

HANSER



Inhaltsverzeichnis

Nasser Kanani

Galvanotechnik

Grundlagen, Verfahren und Praxis einer Schlüsseltechnologie

ISBN: 978-3-446-41738-0

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser.de/978-3-446-41738-0>

sowie im Buchhandel.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort zur ersten Auflage	V
Vorwort zur zweiten 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	Anodisierschichten	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
2.2.2.1.1	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	80
2.3.7	Zinklegierungen	81
2.3.8	Gitterbaufehler und sonstige Materialfehler	82
2.4	Kunststoffe	83
2.4.1	Aufbau (Nahordnung)	84
2.4.2	Amorphe Polymere	85
2.4.3	Teilkristalline Polymere	87
2.4.4	Elektrisch leitende Polymere	91
2.4.4.1	Methoden der Leitfähigkeitserzeugung	92
2.4.4.1.1	Füllermethode	92
2.4.4.1.2	Dotierung	94
2.4.4.2	Thermische und zeitliche Stabilität	100
2.4.4.3	Anwendungsmöglichkeiten	103

2.4.5	Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS)	104
	Literaturverzeichnis	105
3	Elektrolyte zur Abscheidung metallischer Schichten	109
3.1	Einleitung	109
3.2	Ionen im elektrischen Feld	110
3.3	Einfache und komplexe Ionen	113
3.4	Abscheidungselektrolyte	117
3.4.1	Galvanische Elektrolyte	117
3.4.1.1	Saure Elektrolyte	117
3.4.1.2	Neutrale Elektrolyte	119
3.4.1.3	Alkalische Elektrolyte	120
3.4.1.3.1	Cyanidhaltige Elektrolyte	120
3.4.1.3.2	Cyanidfreie Elektrolyte	122
3.4.1.4	Elektrolytzusätze	123
3.4.1.4.1	Glanzbildner	123
3.4.1.4.2	Einebner	127
3.4.1.4.3	Netzmittel/Tenside	130
3.4.1.5	Elektrolyteigenschaften	132
3.4.1.5.1	Elektrische Leitfähigkeit	132
3.4.1.5.2	Deckfähigkeit	136
3.4.1.5.3	Makro-Streufähigkeit	138
3.4.1.5.4	Mikro-Streufähigkeit	143
3.4.2	Außenstromlose Elektrolyte	143
3.4.2.1	Bestandteile	144
3.4.2.1.1	Metallsalze	144
3.4.2.1.2	Reduktionsmittel	146
3.4.2.1.3	Komplexbildner	148
3.4.2.1.4	Stabilisatoren	149
3.4.2.1.5	Beschleuniger	150
3.4.2.1.6	pH-Regulatoren	151
3.4.2.2	Abscheidungsgeschwindigkeit	151
3.4.2.3	Schichtzusammensetzung	152
3.4.2.4	Elektrolytüberwachung	152
3.4.2.4.1	Temperatur	153
3.4.2.4.2	pH-Wert	154
3.4.2.5	Chemische Vernicklung	155
3.4.2.5.1	Nickelsalz	156
3.4.2.5.2	Reduktionsmittel	156

3.4.2.5.3	Komplexbildner.....	156
3.4.2.5.4	Stabilisatoren.....	157
3.4.2.5.5	Beschleuniger.....	157
3.4.2.5.6	pH-Regulatoren.....	157
3.4.2.5.7	Netzmittel.....	158
3.4.2.5.8	Prozessablauf.....	158
3.4.2.5.9	Standzeit.....	159
3.4.2.5.10	Einsatzgebiete.....	161
3.4.2.6	Chemische Verkupferung.....	161
3.4.2.6.1	Kupfersalz.....	161
3.4.2.6.2	Komplexbildner.....	161
3.4.2.6.3	Reduktionsmittel.....	163
3.4.2.6.4	Stabilisatoren.....	163
3.4.2.6.5	pH-Regulatoren.....	164
3.4.2.6.6	Kupferbäder.....	164
3.4.2.6.7	Reaktionsablauf.....	165
3.4.2.6.8	Einsatzgebiete.....	166
	Literaturverzeichnis.....	167
4	Verfahren zur Abscheidung metallischer Schichten.....	171
4.1	Einleitung.....	171
4.2	Chemische Metallabscheidung.....	171
4.2.1	Reduktionsverfahren.....	172
4.2.1.1	Abscheidung von Metallschichten.....	173
4.2.1.2	Abscheidung von Legierungsschichten.....	174
4.2.1.3	Abscheidung von Dispersionsschichten.....	176
4.2.1.3.1	Hartstoffe.....	178
4.2.3.1.2	Trockenschmierstoffe.....	178
4.2.1.4	Schichtdickenverteilung.....	180
4.3	Elektrochemische Metallabscheidung.....	182
4.3.1	Gleichstromverfahren.....	184
4.3.1.1	Abscheidung von Metallschichten.....	186
4.3.1.2	Abscheidung von Legierungsschichten.....	189
4.3.1.2.1	Abscheidung von Messing.....	194
4.3.1.3	Abscheidung von Dispersionsschichten.....	200
4.3.1.4	Abscheidung von „Sandwich-Schichten“.....	205
4.3.1.5	Schichtdickenverteilung.....	207
4.3.2	Pulsstromverfahren.....	212
4.3.2.1	Abscheidung von Metallschichten.....	215

4.3.2.2	Abscheidung von Legierungsschichten	218
4.3.2.3	Abscheidung von Multilayern	220
4.3.2.4	Abscheidung von Dispersionsschichten	224
4.3.2.5	Schichtdickenverteilung	225
4.3.3	Laserinduzierte Metallabscheidung	228
4.3.3.1	Elektrochemische Methode	228
4.3.3.2	Chemische Methode	234
4.3.3.3	Oberflächenmorphologie	234
4.3.3.4	Anwendungsgebiete	235
	Literaturverzeichnis	236
5	Atomistische Deutung der Schichtenstehung	241
5.1	Einleitung	241
5.2	Wanderung der Metallionen im Elektrolyten	241
5.2.1	Transportmechanismen	243
5.2.1.1	Konvektion	243
5.2.1.2	Diffusion	244
5.2.1.3	Migration	245
5.3	Hydratationsverhalten von Metallionen	246
5.3.1	Entladung von Metallionen	249
5.4	Phasengrenze Kathode/Elektrolyt	250
5.4.1	NERNSTSCHE Diffusionsschicht	250
5.4.1.1	Gleichstrom-Elektrolyse	251
5.4.1.2	Pulsstrom-Elektrolyse	254
5.4.2	Elektrolytische Doppelschicht	255
5.4.2.1	Gleichstrom-Elektrolyse	256
5.4.2.1.1	HELMHOLTZ-PERRIN-Modell	257
5.4.2.1.2	GOUY-CHAPMAN-Modell	257
5.4.2.1.3	STERN-GRAHAM-Modell	259
5.4.2.2	Pulsstrom-Elektrolyse	262
5.4.3	Reaktionshemmungen	263
5.4.3.1	Überspannungen	263
5.4.3.1.1	Konzentrationsüberspannung	264
5.4.3.1.2	Reaktionsüberspannung	264
5.4.3.1.3	Diffusionsüberspannung	265
5.4.3.1.4	Durchtrittsüberspannung	265
5.4.3.1.5	Widerstandsüberspannung	266
5.4.3.1.6	Kristallisationsüberspannung	266
5.5	Elektrokristallisation	267

5.5.1	Keimbildung	268
5.5.1.1	Homogene Keimbildung	268
5.5.1.2	Heterogene Keimbildung	270
5.5.2	Keimbildung auf der Kathodenoberfläche	273
5.5.2.1	Nulldimensionale Keime	275
5.5.2.2	Eindimensionale Keime	275
5.5.2.3	Zweidimensionale Keime	275
5.5.2.4	Dreidimensionale Keime	276
5.5.2.4.1	Kugelförmige Keime	278
5.5.2.4.2	Scheibenförmige Keime	279
5.5.2.4.3	Ellipsoidförmige Keime	280
5.5.3	Keimwachstum	280
5.5.3.1	KOSSEL-STRANSKI-Modell	281
5.5.3.2	Wachstumstypen	282
5.5.3.2.1	Feldorientierter Isolationstyp (FI-Typ)	283
5.5.3.2.2	Basisorientierter Reproduktionstyp (BR-Typ)	283
5.5.3.2.3	Feldorientierter Texturtyp (FT-Typ)	284
5.5.3.2.4	Unorientierter Dispersionstyp (UD-Typ)	285
5.5.3.2.5	Zwilligsübergangstyp (Z-Typ)	285
5.5.3.3	FRANK-Modell	286
5.5.4	Einflussparameter	289
5.5.4.1	Substrat	289
5.5.4.1.1	VOLMER-WEBER-Wachstumsmodell	290
5.5.4.1.2	FRANK-VAN-DER-MERWE-Wachstumsmodell	291
5.5.4.1.3	STRANSKI-KRASTANOV-Wachstumsmodell	291
5.5.4.2	Fremdatome	291
5.5.4.3	Stromdichte	292
5.6	Whisker	294
5.6.1	Whiskerbildung	294
5.6.2	Whiskerwachstum	296
5.6.2.1	Diffusionsgesteuertes Wachstum	297
5.6.2.2	Stressinduziertes Wachstums	298
5.6.2.3	Spiralförmiges Wachstum	298
5.6.3	Bedeutung	299
5.6.3.1	Zinn-Whisker	299
	Literaturverzeichnis	302
6	In-situ Beobachtung der Schichtenstehung	305
6.1	Einleitung	305

6.2	Rastersondenmikroskopie (SPM).....	305
6.2.1	Rastertunnelmikroskopie (STM)	308
6.2.1.1	Grundlagen, Verfahren.....	309
6.2.1.2	In-situ Rastertunnelmikroskopie.....	318
6.2.1.2.1	VOLMER-WEBER-Mechanismus	320
6.2.1.2.2	FRANK-VAN-DER-MERWE-Mechanismus.....	322
6.2.1.2.3	STRANSKI-KRASTANOV-Mechanismus	323
6.2.1.2.4	Einfluss von Elektrolytzusätzen	325
6.2.1.2.5	Oberflächentopographie.....	328
6.2.1.2.6	Wachstumsspiralen	332
6.2.2	Rasterkraftmikroskopie (RKM)	334
6.2.2.1	Grundlagen, Verfahren.....	334
6.2.2.2	In-situ Rasterkraftmikroskopie	340
6.2.2.2.1	Oberflächenvorbehandlung.....	341
6.2.2.2.2	Oberflächenaktivierung	342
6.2.2.2.3	Durchkontaktierung von Leiterplatten	345
6.2.2.2.4	Oberflächenmorphologie.....	346
	Literaturverzeichnis	350
7	Bestimmung der Haftfestigkeit metallischer Schichten	353
7.1	Einleitung	353
7.2	Metall/Metall-Haftung	354
7.2.1	Diffusionstheorie	354
7.3	Polymer/Metall-Haftung.....	362
7.3.1	„Druckknopf“-Theorie.....	363
7.3.2	Benetzungstheorie	366
7.3.3	Elektrostatische Theorie.....	366
7.4	Prüfmethoden	368
7.4.1	Qualitative Prüfverfahren	369
7.4.1.1	Biege-Test	370
7.4.1.2	Dornbiege-Test	370
7.4.1.3	Gitterschnitt-Test	370
7.4.1.4	Reib-Test	371
7.4.1.5	Feil-Test	371
7.4.1.6	Hammerschlag-Test	372
7.4.1.7	Tiefungs-Test	372
7.4.1.8	Elektrolytischer Test	373
7.4.1.9	Torsions-Test	374
7.3.1.10	Wickel-Test	374

7.4.2	Quantitative Prüfverfahren	375
7.4.2.1	Abschäl-Test	375
7.4.2.2	Kobaltkegel-Test	377
7.4.2.3	OLLARD-Test	378
7.4.2.4	Abzugversuch	379
7.4.2.5	Ritz-Test	381
7.4.3	Zerstörungsfreie Prüfverfahren	383
7.4.3.1	Thermoschock-Test	383
7.4.3.2	Ultraschall-Test	385
7.4.3.3	Schallemissions-Test	387
7.4.3.4	Ultraschallmikroskopie	389
	Literaturverzeichnis	391
8	Bestimmung der Dicke metallischer Schichten	393
8.1	Einleitung	393
8.2	Definitionen nach DIN EN ISO 2064	393
8.2.1	Wesentliche Fläche	393
8.2.2	Referenzfläche	393
8.2.3	Messstelle	394
8.2.4	Schichtdicke	394
8.2.5	Örtliche Schichtdicke	394
8.2.6	Kleinste örtliche Schichtdicke	394
8.2.7	Größte örtliche Schichtdicke	394
8.2.8	Mindestschichtdicke	394
8.2.9	Höchstschichtdicke	394
8.3	Theoretische Abschätzung	395
8.4	Experimentelle Bestimmung	400
8.4.1	Zerstörende Verfahren	402
8.4.1.1	Mikroskopische Verfahren	402
8.4.1.1.1	Querschliffverfahren	407
8.4.1.1.2	Schrägschliffverfahren	416
8.4.1.1.3	Einschliffverfahren	419
8.4.1.2	Coulometrisches Verfahren	423
8.4.1.2.1	STEP-Test	427
8.4.2	Zerstörungsfreie Verfahren	432
8.4.2.1	Wirbelstromverfahren	433
8.4.2.2	Röntgenfluoreszenz-Verfahren	440
8.4.2.2.1	Kontinuierliche Messung	446
8.4.2.2.2	Standardfreie Messung	448

8.4.3	In-situ-Verfahren	450
8.4.3.1	Inselmethode	450
8.4.3.2	Optipulse-Methode	454
8.4.3.2.1	Optimierungsmaßnahmen	455
8.4.3.2.2	Wirksame Pulsform	456
8.4.3.2.3	Zugabe von Additiven	457
8.4.3.2.4	Beeinflussung der Kupferqualität	458
8.4.3.2.5	Bestimmung der Schichtdicke	460
	Literaturverzeichnis	461
9	Bestimmung der Zusammensetzung metallischer Schichten	463
9.1	Einleitung	463
9.1.1	Auflösungsvermögen	468
9.1.2	Informationstiefe	469
9.1.3	Nachweisgrenze	472
9.1.4	Empfindlichkeit	472
9.2	Massenspektrometrische Methoden	472
9.2.1	Ionenstreuungs-Spektrometrie (ISS)	474
9.2.2	Sekundärionen-Massenspektrometrie (SIMS)	478
9.2.2.1	Stationäre Sekundärionen-Massenspektrometrie (SSIMS)	482
9.2.2.2	Dynamische Sekundärionen-Massenspektrometrie (DSIMS)	482
9.2.3	Sekundärneutralteilchen-Massenspektrometrie (SNMS)	485
9.2.3.1	Direkte Beschussmethode (DBM)	487
9.2.3.2	Separate Beschussmethode (SBM)	487
9.2.3.3	Externe Beschussmethode (EBM)	487
9.3	Elektronenspektroskopische Methoden	491
9.3.1	AUGER-Elektronenspektroskopie (AES)	493
9.3.1.1	Raster-AUGER-Mikroanalyse (SAM)	499
9.3.2	Elektronenspektroskopie für chemische Analyse (ESCA)	500
9.3.2.1	Ultraviolett-Photoelektronenspektroskopie (UPS)	501
9.3.2.2	RÖNTGEN-Photoelektronenspektroskopie (XPS)	502
9.4	Mikroanalyse	507
9.4.1	Energiedispersive Röntgenanalyse (EDX)	512
9.4.1.1	Qualitative EDX-Analyse	515
9.4.1.1.1	Punktanalyse	517
9.4.1.1.2	Linienanalyse	517
9.4.1.1.3	Elementsverteilungsbild	518
9.4.1.2	Quantitative EDX-Analyse	520
9.4.1.2.1	Ordnungszahl-Korrekturfaktor	521

9.4.1.2.2	Absorptions-Korrekturfaktor.	521
9.4.1.2.3	Fluoreszenz-Korrekturfaktor.	522
9.4.2	Wellenlängendispersive Röntgenanalyse (WDX)	523
9.4.2.1	BRAGGSches Reflexionsgesetz	524
9.4.2.2	WDX vs. EDX	529
9.5	Glimmentladungsspektroskopie (GDOES)	529
	Literaturverzeichnis	537
10	Darstellung der Gitterstruktur metallischer Schichten	543
10.1	Einleitung	543
10.2	Raumgitter	544
10.3	Gittertypen von Metallschichten	545
10.3.1	Kubisches Gitter	545
10.3.1.1	Kubisch-primitiv	546
10.3.1.2	Kubisch-raumzentriert	548
10.3.1.3	Kubisch-flächenzentriert	551
10.3.1.3.1	Diamantgitter	554
10.3.2	Hexagonales Gitter	555
10.3.2.1	Hexagonal-primitiv	555
10.3.2.2	Hexagonal dichtester Packung	556
10.3.3	Tetragonales Gitter	562
10.4	Indizierung von Gitterebenen und Richtungen	564
10.4.1	MILLERSche Indizierung	564
10.4.2	MILLER-BRAVAIS-Indizierung	570
10.5	Gleitsysteme	575
10.5.1	Kubisch-raumzentriertes Gitter	576
10.5.2	Kubisch-flächenzentriertes Gitter	577
10.5.3	Hexagonales Gitter	579
10.6	Gittertypen von Legierungsschichten	582
10.6.1	Austauschmischkristalle	582
10.6.2	Einlagerungsmischkristalle	584
10.6.2.1	Gitterlücken	585
10.6.2.1.1	Tetraederlücken	585
10.6.2.1.2	Oktaederlücken	586
	Literaturverzeichnis	588
11	Bestimmung der Eigenspannungen metallischer Schichten	589
11.1	Einleitung	589
11.1.1	Chemische Fehlordnungen	589

11.1.2	Strukturelle Fehlorderungen	590
11.2	Arten von Eigenspannungen	592
11.2.1	Eigenspannungen 1. Art.....	592
11.2.1.1	Eigendruckspannung	593
11.2.1.2	Eigenzugspannung	593
11.2.2	Eigenspannungen 2. Art	594
11.2.3	Eigenspannungen 3. Art	595
11.3	Epitaxie-Effekte.....	597
11.4	Messverfahren	597
11.4.1	Zweistreifen-Methode	598
11.4.2	Spiralkontraktometer	600
11.4.3	Disk-Tensometer	603
11.4.4	IS-Meter TM	606
11.4.5	In-situ-Messsystem MSM 200	608
11.4.6	Röntgenographische Bestimmung	609
11.4.6.1	$\sin^2 \psi$ -Verfahren.....	611
11.5	Reduzierung/Beseitigung	613
11.5.1	Thermische Nachbehandlung.....	613
11.5.2	Optimierung der Zusammensetzung	615
	Literaturverzeichnis	616
12	Bestimmung der mechanischen Eigenschaften metallischer Schichten	619
12.1	Einleitung.....	619
12.2	Elastisches Verhalten	619
12.2.1	Normalbeanspruchung.....	620
12.2.1.1	Spannungs-Dehnungs-Diagramm.....	621
12.2.2	Scherbeanspruchung.....	622
12.2.2.1	Zusammenhang zwischen Schub- und Zugspannung.....	625
12.3	Plastisches Verhalten	626
12.3.1	Mechanismus.....	628
12.3.2	HALL-PETCH-Beziehung	631
12.3.3	Duktilität.....	632
12.3.3.1	Messmethoden	632
12.3.3.1.1	Biegeversuch.....	633
12.3.3.1.2	Dornbiegetest	634
12.3.3.1.3	Tiefungsversuch	634
12.3.3.1.4	Mikrodornmethode	635
12.3.3.1.5	Hydraulischer Wölbungstest.....	637
12.3.3.1.6	Der Zugversuch.....	640

12.4	Mikrohärte	642
12.4.1	Messmethoden	643
12.4.1.1	VICKERS-Verfahren	643
12.4.1.2	KNOOP-Verfahren	646
12.4.1.3	Instrumentierte Eindringprüfung	648
12.4.1.3.1	MARTENS-Härte	652
12.4.1.3.2	Eindringhärte	654
12.4.1.3.3	Eindringmodul	654
12.4.1.3.4	Verformungsarbeit	655
	Literaturverzeichnis	656
13	Untersuchung des Verschleißverhaltens metallischer Schichten	659
13.1	Einleitung	659
13.2	Reibung	659
13.2.1	Reibungszahl	661
13.2.2	Reibungszustände	663
13.2.2.1	Festkörperreibung	663
13.2.2.2	Flüssigkeitsreibung	663
13.2.2.3	Grenzreibung	663
13.2.2.4	Mischreibung	664
13.2.2.5	Gasreibung	664
13.2.2.6	STRIECK-Kurve	664
13.1.3	Maßnahmen zur Reibungsverminderung	666
13.3	Verschleiß	667
13.3.1	Verschleißbetrag	668
13.3.1.1	Verschleiß-Messgrößen	668
13.3.2	Verschleißmechanismen	669
13.3.2.1	Adhäsion	670
13.3.2.2	Abrasion	672
13.3.2.3	Tribooxidation	674
13.3.2.4	Oberflächenzerrüttung	675
13.3.3	Verschleißprüfung	676
13.3.3.1	Modellversuche	677
13.3.3.1.1	Falex-Tester	677
13.3.3.1.2	TABER-Abraser	678
13.3.3.1.3	Gekreuzte Zylinder	679
13.3.3.1.4	Stift-Scheibe-Tribometer	680
13.3.3.1.5	TOG-Prüfstand	682
	Literaturverzeichnis	684

14	Bestimmung der physikalischen Eigenschaften metallischer Schichten	685
14.1	Einleitung	685
14.2	Schmelzpunkt	685
14.3	Dichte	686
14.3.1	Bestimmung durch Wägung	687
14.3.2	Bestimmung mit Pyknometer	687
14.3.3	Bestimmung mit hydrostatischer Waage	688
14.4	Reflexionsvermögen	690
14.5	Elektrische Eigenschaften	695
14.5.1	Spezifischer elektrischer Widerstand	695
14.5.2	Spezifische elektrische Leitfähigkeit	697
14.5.3	Kontaktwiderstand	698
14.6	Thermische Leitfähigkeit	698
14.6.1	Thermischer Ausdehnungskoeffizient	700
14.7	Magnetische Eigenschaften	701
14.7.1	Magnetisierung	702
14.7.2	CURIE-Temperatur	704
14.8	Benetzbarkeit	705
14.8.1	Oberflächenenergie	706
14.8.2.1	YOUNGSche Gleichung	707
14.8.2.1.1	Bestimmung des Benetzungswinkels	710
14.8.2	Lötbarkeit	711
14.8.2.1	Prüfmethoden	713
14.8.2.1.1	Benetzungswaage	714
14.8.3	Schweißbarkeit	716
14.8.4	Bondbarkeit	718
	Literaturverzeichnis	721
15	Einfluss metallischer Schichten auf Bauteileigenschaften	723
15.1	Einleitung	723
15.2	Wasserstoffversprödung	724
15.2.1	Mechanismus	727
15.3	Dauerwechselfestigkeit	732
15.3.1	WÖHLER-Kurve	734
15.4	Porigkeit	736
15.4.1	Nachweismethoden	739
15.4.1.1	Ferroxyl-Test	739
15.4.1.2	Salzsprühtest	739

15.4.1.3	KESTERNICH-Test	741
15.4.1.4	Acrylamid-Gel-Test	742
	Literaturverzeichnis	744
	Stichwortverzeichnis	745