

Nasser Kanani

Galvanotechnik

Grundlagen, Verfahren und Praxis
einer Schlüsseltechnologie

2., überarbeitete und erweiterte Auflage

HANSER

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	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
2.2.2.1.1	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 Schichtentstehung	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	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	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 Wachstum	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

XVIII *Inhaltsverzeichnis*

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	Elektrostatistische 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	OixARD-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
4.8.1.2.1	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	Oктаederlücken	586
	Literaturverzeichnis	588
11	Bestimmung der Eigenspannungen metallischer Schichten	589
11.1	Einleitung	589
11.1.1	Chemische Fehlordnungen	589

11.1.2	Strukturelle Fehlordnungen	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™	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	STRIBECK-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