

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	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
2.2.2.1.2	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 Schichtentstehung	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 Fehlorderungen.....	609
11.1.2	Strukturelle Fehlorderungen.....	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™.....	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