

# Inhalt

<b>Vorwort</b> .....	<b>XV</b>
<b>Die Autorinnen und Autoren</b> .....	<b>XVII</b>
Der Herausgeber. ....	XVII
Die Mitverfasserinnen und Mitverfasser. ....	XVIII
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<i>Dr. Ruben Schlutter</i>	
1.1 Mögliche Fehler an Formteilen. ....	2
1.2 Ableitung eines Lasten- und Pflichtenheftes. ....	4
1.3 Literatur .....	7
<b>2 Werkzeugstähle und deren Beschichtbarkeit</b> .....	<b>9</b>
<i>Markus Pothmann</i>	
2.1 Einführung in Werkzeugstähle. ....	9
2.1.1 Definition von Werkzeugstählen .....	9
2.1.2 Entwicklung der Werkzeugstähle. ....	10
2.1.3 Arten von Werkzeugstählen .....	10
2.1.4 Faktoren, die die Materialauswahl bei Spritzguss-Werkzeugstählen beeinflussen .....	12
2.1.5 Herausforderungen bei der Auswahl von Spritzguss-Werkzeugstählen .....	13
2.1.6 Zukünftige Entwicklung von Spritzguss-Werkzeugstählen. ....	13
2.2 Eigenschaften von Werkzeugstählen. ....	15
2.2.1 Einführung in Spritzguss-Werkzeugstähle .....	15
2.2.2 Eigenschaften von Spritzguss-Werkzeugstählen .....	16

2.2.3	Zusammensetzung von Spritzguss-Werkzeugstählen .....	17
2.2.4	Wärmebehandlung von Spritzguss-Werkzeugstählen .....	20
2.2.5	Oberflächenbehandlung von Spritzguss-Werkzeugstählen .....	22
2.2.6	Wartung und Pflege von Spritzguss-Werkzeugstählen .....	23
2.3	Auswahl von Spritzguss-Werkzeugstählen .....	25
2.4	Literatur .....	28
<b>3</b>	<b>Grundlagen der Beschichtungstechnologien .....</b>	<b>29</b>
3.1	Elektrolytisch abgeschiedene metallische Schichten und Hybridsysteme ... <i>Dr. Orlaw Massler</i>	29
3.1.1	Hintergrund und Herausforderungen .....	29
3.1.2	Galvanische Schichten .....	30
3.1.2.1	Herausforderungen und Maßnahmen .....	32
3.1.3	Außenstromlose Abscheidung .....	34
3.1.3.1	Außenstromlose Beschichtung, chemisch Nickel .....	34
3.1.3.2	Prinzip chemisch Vernickeln .....	34
3.1.3.3	Chemisch Nickel-Schichten mit festen Zusätzen (Dispersion) ..	35
3.1.3.4	Spezialfall Dispersionsschichten .....	35
3.1.3.5	Reibwerterhöhende Schichten .....	36
3.1.3.6	Sensor- und Indikatorschichten .....	36
3.1.4	Beladungstypen .....	37
3.1.5	Beschichtungsgerechte Konstruktion .....	37
3.1.6	Literatur .....	39
3.2	Physikalische Gasphasenabscheidung .....	41
	<i>Dr. Ruben Schlutter</i>	
3.2.1	Einleitung .....	41
3.2.2	Verfahrensvarianten .....	41
3.2.2.1	Bedampfen .....	42
3.2.2.2	Sputtern .....	44
3.2.2.3	Ionenplattieren .....	45
3.2.3	Schichtwachstum und Haftungsmechanismen bei PVD-Beschichtungen .....	46
3.2.4	Mehrlagige Schichtsysteme .....	50
3.2.5	Literatur .....	51

3.3	Chemische Gasphasenabscheidung. ....	53
3.3.1	Metallorganische chemische Gasphasenabscheidung. ....	53
	<i>Vanessa Frettlöh</i>	
3.3.1.1	Einordnung der Technologie. ....	53
3.3.1.2	Abläufe während der MOCVD-Beschichtung. ....	54
3.3.1.3	Anforderungen an metallorganische Precursoren. ....	56
3.3.1.4	Aufbau einer MOCVD-Anlage. ....	58
3.3.1.5	Spaltgängigkeit und 3D-Fähigkeit der Beschichtungen. ....	59
3.3.1.6	Literatur. ....	63
3.3.2	Feststoffbasierte chemische Gasphasenabscheidung. ....	65
	<i>Dr. Ruben Schlutter</i>	
3.3.2.1	Grundlagen der CVD mit festen Precursoren. ....	65
3.3.2.2	Förderung des festen Precursors. ....	69
3.3.2.3	Literatur. ....	72
3.3.3	Plasmabasierte chemische Gasphasenabscheidung. ....	74
	<i>Patrick Engemann</i>	
3.3.3.1	Plasmen. ....	74
3.3.3.2	Plasma Activated Chemical Vapor Deposition. ....	75
3.3.3.3	Literatur. ....	77
3.3.4	Precursoren – Moleküle als Vorstufen für Funktionswerkstoffe. ....	78
	<i>Prof. Dr. Sanjay Mathur, Dr. Veronika Brune, Dr. Thomas Fischer</i>	
3.3.4.1	Chemische Strategien in der Materialsynthese. ....	81
3.3.4.2	Ausblick. ....	92
3.3.4.3	Danksagung. ....	94
3.3.4.4	Literatur. ....	94
3.4	Simulation der Schichtabscheidung. ....	99
	<i>Ameya Kulkarni</i>	
3.4.1	Einleitung. ....	99
3.4.2	Theoretische Grundlagen und Versuchsaufbau. ....	101
3.4.3	Die Zustandsgleichungen. ....	104
3.4.4	Versuchsdurchführung und -ergebnisse. ....	105
3.4.5	Ergebnisse der Simulationen. ....	107
3.4.6	Schlussfolgerung. ....	112
3.4.7	Literatur. ....	113

<b>4</b>	<b>Messtechnik zur Schichtcharakterisierung.....</b>	<b>115</b>
4.1	Kalottenschliff .....	115
	<i>Dr. Ruben Schlutter</i>	
4.1.1	Bestimmung der Schichtdicke .....	116
4.1.2	Bestimmung der Verschleißfestigkeit .....	119
4.1.3	Literatur .....	121
4.2	Rasterelektronenmikroskopie .....	122
	<i>Dr. Ruben Schlutter</i>	
4.2.1	Einleitung .....	122
4.2.2	Geräteaufbau .....	124
4.2.3	Vorbereitung der Probe .....	129
4.2.4	Sensoren in einem Rasterelektronenmikroskop.....	130
	4.2.4.1 SE-Sensor.....	130
	4.2.4.2 UVD-Sensor.....	131
	4.2.4.3 BSE-Sensor .....	132
	4.2.4.4 EDX-Sensor .....	136
4.2.5	Literatur .....	141
4.3	Lasermikroskopie .....	143
	<i>Dr. Stefan Svoboda</i>	
4.3.1	Grundprinzip .....	143
4.3.2	Aufnahme eines Bildes .....	144
4.3.3	Anwendungsbeispiele .....	150
	4.3.3.1 Rissnetzwerk in Sol-Gel-Schicht .....	150
	4.3.3.2 Darstellung und Auswertung eines Kalottenschliffes.....	152
	4.3.3.3 Rauheitsmessung an einer Kunststoffprobe .....	153
	4.3.3.4 Auswertung Verschleißprüfung .....	154
4.3.4	Literatur .....	155
4.4	Weißlichtinterferometrie.....	156
	<i>Dr. Andreas Balster</i>	
4.4.1	Einleitung .....	156
4.4.2	Rauheit als Messgröße.....	157
4.4.3	Weißlichtinterferometrie.....	160
	4.4.3.1 Messprinzip der Weißlichtinterferometrie .....	160

4.4.3.2	Anwendungen der Weißlichtinterferometrie.....	163
4.4.3.3	Einschränkungen der Weißlichtinterferometrie.....	165
4.4.4	Literatur .....	165
4.5	Infrarotspektroskopie .....	166
	<i>Dr. Andreas Balster</i>	
4.5.1	Einleitung .....	166
4.5.2	Physikalische Grundlagen.....	166
4.5.3	Die Anwendung der FTIR-Spektroskopie bei Polymeren: Materialidentifizierung .....	169
4.5.4	Identifizierung und Strukturaufklärung .....	171
4.5.5	Quantifizierung von Komponenten .....	174
4.5.6	Messtechnische Aspekte der FTIR-Spektroskopie .....	175
4.5.7	ATR-FTIR-Spektroskopie .....	176
4.5.8	Anwendungsbereich in der Werkzeugtechnik .....	178
4.5.9	Literatur .....	179
4.6	Röntgenfluoreszenzanalyse .....	181
	<i>Dr. Martin Ciaston</i>	
4.6.1	Einleitung .....	181
4.6.2	Physikalische Grundlagen der Röntgenfluoreszenz.....	181
4.6.3	Instrumentelle Aspekte der Röntgenfluoreszenzspektroskopie ....	184
4.6.4	Anwendungen der Röntgenfluoreszenzspektroskopie in der Materialanalyse .....	186
4.6.5	Quantitative Aspekte der Röntgenfluoreszenzspektroskopie .....	187
4.6.6	Zusammenfassung und Ausblick.....	189
4.6.7	Literatur .....	191
4.7	Elektrochemische Impedanzspektroskopie.....	192
	<i>Dr. Anatoliy Batmanov</i>	
4.7.1	Einleitung .....	192
4.7.2	Grundlagen der EIS .....	194
4.7.3	Darstellung der EIS-Messergebnisse .....	199
4.7.4	EIS-Untersuchung von Schutzschichten .....	200
4.7.5	Der Versuchsaufbau für eine EIS-Messung.....	205
4.7.6	Schlussfolgerung .....	206
4.7.7	Literatur .....	207

4.8	Nanoindentation. ....	209
	<i>Dr. Ruben Schlutter</i>	
4.8.1	Einleitung .....	209
4.8.2	Versuchsaufbau bei der Messung mittels Nanoindenter .....	211
4.8.3	Gängige Prüfverfahren .....	215
4.8.3.1	Bestimmung der Eindringhärte .....	215
4.8.3.2	Bestimmung des Eindringmoduls.....	218
4.8.3.3	Bestimmung des Eindringkriechens .....	219
4.8.3.4	Bestimmung der Eindringrelaxation .....	220
4.8.3.5	Bestimmung des plastischen und elastischen Anteils der Eindringarbeit .....	220
4.8.4	Prüfverfahren für Schichten .....	221
4.8.4.1	Eindringmodul der Schicht .....	224
4.8.4.2	Eindringhärte der Schicht .....	225
4.8.5	Literatur .....	227
4.9	Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit von Beschichtungen .....	228
	<i>Patrick Engemann</i>	
4.9.1	Einfluss der Werkzeugwandtemperatur auf den Spritzgussprozess ..	228
4.9.2	Kontakttemperatur.....	229
4.9.3	Time Domain Thermoreflectance (TDTR) .....	230
4.9.4	3-Omega .....	231
4.9.5	Versuchsaufbau zur Messung der Kontakttemperatur .....	233
4.9.6	Versuchsdurchführung zur Messung der Kontakttemperatur ....	234
4.9.7	Literatur .....	236
4.10	Bestimmung der Entformungskraft beim Spritzgießen.....	238
	<i>Dr. Ruben Schlutter</i>	
4.10.1	Einleitung .....	238
4.10.2	Stand der Technik .....	238
4.10.3	Versuchsaufbau zur Bestimmung der Haft- und Gleitreibung ....	240
4.10.3.1	Versuchsaufbau .....	241
4.10.3.2	Versuchsdurchführung .....	243
4.10.3.3	Qualifizierung des Spritzgießwerkzeuges im Dauerversuch .....	244
4.10.4	Zusammenfassung .....	246
4.10.5	Literatur .....	246

4.11	Bestimmung der Emissionen in der Kunststoffverarbeitung .....	248
	<i>Dr. Andreas Balster, Matthias Korres</i>	
4.11.1	Einleitung .....	248
4.11.2	Gaschromatographie-Massenspektrometrie (GC/MS) .....	248
4.11.3	Emissionsbildung in der Kunststoffverarbeitung .....	256
4.11.4	Prozessabhängige Emissionsbildung .....	257
4.11.4.1	Materialtrocknung .....	257
4.11.4.2	Materialverarbeitung .....	260
4.11.5	Zusammenfassung .....	265
4.11.6	Literatur .....	266
4.12	Verschleißuntersuchungen in der Kunststoffverarbeitung .....	267
	<i>Marko Gehlen</i>	
4.12.1	Einleitung .....	267
4.12.2	Definition von Verschleiß .....	267
4.12.3	Die Bedeutung von Verschleiß für die Industrie .....	268
4.12.4	Stand der Technik und Messverfahren .....	269
4.12.5	Verschleiß beim Spritzguss und im Spritzgießwerkzeug .....	271
4.12.6	Untersuchung des Verschleißverhaltens im Spritzguss .....	271
4.12.7	Ausblick .....	274
4.12.8	Zusammenfassung .....	275
4.12.9	Literatur .....	275
4.13	Haftungsbewertung von Beschichtungen .....	277
	<i>Dr. Orlaw Massler</i>	
4.13.1	Rockwelltest, DIN EN ISO 4856 .....	279
4.13.2	Thermoschocktest .....	280
4.13.3	Feiltest .....	281
4.13.4	Querschliiffmethode .....	281
4.13.5	Literatur .....	282
<b>5</b>	<b>Anwendung funktioneller Schichten .....</b>	<b>283</b>
5.1	Hartstoffschichten .....	283
	<i>Marko Gehlen</i>	
5.1.1	Einleitung .....	283
5.1.2	Definition und Eigenschaften einer Hartstoffschicht .....	283
5.1.3	Einsatzgebiete .....	284

5.1.4	Voraussetzungen und Schichtaufbau.....	284
5.1.5	Verfahren zum Aufbringen von Hartstoffschichten.....	285
5.1.6	Kennwerte zur Bewertung der Verschleißfestigkeit.....	286
5.1.7	Erzielte Abriebvergleichswerte und Härten.....	287
5.1.8	Zusammenfassung.....	288
5.1.9	Literatur.....	289
5.2	Tribologische Schichten und Verschleißschutzschichten.....	290
	<i>Dr. Orlaw Massler</i>	
5.2.1	Anforderungen an Verschleißschutz und Reibung.....	290
5.2.1.1	Abrasiver Verschleiß.....	290
5.2.1.2	Adhäsiver Verschleiß.....	290
5.2.1.3	Ermüdungsverschleiß.....	290
5.2.1.4	Tribooxidation.....	291
5.2.1.5	Reibungsreduktion.....	291
5.2.2	Galvanische Beschichtungen.....	292
5.2.2.1	Hartverchromung.....	292
5.2.2.2	Vernickelung.....	294
5.2.3	Chemisch Nickel und Dispersionsschichten.....	294
5.2.3.1	Dispersionsschichten.....	295
5.2.3.2	SiC-Dispersionsschichten.....	295
5.2.3.3	BC-Dispersionsschichten.....	296
5.2.3.4	hBN-Dispersionsschichten.....	296
5.2.4	Tribologische PVD- und PACVD-Beschichtungen.....	296
5.2.5	Hybridschichten.....	297
5.2.5.1	Ni-Cr-Hybrid.....	298
5.2.5.2	Plasmanitrieren – PVD – DLC.....	299
5.2.5.3	Chemisch Ni-DLC-Hybridschichten.....	299
5.2.5.4	Ni-SiC-DLC-Hybridschicht.....	299
5.2.6	Literatur.....	299
5.3	Korrosionsschutzschichten.....	300
	<i>Dr. Anatoliy Batmanov</i>	
5.3.1	Definition der Korrosion.....	300
5.3.2	Grundsätzliche Strategien zur Vermeidung der Korrosion.....	302



5.3.3	Anforderungen an Korrosionsschutzschichten.....	303
5.3.4	Entwicklung einer Korrosionsschutzschicht gegen Heißgaskorrosion .....	307
5.3.5	Entwicklung einer Korrosionsschutzschicht gegen wässrige Korrosion .....	310
5.3.6	Literatur .....	312
5.4	Thermische Barrierschichten..... <i>Vanessa Frettlöh</i>	313
5.4.1	Verständnis einer thermischen Barrierschicht.....	313
5.4.2	Einfluss der Temperatur im Spritzgussprozess .....	313
5.4.3	Anwendung und Eigenschaften von thermischen Barrierschichten.....	316
5.4.4	Funktionsweise thermischer Barrierschichten.....	317
5.4.5	Anwendung thermischer Barrierschichten im Spritzgießprozess ..	319
5.4.6	Einsatz thermischer Barrierschichten im Dünnwandspritzguss ...	322
5.4.7	Literatur .....	325
5.5	Beschichtungen zur Belagsreduzierung .....	328
	<i>Mattias Korres</i>	
5.5.1	Einführung .....	328
5.5.2	Belag im Spritzgießwerkzeug.....	329
5.5.3	Prozessoptimierung.....	332
5.5.4	Optimierung des Spritzgießwerkzeuges .....	334
5.5.5	Beschichtungen zur Belagsreduzierung .....	335
5.5.6	Literatur .....	337
5.6	Beschichtungen zur Entformungskraftreduzierung.....	338
	<i>Dr. Ruben Schlutter</i>	
5.6.1	Einleitung .....	338
5.6.2	Stand der Technik .....	338
5.6.3	Anwendungsmöglichkeiten und Potentiale.....	343
5.6.3.1	Werkstoffauswahl des thermoplastischen Werkstoffs ....	343
5.6.3.2	Zugaben von Additiven .....	343
5.6.4	Modifizierung der Kavitätsoberfläche .....	344
5.6.5	Zusammenfassung.....	346
5.6.6	Literatur .....	346

5.7	Dünnschichtsensorik.....	348
	<i>Dr. Angelo Librizzi</i>	
5.7.1	Einleitung.....	348
5.7.2	Stand der Technik – Werkzeugsensorik .....	349
5.7.2.1	Druckmessung im Spritzgießwerkzeug.....	349
5.7.2.2	Temperaturmessung im Spritzgießwerkzeug .....	351
5.7.3	Messprinzip für temperatursensitive Dünnschichten .....	354
5.7.4	Schichtaufbau.....	355
5.7.5	Schichtherstellung.....	356
5.7.6	Charakterisierung des thermoelektrischen Verhaltens der Dünnschichtsensoren .....	360
5.7.7	Berechnung der Ansprechdynamik .....	361
5.7.8	Sensorintegration und Anwendung in einem Spritzgießwerkzeug ..	362
5.7.9	Zusammenfassung.....	365
5.7.10	Literatur .....	366
5.8	Heizschichten.....	367
	<i>Dr. Martin Ciaston</i>	
5.8.1	Einleitung.....	367
5.8.2	Grundlagen der konturnahen Heizschichten .....	367
5.8.3	Anforderungen an ein Schichtsystem für eine Anwendung als Heizleiter im Spritzgießverfahren .....	369
5.8.4	Anwendung von Heizschichten in Spritzgießprozessen .....	369
5.8.5	Zusammenfassung und Ausblick.....	370
5.8.6	Literatur .....	371
	<b>Index .....</b>	<b>373</b>