

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort zur ersten Auflage .....	V
Vorwort zur zweiten Auflage .....	IX
Akronyme .....	XXVII
Formelzeichen, Symbole, Konstanten .....	XXXV
1 <b>Galvanotechnik – eine Schlüsseltechnologie?</b> .....	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

## **XII**      *Inhaltsverzeichnis*

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
<b>2</b>	<b>Galvanisierbare Werkstoffe.....</b>	<b>33</b>
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
<b>3</b>	<b>Elektrolyte zur Abscheidung metallischer Schichten .....</b>	<b>109</b>
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
<b>4</b>	<b>Verfahren zur Abscheidung metallischer Schichten.....</b>	<b>171</b>
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
4.2.1.3.2	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
<b>5</b>	<b>Atomistische Deutung der Schichtentstehung .....</b>	<b>241</b>
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-STRAUSKI-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	Zwillingsübergangstyp (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	STRAUSKI-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
<b>6</b>	<b>In-situ Beobachtung der Schichtentstehung .....</b>	<b>305</b>
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
<b>7</b>	<b>Bestimmung der Haftfestigkeit metallischer Schichten .....</b>	<b>353</b>
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
<b>8</b>	<b>Bestimmung der Dicke metallischer Schichten .....</b>	<b>393</b>
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
<b>9</b>	<b>Bestimmung der Zusammensetzung metallischer Schichten .....</b>	<b>463</b>
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
<b>10</b>	<b>Darstellung der Gitterstruktur metallischer Schichten .....</b>	<b>543</b>
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	Oктаederlücken .....	586
	Literaturverzeichnis .....	588
<b>11</b>	<b>Bestimmung der Eigenspannungen metallischer Schichten .....</b>	<b>589</b>
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 <sup>TM</sup> .....	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
<b>12</b>	<b>Bestimmung der mechanischen Eigenschaften metallischer Schichten</b> .....	<b>619</b>
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
<b>13</b>	<b>Untersuchung des Verschleißverhaltens metallischer Schichten</b> ....	<b>659</b>
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

<b>14</b>	<b>Bestimmung der physikalischen Eigenschaften metallischer Schichten</b> .....	<b>685</b>
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
<b>15</b>	<b>Einfluss metallischer Schichten auf Bauteileigenschaften</b> .....	<b>723</b>
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
	<b>Stichwortverzeichnis</b> .....	745