

# Inhalt

<b>Formelzeichen</b> . . . . .	1
<b>1. Anwendungen und zukünftige Entwicklungen der Vakuumbeschichtungs- technik</b> . . . . .	5
<b>2. Bedeutung der Vakuumtechnik für die Beschichtungstechnik</b> . . . . .	7
2.1. Vorbemerkungen . . . . .	7
2.2. Einfluß der Restgase auf die Schichtreinheit . . . . .	8
2.3. Vakuumerzeugung . . . . .	10
2.4. Vakuummessung . . . . .	12
2.4.1. Wärmeleitungsvakuummeter . . . . .	12
2.4.2. Reibungsvakuummeter . . . . .	12
2.4.3. Kaltkathoden-Ionisationsvakuummeter . . . . .	13
2.4.4. Ionisations-Vakuummeter mit Glühkathode . . . . .	13
2.4.5. Totaldruckmessung bei Beschichtungsprozessen . . . . .	13
2.4.5.1. Konventionelle Katodenerstäubung . . . . .	13
2.4.5.2. Reaktive Katodenerstäubung . . . . .	14
2.4.5.3. Konventionelles Aufdampfen . . . . .	14
2.4.5.4. Reaktives Aufdampfen . . . . .	14
2.4.6. Partialdruckmessung . . . . .	14
<b>3. Aufdampfen im Hochvakuum</b> . . . . .	16
3.1. Vorbemerkungen . . . . .	16
3.2. Physikalische Grundlagen . . . . .	17
3.2.1. Verdampfungsprozeß . . . . .	17
3.2.2. Transportphase . . . . .	19
3.2.3. Kondensationsphase . . . . .	21
3.3. Verdampfungsquellen . . . . .	22
3.3.1. Allgemeines . . . . .	22
3.3.2. Widerstandsbeheizte Verdampfungsquellen . . . . .	23
3.3.3. Elektronenstrahlverdampfer . . . . .	27
3.3.3.1. Überblick . . . . .	27
3.3.3.2. Pierce-Kanonen . . . . .	28
3.3.3.3. Einbaukanonen . . . . .	29
3.3.3.4. Zum Betrieb von Elektronenstrahlkanonen . . . . .	30

3.3.3.5. Tiegel und Strahlführung . . . . .	31
3.3.3.6. Ratenregelung . . . . .	33
3.3.3.7. Automatisierung . . . . .	35
3.3.4. Sonstige Verdampfungsquellen . . . . .	35
3.4. Verdampfen von verschiedenen Materialien . . . . .	36
3.4.1. Verdampfen von Metallen . . . . .	36
3.4.2. Verdampfen von Legierungen . . . . .	36
3.4.2.1. Vorbemerkungen . . . . .	36
3.4.2.2. Flash-Verdampfung . . . . .	36
3.4.2.3. Simultanverdampfung . . . . .	36
3.4.2.4. Springstrahlverfahren . . . . .	37
3.4.2.5. Eintiegelverfahren . . . . .	38
3.4.3. Verdampfen von chemischen Verbindungen . . . . .	41
3.4.3.1. Vorbemerkungen . . . . .	41
3.4.3.2. Verdampfen bei gleicher Zusammensetzung von Beschichtungsgut und gewünschter Schicht . . . . .	41
3.4.3.3. Reaktives Aufdampfen . . . . .	42
<b>4. Plasmatechnologie . . . . .</b>	<b>43</b>
4.1. Einführung . . . . .	43
4.2. Quasineutralität . . . . .	43
4.3. Charakteristische Kenngrößen . . . . .	44
4.3.1. Langmuirsche Plasmafrequenz . . . . .	44
4.3.2. Debyesche Abschirmlänge . . . . .	45
4.3.3. Landau-Länge, Plasmaparameter . . . . .	47
4.4. Bewegung geladener Teilchen in elektromagnetischen Feldern . . . . .	48
4.4.1. Maxwellsche Gleichungen . . . . .	48
4.4.2. Bewegungsgleichung und Energiesatz . . . . .	50
4.4.3. Larmor-Bewegung . . . . .	51
4.5. Stoßbestimmte Plasmen . . . . .	53
4.5.1. Geschwindigkeitsverteilung . . . . .	53
4.5.2. Mittlere freie Weglänge, Stoßfrequenzen . . . . .	56
4.5.3. Driftbewegung von Ladungsträgern in einem elektrischen Feld unter Berücksichtigung von Stößen . . . . .	57
4.5.4. Ionisation und Rekombination . . . . .	60
4.5.4.1. Ionisationsprozesse . . . . .	64
4.5.4.1.1. Ionisierung durch Elektronenstöße . . . . .	64
4.5.4.1.2. Ionisierung durch Ion- oder Atomstöße . . . . .	65
4.5.4.1.3. Strahlungsinduzierte Ionisation . . . . .	65
4.5.4.1.4. Ionisation durch Stöße zweiter Art . . . . .	65
4.5.4.1.5. Kumulative Ionisation . . . . .	65
4.5.4.1.6. Ionisierung durch elektrische Felder . . . . .	65
4.5.4.1.7. Oberflächenionisierung . . . . .	66
4.5.4.2. Neutralisationsprozesse . . . . .	66

4.5.5. Das Plasma als Kontinuum . . . . .	67
4.5.5.1. Thermodynamische Grundgleichungen . . . . .	67
4.5.5.2. Saha-Gleichung . . . . .	70
4.5.5.3. Massenerhaltungsgesetz . . . . .	73
4.5.5.4. Impulserhaltung . . . . .	74
4.5.5.5. Ableitung des Ohmschen Gesetzes . . . . .	76
4.5.5.5.1. Vollständig ionisiertes Plasma . . . . .	76
4.5.5.5.2. Teilweise ionisiertes Plasma . . . . .	80
4.5.5.6. Der Energiesatz für ein Plasma . . . . .	81
4.5.6. Transportvorgänge . . . . .	83
4.6. Entladungsarten . . . . .	88
4.6.1. Gleichstromentladungen . . . . .	88
4.6.1.1. Unselbständige Gasentladungen . . . . .	88
4.6.1.2. Selbständige Gasentladung . . . . .	89
4.6.1.2.1. Energieverteilung der Gasionen in anomalen Glimmentladungen . . . . .	92
4.6.1.2.2. Hohlkatodenentladung . . . . .	94
4.6.2. Hochfrequenzentladung . . . . .	96
4.7. Katodenzerstäubung . . . . .	100
4.7.1. Einleitung . . . . .	100
4.7.2. Zerstäubungsausbeute . . . . .	101
4.7.3. Zerstäubungsmechanismus . . . . .	104
4.7.3.1. Zerstäubungstheorie . . . . .	104
4.7.3.2. Spikes und thermische Spikes . . . . .	106
4.7.4. Zerstäubung polyatomarer Materialien . . . . .	107
4.7.5. Zerstäubungsmethoden . . . . .	108
4.7.5.1. Konventionelle Zerstäubungsmethoden . . . . .	108
4.7.5.1.1. DC-Diodenzerstäubung . . . . .	109
4.7.5.1.2. Triodenzerstäubung . . . . .	112
4.7.5.1.3. HF-Zerstäubung . . . . .	113
4.7.5.1.4. Bias-Zerstäubung . . . . .	119
4.7.5.1.5. Reaktives Zerstäuben . . . . .	120
4.7.5.2. Hochleistungskatodenzerstäubung durch Magnetronspütern . . . . .	122
4.7.5.2.1. Prinzip der Magnetronkatode . . . . .	122
4.7.5.2.2. Zerstäubungscharakteristika . . . . .	123
4.8. Ionenplattieren . . . . .	133
4.8.1. Einleitung . . . . .	133
4.8.2. Energetische Aktivierung der Schicht . . . . .	134
4.8.3. Verfahrenstechnik . . . . .	137
4.8.4. Anlagentechnik . . . . .	143
4.8.5. Entwicklungsstand . . . . .	147
4.9. Plasmabehandlungsmethoden . . . . .	150
4.9.1. Plasmapolymerisation . . . . .	150
4.9.1.1. Einleitung . . . . .	150
4.9.1.2. Physik und Chemie der Plasmapolymerisation . . . . .	151
4.9.2. Plasmahärten (Glimmnitrieren) . . . . .	156
4.9.2.1. Einleitung . . . . .	156

4.9.2.2. Elementarprozesse beim Plasmahärten . . . . .	156
4.9.3. Trockenätzen oder plasmaunterstütztes Ätzen . . . . .	158
4.9.3.1. Einleitung . . . . .	158
4.9.3.2. Physikalisches Ätzen . . . . .	161
4.9.3.3. Chemisches Ätzen . . . . .	162
4.9.3.4. Chemisch-physikalisches Ätzen . . . . .	163
4.9.3.5. Trockenätzreaktorsysteme . . . . .	163
4.9.3.6. Bedeutung des selektiven und anisotropen Ätzprozesses in der Halbleitertechnologie . . . . .	168
4.9.3.7. Photonenunterstütztes chemisches Ätzen . . . . .	174
<b>5. Einfluß von Beschichtungsparametern auf die Gefügestruktur dünner Schichten . . . . .</b>	<b>176</b>
5.1. Vorbemerkungen . . . . .	176
5.2. Dreizonenmodell nach Movchan und Demchishin . . . . .	177
5.3. Strukturmodell für aufgestäubte Schichten nach Thornton . . . . .	178
<b>6. Chemical-Vapour-Deposition (CVD) . . . . .</b>	<b>183</b>
6.1. Einleitung . . . . .	183
6.2. Physikalisch-chemische Grundlagen . . . . .	183
6.2.1. Allgemeines . . . . .	183
6.2.2. Transport der Reaktionspartner zur Reaktionszone an der Substrat- oberfläche . . . . .	184
6.2.3. Reaktionsprozeß auf der Substratoberfläche . . . . .	185
6.2.4. Keimbildung und Schichtwachstum . . . . .	188
6.3. Anlagenkonzepte . . . . .	191
6.3.1. Diskontinuierlich arbeitender Kaltwand-Reaktor (Cold-Wall-Batch-Reactor) . . . . .	191
6.3.1.1. Prinzipieller Aufbau . . . . .	191
6.3.1.2. Kontaminationskontrolle . . . . .	193
6.3.1.3. Anwendungsgebiete . . . . .	194
6.3.1.4. Vor- und Nachteile der Trommel-CVD-Systeme . . . . .	194
6.3.2. Automatische, kontinuierliche CVD-Anlagen . . . . .	195
6.3.2.1. Prinzipieller Aufbau . . . . .	195
6.3.2.2. Konzept einer kontinuierlich arbeitenden CVD-Anlage . . . . .	198
6.3.2.3. Kontamination . . . . .	199
6.3.2.4. Qualitätsverbesserung der Schichteigenschaften durch die Einfüh- rung kontinuierlich arbeitender CVD-Anlagen . . . . .	200
6.3.3. Niederdruck-CVD-Systeme (LP-CVD) . . . . .	202
6.3.3.1. Prinzipieller Aufbau . . . . .	202
6.3.3.2. Schichtparameter . . . . .	203
6.3.3.3. Kontamination . . . . .	205
6.3.4. Plasmaunterstützte CVD-Prozesse (PE-CVD) . . . . .	205

<b>7.</b>	<b>Ionenstrahlbeschichtung</b>	207
7.1.	Einleitung	207
7.2.	Bestrahlung eines Festkörpers mit Ionen	207
	7.2.1. Elementarprozesse	207
	7.2.2. Ionenstrahltechniken	209
7.3.	Erzeugen eines Ionenstrahls	210
	7.3.1. Anforderungen an den Ionenstrahl	210
	7.3.2. Auswahl des Systems zur Erzeugung eines Ionenstrahls	211
	7.3.3. Systemkomponenten	213
	7.3.3.1. Übersicht	213
	7.3.3.2. Kaufman-Quelle	215
	7.3.3.3. Freeman-Ionenquelle	218
7.4.	Beschichten mit Ionenstrahlen	218
	7.4.1. Einfluß von Energie und Ladung der Ionen auf die Schichtbildung	218
	7.4.2. Primäre und sekundäre Ionenstrahlbeschichtung	220
	7.4.3. Anwendungsbeispiele für die Ionenstrahlbeschichtung	222
	7.4.4. Vergleich mit anderen Beschichtungsverfahren	225
	7.4.5. Trends	228
	7.4.6. Durchsatzanforderungen der Massenproduktion	230
<b>8.</b>	<b>Meßtechnik</b>	233
8.1.	Extra-Situm-Verfahren	233
	8.1.1. Optische Untersuchung mikrogeometrischer Eigenschaften	233
	8.1.1.1. Mikroskopische Methoden	233
	8.1.1.1.1. Eigenschaften und Kenngrößen des Mikroskops	233
	8.1.1.1.2. Linienbreitenmessung	237
	8.1.1.1.3. Rechnerunterstützte Auswertung von Mikroskopbildern	242
	8.1.1.1.4. Rastermikroskopie	242
	8.1.1.2. Interferometrisches Messen von Schichtdicken und Stufenhöhen	244
	8.1.1.2.1. Schichtdickenmessung	245
	8.1.1.2.2. Stufenhöhenmessung	246
	8.1.2. Rauheit von Festkörperoberflächen	248
	8.1.2.1. Begriffe und Definitionen	248
	8.1.2.2. Meßgeräte und Meßmethoden	250
	8.1.2.2.1. Mechanische Messung (Stylus-Methode)	250
	8.1.2.2.2. Lichtschnittverfahren	250
	8.1.2.2.3. Glanzmeßmethode	250
	8.1.2.2.4. Interferentielle Meßmethode	252
	8.1.2.2.5. Bestimmung von Rauheitskennwerten durch Speckle-Kontrast-Verfahren	252
	8.1.2.2.6. Oberflächenprüfung durch Streulicht	255
	8.1.2.2.7. Messung der Rauheit durch Elektronenstrahlinterferenzen	256
	8.1.2.2.8. Rastertunnelmikroskop	256
	8.1.2.2.9. Ellipsometrische Rauheitsmessung	256
	8.1.3. Ellipsometrie	257

8.1.3.1. Grundlagen . . . . .	257
8.1.3.2. Meßgeräte und Meßtechnik . . . . .	258
8.1.4. Untersuchungsmethoden physikalischer Eigenschaften . . . . .	261
8.1.4.1. Messung der thermischen Leitfähigkeit . . . . .	261
8.1.4.1.1. Allgemeines . . . . .	261
8.1.4.1.2. Experimentelle Bestimmung . . . . .	261
8.1.4.2. Elektrische Leitfähigkeit . . . . .	262
8.1.4.2.1. Definition . . . . .	262
8.1.4.2.2. Bestimmungsmethoden . . . . .	262
8.1.4.3. Photoleitfähigkeit . . . . .	263
8.1.4.4. Farbmetrik . . . . .	268
8.1.4.4.1. Einleitung . . . . .	268
8.1.4.4.2. Farbmessung . . . . .	270
8.1.4.4.3. Farbmeßgeräte . . . . .	273
8.1.4.5. Messung von Transmission, Reflexion, Absorption und Streuung . . . . .	274
8.1.4.5.1. Allgemeines . . . . .	274
8.1.4.5.2. Messung der Transmission . . . . .	274
8.1.4.5.3. Messung der Reflexion . . . . .	282
8.1.4.5.4. Messung des gestreuten Lichtes . . . . .	283
8.1.4.5.5. Messung der Absorption . . . . .	284
8.1.4.6. Messung des Kontaktwiderstandes . . . . .	286
8.1.4.6.1. Allgemeines . . . . .	286
8.1.4.6.2. Bestimmungsmethoden . . . . .	286
8.1.4.7. Permeation . . . . .	286
8.1.4.7.1. Allgemeines . . . . .	286
8.1.4.7.2. Meßprinzipien . . . . .	287
8.1.4.7.3. Gerätebeschreibungen . . . . .	290
8.1.5. Untersuchung mechanisch-technologischer Eigenschaften . . . . .	293
8.1.5.1. Mechanische Spannungen in dünnen Schichten . . . . .	293
8.1.5.1.1. Allgemeines . . . . .	293
8.1.5.1.2. Meßmethoden . . . . .	295
8.1.5.2. Härtemessung . . . . .	297
8.1.5.2.1. Allgemeines . . . . .	297
8.1.5.2.2. Einflüsse von Meßbedingungen auf die Härtewerte . . . . .	298
8.1.5.2.3. Prüfgeräte und ihre Anwendung . . . . .	299
8.1.5.3. Haftfestigkeit . . . . .	302
8.1.5.3.1. Allgemeines . . . . .	302
8.1.5.3.2. Meßmethoden und Meßgeräte . . . . .	303
8.1.5.4. Messung der Duktilität von Beschichtungen . . . . .	307
8.1.5.4.1. Definitionen . . . . .	307
8.1.5.4.2. Bestimmungsmethoden . . . . .	307
8.1.5.5. Messung von Pinholedichten . . . . .	308
8.1.5.5.1. Allgemeines . . . . .	308
8.1.5.5.2. Meßmethoden . . . . .	308
8.1.5.6. Schichtdickenmessung mit nichtoptischen Methoden . . . . .	310
8.1.5.6.1. Allgemeines . . . . .	310
8.1.5.6.2. Direkte Bestimmungsmethoden . . . . .	310
8.1.5.6.3. Indirekte Bestimmungsmethoden . . . . .	312
8.1.5.7. Korrosionsprüfung . . . . .	312
8.1.6. Moderne Verfahren der Oberflächen- und Dünnschichtanalyse . . . . .	314

8.1.6.1. Physikalische Grundlagen moderner Methoden der Oberflächenanalyse . . . . .	314
8.1.6.1.1. Einleitung . . . . .	314
8.1.6.1.2. Ionenspektroskopien . . . . .	315
8.1.6.1.3. Elektronenspektroskopien . . . . .	328
8.1.6.2. Anwendungen . . . . .	339
8.1.6.2.1. Einleitung . . . . .	339
8.1.6.2.2. Dünnfilm- und Oberflächencharakterisierung . . . . .	340
8.1.6.2.3. Oberflächen-, Dünnfilm- und Volumenanalyse . . . . .	343
8.1.6.2.4. Kombination mehrerer Analysemethoden . . . . .	371
8.1.6.2.5. Charakterisierung von Silizidschichten . . . . .	374
8.1.6.3. Laser-Mikrosonden-Massenanalyse (LAMMA) . . . . .	380
8.1.6.3.1. Einleitung . . . . .	380
8.1.6.3.2. Physikalische Grundlagen der laser-induzierten Massenspektrometrie . . . . .	380
8.1.6.3.3. Gerätetechnisches Konzept der Lasermikrosonde . . . . .	383
8.1.6.3.4. Methoden zur Quantifizierung . . . . .	384
8.1.6.3.5. Experimentelle Ergebnisse anhand typischer Anwendungsbeispiele . . . . .	385
<b>8.2. In-Situ-Meßverfahren . . . . .</b>	<b>388</b>
8.2.1. Einleitung . . . . .	388
8.2.2. Ratenmessung mittels Ionisierung . . . . .	389
8.2.3. Ratenmessung durch Elektroneninduzierte Emissionsspektroskopie (EIES) . . . . .	390
8.2.4. Ratenmessung mit Atomabsorptionsspektroskopie (AA) . . . . .	391
8.2.5. Optische Prozeßmeßverfahren . . . . .	391
8.2.5.1. Einleitung . . . . .	391
8.2.5.2. Apparativer Aufbau . . . . .	392
8.2.5.2.1. Allgemeines . . . . .	392
8.2.5.2.2. Photometer . . . . .	393
8.2.5.2.3. Spektralphotometer . . . . .	394
8.2.5.2.4. Ellipsometer . . . . .	394
8.2.5.3. Darstellung und Auswertung des Meßsignals . . . . .	395
8.2.5.4. Theoretische Berechnung der optischen Eigenschaften dünner Schichten . . . . .	399
8.2.6. Schwingquarzmeßsystem . . . . .	400
<b>9. Anwendungen dünner Schichten . . . . .</b>	<b>403</b>
9.1. Elektrische Widerstandsschichten . . . . .	403
9.1.1. Einleitung . . . . .	403
9.1.2. NiCr-Widerstandsschichten . . . . .	405
9.2. Elektronik/Optoelektronik . . . . .	410
9.2.1. Einleitung . . . . .	410
9.2.2. Grundlagen aus der Halbleiterphysik . . . . .	411
9.2.2.1. Direkte und indirekte Halbleiter . . . . .	411
9.2.2.2. Homo- und Heteroübergänge . . . . .	412
9.2.2.3. Generations- und Rekombinationsprozesse in Halbleitern . . . . .	418

9.2.2.4. Beweglichkeit freier Ladungsträger im Halbleiter . . . . .	421
9.2.2.5. Mikrostruktureffekte . . . . .	421
9.2.2.6. Übergitter . . . . .	423
9.2.3. Materialien . . . . .	425
9.2.3.1. III-V-Verbindungshalbleiter . . . . .	425
9.2.3.2. Photovoltaische Materialien . . . . .	430
9.2.4. Technologien . . . . .	433
9.2.4.1. Technologie des Siziliums . . . . .	433
9.2.4.2. Technologie der Verbindungshalbleiter . . . . .	436
9.2.5. Bauelemente . . . . .	437
9.2.5.1. Lumineszenzdioden . . . . .	438
9.2.5.2. Halbleiterlaser . . . . .	440
9.2.5.3. Photodetektoren . . . . .	446
9.2.5.4. Solarzellen . . . . .	450
9.3. Dünne Schichten für die Optik . . . . .	455
9.3.1. Grundlegendes über die Interferenz bei Einfach- und Mehrfach- schichten . . . . .	455
9.3.1.1. Einführung . . . . .	455
9.3.1.2. Reflexionsmindernde Schichten . . . . .	456
9.3.1.2.1. Änderung der Reflexion eines absorptionsfreien Substrates durch Aufbringen einer dünnen Schicht . . . . .	456
9.3.1.2.2. Änderung der Reflexion eines absorptionsfreien Substrates durch eine Doppelschicht . . . . .	460
9.3.1.2.3. Änderung der Reflexion durch Dreifach-Schichten . . . . .	463
9.3.1.3. Vielschichtsysteme mit reflexionserhöhender Wirkung . . . . .	466
9.3.2. Einige wichtige Anwendungen dünner Schichten in der Optik . . . . .	467
9.3.2.1. Reflexionsmindernde Schichten und Sonnenschutzschichten . . . . .	467
9.3.2.1.1. Allgemeines . . . . .	467
9.3.2.1.2. Sonnenschutzfilter . . . . .	468
9.3.2.1.3. Reflexionsmindernde Schichten auf Brillengläsern und Linsen . . . . .	471
9.3.2.2. Hochreflektierende Schichten und Filterschichten . . . . .	475
9.3.2.2.1. Allgemeines . . . . .	475
9.3.2.2.2. Hochreflektierende metallische Spiegel . . . . .	475
9.3.2.2.3. Vielschichtsysteme aus dielektrischen Schichten . . . . .	477
9.3.3. Prüfung dünner Schichten für die Optik . . . . .	484
9.3.4. Aufbau und Betrieb von Anlagen zum Herstellen dünner Schichten für die Optik . . . . .	488
9.3.4.1. Allgemeines zur Verfahrenstechnik zum Herstellen dünner, optisch wirksamer Schichten . . . . .	488
9.3.4.2. Vergleichende Betrachtungen über Aufdampfen im Hochvakuum und Katodenzerstäubung . . . . .	489
9.3.4.3. Aufdampfanlagen und Zubehör . . . . .	494
9.3.4.3.1. Allgemeines . . . . .	494
9.3.4.3.2. Vakuumausrüstung . . . . .	494
9.3.4.3.3. Verdampfungsquellen und Substrathalter . . . . .	497
9.3.4.3.4. Substratheizung . . . . .	497
9.3.4.3.5. Glimmeinrichtung . . . . .	498
9.3.4.3.6. Testglaswechsler . . . . .	499
9.3.4.3.7. Blenden . . . . .	500

9.3.4.3.8.	Weiteres Zubehör zu Aufdampfanlagen . . . . .	500
9.3.4.3.9.	Schichtdickengleichmäßigkeit . . . . .	502
9.3.4.4.	Katodenzerstäubungsanlagen für die Herstellung optisch wirk- samer Schichten . . . . .	509
9.4.	Energieeinsparung durch beschichtetes Architekturglas . . . . .	511
9.4.1.	Allgemeines . . . . .	511
9.4.2.	Optische Eigenschaften von Fensterglas . . . . .	512
9.4.3.	Wärmedämmschichten . . . . .	513
9.4.3.1.	Grundsätzliches . . . . .	513
9.4.3.2.	Unbeschichtete Einfachverglasungen . . . . .	514
9.4.3.3.	Unbeschichtete Doppelverglasungen (Isolierglas) . . . . .	514
9.4.3.4.	Beschichtete Doppelverglasungen (Isolierglas) . . . . .	515
9.4.3.5.	Leistungsbilanz bei Isolierglas . . . . .	515
9.4.4.	Sonnenschutzschichten . . . . .	516
9.4.4.1.	Grundsätzliches . . . . .	516
9.4.4.2.	Beispiele . . . . .	517
9.4.5.	Schichtsysteme und Schichteigenschaften . . . . .	518
9.4.5.1.	Allgemeines . . . . .	518
9.4.5.2.	Wärmedämmschichten ohne wesentliche Sonnenschutzwirkung . . . . .	519
9.4.5.2.1.	Einfachschichten . . . . .	519
9.4.5.2.2.	Schichtsysteme . . . . .	520
9.4.5.3.	Schichten mit Wärmedämm- und Sonnenschutzwirkung . . . . .	521
9.4.5.4.	Sonnenschutzschichten ohne wesentliche Wärmedämmwirkung . . . . .	522
9.4.6.	Beschichtungstechnologien . . . . .	523
9.4.6.1.	Chemische Beschichtungsverfahren . . . . .	523
9.4.6.2.	Beschichten durch Aufdampfen im Hochvakuum . . . . .	523
9.4.6.3.	Beschichten durch Katodenzerstäubung . . . . .	525
9.4.6.3.1.	Allgemeines . . . . .	525
9.4.6.3.2.	Einkammeranlagen . . . . .	525
9.4.6.3.3.	Zweikammeranlagen . . . . .	527
9.4.6.3.4.	Mehrkammerdurchlaufanlagen . . . . .	527
9.4.7.	Zusammenfassende Bemerkungen . . . . .	530
9.5.	Tribologie . . . . .	531
9.5.1.	Allgemeines . . . . .	531
9.5.2.	Verschleißmechanismen . . . . .	532
9.5.3.	Verschleißprüfung durch direkte und indirekte Meßmethoden . . . . .	533
9.5.4.	Verschleißminderung durch Oberflächenbeschichtung . . . . .	534
9.5.5.	Bevorzugte Beschichtungsmethoden für tribologisch beanspruchte Schichten . . . . .	540
9.5.5.1.	Allgemeines . . . . .	540
9.5.5.2.	CVD-Verfahren . . . . .	540
9.5.5.3.	PVD-Verfahren . . . . .	543
9.5.6.	Anwendungen . . . . .	546
9.5.6.1.	Dekorative abriebfeste Schichten . . . . .	546
9.5.6.2.	Verschleißminderung bei Werkzeugen . . . . .	549
9.5.6.2.1.	Allgemeines . . . . .	549
9.5.6.2.2.	Anwendung CVD-Verfahren . . . . .	550
9.5.6.2.3.	Anwendung PVD-Verfahren . . . . .	553

9.5.6.3.	Reibungsmindernde Schichten unter Gleitbeanspruchung . . . . .	559
9.5.6.3.1.	Allgemeines . . . . .	559
9.5.6.3.2.	Weichmetallische Schichten . . . . .	559
9.5.6.4.	Reibungsmindernde Schichten bei Wälzbeanspruchung . . . . .	562
9.5.6.4.1.	Allgemeines . . . . .	562
9.5.6.4.2.	MoS <sub>2</sub> -Schichten . . . . .	562
9.5.6.5.	Hartstoffschichten auf Bauteilen . . . . .	562
9.5.6.5.1.	Allgemeines . . . . .	562
9.5.6.5.2.	Tribologisches Verhalten von TiN-Schichten in Flügelzellen- pumpen . . . . .	563
9.6.	Beschichtung von Kunststoffformteilen . . . . .	565
9.6.1.	Allgemeines . . . . .	565
9.6.2.	Arbeitsgänge vor und nach dem Metallisieren von Kunststoff- formteilen . . . . .	566
9.6.2.1.	Grundlackierung . . . . .	566
9.6.2.2.	Schutzlackierung . . . . .	566
9.6.3.	Anlagen zum Metallisieren von Kunststoffformteilen . . . . .	566
9.6.4.	Anwendungen . . . . .	570
9.6.4.1.	Kunststoffteile mit hohem Reflexionsvermögen im sichtbaren Spektralbereich . . . . .	570
9.6.4.2.	Erzeugung verschiedener Goldtöne . . . . .	571
9.6.4.3.	Erzeugung verschiedener Farbtöne . . . . .	572
9.6.4.4.	Iris-Effekte (Regenbogeneffekt) . . . . .	572
9.6.4.5.	Abschirmschichten . . . . .	572
9.7.	Folienbeschichtung . . . . .	572
9.7.1.	Problemstellungen bei der Folienbeschichtung . . . . .	572
9.7.2.	Aufbau und Wirkungsweise von Folienbeschichtungsanlagen . . . . .	573
9.7.2.1.	Vakuumtechnik . . . . .	573
9.7.2.2.	Wickelsystem . . . . .	577
9.7.2.3.	Beschichtungsmethoden . . . . .	578
9.7.2.4.	Zum Prozeßablauf . . . . .	583
9.7.3.	Anwendungen . . . . .	587
9.7.3.1.	Kondensatorfolie . . . . .	587
9.7.3.2.	Verpackungsfolie . . . . .	587
9.7.3.3.	Folien für Architekturglas . . . . .	588
9.7.3.4.	Photoleitende Schichten für die Herstellung von photographischen Filmen . . . . .	589
9.7.3.5.	Einige zukünftige Anwendungen von beschichteten Folien . . . . .	591
9.7.3.5.1.	Speicherschichten . . . . .	591
9.7.3.5.2.	Transparente leitende Schichten . . . . .	591
9.7.3.5.3.	Interferenzschichten auf Kunststofffolien . . . . .	592
9.7.3.6.	Beschichten von Folien in Luft-zu-Luft-Anlagen . . . . .	592
9.8.	Dünne Schichten zur Informationsspeicherung . . . . .	593
9.8.1.	Einführung . . . . .	593
9.8.2.	Magnetische Aufzeichnung . . . . .	594
9.8.2.1.	Aufzeichnungs- und Wiedergabetechnik . . . . .	594
9.8.2.2.	Longitudinale und vertikale Aufzeichnung in dünnen Schichten . . . . .	596

9.8.2.3. Schichtsysteme für die magnetische Aufzeichnung . . . . .	597
9.8.2.4. Schreib-Lese-Köpfe in Dünnschichttechnik . . . . .	602
9.8.3. Magnetooptische und optische Informationsspeicherung . . . . .	603
<b>9.9. Eigenschaften und Herstellung von optisch transparenten, elektrisch leit-</b>	
<b>fähigen Oxidschichten . . . . .</b>	<b>605</b>
9.9.1. Einleitung . . . . .	605
9.9.2. Schichteigenschaften . . . . .	605
9.9.3. Herstellungsmethoden . . . . .	607
<b>9.10. Anwendungen der Plasmapolymersation . . . . .</b>	<b>608</b>
9.10.1. Einleitung . . . . .	608
9.10.2. Plasmapolymere durch Elektronenbeschuß . . . . .	609
9.10.3. Plasmapolymere durch Ionenbeschuß . . . . .	610
<b>9.11. Anlagen zur kontinuierlichen Beschichtung von Metallbändern, -drähten</b>	
<b>und -profilen . . . . .</b>	<b>612</b>
9.11.1. Einführung . . . . .	612
9.11.2. Beschichten von Drähten . . . . .	613
9.11.3. Beschichten von Blechen . . . . .	615
<b>10. Automatisierung von PVD-Anlagen . . . . .</b>	<b>618</b>
10.1. Vorbemerkungen . . . . .	618
10.2. Begriffe und Begriffsbestimmung . . . . .	618
10.2.1. Ablaufverknüpfte Steuerungen . . . . .	619
10.2.2. Rechner- oder Computer-Steuerung . . . . .	619
10.2.3. Sensoren und Stellglieder . . . . .	620
10.2.4. Verfahrensentwicklung . . . . .	621
10.3. Verfahrensanalyse – Prozeßparameter . . . . .	622
10.3.1. Auswahlkriterien . . . . .	622
10.3.2. Bedienung der Automaten . . . . .	623
10.4. Automation von Teilsystemen . . . . .	624
10.4.1. Pumpsatz-Steuerungen . . . . .	624
10.4.1.1. Hochvakuumpumpsätze mit Diffusionspumpen . . . . .	624
10.4.1.2. Pumpsätze mit Turbomolekularpumpen . . . . .	625
10.4.1.3. Pumpsätze mit Kryopumpen . . . . .	626
10.4.1.4. Steuerungsgeräte für Pumpstände . . . . .	627
10.4.2. Druck- und Partialdrucksteuerung . . . . .	627
10.4.2.1. Kontrolle und Analyse des Druckes vor der Beschichtung . . . . .	627
10.4.2.2. Gaseinlaß und Drucksteuerung . . . . .	629
10.4.2.3. Einlaß von Reaktionsgasen . . . . .	629
10.4.3. Automation von Antrieben und Substrattransport . . . . .	630
10.4.3.1. Substratbewegung . . . . .	630
10.4.3.2. Schleusensysteme und Mehrkammer-In-line-Anlagen . . . . .	630
10.4.3.3. Folientransport und Beschichtung . . . . .	632
10.4.4. Regelung der Substrattemperatur . . . . .	632

10.4.4.1.	Heizeinrichtungen im Vakuum . . . . .	632
10.4.4.2.	Messung und Regelung der Substrattemperaturen . . . . .	633
10.4.5.	Stabilisierung und Regelung von Verdampfern . . . . .	633
10.4.5.1.	Widerstandsbeheizte Verdampfer . . . . .	633
10.4.5.2.	Induktive Verdampfer . . . . .	633
10.4.5.3.	Elektronenstrahlverdampfer . . . . .	633
10.4.6.	Stabilisierung und Regelung von Sputterprozessen . . . . .	634
10.4.7.	Schichtdickenkontrollen und Ratenregelung . . . . .	635
10.4.7.1.	Kontrollen und Regelungen bei Aufdampfprozessen . . . . .	635
10.4.7.1.1.	Schwingquarz-Meßtechnik . . . . .	635
10.4.7.1.2.	Photometrische Meßmethoden . . . . .	636
10.4.7.1.3.	Elektrische und andere Meßmethoden . . . . .	637
10.4.7.2.	Kontrollen und Regelung von Sputterprozessen . . . . .	637
10.4.7.3.	Ratenregelung bei reaktiven PVD-Prozessen . . . . .	638
10.5.	Beispiele für die Automation von PVD-Prozessen . . . . .	638
10.5.1.	Prozeßsteuerung mit Schwingquarzmeßtechnik . . . . .	638
10.5.2.	Prozeßsteuerung für optische Mehrfachschichten . . . . .	639
10.5.3.	Automatisierung von In-line-Beschichtungsanlagen . . . . .	641
11.	Schrifttum . . . . .	643
12.	Sachwortverzeichnis . . . . .	684