

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