

Vorwort	XVII	
Polymere und Kunststoffe	1	KAPITEL 1
1.1 Duroplaste	3	
1.2 Thermoplaste	4	
1.3 Amorphe und teilkristalline Kunststoffe	5	
Standardkunststoffe	7	KAPITEL 2
2.1 Polyethylen (PE)	7	
2.1.1 Einteilung	8	
2.1.2 Eigenschaften von Polyethylen	8	
2.1.3 Recycling	9	
2.1.4 Anwendungsgebiete	9	
2.2 Polypropylen (PP)	11	
2.2.1 Eigenschaften von Polypropylen	12	
2.2.2 Recycling	13	
2.3 Polyvinylchlorid (PVC)	13	
2.3.1 Eigenschaften von PVC	14	
2.3.2 Recycling	14	
2.4 Polystyrol (PS)	15	
2.4.1 Einteilung	16	
2.4.2 Eigenschaften von Polystyrol	16	
2.4.3 Recycling	17	
2.4.4 Anwendungsgebiete	17	
2.5 Styrol-Acrylnitril (SAN)	17	
2.6 Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS)	18	
2.6.1 ABS Blends	19	
2.6.2 Eigenschaften von ABS	19	
2.6.3 Recycling	19	
2.6.4 Anwendungsgebiete	20	
2.7 Polymethylmethacrylat (PMMA)	21	
2.7.1 Eigenschaften von PMMA	22	
2.7.2 Recycling	22	
2.7.3 Anwendungsgebiete	22	
Technische Kunststoffe	23	KAPITEL 3
3.1 Polyamid (Nylon)	23	
3.1.1 Einteilung	23	
3.1.2 Eigenschaften von Polyamid	25	
3.1.3 Recycling	25	
3.1.4 Anwendungsgebiete	25	

3.2	POM (Polyoxymethylen)	26
3.2.1	Eigenschaften von POM	27
3.2.2	Recycling	28
3.2.3	Anwendungsgebiete	28
3.3	Polyester	29
3.3.1	Eigenschaften von PBT und PET	31
3.3.2	Recycling	31
3.3.3	Anwendungsgebiete	31
3.4	Polycarbonat	33
3.4.1	Eigenschaften von Polycarbonat	34
3.4.2	Recycling	34
3.4.3	Anwendungsgebiete	34
KAPITEL 4	Thermoplastische Elastomere	36
4.1	TPE-O	36
4.1.1	Eigenschaften von TPE-O	36
4.1.2	Anwendungsbereiche	37
4.2	TPE-S	38
4.2.1	Eigenschaften von TPE-S	38
4.2.2	Anwendungsbereiche	39
4.3	TPE-V	39
4.3.1	Eigenschaften von TPE-V	40
4.3.2	Anwendungsbereiche	40
4.4	TPE-U	41
4.4.1	Eigenschaften von TPE-U	41
4.4.2	Anwendungsbereiche	42
4.5	TPE-E	42
4.5.1	Eigenschaften von TPE-E	42
4.5.2	Anwendungsbereiche	43
4.6	TPE-A	44
4.6.1	Eigenschaften von TPE-A	44
4.6.2	Anwendungsbereiche	45
KAPITEL 5	Hochleistungspolymere	46
5.1	Hochleistungsthermoplaste	46
5.1.1	Recycling	47
5.2	Fluorpolymere	47
5.2.1	Eigenschaften von PTFE	48
5.2.2	Anwendungsbereiche	48
5.3	Hochleistungs-Polyamid – PPA	49
5.3.1	Eigenschaften von PPA	49
5.3.2	Anwendungsbereiche	50
5.4	Flüssigkristalline Polymere – LCP	50
5.4.1	Eigenschaften von LCP	50
5.4.2	Anwendungsbereiche	51

5.5	Polyphenylensulfid – PPS	52	
5.5.1	Eigenschaften von PPS	52	
5.5.2	Anwendungsbereiche	52	
5.6	Polyetheretherketon – PEEK	53	
5.6.1	Eigenschaften von PEEK	53	
5.6.2	Anwendungsbereiche	54	
5.7	Polyetherimid – PEI	54	
5.7.1	Eigenschaften von PEI	55	
5.7.2	Anwendungsbereiche	55	
5.8	Polysulfon – PSU	56	
5.8.1	Eigenschaften von PSU	56	
5.8.2	Anwendungsbereiche	57	
5.9	Polyphenylsulfon – PPSU	57	
5.9.1	Eigenschaften von PPSU	57	
5.9.2	Anwendungsbereiche	58	
	Biokunststoffe und Biokomposite	59	KAPITEL 6
6.1	Definition	59	
6.1.1	Was bedeutet Biokunststoff?	60	
6.1.2	Markt	60	
6.1.3	Produktion und Einsatz von Biokunststoffen	61	
6.2	Biokunststoffe	62	
6.3	Biopolymere	62	
6.4	Polymere auf biologischer Basis: Biopolyester	64	
6.5	Polymere auf biologischer Basis: Biopolyamide	66	
6.6	Biopolymere auf Basis von Mikroorganismen	67	
6.7	Bioethanol oder Biomethanol	67	
6.8	Biokomposite	68	
6.9	Weitere Information zu Biokunststoffen	69	
	Kunststoffe und Umwelt	70	KAPITEL 7
7.1	Kunststoff ist klimafreundlich und spart Energie	70	
7.2	Auswirkungen der Umwelt auf Kunststoffe	72	
7.3	Recycling von Kunststoffen	73	
7.3.1	Kunststoff-Recycling in der EU	74	
	Modifizierung von Polymeren	76	KAPITEL 8
8.1	Polymerisation	76	
8.2	Additive	78	
8.2.1	Steifigkeit und Zugfestigkeit	79	
8.2.2	Oberflächenhärte	79	
8.2.3	Verschleißfestigkeit	79	
8.2.4	Zähigkeit	80	

8.3	Physikalische Eigenschaften	80
8.3.1	Erscheinungsbild	80
8.3.2	Kristallinität	81
8.3.3	Witterungsbeständigkeit	81
8.3.4	Reibungsverhalten	82
8.3.5	Dichte	82
8.4	Chemische Eigenschaften	83
8.4.1	Barriereigenschaften	83
8.4.2	Oxidationsbeständigkeit	83
8.4.3	Hydrolysebeständigkeit	84
8.5	Elektrische Eigenschaften	84
8.6	Thermische Eigenschaften	85
8.6.1	Wärmestabilisierung	85
8.6.2	Wärmeformbeständigkeit	86
8.6.3	Einstufung des Brandverhaltens	86
8.7	Materialpreis	87
KAPITEL 9	Materialdaten und Messgrößen	88
9.1	Zugfestigkeit und Steifigkeit	89
9.2	Schlagzähigkeit	92
9.3	Maximale Einsatztemperatur	93
9.3.1	Dauergebrauchstemperatur	93
9.3.2	Wärmeformbeständigkeit	93
9.4	Prüfung des Brandverhaltens	94
9.4.1	Brennbarkeitsklasse HB	95
9.4.2	Brennbarkeitsklasse V	95
9.5	Elektrische Eigenschaften	96
9.6	Fließeigenschaften: Schmelzindex	97
9.7	Schwindung	97
KAPITEL 10	Materialdatenbanken im Internet	98
10.1	CAMPUS	98
10.1.1	Eigenschaften von CAMPUS 5.2	99
10.2	Material Data Center	99
10.2.1	Eigenschaften des Material Data Center	100
10.3	Prospector Plastics Database	100
10.3.1	Eigenschaften der Prospector Plastics Database	101
KAPITEL 11	Prüfverfahren für Kunststoff-Rohstoffe und Formteile	102
11.1	Qualitätskontrolle bei der Herstellung des Rohstoffs	102
11.2	Visuelle Qualitätskontrolle von Kunststoffgranulaten	103
11.3	Visuelle Prüfung von Kunststoffteilen	104
11.4	Prüfungen, die der Spritzgießer durchführen kann	105
11.5	Spezielle Prüfverfahren	107

Spritzgießverfahren	110	KAPITEL 12
12.1 Geschichte	110	
12.2 Eigenschaften	111	
12.2.1 Einschränkungen	111	
12.3 Die Spritzgießmaschine	112	
12.3.1 Einspritzeinheit	112	
12.3.2 Schließeinheit	113	
12.3.3 Spritzgießzyklus	114	
12.4 Alternative Spritzgießverfahren	115	
12.4.1 Mehrkomponenten-Spritzgießen	115	
12.4.2 Gas- oder Wasser-Injektion	116	
Nachbearbeitungsverfahren	117	KAPITEL 13
13.1 Oberflächenbehandlung von Formteilen	117	
13.1.1 Bedrucken	117	
13.1.2 Heißprägen	118	
13.1.3 Tampondruck	119	
13.1.4 Siebdruck	119	
13.1.5 IMD: In-Mould-Dekorieren	120	
13.1.6 Lasermarkierung	121	
13.1.7 Lackierung	121	
13.1.8 Metallisierung/Verchromung	122	
Verschiedene Bauarten von Werkzeugen	123	KAPITEL 14
14.1 Zweiplattenwerkzeuge	123	
14.2 Dreiplattenwerkzeuge	124	
14.3 Schieberwerkzeuge	124	
14.4 Werkzeuge mit rotierenden Kernen	125	
14.5 Etagenwerkzeuge	125	
14.6 Werkzeuge mit Auswerfern an der festen Werkzeughälfte	126	
14.7 Familienwerkzeuge	126	
14.8 Mehrkomponenten-Werkzeuge	127	
14.9 Werkzeuge mit Schmelzkernen	128	
Aufbau von Werkzeugen	129	KAPITEL 15
15.1 Die Aufgaben des Werkzeugs	130	
15.2 Angusssysteme – Kaltkanal	130	
15.3 Angusssysteme – Heißkanal	132	
15.4 Pfropfenfänger/Angusz zieher	133	
15.5 Temperier- und Kühlsysteme	134	
15.6 Belüftungssysteme	136	
15.7 Auswerfersysteme	137	
15.8 Entformungsschrägen	138	

KAPITEL 16	Werkzeuggestaltung und Produktqualität	139
16.1	Durch das Werkzeug verursachte Probleme	139
16.1.1	Zu schwache Werkzeugplatten	139
16.1.2	Fehlerhafte Auslegung von Anguss und Düse	140
16.1.3	Fehlerhafte Auslegung der Angusskanäle	141
16.1.4	Fehlerhafte Auslegung bzw. Positionierung oder Fehlen des Pfpfenfängers	141
16.1.5	Fehlerhafte Auslegung des Anschnitts	142
16.1.6	Fehlerhafte Entlüftung	143
16.1.7	Fehlerhafte Regelung der Werkzeugtemperatur	144
KAPITEL 17	Prototypenwerkzeuge und Analyse des Füllvorgangs	145
17.1	Prototypenwerkzeuge	145
17.2	Analyse des Füllvorgangs	146
17.2.1	Analyse des Füllvorgangs	146
17.3	Arbeitsablauf	147
17.3.1	Gitternetzmodell	147
17.3.2	Werkstoffauswahl	148
17.3.3	Verfahrensparameter	148
17.3.4	Auswahl des Anschnittpunkts	148
17.3.5	Simulation	149
17.3.6	Ergebnisse der Simulation	149
17.3.7	Füllverlauf	150
17.3.8	Druckverteilung	150
17.3.9	Schließkraft	150
17.3.10	Kühlzeit	151
17.3.11	Temperaturregelung	151
17.3.12	Schwindung und Verzug	151
17.3.13	Glasfaserorientierung	152
17.3.14	Analyse des Verzugs	152
17.3.15	Position des Anschnitts	152
17.3.16	Materialwechsel	153
17.3.17	Simulations-Software	153
KAPITEL 18	Rapid Prototyping und Additive Fertigungsverfahren	154
18.1	Prototypen	154
18.2	Rapid Prototyping (RP)	155
18.2.1	SLA – Stereolithographie	156
18.2.2	SLS – Selektives Laser Sintern	159
18.2.3	FDM – Fused Deposition Modeling	161
18.2.4	3D-Drucken	162
18.2.5	3D-Drucker	163
18.2.6	PolyJet	164
18.3	Generative Fertigung (Additive Manufacturing)	166

Kostenberechnungen für Formteile	168	KAPITEL 19
19.1 Berechnung der Bauteilkosten	169	
19.2 Szenarien Bauteilkosten	173	
19.3 Kostenvergleich	174	
Extrusion	177	KAPITEL 20
20.1 Der Extrusionsprozess	177	
20.1.1 Vorteile (+) und Grenzen (-)	177	
20.2 Materialien für die Extrusion	179	
20.3 Die Auslegung des Extruders	180	
20.3.1 Der Zylinder	180	
20.3.2 Einschneckenextruder	181	
20.3.3 Barriereschnecken	181	
20.3.4 Parallele Doppelschneckenextruder	182	
20.3.5 Konische Doppelschneckenextruder	182	
20.3.6 Rotationsrichtung	183	
20.3.7 Vergleich von Einschnecken- und Doppelschnecken- extrudern	183	
20.3.8 Werkzeug/Düse	184	
20.3.9 Kalibrierung	184	
20.3.10 Korrugatoren	185	
20.3.11 Kühlung	185	
20.3.12 Abzug	186	
20.3.13 Kennzeichnung	186	
20.3.14 Nachbearbeitung	187	
20.3.15 Trennen	187	
20.3.16 Wickeln	188	
20.4 Extrusionsverfahren	188	
20.4.1 Extrusion mit geradem Werkzeug	189	
20.4.2 Extrusion mit Umlenk-Werkzeug	189	
20.4.3 Extrusion von Platten	190	
20.4.4 Coextrusion	191	
20.4.5 Folienblasen	191	
20.4.5.1 Vorteile (+) und Grenzen (-) des Folienblasens	192	
20.4.6 Kabelherstellung	193	
20.4.7 Monofilamente	194	
20.4.8 Compoundierung	195	
20.5 Gestaltung von extrudierten Produkten	196	
20.5.1 Verrippung, Versteifung	197	
20.5.2 Hohlräume	197	
20.5.3 Dichtlippe	197	
20.5.4 Scharnier	198	
20.5.5 Führungen	198	
20.5.6 Gleitverbindung	198	
20.5.7 Schnappverbindung	199	
20.5.8 Balg	199	
20.5.9 Insert/Verstärkung	199	

	20.5.10	Reibung an der Oberfläche	200
	20.5.11	Bedrucken/Stempeln	200
	20.5.12	Dekoration der Oberfläche	200
	20.5.13	Seitliche Löcher	201
	20.5.14	Unregelmäßige Löcher	201
	20.5.15	Korrugatoren	201
	20.5.16	Spiralisierung	202
	20.5.17	Schäumen	202
	20.5.18	Extrudierte Schraubenlöcher	202
	20.5.19	Muffen und Heizelementschweißen	203
KAPITEL 21		Alternative Verarbeitungsmethoden für Thermoplaste	204
	21.1	Blasformen	204
	21.2	Rotationsformen	206
	21.3	Vakuumformen	207
KAPITEL 22		Vorgehensweise bei der Materialauswahl	209
	22.1	Wie wählen Sie das richtige Material für Ihr Entwicklungsprojekt?	209
	22.2	Entwicklungskooperation	210
	22.3	Festlegung des Anforderungsprofils	210
	22.4	Muss-Anforderungen	211
	22.5	Kann-Anforderungen	212
	22.6	Erstellung einer detaillierten Kostenanalyse	214
	22.7	Erstellung eines aussagekräftigen Prüfprogramms	215
KAPITEL 23		Anforderungen und Spezifikation von Kunststoffprodukten ..	216
	23.1	Hintergrundinformationen	216
	23.2	Losgröße	217
	23.3	Formteilgröße	218
	23.4	Toleranzanforderungen	218
	23.5	Gestaltung des Formteils	220
	23.6	Montage-Anforderungen	223
	23.7	Mechanische Belastung	223
	23.8	Chemische Beständigkeit	224
	23.9	Elektrische Eigenschaften	225
	23.10	Umweltauswirkungen	226
	23.11	Farbe	227
	23.12	Oberflächeneigenschaften	228
	23.13	Sonstige Eigenschaften	230
	23.14	Gesetzliche Anforderungen	231
	23.15	Anforderungen des Recyclings	232
	23.16	Kostenanforderungen	233

23.17	Anforderungsprofil: Checkliste	234
23.17.1	Hintergrundinformation	234
23.17.2	Batchgröße	235
23.17.3	Formteilgröße	235
23.17.4	Toleranzanforderungen	235
23.17.5	Formteilgestaltung	235
23.17.6	Montage-Anforderungen	235
23.17.7	Mechanische Belastung	235
23.17.8	Chemische Beständigkeit	235
23.17.9	Elektrische Eigenschaften	236
23.17.10	Umweltauswirkungen	236
23.17.11	Farbe	236
23.17.12	Oberflächeneigenschaften	236
23.17.13	Sonstige Eigenschaften	237
23.17.14	Gesetzliche Anforderungen	237
23.17.15	Recycling	237
23.17.16	Kosten	237

Konstruktionsregeln für thermoplastische Formteile 238

KAPITEL 24

24.1	Regel 1: Kunststoffe sind keine Metalle	239
24.2	Regel 2: Berücksichtigung der besonderen Eigenschaften von Kunststoffen	240
24.2.1	Anisotropes Verhalten	241
24.2.2	Temperaturabhängiges Verhalten	241
24.2.3	Zeitabhängige Spannungs-Dehnungs-Kurve	242
24.2.3.1	Kriechen	242
24.2.3.2	Relaxation	242
24.2.4	Geschwindigkeitsabhängige Eigenschaften	243
24.2.5	Umweltabhängige Eigenschaften	244
24.2.6	Einfache Bauteilauslegung	244
24.2.7	Einfache Einfärbung	244
24.2.8	Einfache Montage	245
24.2.9	Recycling	245
24.3	Regel 3: Konstruieren im Hinblick auf das zukünftige Recycling ..	246
24.3.1	Zerlegung	246
24.3.2	Wiederverwendete Materialien	248
24.3.3	Kennzeichnung	248
24.3.4	Reinigung	249
24.4	Regel 4: Integration mehrerer Funktionen in einem Bauteil	249
24.5	Regel 5: Einhaltung einer gleichmäßigen Wanddicke	251
24.6	Regel 6: Vermeidung von scharfen Kanten	252
24.7	Regel 7: Verwendung von Rippen zur Erhöhung der Steifigkeit ...	254
24.7.1	Einschränkungen bei der Gestaltung von Rippen	254
24.7.2	Materialsparende Konstruktion	255
24.7.3	Vermeidung von Einfallstellen bei Rippen	255

24.8	Regel 8: Sorgfältige Positionierung und Dimensionierung des Anschnitts	255
24.8.1	Bindenähte	257
24.9	Regel 9: Vermeiden von engen Toleranzen	258
24.10	Regel 10: Auswahl eines geeigneten Montageverfahrens	259
KAPITEL 25	Verbindungstechniken für Thermoplaste	260
25.1	Verbindungstechniken, die die Demontage erleichtern	260
25.2	Integrierte Schnappverbindungen	261
25.3	Dauerhafte Verbindungstechniken	262
25.4	Ultraschallschweißen	262
25.5	Vibrationsschweißen	263
25.6	Rotationsschweißen	264
25.7	Heizelementschweißen	265
25.8	Infrarotschweißen	266
25.9	Laserschweißen	266
25.10	Nieten	268
25.11	Kleben	269
KAPITEL 26	Der Spritzgießprozess	270
26.1	Analyse des Spritzgießprozesses	270
26.2	Kontaktangaben	272
26.3	Informationsbereich	272
26.4	Materialinformation	273
26.5	Angaben zur Maschine	274
26.6	Angaben zum Werkzeug	276
26.7	Trocknung	278
26.8	Angaben zur Verarbeitung	280
26.9	Temperaturen	281
26.10	Druck, Einspritzgeschwindigkeit und Schneckendrehzahl	286
26.11	Nachdruck	287
26.12	Einspritzphase	289
26.13	Schneckendrehzahl	290
26.14	Zeit- und Wegeinstellungen	292
KAPITEL 27	Prozessparameter für das Spritzgießen	297
KAPITEL 28	Problemlösung und Qualitätsmanagement	301
28.1	Höhere Qualitätsansprüche	301
28.2	Analytische Fehlerbehebung	301
28.2.1	Definition des Problems	302
28.2.2	Definition der Abweichung	302

28.3	Eingrenzung eines Problems	303
28.3.1	Einteilung von Problemen	304
28.3.2	Problemanalyse	306
28.3.3	Brainstorming	307
28.3.4	Überprüfung der Ursachen	308
28.3.5	Planung der zu ergreifenden Maßnahmen	308
28.4	Statistische Versuchsplanung (Statistical Design of Experiments – DOE)	309
28.4.1	Faktorielle Versuchsplanung	309
28.5	Fehler- Möglichkeits- und Einflussanalyse – FMEA	312
28.5.1	Allgemeine Konzepte der FMEA	314

Fehlersuche – Ursachen und Auswirkungen 316

KAPITEL 29

29.1	Probleme beim Spritzgießen	316
29.2	Füllgrad	318
29.2.1	Teilfüllungen – Das Formteil ist nicht vollständig gefüllt	318
29.2.2	Gratbildung	319
29.2.3	Einfeldstellen	319
29.2.4	Hohlräume oder Poren	320
29.3	Oberflächenfehler	321
29.3.1	Brandflecken	321
29.3.1.1	Entfärbung, dunkle Schlieren oder Materialabbau	321
29.3.1.2	Schwarze Stippen	321
29.3.1.3	Spliss oder Silberschlieren (an manchen Stellen der Oberfläche)	322
29.3.1.4	Diesel-Effekt – eingeschlossene Luft	323
29.3.2	Spliss oder Silberschlieren (auf der gesamten Oberfläche)	324
29.3.3	Farbschlieren – Schlechte Farbverteilung	324
29.3.4	Farbschlieren – Ungünstige Pigmentorientierung	325
29.3.5	Oberflächenglanz – Matte und glänzende Oberflächenabweichungen	325
29.3.6	Oberflächenglanz – Corona-Effekt	326
29.3.7	Spliss, Streifen und Blasen	326
29.3.8	Glasfaserschlieren	327
29.3.9	Bindenähte	327
29.3.10	Freistrahlbildung	328
29.3.11	Delaminierung	329
29.3.12	Schallplattenrillen (Orangenschalenhauteffekt)	329
29.3.13	Kalter Pfropfen	330
29.3.14	Auswerfermarkierungen	330
29.3.15	Ölflecken – braune oder schwarze Stippen	331
29.3.16	Wasserflecken	331
29.4	Geringe mechanische Festigkeit	332
29.4.1	Blasen oder Hohlräume im Inneren des Formteils	332
29.4.2	Risse	332
29.4.3	Unaufgeschmolzenes Material	333

29.4.4	Versprödung	334
29.4.5	Rissbildung	334
29.4.6	Probleme mit Mahlgut	335
29.5	Probleme mit der Maßhaltigkeit	336
29.5.1	Fehlerhafte Schwindung	336
29.5.2	Unrealistische Toleranzen	337
29.5.3	Verzug	338
29.6	Produktionsprobleme	339
29.6.1	Formteil haftet in der Kavität	339
29.6.2	Formteil haftet auf dem Kern	339
29.6.3	Formteil haftet an den Auswerferstiften	340
29.6.4	Anguss haftet im Werkzeug	341
29.6.5	Fadenbildung	342
KAPITEL 30	Statistische Prozesskontrolle (SPC)	343
30.1	Warum SPC?	343
30.2	Begriffe der SPC	344
30.2.1	Normalverteilung (Gauß-Verteilung)	344
30.3	Standardabweichungen	344
30.3.1	Einfache Standardabweichung	344
30.3.2	Sechsfache Standardabweichung (Six Sigma)	345
30.3.3	Regelgrenzen	345
30.3.4	Zielwert	347
30.3.5	Zielwert Zentrierung (Target Value Centering, TC)	348
30.3.6	Maschinenfähigkeit (Cm)	349
30.3.7	Maschinenfähigkeitsindex (CmK)	349
30.3.8	Prozessfähigkeit (Cp)	350
30.3.9	Prozessfähigkeitsindex (Cpk)	350
30.3.10	Sechs wichtige Faktoren	351
30.3.11	Maschinenfähigkeit	351
30.3.12	Prozessfähigkeit	352
30.4	Anwendung der SPC in der Praxis	352
30.4.1	Software	352
30.4.2	Prozessdatenüberwachung	353
KAPITEL 31	Internetadressen	355
	Index	357