIb	IVb	Vb	VIb	VIIb	O			
1 H													1 H	2 He			
3 Li	4 Be								5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne			
11 Na	12 Mg								13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar			
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	89 Ac	104 Ku														

Abb. 4.14: Übersicht der aus wässrigen Elektrolyten elektrochemisch abscheidbaren Metalle [4.5]

4.3.1.2 Abscheidung von Legierungsschichten

Die bisher betrachtete Entladung einer einzigen Ionensorte bei der kathodischen Abscheidung eines Metalls ist nur in ganz wenigen Fällen der alleinige elektrochemische Vorgang an der Kathode. Vielfach findet eine gleichzeitige Entladung von zwei oder mehreren Ionensorten statt. Die Mitabscheidung von Wasserstoff mit ihren häufig unerwünschten Begleiterscheinungen stellt ein allzu bekanntes Beispiel hierfür dar. Aus dieser Tatsache ergibt sich die Möglichkeit, zwei oder mehrere Metalle gleichzeitig abzuscheiden, und zwar derart, dass man als Ergebnis des Abscheidungsprozesses eine Legierungsschicht als Überzug erhält [4.8, 4.9].

Die elektrochemische Abscheidung einer binären Legierungsschicht, d. h. die gleichzeitige Abscheidung von zwei Metallen Me1 und Me2, lässt sich anhand der dazugehörigen Stromdichte-Potential-Kurven theoretisch behandeln. Dabei sollen folgende Annahmen gelten:

- ▶ Me1 ist elektrochemisch edler als Me2 ($\epsilon_1^0 > \epsilon_2^0$).
- ▶ Die Austauschstromdichten i_1^0 und i_2^0 sind nicht gleich groß ($i_1^0 > i_2^0$).
- ▶ Der Abscheidungsprozess ist ausschließlich durchtrittskontrolliert, wobei $\eta_{D,1} \neq \eta_{D,2}$.

Unter Berücksichtigung dieser Annahmen können nun folgende unterschiedliche Fälle bei der Legierungsbildung diskutiert werden:

Für den Fall, dass die Durchtrittsfaktoren α_1 und α_2 gleich groß sind, erhält man gemäß Gl. (4.14):

$$i_1 = -i_1^0 \times e^{\frac{-(1-\alpha_1) \cdot z \cdot F}{RT} \eta_{D,1}} \quad (4.16)$$

$$i_2 = -i_2^0 \times e^{\frac{-(1-\alpha_2) \cdot z \cdot F}{RT} \eta_{D,2}} \quad (4.17)$$

Die dazugehörigen Stromdichte-Potential-Kurven, die die Abscheidung Me1 und Me2 beschreiben, sind in Abb. 4.15 graphisch dargestellt.

Aus dem Verhältnis der beiden kathodischen Stromdichten i_1 und i_2

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{i_1^0}{i_2^0} e^{\frac{(1-\alpha) \cdot z \cdot F}{RT} (\eta_{D,2} - \eta_{D,1})} \quad (4.18)$$

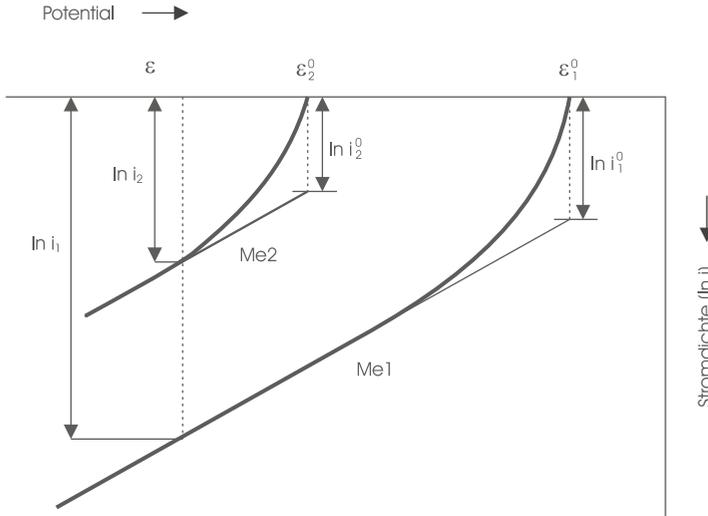


Abb. 4.15: Gleichzeitige Abscheidung zweier Metalle Me1 und Me2 mittels Gleichstrom-Elektrolyse unter der Bedingung, dass $\varepsilon_1^0 > \varepsilon_2^0$, $i_1^0 > i_2^0$ und $\alpha_1 = \alpha_2$

lässt sich für diesen Fall folgende Schlussfolgerung ableiten: Bei gleichzeitiger Abscheidung zweier Metalle hängt das Verhältnis der Abscheidungsstromdichten von den Austauschstromdichten und der Differenz der Gleichgewichtspotentiale ab. Je größer i_1^0 im Vergleich zu i_2^0 , und je positiver das Gleichgewichtspotential von Me1 gegenüber dem von Me2 ist, umso größer ist die abgeschiedene Menge von Me1 im Vergleich zu Me2.

Der Fall $\alpha_1 = \alpha_2$ stellt eine starke Vereinfachung der Verhältnisse dar. Im Allgemeinen sind die Durchtrittskoeffizienten für die einzelnen kathodischen Reaktionen nicht identisch. Für die Stromdichte-Potential-Kurven bedeutet dies, dass sie nicht mehr mit gleicher Steigung verlaufen. Dadurch können sich gänzlich andere Verhältnisse einstellen [4.10].

Für den Fall, dass $\alpha_1 < \alpha_2$ bzw. $\alpha_1 \ll \alpha_2$ ist, ergeben sich die in Abb. 4.16a bzw. Abb. 4.16b dargestellten Stromdichte-Potential-Kurven.

Hieraus geht hervor, dass mit größer werdendem α_2 die Menge des abgeschiedenen Me2 gegenüber der des Me1 zunimmt. Steigt der Wert von α_2 so weit an, dass die Stromdichte-Potential-Kurve von Me2 diejenige von Me1 schneidet (Abb. 4.16b), dann ergeben sich folgende Verhältnisse:

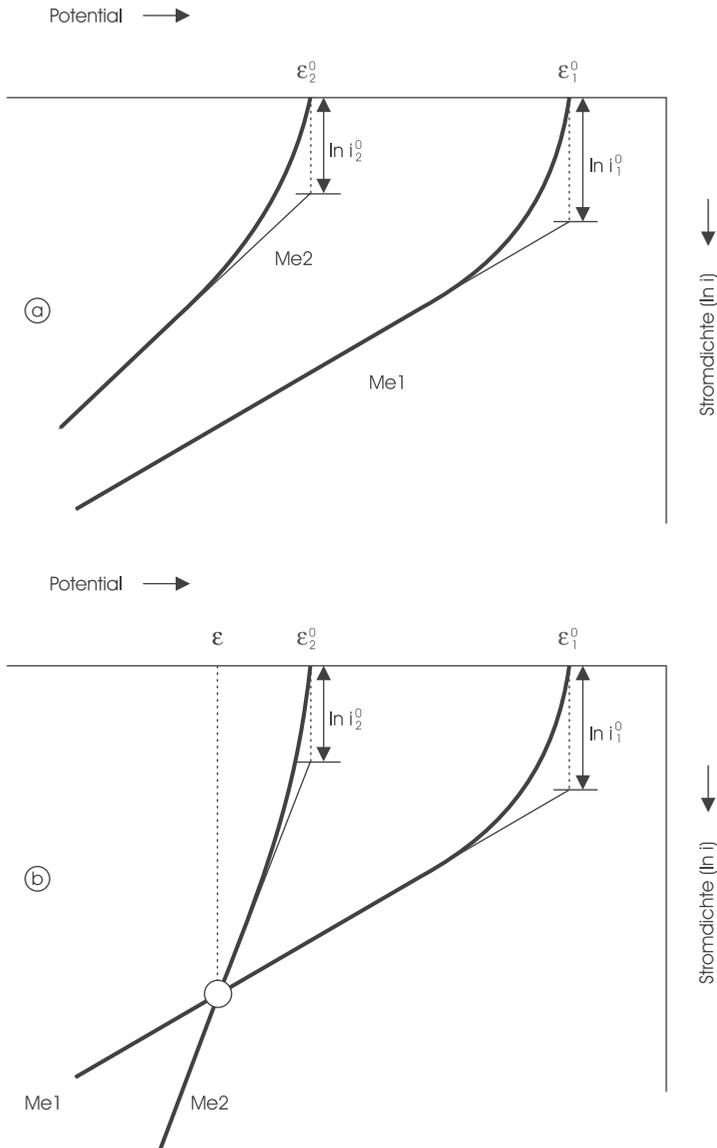


Abb. 4.16: Gleichzeitige Abscheidung von Me1 und Me2 mittels Gleichstrom-Elektrolyse unter der Bedingung, dass $\epsilon_1^0 > \epsilon_2^0$, $i_1^0 > i_2^0$ und $\alpha_1 < \alpha_2$ (a) bzw. $\alpha_1 \ll \alpha_2$ (b)

Bei Abscheidungspotentialen positiver als ϵ wird mehr Me1 und bei Abscheidungspotentialen negativer als ϵ umgekehrt mehr Me2 abgeschieden. Beim Abscheidungspotential ϵ , bei dem sich die Stromdichte-Potential-Kurven von Me1 und Me2 schneiden, sind die Abscheidungsstromdichten der beiden Metalle gleich groß ($\ln i_1 = \ln i_2$). Folglich werden gleiche Mengen von Me1 und Me2 im Verhältnis 1 : 1 abgeschieden. Die kathodische Stromausbeute³ beträgt in diesem Fall für jedes Metall 50 %. Hieraus lässt sich die folgende Schlussfolgerung ableiten: Um bei der Abscheidung von zwei unterschiedlichen Metallen eine Legierungsschicht zu erhalten, ist es notwendig, dass die dazugehörigen Stromdichte-Potential-Kurven möglichst nah beieinander liegen. Der Idealfall liegt vor, wenn sie miteinander identisch sind. Dieser Fall ist jedoch sehr unwahrscheinlich und kommt praktisch nicht vor. Je nach Elektrolytzusammensetzung und Bindungsart der Metallionen können die Abscheidungspotentiale der beiden Metalle mehr oder weniger weit auseinander liegen. Beispielsweise differieren die Abscheidungspotentiale hydratisierter Metallionen in den Lösungen einfacher Salze so stark, dass ihre gleichzeitige Entladung praktisch ausgeschlossen ist. Eine Annäherung der dazugehörigen Stromdichte-Potential-Kurven lässt sich aber oft durch die Überführung der hydratisierten Metallionen in Komplexverbindungen realisieren. Durch die Komplexierung der zu entladenden Metallionen wird einerseits die Konzentration an entladbaren Kationen geringer, andererseits aber ändert sich ihr Abscheidungspotential. Daraus ergibt sich die Möglichkeit, die Abscheidungspotentiale der beiden abzuschheidenden Metalle durch Zugabe geeigneter Komplexbildner zum Elektrolyten in weiten Grenzen zu variieren. Dies ist der Grund dafür, dass für die Abscheidung von Legierungsschichten hauptsächlich komplexe Salzlösungen verwendet werden. Die Voraussetzung für die gleichzeitige Abscheidung zweier Metalle aus solchen Elektrolyten ist, dass sich das Abscheidungspotential der einen Komplexverbindung stärker verschieben lässt als das der anderen.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass für die gleichzeitige Entladung zwei unterschiedlicher Kationen an der Kathode nicht immer die Lage ihrer Normalpotentiale in der elektrochemischen Spannungsreihe maßgebend sein muss. Das heißt, die Prämisse, wonach sich ein chemisch edleres Metall stets stärker abscheiden muss als ein unedleres, trifft, wie aus Abb. 4.17 ersichtlich, nicht immer zu.

Dieser Fall beruht auf der Annahme, dass die Abscheidung des edleren Metalls Me1 nach dem Beginn der Elektrolyse hauptsächlich durch den Antransport seiner Kationen zur Kathode bestimmt wird. Sie ist somit diffusionskontrolliert, und die Abscheidungsgeschwindigkeit wird durch die kathodische Grenzstromdichte limitiert.

³ Unter der kathodischen Stromausbeute Θ_k ist das Verhältnis der tatsächlich auf der Kathode abgeschiedenen Metallmenge zu dem theoretisch errechneten Wert zu verstehen. Sie wird in Prozent angegeben und stellt ein Maß für den Wirkungsgrad des Abscheidungsprozesses dar.

Die Abscheidung von Me2 soll hingegen als durchtrittsgesteuert ablaufen. Diese Darstellung zeigt, dass bei genügend hohen negativen Abscheidungspotentialen (links von ϵ) die Abscheidungsstromdichte des unedleren Metalls Me2 diejenige von Me1 überwiegen wird ($\ln i_2 > \ln i_1$). Das heißt, unter diesen Bedingungen wird das unedlere Metall Me2 mehr abgeschieden als das edlere Me1.

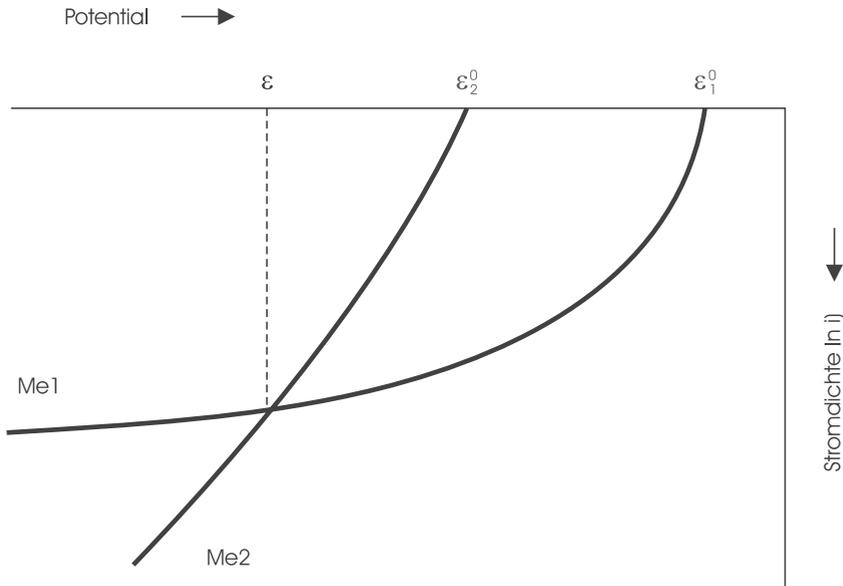


Abb. 4.17: Gleichzeitige Abscheidung von Me1 und Me2 mittels Gleichstrom-Elektrolyse unter der Bedingung, dass $\epsilon_1^0 > \epsilon_2^0$ und $\alpha_1 < \alpha_2$

Die hier im Zusammenhang mit der Abscheidung von Legierungsschichten dargelegten Überlegungen haben nur dann Gültigkeit, wenn sich die gleichzeitig ablaufenden kathodischen Entladungsvorgänge nicht gegenseitig beeinflussen. Dies ist jedoch nur selten der Fall.

Die Übersicht in Abb. 4.18 gibt einen Anhaltspunkt über die elektrochemische Abscheidung binärer Legierungsschichten [4.5, 4.11]. Sie macht Aussagen darüber, welche Legierungsschichten bereits Eingang in die Technik gefunden haben und welche nur gelegentlich angewandt werden. In dieser Übersicht sind auch jene Legierungsschichten berücksichtigt worden, deren Abscheidung im Wesentlichen nur im Labor nachgewiesen werden konnte.

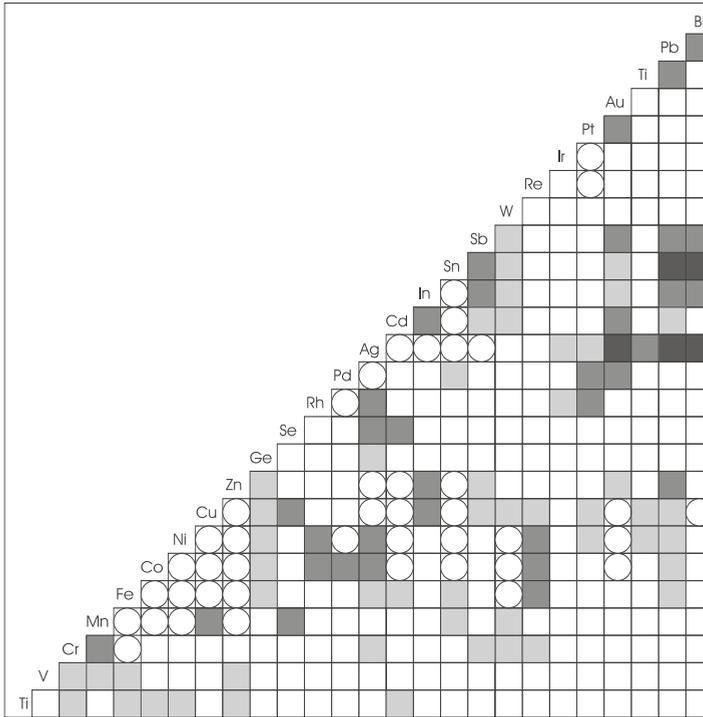


Abb. 4.18: Übersicht über galvanisch abscheidbare binäre Legierungsschichten; O: technisch etabliert, ■: gelegentliche Anwendung, □: Abscheidung im Labormaßstab [4.11]

4.3.1.2.1 Abscheidung von Messing

Die Abscheidung von Messing soll im Folgenden als ein Beispiel für die Legierungsabscheidung gelten.

Messing ist eine Legierung aus Kupfer und Zink. Das handelsübliche Messing mit einem Zinkgehalt von 30 bis 35 % besteht aus α -Mischkristallen⁴ und wird daher als α -Messing oder einfach Messing bezeichnet.

Messing ist zwar etwas härter als reines Kupfer, lässt sich jedoch gut umformen. Seine Formänderungsfähigkeit nimmt mit steigendem Zinkgehalt zu, bis sie bei Gehalten von

⁴ Kupfer kann bis zu 39 % Zink durch Substitution in statistischer Verteilung in sein Atomgitter aufnehmen. Dabei bläht sich das Gitter wegen des größeren Atomradius von Zink ($r_{\text{Zn}} = 1,58 \cdot 10^{-10}$, $r_{\text{Cu}} = 1,28 \cdot 10^{-10}$ m) etwas auf. Der dadurch entstandene Mischkristall hat das gleiche Atomgitter wie Kupfer und wird als α -Mischkristall bezeichnet.

30 bis 35 % Zn ein Maximum erreicht⁵. Die elektrische Leitfähigkeit von Messing liegt bei ca. $15 \cdot 10^6$ S/m; der *E*-Modul beträgt 78 000 bis 123 000 N/mm². Eine sehr häufig verwendete Messingsorte, die 37 % Zink enthält (CuZn37)⁶, besitzt eine Dichte von etwa 8,3 g/cm³. Messing ist unmagnetisch, korrosionsbeständig, und seine Farbe variiert je nach Mischungsverhältnis von goldorange bis hellgelb (Tab. 4.7).

Tab. 4.7: Zusammensetzung und Farbe von Messing

Zusammensetzung	Name	Verwendung
80 % Kupfer + 20 % Zink	Messing (goldorange)	Unehches Blattgold
70 % Kupfer + 30 % Zink	Messing (hellgelb)	Blasinstrumente, Armaturen, Beschläge, Schrauben

Wegen seiner goldähnlichen Farbe wird Messing oft für Verzierungen und Beschläge verwendet. Häufig wird es auch wegen seiner guten Korrosionseigenschaften für Armaturen und Formstücke in der Sanitärinstallation herangezogen.

Galvanisch abgeschiedene Messingüberzüge besitzen die gleichen Eigenschaften wie metallurgisch hergestelltes Messing und werden daher oft für verschiedene technische und dekorative Zwecke eingesetzt.

Die galvanische Abscheidung von Messingschichten ist nur dann möglich, wenn es gelingt, die beiden Metalle Kupfer und Zink gleichzeitig abzuscheiden. Dies bedeutet praktisch wiederum, dass die Konzentrationen der Kupfer- und Zinkionen, die Abscheidungstemperatur, die Stromdichte und der pH-Wert des Elektrolyten so aufeinander abgestimmt werden müssen, dass die Abscheidungspotentiale der beiden Metalle in etwa gleich groß sind.

Aus den Stromdichte-Potential-Kurven von Kupfer und Zink kann man ersehen, ob und aus welchen Elektrolyten sie abgeschieden werden.

Die Kurven A und B in Abb. 4.19 beziehen sich auf die Abscheidung von Kupfer und Zink aus jeweils einer 1 molaren Sulfatlösung. Die beiden Stromdichte-Potential-Kurven liegen etwa 1 V auseinander. Aus einer Sulfatlösung lassen sich also Kupfer und Zink nicht gemeinsam und gleichzeitig abscheiden.

⁵ Die Legierung CuZn30 weist von allen Messingsorten die beste plastische Verformbarkeit (hohe Bruchdehnung) auf. Da aus ihr früher häufig Kartuschen für Artilleriegeschosse hergestellt wurden, nannte man diese Legierung Karthuschenmessing.

⁶ Früher wurde die Bezeichnung Ms 63 verwendet, d. h. mit Angabe des Kupferanteils.

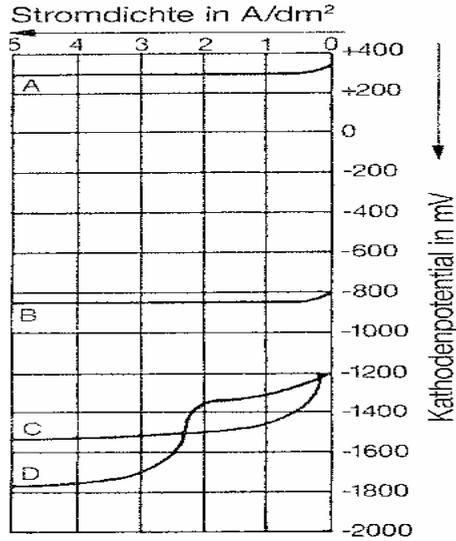


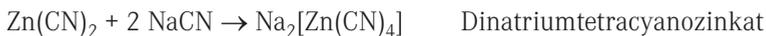
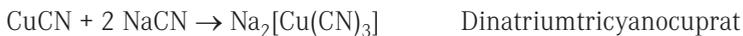
Abb. 4.19: Stromdichte-Potential-Kurven von Kupfer und Zink in unterschiedlichen Elektrolyten [4.61]

A und B: 1 molare Kupfer- bzw. Zinksulfatlösung

C: 20 g/l Kupfer + 5 g/l Natriumcyanid + 10 g/l Natriumhydroxid

D: 60 g/l Zinkcyanid + 36 g/l Natriumcyanid + 60 g/l Natriumhydroxid

Die Kurven C und D geben die Stromdichte-Potential-Kurven von Kupfer und Zink hingegen in cyanidischen Elektrolyten wieder. Durch die Komplexbildung des Cyanids sind die Abscheidungspotentiale von Kupfer und Zink nach edleren Werten hin verschoben worden, wobei dies bei Kupfer etwas ausgeprägter ist als bei Zink (Abscheidungspotential von Kupfer $-1,16$ V, das von Zink $-1,22$ V). Aus dieser Darstellung geht hervor, dass beim Anlegen einer Spannung von etwa $-1,5$ V sowohl die Kupfer- als auch die Zinkionen mit der gleichen Stromdichte von etwa $2,4$ A/dm² entladen werden. Dies ist der Grund, weshalb für die Abscheidung von Messingschichten durchweg cyanidische Elektrolyte verwendet werden. Dabei dienen als Metallträger Kupfer- und Zinkcyanid. Beide Verbindungen sind in Wasser unlöslich, lösen sich aber leicht unter Bildung von Komplexen in Alkalicyanidlösungen (Natriumcyanid oder Kaliumcyanid). Folgende Komplexsalze entstehen:



Aus cyanidischen Elektrolyten werden in der Regel Messingschichten mit einem Massenanteil von 65 bis 80 % Kupfer abgeschieden.

Messingelektrolyte finden im Wesentlichen aus zwei Gründen Anwendung:

- ▶ Für technische Zwecke
- ▶ Für dekorative Zwecke

Die wichtigste technische Anwendung ist die Reifenherstellung. Da Gummi bzw. die Kautschukmasse sehr gut auf Messing haftet, wird der Reifenkord aus dünn gezogenem Stahldraht vermessingt. Die Reifenhersteller verlangen ein Messing mit einem Kupferanteil von 68 bis 73 %.

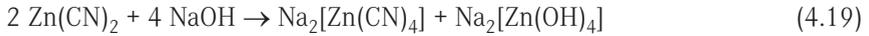
Zum Vermessingen wird beispielsweise der folgende Elektrolyt eingesetzt [4.59]:

▶ Kupfercyanid	90 g/l
▶ Zinkcyanid	24 g/l
▶ Natriumcyanid	72 g/l
▶ freies Natriumcyanid	24 g/l
▶ Natriumhydroxid	10-20 g/l
▶ pH-Wert	12
▶ Temperatur	30-60 °C
▶ Stromdichte	0,8-5,4
▶ Anoden	75 : 25 (Cu : Zn)

Das Anodenverhältnis Cu : Zn wird auf die gewünschte Messinglegierung eingestellt, die je nach verwendeter Kautschukmasse unterschiedlich sein kann. Die wichtigen Badparameter sind der Kupfergehalt, das freie Cyanid, der NaOH-Gehalt und die Badtemperatur. Es können Stromdichten von 1 bis ca. 20 A/dm² angewendet werden. Als Badzusätze werden Tartrate, Zitate u. a. auch Äthanolamin vorgeschlagen [4.59]. Die Messingniederschläge enthalten 63 bis 82 % Kupfer.

Als freies Cyanid wird jene Cyanidmenge bezeichnet, die über das in den Komplexen Dinatriumcyanocuprat(I) und Dinatriumtetracyanozincat gebundenes Cyanid hinaus noch im Elektrolyten vorhanden ist. Wenn zu wenig Cyanid vorhanden ist, nimmt der anodische Wirkungsgrad ab, die Spannung steigt infolge des höheren Widerstandes des Elektrolyten, und die Überzüge neigen zur Blasenbildung. Andererseits bewirkt ein zu hoher Gehalt an freiem Cyanid ein Ansteigen des Zinkgehalts der Legierung und eine Abnahme des kathodischen Wirkungsgrads.

In der Literatur werden Elektrolyte für hohe Leistungen beschrieben, die hohe Hydroxid-gehalte aufweisen. In diesen Elektrolyten wird neben dem Cyano-Komplex nach



Dinatriumtetrahydroxozinkat gebildet. Folgendes Gleichgewicht kann dabei auftreten:



Diese Gleichgewichtsreaktion ist besonders bei der Korrektur von Messingelektrolyten, die hohe Mengen an Natriumhydroxid ausweisen, zu beachten.

Bei Messingelektrolyten wird - im Gegensatz zu den Kupferelektrolyten - das an Zink gebundene Cyanid bei der titrimetrischen Analyse miterfasst. Das titrierbare Cyanid wird auch als Gesamtcyanid bezeichnet. Das so genannte freie Cyanid ergibt sich aus der Differenz des titrierbaren Cyanids abzüglich des stöchiometrisch an Natriumtetra-cyanozinkat gebundenen Cyanids [4.60].

Die zunehmende Nachfrage nach dekorativen Oberflächen ist der Grund dafür, dass Messingelektrolyte auch für dekorative Zwecke entwickelt wurden. Eine Aktualität erlangten solche Schichten nach dem Inkrafttreten der Bedarfsgegenständeverordnung (BedGgstV) vom 16.04.1992 (Neufassung 16.06.2008), durch die die Anwendung des allergiehervorrufenden Nickels beschränkt wurde. So werden heute Schnallen, Knöpfe, Taschenbügel und Billigschmuck, um nur einige wenige Beispiele zu nennen, mit Messingniederschlägen versehen. Dabei ist die Farbe der abgeschiedenen Messingüberzüge abhängig von der Legierungszusammensetzung (Tab. 4.8).

Tab. 4.8: Farbe der Messingüberzüge [4.60]

Farbe	Massenanteil an Kupfer [%]
rot	90-100
rotgelb	80-90
gelb	65-80
rötlich	60-65
gelb	50-60
weiß-grau	< 50

In der Literatur wird eine Vielzahl verschiedener Messingelektrolyte für dekorative Zwecke beschrieben. Der hier betrachtete Elektrolyt hat sich in der Praxis sowohl als Matt- als auch als Glanzmessingelektrolyt in Trommel- und Gestellbädern bewährt [4.60]:

Typischer Grundansatz

▶ Kupfercyanid	28 g/l \approx 20 g/l Cu
▶ Zinkcyanid	36 g/l \approx 20 g/l Zn
▶ Natriumcyanid (Gesamtnatriumcyanid)	64 g/l \approx 63 g/l
▶ Natriumcarbonat mit und ohne Glanzzusätze	30 g/l

Analysenwerte

▶ Kupfer	20 ± 3 g/l
▶ Zink	20 ± 3 g/l
▶ Gesamtcyanid	2,9–3,2-fache des Zinkgehalts
▶ Natriumcarbonat	30–80 g/l
▶ Ammonium	< 1 g/l
▶ pH-Wert	9–10

Arbeitsbedingungen

▶ Temperatur	20–50 °C
▶ Stromdichte (Gestell)	0,1–1,0 A/dm ²
▶ Stromdichte (Trommel)	< 0,5 A/dm ²
▶ Stromausbeute	75–90 %
▶ Anodische Stromdichte	< 1 A/dm ²
▶ Kathodenbewegung	2–4 m/min

Der Elektrolyt eignet sich zum Beschichten von Gestellartikel bis zu einer Schichtdicke von etwa 20–30 μm . In Trommeln werden in der Regel nur Überzüge mit geringer Schichtdicke abgeschieden. Hochglänzende Überzüge bis zu einer Schichtdicke von 3 μm werden meistens auf Nickelüberzügen abgeschieden. Zusatzfreie Elektrolyte reproduzieren den Glanzgrad des Grundmaterials bis zu einer Schichtdicke von ca. 1 μm . Sind glänzendere Überzüge erwünscht, so kommen Glanzzusätze, die den cyanidischen Glanzkupferzusätzen ähnlich sind, zur Anwendung. Üblicherweise werden Messingüberzüge mit einem Massenanteil von 25–35 % Zink abgeschieden [4.60].

Die Neigung der Messingüberzüge zum Verfärben, d. h. die Bildung von dunklen Flecken und Anlauffarben, kann durch Chromatieren verzögert werden.

Messingüberzüge mit einem Zinkanteil von ca. 35 bis 40 % weisen eine „schmutzig“ rote Farbe auf. Solche Überzüge entstehen bevorzugt in den niedrigen Stromdichtebereichen. Der Massenanteil an Zink wird durch eine Reihe von Faktoren beeinflusst. Er steigt an mit

- ▶ Zunahme des pH-Wertes
- ▶ Abnahme der Stromdichte
- ▶ Zunahme der Zinkionen-Konzentration
- ▶ Abnahme der Kupferionen-Konzentration
- ▶ Abnahme der Arbeitstemperaturen,
- ▶ Abnahme der Elektrolyt- oder Kathodenbewegung
- ▶ Zunahme des Ammoniumgehalts
- ▶ Abnahme des Natriumcyanidgehalts

Sehr aktuell ist eine Messingfarbe mit einem Stich ins grünliche. Helle, grünlich gelbe Überzüge werden bei pH-Werten von 9 bis 10, hohen Stromdichten, guter Bewegung, hohem Gesamtcyanidgehalt, Temperaturen von 40–50 °C und normalen Ammoniumgehalten erhalten. Als Anoden dient Messing mit einem Massenanteil von 70 % Kupfer.

4.3.1.3 Abscheidung von Dispersionsschichten

Die Eigenschaften galvanisch abgeschiedener Metall- oder Legierungsschichten können erheblich verändert werden, wenn man feine, nichtmetallische Partikel aus Hart- oder Trockenchmierstoffen in die Elektrolytlösung gibt und dafür sorgt, dass sie während der Elektrolyse zur Kathode gelangen und dort mit abgeschieden werden [4.12–4.16]. Die so erhaltenen Dispersionsschichten, auch Kompositsschichten genannt, bestehen aus einer metallischen Matrix mit nichtmetallischen Einlagerungen. Die Menge der in der Schicht eingebetteten Feststoffpartikel hängt von der Größe und der Dichte der Teilchen, dem pH-Wert, der Zusammensetzung, der Viskosität und der Temperatur des Elektrolyten sowie von der Stromdichte ab. Die dispergierten Partikel, die einen Durchmesser zwischen 0,1 bis 30 µm haben können, beeinflussen den Schichtaufbau und verändern damit die Eigenschaften der Schicht in verschiedener Weise. Die Erniedrigung der Eigenzugspannungen und damit der Neigung zur Rissbildung oder die Veränderung der oberflächenrelevanten Eigenschaften wie Adhäsions- und Abrasionsverhalten können als Beispiele derartiger Veränderungen genannt werden.

Für die Verbesserung der mechanischen und thermischen Eigenschaften galvanisch abgeschiedener Schichten, wie Härte, Zugfestigkeit und Temperaturbeständigkeit, werden Hartstoffe, wie Carbide von Chrom, Silizium, Titan und Wolfram, bzw. Oxide von Aluminium, Silizium, Titan und Zirkonium oder auch Titannitrid in die Metallmatrix

Stichwortverzeichnis

A

Abrasion 680, 690, 691
Abrasionsverschleiß 678
ABS 109, 110, 196, 319, 359, 360, 361, 382, 383, 384, 465, 634, 658
Abschirmung 20, 110, 465
Absorption 245, 251, 534, 542, 698, 699
Absorptionskoeffizient 534
Achsenverhältnis 579, 580, 600, 601
Acrylnitril-Butadien-Styrol 109, 196, 359, 382
Adatome 6, 258, 272, 280, 284, 290, 291, 292, 295, 297, 298, 303
Adhäsion 296, 307, 308, 382, 386, 670, 678, 690, 691, 716, 731
Adhäsionsarbeit 386
Adhäsionsverschleiß 678
AFM 323, 324, 352, 353, 357, 358, 359, 360, 361, 362, 363, 364, 365, 366, 367
Akkumulatoren 108
Aktivierungsenergie 284, 287, 304, 314, 377, 381
Aktivität 168, 221, 450
Aktivitätskoeffizient 168
Alkaliphosphatierung 21
alkalische Elektrolyte 134
Altautoverordnung 319
Aluminium-Gusslegierungen 78, 79
Aluminium-Knetlegierungen 78, 79, 80
Aluminiumlegierungen 56, 77, 78, 80, 81, 175
Anisotropie 301, 563, 725
anodische Stromausbeute 418, 445
anorganische Lacke 4, 9
Anschliffwinkel 436, 437, 438
Äquivalentleitfähigkeit 150
Äquivalentmasse 150
Äquivalentmenge 150
Arrhenius-Beziehung 377
atmosphärisches Plasmaspritzen 4, 10
Ätzdauer 360, 434
Ätzen 353, 427, 430, 433, 434, 435
Ätzlösungen 434
Ätzverfahren 434
Aufdampfen 4, 5

Auflösung 196, 228, 324, 325, 326, 333, 334, 352, 358, 359, 379, 423, 431, 438, 452, 475, 488, 489, 498, 505, 508, 509, 510, 519, 520, 526, 527, 530, 531, 545, 549, 555, 556, 612, 625, 629, 661
Auflösungsvermögen 44, 324, 329, 334, 357, 410, 422, 423, 426, 483, 487, 488, 530, 545
Auftragen 2, 4, 6
Auftragsschweißen 3, 4, 6, 7
Ausdehnungskoeffizient 195, 708
außenstromlose Elektrolyte 157
Austauschmischkristalle 66, 602
Austauschstromdichte 199, 201, 203, 219, 283
Austrittsarbeit 328, 514, 520
autokatalytische Abscheidung 365
autokatalytische Metallabscheidung 250
Avogadro-Zahl 415

B

basisorientierter Reproduktionstyp 300, 301
Bauschinger-Effekt 615
Baustähle 73
Beilby-Schicht 429, 430
Beizen 359, 361, 373, 383, 384, 385, 725, 735
Benetzbarkeit 144, 172, 287, 713, 714, 722
Benetzungstheorie 386
Benetzungswaage 722, 724
Benetzungswinkel 287, 288, 289, 295, 716, 718, 719, 720
Berkovich-Eindringkörper 659, 662, 664
Beschichtungstechnologien 2
Beschleuniger 158, 164, 171, 172, 362
Beschleunigungsspannung 38, 326, 424, 425, 426, 519, 527, 528, 529, 536, 541
Biegetest 756
Biegeversuch 756
Bildungsenergie 38, 39
Bindungsenergie 499, 520, 525
Bindungsmechanismus 57, 58
Bohrlochmetallisierung 180
Bohrsches Magneton 709
Boltzmannsche Konstante 38, 61
Bondbarkeit 713, 726, 727
Braggsches Reflexionsgesetz 544

- Brechungsindex 423, 438, 439, 699, 700
Brechzahl 423, 699
Bremsstrahlung 529, 531, 532, 535, 536, 542
Bronze 85
Brownsche Molekularbewegung 37
BR-Typ 300, 301, 302
Bruchdehnung 109, 211, 647, 648, 738
- C**
Cannizzaro-Reaktion 180
Carbide 73, 74, 194
Ceramic Matrix Composite 113
CFC 241
charakteristische Röntgenstrahlung 529, 533, 540
Chelate 130
chemical shift 525, 526
Chemical Vapor Deposition (CVD) 4
chemische Korrosion 778
chemischer Sauerstoffbedarf 174
chemische Verkupferung 175
chemische Vernicklung 169
chemische Verschiebung 525
Chemisch Nickel 20, 365
chemisch-reduktive Metallabscheidung 188
Chipbonden 726
Chromatieren 17, 19, 215
Chromatierung 19
Chromatschichten 19, 21
Chromsäure 19
Chromschichten 18, 21, 398
Chromschwefelsäure 174, 359, 360, 361, 383, 634
Clustern 324, 347, 350
CMM 236
Compositionally Modulated Multilayers 236
constant current mode 331, 332, 357
constant height mode 331, 332, 357
Coulombsche Kraft 124, 148
Coulombsches Gesetz 123
Coulometrisches Verfahren 443
CSB 174
Curie-Punkt 712
Curie-Temperatur 712
CVD 3
CVD-Verfahren 3, 4, 5
cyanidfreie Elektrolyte 136
cyanidhaltige Elektrolyte 134
- D**
Dauerwechselfestigkeit 740
DBT 236
Debye-Temperatur 61
Deckfähigkeit 132, 136, 150, 151, 152
Deckvermögen 150
Dekohäsionstheorie 738
Diamantgitter 194, 565, 574, 583
dichtester Kugelpackung 58
Die-Bonden 726
Dielektrizitätskonstante 123, 276
Diffusion 5, 6, 202, 204, 220, 221, 259, 260, 261, 265, 267, 269, 270, 282, 291, 315, 316, 325, 347, 374, 376, 377, 379, 381, 460, 532, 609, 721, 727, 728, 731, 734, 736, 737
Diffusionsbarrieren 381
Diffusionsgrenzstromdichte 268
Diffusionskoeffizienten 247, 261, 315, 376, 377
Diffusionskonstanten 377
Diffusionsschicht 227, 234, 235, 236, 240, 247, 265, 266, 267, 268, 269, 270, 271, 279, 280, 283, 310, 378
Diffusionstheorie 374, 382
Diffusionsüberspannung 282
Dispersionshärtung 217
Dispersionsschichten 17, 18, 21, 175, 192, 216, 217, 218, 220, 221, 240, 241, 553, 681
Dispersionsteilchen 193
Displays 108
Disproportionierung 179
Dissoziation 124, 134, 146, 159, 160, 245
Dissoziationsgrad 146, 147, 148
Doppelelektrolytverfahren 236
Doppelsalze 159
Dornbiegeversuch 756
Dotierung 97, 99, 100
DPP 236
Drahtbonden 726, 727
dreidimensionale Keime 293, 295
Drei/Vier-Punktbiegeversuch 756
Druckknopf-Theorie 361, 383, 384
Dual Bath Technique 236
Dual Plating Process 236
Duktilität 24, 26, 53, 137, 138, 157, 478, 480, 563, 731, 753
Duktilitätsmessung 756
Duktilitätswerte 753

- Durchdringungsverbundwerkstoffe 111, 114
Durchkontaktierung 180, 363
Durchlaufgalvanisierung 14, 15
Durchschallungsmethode 406
Durchstrahlungsmikroskopie 773
Durchtrittsprozess 281
Durchtrittsreaktion 201, 282
Durchtrittsüberspannung 201, 281, 282, 283
- E**
Edelmetallbekeimung 387
Edelmetallschichten 19
Edelstähle 71, 72
EDS 199, 265, 272
EDTA 130, 163, 176, 177, 634
EDX 379, 484, 490, 491, 532, 535, 536, 537, 540, 541, 543, 549, 554, 555
Eigendruckspannungen 613, 620, 621, 627, 630
Eigenspannungen 137, 157, 301, 315, 316, 609, 610, 611, 612, 613, 614, 615, 616, 617, 618, 619, 621, 622, 623, 624, 625, 626, 627, 628, 629, 630, 631, 634, 635, 636, 735
Eigenzugspannungen 612, 613, 618, 619, 620, 621, 627, 630
eindimensionale Defekte 40
eindimensionale Keime 292
Eindringmodul 653, 661, 664
Eindringtiefe 440, 454, 490, 527, 528, 529, 541, 543, 632, 660, 661, 662, 663, 664
Einebner 141
Einebnung 137, 141, 142, 143, 157, 431, 432
Einebnungseffekt 140, 141, 143
Einebnungsvermögen 141, 142, 227
Einebnungswirkung 143
Einfallswinkel 487, 495, 496, 497, 702
Einlagerungsmischkristalle 64, 604
Einsatzstähle 73, 74
Einschliffverfahren 439, 442
Eisenlegierungen 33, 69, 77
Elastizitätsmodul 54, 55, 77, 81, 619, 621, 631, 640, 641, 642, 643, 664
elektrisch 24, 58, 77, 81, 88, 96, 105, 109, 146, 473, 703
elektrochemische Korrosion 780
elektrochemische Metallabscheidung 198
elektrochemisches Äquivalent 219, 417
elektrochemische Spannungsreihe 208, 782, 791
elektrochemisches Potential 446, 449
elektroforetische Kraft 125
Elektrokristallisation 281, 284, 290, 298, 610
Elektrolysedauer 415, 417, 419, 420
elektrolytische Doppelschicht 199, 201, 203, 229, 248, 265, 266, 271, 272, 273, 274, 275, 276, 277, 278, 279, 280, 281, 282, 283, 290, 291, 336, 386
Elektrolytüberwachung 166, 167
Elektrolytzusätze 137, 166, 359, 474
Elektromigration 291
Elektronegativität 603
Elektronenaustausch 154, 189, 327
Elektronengas 57, 58, 505, 507, 508, 509, 565
Elektronenstrahl 323, 379, 505, 508, 541
Elektronenvolt 38
elektrostatische Theorie 386
Elementarladung 38, 125, 326, 416, 424, 707
Elementarzelle 37, 292, 293, 564, 565, 566, 567, 568, 569, 570, 571, 572, 573, 574, 575, 576, 577, 578, 579, 580, 582, 585, 596, 598
Elementsverteilungsbild 538
ellipsoidförmige Keime 297
Elongation 760
Eloxalschichten 21
Eloxieren 17, 21
Emaillieren 3
Empfindlichkeit 75, 76, 332, 406, 457, 472, 477, 487, 492, 527, 629
Energieauflösung 521, 536
Energieverteilungskurve 511, 512, 514, 515
Enthalpie 295, 296
Epitaxie 292, 617, 731
Epitaxie-Effekte 617
Erichsen-Test 392
Erosion 2
ESS-Test 748
Expositionszeit 14, 143, 366, 415, 417, 620, 623
Ex-situ-Methoden 470
- F**
Faradaysche Konstante 201, 259, 338, 416
Faradayscher Strom 279, 336
Faradaysches Gesetz 219, 224, 445
Faserverbundwerkstoffe 111, 112
Feldemissions-Rasterelektronenmikroskop 379
feldorientierter Isolationstyp 300

- feldorientierter Texturtyp 301
 Fermi-Energie 99, 328, 333
 Fermi-Fläche 99
 Fermi-Grenze 99
 Fernordnung 34, 48, 49, 89
 Festkörperreibung 671, 673, 674, 678
 Ficksche Diffusionsgesetze 375
 FI-Typ 300
 Flächenregel 791
 Flammsspritzen 4, 11
 Fluoreszenzstrahlung 470
 Flüssigkeitsreibung 671, 673
 Formaldehyd 161, 176, 177, 178, 179, 180
 Frank-Modell 303
 Frankscher Wachstumsmechanismus 350
 Frank-van-der-Merwe-Mechanismus 340, 341
 Frank-van-der-Merwe-Wachstumsmodell 308
 freies Cyanid 134, 213
 Frenkel-Mechanismus 39
 Frenkel-Paar 460
 FT-Typ 301
 Füllermethode 97, 98
- G**
- galvanische Elemente 780
 Galvanisieren 3, 4, 12, 16, 27
 Galvanisierungsanlagen 13
 Galvanisierungseinrichtungen 13
 Galvanisierungsverfahren 12
 Galvanoformung 17, 18, 19, 20, 22
 gelbes Blutlaugensalz 128
 Gestellgalvanisierung 12, 13, 14
 Gitterbaufehler 37, 52, 53, 56, 60, 67, 87, 315, 381, 459, 610
 Gitterkonstante 34, 35, 36, 292, 566, 617
 Gitterlücken 604, 605
 Gitterwinkel 37
 Glanzbereich 139, 140
 Glanzbildner 137, 138, 139, 140
 Glanzeffekt 449
 Glanzkoeffizienten 702
 Glanzmessingelektrolyt 215
 Glanzmittel 138, 139
 Glanznickelschichten 143, 449, 450
 Glanzträger 138
 Glanzvermögen 146
 Glanzzusätze 132, 135, 138, 139, 215, 408, 449
- Gleichgewichtspotential 154, 199, 201, 206, 221, 338, 340, 342
 Gleichmaßdehnung 647, 648
 Gleichstromabscheidung 234, 235, 242
 Gleichstrom-Elektrolyse 200, 206, 207, 209, 232, 234, 267, 270, 271, 273
 Gleichstromverfahren 200, 223, 224, 225, 241, 243, 273, 310, 311, 474, 475
 Gleitebenen 595, 596, 597, 599, 600, 601, 648, 650, 651
 Gleitfähigkeit 24
 Gleitlacke 4, 9
 Gleitrichtungen 43, 595, 596, 597, 598, 599, 648, 650, 651
 Gleitsysteme 595, 596, 597, 598, 599, 600, 601, 650
 Gleitverhalten 192
 Glockengalvanisierung 14
 Gouy-Chapman-Modell 274, 275, 276
 Gouy-Chapman-Schicht 276
 Grenzfläche, kohärente 296
 Grenzflächenarbeit 296
 Grenzflächenenergie 285, 286, 295, 296, 297, 386, 716, 718, 719
 Grenzflächenspannung 144, 718
 Grenzreibung 671, 673, 674
 Grenzstromdichte 208, 234
 Großwinkelkorngrenzen 47, 49, 53
 Grundstähle 71
- H**
- Haftfestigkeit 8, 10, 11, 21, 37, 46, 361, 373, 374, 377, 381, 383, 386, 387, 388, 389, 390, 391, 392, 393, 394, 395, 397, 398, 399, 400, 401, 402, 403, 404, 405, 406, 465, 519, 639
 Haftfestigkeitsprüfung 388, 389, 391, 395, 398, 399, 403, 405, 406, 407
 Halbglanznickel 448, 449
 Halbglanznickelüberzüge 449
 Hall-Petch-Beziehung 651
 Haring-Blum-Zelle 154, 155, 156
 Härte 194, 195
 Hartstoffe 193, 194, 195
 Helmholtz-Ebene 278, 283
 Helmholtz-Perrin-Modell 273, 274, 275
 Helmholtz-Schicht 273, 276, 278, 281, 283, 290
 Heyrovsky-Mechanismus 736, 737

- hochlegierte Stähle 70, 71
Hochleistungskeramiken 119
Hookesches Gesetz 356, 618
Hull-Zelle 151, 152, 154
Hundeknochen-Effekt 227
Hydratationsverhalten 262, 265
hydraulischer Wölbungsversuch 756
hydrostatische Waage 696
Hystereseschleife 710, 711
- I**
Induktion 710
Informationstiefe 483, 487, 489, 490, 491, 505, 516, 520, 523, 526, 527, 556
inkohärente Zwillingsgrenze 50
In-situ-Verfahren 470
instabile Rissausbreitung 52
instrumentierte Eindringprüfung 658
Interconnect Stress Test 479
Ionenbeweglichkeit 126
Ionenleiter 58, 126, 272
Ionenleitung 202
IST 479
- K**
Kaltverformung 45, 53, 609
kathodische Stromausbeute 208, 419, 420
Kavitation 2
Keimbildung 42, 235, 243, 284, 285, 286, 287, 288, 289, 290, 292, 293, 294, 296, 300, 302, 303, 306, 308, 310, 323, 343, 350, 358, 359, 728
Keimbildungsarbeit 150, 286, 289, 292, 293, 294
Keimbildungsreaktion 163
Keimwachstum 297, 303
keramische Werkstoffe 114
Kesternich-Test 749, 750
Kippwinkel 534, 540, 632
Kirkendall-Effekt 381
Knoop-Eindringkörper 656, 659
Knoop-Verfahren 656, 657, 658, 661
Koerzitivfeldstärke 24, 711
kohärente Zwillingsgrenze 50
kohlenstofffaserverstärkter Kohlenstoff 241
Komplexbildner 130, 158, 162, 163, 170, 172, 175, 176, 177, 190, 208, 237
Komplexbildung 162, 212, 281
Komplexe 127, 128, 130, 132, 133, 159, 240, 257
Komplexsalz 159
Kompositwerkstoffe 110
Konstantan 87
Konstitutionsformel 129, 139
Kontaktwiderstand 373, 483, 704, 706
Kontaktwinkel 287, 717, 718
Konvektion 202, 220, 221, 246, 259, 260, 261, 265, 269, 280
Koordinationszahl 128, 566, 567, 568, 570, 571, 573, 574, 579, 581, 582
Kornflächenätzung 433
Korngrenzen 34, 46, 47, 49, 50, 51, 53, 67, 68, 73, 87, 302, 314, 315, 381, 433, 460, 563, 602, 610, 651, 739
Korngrenzenätzung 433
Korngrenzenspannung 49
Korngrenzenwinkel 49
Korrosion 777, 778
Korrosionsbeständigkeit 19, 20, 21, 23, 26, 53, 73, 74, 75, 76, 80, 89, 137, 157, 172, 196, 317, 365, 483, 693, 694
Korrosionselemente 786
Korrosionsgeschwindigkeit 784
Korrosionsmechanismen 778
Korrosionsprüfungen 793
Korrosionsschutz 787
Korrosionsschutzdauer 789
Korrosionsschutzschichten 788
Korrosionsverhalten 791
Kossel-Stranski-Modell 298
Kovar 466
Kraft-Weg-Diagramme 408
Kriechverhalten 53, 660, 661
Kristallisationsüberspannung 281, 283, 295, 302
Kristallkeime 140, 258, 284, 285, 286, 287, 289, 290, 291, 292, 293, 294, 298, 300, 301, 302, 303, 305
Kristallstruktur 194, 196, 306, 564, 580
Kristallwachstum 146, 284, 295, 298, 300, 304, 306, 308, 316, 339, 350
Kristallwasser 158
kugelförmige Keime 295
Kunststoffe 20, 33, 88, 89, 90, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 109, 175, 188, 352
Kupfer-Gusslegierungen 85
Kupfer-Knetlegierungen 83
Kupferlegierungen 83

L

Lackieren 3, 4, 8, 9, 21
Lagermetall 86
Längen-Ausdehnungskoeffizient 403
laserinduzierte Metallabscheidung 244
Lastspielzahl 742, 743
Leadframe 726
Leerstellen 37, 38, 39, 53, 60, 87, 374, 381, 459, 460, 610
Leerstellenkonzentration 38, 39, 375
Legierungsabscheidung 210, 235
Legierungsschichten 7, 16, 17, 20, 136, 175, 190, 192, 205, 208, 209, 216, 222, 234, 235, 236, 237, 239, 241, 365, 436, 463, 464, 467, 468, 602, 609, 634, 635, 693
Leiterplatten 180
Leitfähigkeit 14, 24, 53, 58, 59, 60, 61, 64, 66, 77, 78, 81, 88, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 132, 133, 137, 146, 147, 148, 149, 150, 153, 154, 167, 168, 211, 251, 261, 306, 325, 328, 452, 454, 455, 456, 459, 460, 473, 563, 693, 703, 705, 706, 707, 721
Leitsalze 133, 137, 150, 262
Lennard-Jones-Potential 354, 356
Liganden 128, 129, 130, 362
linearer Ausdehnungskoeffizient 77, 81
Linienanalyse 520, 537
Literbelastung 166
Lokalelement 746
Lokalelementbildung 433, 449
Lorenz-Zahl 61
Loschmidtsche Zahl 415
Lötbarkeit 24, 137, 157, 317, 719, 720, 721, 722, 724
Luftleinblasung 141, 146, 147, 173, 218, 246, 475
Luggin-Kapillare 451

M

magnetisch 24, 709
Magnetisierung 710, 711, 712
Makro-Eigenspannungen 612, 618, 625
Makrohärte 652
Makro-Streufähigkeit 152, 155, 156, 157
Manganin 87
Martens-Härte 653, 658, 662, 663
Massengalvanisierung 13

Matthiessensche Regel 59
Mattnickel 448
mechanischer Wölbungsversuch 756
metallische Bindung 57, 58, 388
metallisches Glas 563
Metallsalze 127, 131, 158, 240, 257
Metallverteilung 137
Metal Matrix Composite 112
Metal Turn Over 173, 174
Meyer-Exponent 653
Migration 202, 259, 261, 262
Mikro-Eigenspannungen 612, 614, 615, 618
Mikrohärte 652, 653, 655, 657, 658, 661, 663
Mikrorissigkeit 614
Mikrorührung 246, 248
Mikro-Streufähigkeit 157
Miller-Bravais-Indizes 584, 591, 592, 593, 594, 595
Millersche Indizes 584, 585, 586, 588, 589, 590
Mischkristallbildung 64, 75, 602
Mischreibung 671, 673, 674, 678, 679, 689
Monelmetall 87
Monolage 221, 307, 308, 340, 341, 342, 502, 520, 524, 526, 527
Monozeit 307
MTO 173, 174
Multilayer 24, 108, 180, 236, 237, 238, 427, 436

N

Nachweisempfindlichkeit 502, 504, 505, 520, 524, 526
Nachweisgrenze 483, 487, 492, 505, 508, 520, 523, 527, 536, 549, 551, 556
Nahordnung 47, 48, 49, 89, 90, 124, 125
Natriumhypophosphit 161, 170, 171, 172, 173, 176, 190
NE-Metalle 33
Nernst-Gleichung 282, 785
Nernst-Planck-Gleichung 259
Nernstsche Diffusionsschicht 225, 246, 266, 267, 270, 271
Netzebene 37, 42, 43, 44, 303, 305, 544
Netzmittel 144, 145, 146, 158, 172
Neusilber 85
neutrale Elektrolyte 133
Nichtleiter 96, 164, 175
Nichtoxidkeramiken 117
nichtrostende Stähle 72

- Nickelschichten 19, 21, 132, 310, 311, 446, 448, 449, 450
Niederdruck-Plasmaspritzen 4, 10
niedriglegierte Stähle 70
non contact mode 357
Normalpotenziale 782
Normalwasserstoffelektrode 347, 348, 745, 782
NSS-Test 748
nulldimensionale Defekte 37
nulldimensionale Keime 292
- O**
Oberflächenaktivierung 188, 362
Oberflächendiffusion 258, 280, 282, 284, 290, 298, 316
Oberflächenenergie 296, 386, 714, 717, 718
Oberflächenfehler 37, 52, 298
Oberflächenmorphologie 225, 250, 293, 306, 310, 348, 349, 364, 365, 366, 385, 540, 703
Oberflächenrauheit 227, 385, 446, 456, 555, 670
Oberflächenschutzmethoden 3
Oberflächenspannung 144, 714, 718
Oberflächentopographie 324, 331, 333, 335, 337, 346, 347, 352, 357
Oberflächenvorbehandlung 359
Oberflächenzerrüttung 678, 683, 684
Öffnungswinkel 353, 357, 383, 401, 423, 516, 653, 657
Ollard-Test 398, 399
OPD 338, 339, 341, 343, 345
Ordnungszahl 452, 462, 463, 492, 515, 528, 530, 541, 542
organische Lacke 4, 9
Over Potential Deposition 338
Oxidation 2, 11, 21, 99, 133, 171, 174, 188, 189, 418, 525
Oxidationsreaktion 787
Oxidkeramiken 116
Oxoniumionen 733
- P**
Passivierung 162, 167, 553
Patina 785
Pauli-Repulsion 354
Permeabilität 452, 454, 455
Permeabilitätszahl 455
Phosphatieren 17, 21
Photolyse 245
pH-Regulatoren 158, 164, 165, 171, 178
Physical Vapor Deposition (PVD) 4, 5
Plancksches Wirkungsquantum 326, 425, 532
Platinelektrode 733
Poissonsche Zahl 627, 631, 643, 644, 645, 665
Polarisation 154, 223, 710
Polyamid 109
Polycarbonat 109
Polyetherimid 109
Polyimid 109
Polymere 88, 89, 90, 92, 96, 97, 100, 101, 102, 105, 108
Polymer Matrix Composite 112
Polymer/Metall-Haftung 382, 386
Polyphenylenoxid 109
Polypropylen 109
Polysulfon 109
Polytetrafluorethylen 195, 217
Poren 21, 27, 52, 53, 87, 145, 241, 325, 350, 381, 383, 385, 450, 610, 613, 728, 739, 744, 745, 746, 747, 748, 749, 750, 751
Porigkeit 744, 746, 747, 750
Potentialbarriere 327, 328, 329, 330
Potentialdifferenz 154, 161, 199, 201, 259, 283, 449
primäre Glanzmittel 138
primäre Stromdichteverteilung 149, 153, 154
Prüflösungen 447
PTFE 195, 196, 217, 218, 687
Pufferlösungen 165
Pulsparameter 230, 235
Pulsstrom 200, 228, 229, 230, 231, 232, 233, 234, 235, 236, 237, 238, 242, 243, 253, 270, 271, 273, 279, 280, 310, 311, 475, 504
Pulsstromabscheidung 231, 232, 233, 234
Pulsstromdichte 230, 231, 233, 271, 311
Pulsstrom-Elektrolyse 236, 271
Pulsstromverfahren 200, 228, 241, 243, 310, 311, 347, 474, 475, 478, 479
Punktanalyse 537, 538, 540
PVD 3
Pyknometer 695, 696
- Q**
Quadrol® 130, 163, 176, 177
Qualitätsstähle 71, 72
Querkontraktionszahl 627, 644
Querschleiffverfahren 427, 442

R

Randwinkel 296, 716, 717
Rasterelektronenmikroskop 34, 331, 334,
379, 423, 424, 426
Rasterkraftmikroskopie 323, 352, 357, 358,
359, 362, 365
Rastersondenmikroskopie 323, 324, 325
Rastertunnelmikroskopie 323, 326, 327, 331,
335, 336, 337, 343, 352
Raumerfüllung 567, 569, 573, 574, 577, 578,
580, 581, 582
Raumgitter 36, 58, 563, 564, 565, 566, 567,
573, 574, 576, 580, 596, 603, 604
Reaktionsordnung 127
Reaktionsüberspannung 281
Realkristall 38, 40, 41, 43, 45
Redox-Potential 161, 165, 190, 785
Redox-Reaktion 179, 189
Reduktion 99, 162, 179, 188, 189, 191, 221,
233, 419, 736, 737
Reduktionsmittel 131, 157, 160, 161, 165, 170,
176, 177, 179, 188, 189, 190, 200, 257, 362
Reduktionsreaktion 780, 787
Reduktionsverfahren 188, 192, 197
Reflexionsgesetz 543, 544, 700
Reflexionsvermögen 19, 24, 57, 88, 137, 138,
365, 545, 698, 700, 701
Reibung 126, 262, 583, 667, 668, 669, 670,
671, 672, 674, 675, 678, 682
Reibungskoeffizient 23, 669
Reibungszahl 18, 26, 195, 196, 669, 670, 672,
673, 674
Reinigung 4, 12, 26, 29, 33, 373, 374, 381,
524, 626
Rekombination 373, 460, 733, 734, 736, 737
Rekristallisationstemperatur 45
REM 34, 196, 239, 249, 318, 323, 331, 353,
379, 383, 423, 426, 530, 613, 614, 678,
680, 682, 683, 686, 687, 727, 728
Remanenz 711
RKM 352
Röntgenanalyse 490, 491, 527, 532, 533, 535,
536, 540, 543, 544, 545, 546, 547, 548, 549
Röntgenfluoreszenz-Verfahren 460, 461, 464,
466, 467, 469
Röntgenstrahlen 460, 463, 490, 521, 522,
523, 531, 534, 535, 540, 543, 547, 630, 631
Rotguss 86

Rotrost 792
Rowland-Kreis 547, 551

S

Salzsprühtest 747, 748, 750
Sandwich-Schichten 221, 222
Sättigungsmagnetisierung 711, 712
Sauerstoffkorrosion 433
saure Elektrolyte 131
SBT 237
Schallemission 407, 408
Schallemissionsanalyse 407
scheibenförmige Keime 296
Schichtdickenmessung 243, 420, 421, 427,
437, 441, 443, 444, 446, 447, 448, 452,
453, 454, 456, 457, 461, 462, 463, 464,
465, 466, 467, 468, 469, 470, 474, 519
Schichtdickenverteilung 28, 137, 149, 152,
156, 196, 197, 223, 224, 225, 226, 227,
228, 241, 242, 421, 457, 470, 473, 475
Schichtverbundwerkstoffe 113
Schmelztauchen 3, 4, 7
Schnellarbeitsstähle 74
Schrägschliffverfahren 436, 439, 442
Schraubenversetzung 40, 41, 42, 44, 304,
305, 316, 350, 351, 610, 612
Schubspannung 53, 54, 642, 643, 645, 646, 650
Schweißbarkeit 23, 80, 483, 724, 725, 726
sekundäre Glanzmittel 138
sekundäre Stromdichteverteilung 154
selektive Beschichtung 251
SEM 325, 334
Shielding 20
Sievertsches Druckgesetz 734
Single Bath Technique 237
Single Plating Process 237
Skin-Effekt 454, 705
soft contact mode 357
Sol-Gel-Verfahren 3
Spannungs-Dehnungs-Diagramm 641, 647, 753
Spannungsrelaxationsprozesse 407
Spannungszustand 55, 620, 641, 738
spezifischer elektrischer Widerstand 703, 704
Spiralbiegeversuch 756
Spiralkontraktometer 621, 622, 623, 625
SPM 323, 325, 334
SPP 237
Sprödbruch 52, 738

Sputtern (Aufstäuben) 4, 5, 6
Stabilisatoren 158, 163, 164, 166, 171, 172, 176, 177, 178
Stabilität 62, 73, 105, 106, 108, 136, 137, 157, 163, 167, 171, 172, 192, 221, 240, 241, 298, 723
Standardabweichung 243, 620, 623, 625, 774
Standardelektrodenpotentiale 782
Standardpotential 61, 221, 338, 745
Standzeit 172, 173, 692
starke und schwache Elektrolyte 123
STEP-Test 448, 451, 452
Stern-Graham-Modell 273, 276, 277, 278
STM 323, 324, 325, 326, 331, 333, 334, 335, 336, 337, 338, 339, 340, 341, 342, 343, 344, 346, 347, 348, 350, 351, 357
Stokessches Gesetz 125
Stranski-Krastanov-Mechanismus 341, 342
Stranski-Krastanov-Wachstumsmodell 308
Streckgrenze 71, 73, 78, 614, 641, 642, 647, 738, 740
Streufähigkeit 136, 152, 153, 154, 155, 156, 157, 196, 474, 475, 477
Stribeck-Kurve 672
Stromausbeute 179, 208, 215, 224, 234, 268, 418, 445, 481
Stromdichte-Potential-Kurven 202, 203, 204, 205, 206, 208, 211, 212, 431, 432
Strom-Zeit-Diagramme 476, 477
Strom-Zeit-Funktionen 228, 229
Stückgalvanisierung 12
Stufenversetzung 42, 43, 44, 45, 46, 612, 649
Sulfamate 131

T
Taber-Abraser 23, 685, 686, 688, 690
Taber-Index 687
Tafel-Gerade 203
Tafel-Reaktion 736
Target 6, 517
Teilchenverbundwerkstoffe 112
Tenside 144, 145
Tensiometer 718
Textur 563
theoretische Zugfestigkeit 53, 55, 57
thermisch 24, 60, 88, 105, 109, 634, 706, 707
thermische Ausdehnungskoeffizienten 319, 388, 403, 404, 708

thermisches Spritzen 3, 4, 9
Thermocycle-Test 479, 480
Tiefenauflösung 509, 510, 526, 555, 556
Tiefenprofilanalyse 510, 520, 527, 552, 556
Tiefenstreuung 14, 150
Tiefungsversuch 756
Tribometer 685, 688, 690
Tribooxidation 678, 682, 684
Trockenschmierstoffe 193, 195
Trommelgalvanisierung 14
Tunnelprozess 327
Tunnelspannung 329, 330, 335
Tunnelstrecke 329, 332, 335
Turnbulls-Blau 747

U

Übergangswiderstand 5, 373, 703, 706
Überspannung 154, 201, 250, 283, 301, 550, 732
UD-Typ 302
Ultraschall 218, 405, 406, 409
Ultraschallmikroskopie 409, 410
Umkehrpulsstrom 228
Umwandlungsschichten 17, 18, 21
Under Potential Deposition 222, 340
universelle Gaskonstante 261
unlegierte Stähle 69
unorientierter Dispersionstyp 302
UPD 222, 340, 341, 342, 343, 345
UV-Licht 360, 486, 521

V

Valenzelektronen 57, 328, 603
van-der-Waals-Kräfte 354, 374
van-der-Waals-Radius 734
Varianz 623, 625
Verbundwerkstoffe 110
Verformungsarbeit 653, 661, 665, 666
Verschleißbeständigkeit 365, 675
Verschleißbetrag 668, 676, 681, 690
Verschleißfestigkeit 18, 19, 21, 23, 24, 74, 75, 109, 196, 675, 685, 727
Verschleißintensität 686
Verschleißmechanismen 668, 677, 678, 685, 690
Verschleiß-Messgrößen 676
Verschleißprüfung 684, 688
Verschleißwiderstand 20, 23, 26, 88, 137, 157, 365, 676, 681

- Versetzungsdichte 44, 57, 430, 460
Versetzungslinie 40, 42, 43, 44, 45, 298, 350, 649
Versiegelung 19
Verzerrungsenergie 42, 297, 642
Verzunderung 2
Vicat-Zahl 109
Vickers-Eindringkörper 656, 662, 663, 664
Vickershärte 109, 196
Vickers-Mikrohärte 17, 18, 23
Vickers-Verfahren 652, 653, 657
Voigtsche Elastizitätskonstanten 632
Volmer-Reaktion 735
Volmer-Tafel-Mechanismus 736
Volmer-Weber-Mechanismus 338, 339
Volmer-Weber-Wachstumsmodell 307
Volumen-Ausdehnungskoeffizient 403
Vorbehandlung 4, 12, 16, 21, 26, 33, 188, 373, 374, 382, 393, 399, 557, 735, 752
- W**
Wachstumsgeschwindigkeit 309, 314, 351
Walzplattieren 4, 8
Wanderungsenergie 39
Wanderungsgeschwindigkeit 126, 146, 147, 148
Warenbewegung 141, 146, 147, 166, 192, 475
Wärmebehandlung 8, 23, 69, 70, 71, 72, 79, 378, 457, 458, 459, 460, 496, 612, 651, 652, 725, 739
Wärmeleitfähigkeit 60, 61, 77, 81, 88, 89, 251, 707, 723, 725
Wärmeleitzahl 60, 61, 195, 707
Wasserstoffaufnahme 734
Wasserstoffentwicklung 165, 191, 732
Wasserstoffüberspannung 732
Wasserstoffversprödung 731, 732, 734, 735, 737, 738, 739
Weichlöten 720
Weißrost 792
Weissche Bezirke 710
Whisker 55, 311, 313, 314, 315, 316, 317, 318, 319, 350
Whiskerbildung 313, 314, 317, 318, 319
Whiskerwachstum 314, 315
Widerstandsüberspannung 283
Wiedemann-Franzsches Gesetz 61
Wilhelmy-Plattenmethode 718
Wirbelstromverfahren 453, 454, 455, 457, 458, 459, 460
Wirkungsgrad 16, 136, 208, 213, 418, 445
Wirkungsquerschnitt 517, 523
Wöhler-Kurve 742, 743
Wölbungsversuch
- hydraulischer 756
- mechanischer 756
- Y**
Youngsche Gleichung 715, 716
- Z**
ZAF-Korrekturprogramme 542
Zentralion 124, 125, 128, 129, 130
Zinklegierungen 24, 602
Zinkphosphatierung 21
Zinkschichten 19, 136, 233, 694
Zink-Whisker 316
Zinnpest 583
Zinnschrei 407, 583
Zinn-Whisker 317
Zisman-Diagramm 718
Z-Typ 302
Zugfestigkeit 89, 109
Zugversuch 753
Zusätze 13, 14, 78, 137, 144, 146, 157, 227, 250, 346, 448, 725
Zusatzstoffe 131, 449
zweidimensionale Defekte 46
zweidimensionale Keime 292
Zwilligsübergangstyp 299, 302
Zwillingsgrenzen 47, 50, 51, 53, 302, 610
Zwillingslamelle 50, 51
Zwischengitteratome 39, 40, 53, 460, 610
Zwischenschicht 465