

Wolfgang Kaiser

Kunststoffchemie für Ingenieure

Von der Synthese bis zur Anwendung

4., neu bearbeitete und erweiterte Auflage

HANSER

Inhalt

Vorwort zur vierten Auflage	V
Prof. Dr. Phil. II Wolfgang Kaiser	VII
Hinweise zur Benutzung des Buches	IX
1 Einführung	1
1.1 Werkstoffklassen	1
1.2 Bedeutung der Kunststoffe	3
1.2.1 Wachstumsursachen	4
1.2.1.1 Die Petrochemie als Rohstofflieferant	4
1.2.1.2 Leichtgewicht Kunststoff	4
1.2.1.3 Energiegünstiges Verhalten	4
1.2.1.4 Komplexe Formteilgeometrien und hoher Automatisierungsgrad	5
1.2.1.5 Nutzung von Synergien	5
1.2.2 Kunststoffe und die Grundbedürfnisse des Menschen	6
1.2.2.1 Nahrung	6
1.2.2.2 Gesundheit	7
1.2.2.3 Kleidung	7
1.2.2.4 Wohnung	8
1.2.2.5 Kommunikation	8
1.3 Geschichte der Kunststoffe	8
1.3.1 Kurzer Abriss der Entwicklung der Polymerwissenschaften (ohne Copolymere und Blends)	12
1.4 Zukunft der Kunststoffe – Prognosen	23
1.4.1 Zukünftiger Pro Kopf-Verbrauch von Kunststoff-Werkstoffen .	24
1.4.2 Erwartungen an Polymere	25
1.4.3 Zukünftige Rohstoffquellen	25
1.5 Wirtschaftsdaten und Grafiken zu Kunststoffen	28
1.5.1 Einteilung der Kunststoffe nach Bedarf und Anwendungsgebieten	28
1.5.2 Einteilung der Kunststoffe nach ihrem Eigenschaftsprofil	28
2 Grundlagen	33
2.1 Was sind Kunststoffe	34

2.1.1	Einteilung der Kunststoffe	37
2.1.2	Makromolekül-Architektur/Topologie	38
2.2	Bildungsreaktionen für Makromoleküle – Polyreaktionen	41
2.2.1	Kettenpolymerisation	42
2.2.1.1	Radikalische Kettenpolymerisation	43
2.2.1.2	Kationische Kettenpolymerisation	46
2.2.1.3	Anionische Kettenpolymerisation	48
2.2.1.4	Koordinative Kettenpolymerisation/Polyinsertion ..	50
2.2.1.5	Homo- und Copolymerisate	51
2.2.1.6	Chemische Vernetzung durch Kettencopolymerisation	53
2.2.1.7	Verfahrenstechnik der Kettenpolymerisation	53
2.2.1.8	Plasmapolymerisation	58
2.2.2	Kondensationspolymerisation (Polykondensation)	58
2.2.3	Additionspolymerisation (Polyaddition)	62
2.2.4	Verfahrenstechnik der Kondensationspolymerisation und Additionspolymerisation	63
2.2.5	Einteilung nach dem Typ der Aufbaureaktionen	64
2.2.6	Chemische Umsetzungen an Makromolekülen	65
2.2.6.1	Vergrößerung des Polymerisationsgrads	65
2.2.6.2	Beibehaltung des Polymerisationsgrads	65
2.2.6.3	Verringerung des Polymerisationsgrads	66
2.2.6.4	Chemische Umsetzungen an makromolekularen Naturstoffen	66
2.3	Bindungskräfte in makromolekularen Systemen	67
2.3.1	Hauptvalenzbindungen	67
2.3.2	Nebenvalenzbindungen	70
2.3.3	Ionenbindungen	74
2.3.4	Mechanische Bindungen	74
2.4	Strukturmerkmale von Kunststoffen	75
2.4.1	Chemische Struktur	76
2.4.1.1	Konstitution	76
2.4.1.2	Konfiguration	82
2.4.2	Festkörperstruktur	84
2.4.2.1	Räumliche Anordnung eines Makromoleküls	84
2.4.2.2	Räumliche Anordnung mehrerer Makromoleküle zu einem Verband	85
2.4.2.3	Kristallinität	88
2.4.3	Mittlere Molmasse $\overline{M}$ und Molmassenverteilung	90
2.4.3.1	Kettenlänge	90
2.4.3.2	Molmasse M bei niedermolekularen Verbindungen	91

- 2.4.3.3 Mittlere Molmasse $\overline{M}$ und Molmassenverteilung bei hochmolekularen Verbindungen 91
 - 2.4.3.4 Mittlerer Polymerisationsgrad 93
 - 2.4.3.5 Beeinflussung von Eigenschaften durch die mittlere Molmasse 94
- 2.5 Modifizierung von Polymeren und Kunststoffen 95
 - 2.5.1 Chemisches Modifizieren von Polymeren 95
 - 2.5.1.1 Steuerung von Synthesereaktionen 95
 - 2.5.1.2 Copolymerisation 96
 - 2.5.1.3 Andere chemische Modifikationen 96
 - 2.5.2 Physikalische Modifizierung von Polymeren und Kunststoffen 96
 - 2.5.2.1 Polymergegemische und Polymerblends 96
 - 2.5.2.2 Erhöhung der Ordnung in Polymeren 97
 - 2.5.3 Modifizieren mit Zusatzstoffen (Additive) 99
 - 2.5.3.1 Füllstoffe 100
 - 2.5.3.2 Verstärkungsstoffe 101
 - 2.5.3.3 Weichmacher 102
 - 2.5.3.4 Treibmittel 102
 - 2.5.3.5 Farbmittel 102
 - 2.5.3.6 Stabilisatoren 103
 - 2.5.3.7 Flammhemmende Zusätze 104
 - 2.5.3.8 Weitere Additivgruppen 104
- 2.6 Wichtige Eigenschaften der Kunststoffe 106
 - 2.6.1 Fließverhalten (Rheologie) von Kunststoff-Schmelzen 106
 - 2.6.1.1 Viskositätsfunktionen von Thermoplastschmelzen .. 108
 - 2.6.1.2 Zeitverhalten von thermisch instabilen Thermo-
plast-Schmelzen und reagierenden Formmassen ... 110
 - 2.6.2 Thermisch-mechanisches Verhalten 112
 - 2.6.2.1 Thermoplaste 112
 - 2.6.2.2 Elastomere und Duroplaste 115
 - 2.6.3 Chrono-mechanisches Verhalten 117
 - 2.6.4 Verhalten gegen Umwelteinflüsse 120
 - 2.6.4.1 Chemische Beständigkeit 120
- 2.7 Alterung und Alterungsschutz 123
 - 2.7.1 Alterung und Alterungsvorgänge 123
 - 2.7.1.1 Chemische Alterungsvorgänge 123
 - 2.7.1.2 Physikalische Alterungsvorgänge 126
 - 2.7.2 Alterungsschutz 126
- 2.8 Chemische Reaktionen bei der Kunststoffverarbeitung 130
 - 2.8.1 Chemische Reaktionen im Aufgabenbereich des Verarbeiters 131

2.8.1.1	Gezielte chemische Reaktionen während der Verarbeitung	131
2.8.1.2	Unerwünschte chemische Reaktionen während der Verarbeitung als Begleiterscheinung	131
2.8.1.3	Chemische Reaktionen außerhalb der Verarbeitung, jedoch vom Verarbeiter durch Zugabe von Hilfsmitteln beeinflussbar	131
2.8.2	Kunststofferzeugung beim Verarbeiter	132
2.9	Wichtige Aspekt bei der Schadenverhütung und Schadensanalyse im Kunststoffbereich	133
2.9.1	Thermoanalyse (TA) zur Schadenverhütung/Schadensanalyse	134
2.9.1.1	Differential-Kalorimetrie (Differential Scanning-Calorimetry), DSC	135
2.9.2	Mikroskopische Gefügeanalyse an Bauteilen und Halbzeug	138
3	Technologie der Verarbeitung von Kunststoffen	141
3.1	Allgemeines	141
3.2	Begriffe und Einteilung der Fertigungsverfahren nach DIN 8850	142
3.3	Prinzip der wichtigsten Ver- und Bearbeitungsverfahren	143
3.4	Aufbereitung	144
3.4.1	Einteilung der Aufbereitungsverfahren	145
3.4.1.1	Mischen	146
3.4.1.2	Granulieren	148
3.4.1.3	Zerkleinern	149
3.4.1.4	Vortrocknen	150
3.5	Urformen	151
3.5.1	Extrudieren (Strangpressen)	152
3.5.1.1	Aufbau eines Extruders	153
3.5.1.2	Beispiele typischer Extrusionsanlagen	158
3.5.2	Blasformen	162
3.5.2.1	Extrusionsblasformen	162
3.5.2.2	Extrusions-Streckblasformen	165
3.5.2.3	Spritzblasformen	166
3.5.2.4	Spritz-Streckblasformen	166
3.5.3	Spritzgießen	167
3.5.3.1	Verfahrenstechnik beim Spritzgießen	167
3.5.3.2	Spritzgießmaschine	168
3.5.3.3	Einflussgrößen auf die Formteilqualität beim Spritzgießen	171
3.5.3.4	Sonderv Verfahren der Spritzgießtechnik	172
3.5.3.5	Spritzgießen von vernetzenden Polymeren	177

3.5.4	Pressen, Spritzpressen, Schichtpressen	177
3.5.4.1	Pressen von Duroplasten	178
3.5.4.2	Pressen von Thermoplasten	179
3.5.4.3	Spritzpressen von Duroplasten	179
3.5.4.4	Schichtpressen von Duroplasten	180
3.5.5	Kalandrieren	180
3.5.5.1	Bauarten des Kalanders	180
3.5.5.2	Verfahrenstechnik beim Kalandrieren	181
3.5.6	Spinnverfahren	182
3.5.6.1	Grundlagen des Spinnprozesses	183
3.5.6.2	Herstellung von Chemiefasern	184
3.5.6.3	Textile Definitionen	189
3.5.6.4	Textile Flächegebilde	190
3.5.7	FVK-Urformen	191
3.5.7.1	Prepregverarbeitung	192
3.5.7.2	Faserspritzen	192
3.5.7.3	Faserwickeln	193
3.5.7.4	Pultrusion	193
3.5.7.5	RTM-Verfahren	193
3.5.7.6	Handlaminieren	195
3.5.8	Schäumen	196
3.5.8.1	Herstellung eines Schaumstoffes	197
3.5.8.2	Einteilung der Schäumverfahren	198
3.5.8.3	Polystyrol-Schaumstoffe	199
3.5.8.4	Polyurethan-Schaumstoffe	201
3.5.9	Gießen	207
3.5.9.1	Vakuumgießen	208
3.5.9.2	Rotationsformen (Rotationsgießen)	210
3.5.9.3	Schleuderverfahren (Schleudergießen)	211
3.5.9.4	Filmgießen (Foliengießen)	211
3.5.9.5	Einbetten, Imprägnieren, Tränken	212
3.5.10	Tauchformen	212
3.5.11	Additive Fertigungsverfahren (Additive Manufacturing AM)	213
3.5.11.1	Polymerisation als Basis für AM	214
3.5.11.2	Selektives Lasersintern (SLS)	216
3.5.11.3	Fused Layer Modeling (FLM)	216
3.5.11.4	Layer Laminate Manufacturing (LLM, auch LOM [®])	216
3.5.11.5	Aerosolprinting und Bioplotter	216

3.6	Umformen	217
3.6.1	Unterschiede im Warmformbereich zwischen amorphen und teilkristallinen Thermoplasten	217
3.6.2	Einteilung der Warmformverfahren für Thermoplaste	218
3.6.2.1	Biegeumformen	218
3.6.2.2	Zugumformen	218
3.6.2.3	Druckumformen	220
3.6.2.4	Zugdruckumformen	220
3.6.2.5	Kombinierte Verfahren	221
3.6.3	Verfahrenstechnik beim Warmformen	221
3.6.4	Thermoformmaschinen	223
3.6.5	Vor- und Nachteile des Warmformens	225
3.7	Trennen (Spanen)	225
3.8	Fügen	227
3.8.1	Schweißen	227
3.8.1.1	Heizelementschweißen	229
3.8.1.2	Wärmegasschweißen	230
3.8.1.3	Strahlungsschweißen	230
3.8.1.4	Reibungsschweißen	231
3.8.1.5	Induktionsschweißen	232
3.8.2	Kleben	232
3.8.2.1	Grundlagen	232
3.8.2.2	Abbindemechanismus der Klebung	233
3.8.2.3	Verfahrenstechnik	235
3.8.3	Mechanische Verbindungen	235
3.9	Beschichten	235
3.9.1	Einteilung der Beschichtungsverfahren	235
3.9.2	Streichverfahren	236
3.9.3	Pulverbeschichten	237
3.10	Veredeln	238
3.10.1	Lackieren von Kunststoffen	239
3.10.2	Bedrucken von Kunststoffen	239
3.10.3	Laserbeschriften	241
3.10.4	Heißprägen	241
3.10.5	Metallisieren	241
3.10.6	Beflocken	243
3.10.7	Plasmabeschichten	243
3.10.8	Tempern	244
3.10.9	Konditionieren	245
3.10.10	Bestrahlen	245

4 Polyolefine	249
4.1 Polyethylen (PE)	249
4.1.1 Das Wichtigste in Kürze	249
4.1.2 Handelsnamen (Beispiele ^R)	249
4.1.3 Eigenschaften	250
4.1.4 Verarbeitung und Anwendung	251
4.1.5 Anwendungsbeispiele	252
4.1.6 Der Weg zum Polyethylen	253
4.1.6.1 Hochdruckverfahren	253
4.1.6.2 Niederdruckverfahren	254
4.1.7 Der molekulare Aufbau des Polyethylens	256
4.1.7.1 Polyethylene mit multimodaler Molmassen- verteilung	258
4.1.7.2 Ethylen-Copolymere mit α -Olefinen	259
4.1.7.3 Metallocen-katalysierte Ethylencopolymere (PE-MC)	260
4.2 Chemische Modifikation von Polyethylen	260
4.2.1 Abwandlung durch Vernetzen	260
4.2.2 Abwandlung durch chemische Veränderungen	262
4.2.3 Weitere Ethylen-Copolymere	263
4.2.3.1 Unpolare Ethylen-Copolymere	263
4.2.3.2 Polare Ethylen-Copolymere	263
4.3 Polypropylen (PP)	269
4.3.1 Das Wichtigste in Kürze	269
4.3.2 Handelsnamen (Beispiele ^R)	269
4.3.3 Eigenschaften	270
4.3.4 Verarbeitung und Anwendung	271
4.3.5 Anwendungsbeispiele	271
4.3.6 Der Weg zum Polypropylen	272
4.3.7 Der molekulare Aufbau von Polypropylen	273
4.3.7.1 Isotaktisches Polypropylen (iPP)	274
4.3.7.2 Syndiotaktisches Polypropylen (sPP)	274
4.3.7.3 Ataktisches Polypropylen (aPP)	275
4.4 Modifikation von Polypropylen	275
4.4.1 PP-Copolymere	275
4.4.2 Gefüllte und verstärkte Polypropylene	276
4.4.3 Chemische Modifikation am fertigen PP-Polymer	277
4.5 Polyisobutylen (PIB)	277
4.5.1 Handelsnamen (Beispiele ^R)	277
4.5.2 Eigenschaften	277

4.5.3	Verarbeitung (Beispiele)	278
4.5.4	Anwendungsbeispiele	278
4.5.5	Der Weg zum Polyisobutylen	278
4.6	Polybuten-1 (PB)	279
4.6.1	Handelsnamen (Beispiele [®])	279
4.6.2	Eigenschaften, Verarbeitung und Anwendung	279
4.6.3	Der Weg zum Polybuten-1	280
4.7	Poly-4-methylpenten-1 (PMP)	280
4.7.1	Handelsnamen (Beispiel [®])	280
4.7.2	Eigenschaften	280
4.7.3	Verarbeitung (Beispiele)	281
4.7.4	Anwendungsbeispiele	281
4.7.5	Der Weg zum Poly-4-methylpenten-1	281
4.8	Geschichtliches	282
4.9	Tabellarischer Eigenschaftsvergleich	283
5	Chlor-Kunststoffe	287
5.1	Hart-Polyvinylchlorid (PVC-U) (Hart-PVC, weichmacherfreies PVC)	287
5.1.1	Das Wichtigste in Kürze über Hart-Polyvinylchlorid	287
5.1.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	287
5.1.3	Eigenschaften	288
5.1.4	Verarbeitung (Beispiele)	289
5.1.5	Anwendungsbeispiele	290
5.1.6	Der Weg zum Polyvinylchlorid	290
5.2	Modifizierte Vinylchlorid-Polymerisate	294
5.2.1	Vinylchlorid-Copolymere	294
5.2.1.1	Einteilung	294
5.2.1.2	Eigenschaften, Verarbeitung und Anwendung	296
5.2.1.3	Der Weg zu den Vinylchlorid-Copolymeren	296
5.2.2	Besonders schlagfestes Polyvinylchlorid (PVC-HI)	297
5.2.2.1	Eigenschaften, Verarbeitung und Anwendung	297
5.2.2.2	Der Weg zum besonders schlagfesten Polyvinylchlorid	297
5.2.3	Chloriertes Polyvinylchlorid (PVC-C)	298
5.2.3.1	Eigenschaften, Verarbeitung und Anwendung	298
5.2.3.2	Der Weg zum chlorierten Polyvinylchlorid	299
5.3	Weich-Polyvinylchlorid (PVC-P) (Weich-PVC, weichmacherhaltiges PVC)	299
5.3.1	Das Wichtigste in Kürze über Weich-Polyvinylchlorid	299
5.3.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	300

5.3.3	Eigenschaften	300
5.3.4	Verarbeitung (Beispiele)	301
5.3.5	Anwendungsbeispiele	301
5.3.6	Der Weg zum Weich-Polyvinylchlorid	302
5.3.6.1	Weichmacher	302
5.3.6.2	Einarbeitung von Weichmachern	304
5.4	Chloriertes Polyethylen (PE-C)	306
5.4.1	Eigenschaften, Verarbeitung und Anwendung	306
5.4.2	Der Weg zum chlorierten Polyethylen	306
5.5	Polyvinylidenchlorid (PVDC)	307
5.5.1	Das Wichtigste in Kürze	307
5.5.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	308
5.5.3	Eigenschaften, Verarbeitung und Anwendung von Vinylidenchlorid-Copolymerisaten	308
5.5.4	Der Weg zu den Vinylidenchlorid-Copolymerisaten	308
5.6	Geschichtliches	309
5.7	Tabellarischer Eigenschaftsvergleich	309
6	Polystyrol-Kunststoffe	313
6.1	Das Wichtigste in Kürze über Polystyrol-Kunststoffe	313
6.2	Polystyrol (PS)	314
6.2.1	Handelsnamen (Beispiele [®])	314
6.2.2	Ataktisches Polystyrol	314
6.2.2.1	Eigenschaften	314
6.2.2.2	Verarbeitung (Beispiele)	315
6.2.2.3	Anwendungsbeispiele	315
6.2.2.4	Der Weg zum Polystyrol	315
6.2.3	Stereoreguläre Polystyrole	317
6.3	Modifizierte Styrolpolymere (Abschnitt 6.4 bis 6.8)	318
6.4	Styrol-Acrylnitril-Copolymerisat (SAN)	319
6.4.1	Handelsnamen (Beispiele [®])	319
6.4.2	Eigenschaften und Verarbeitung	319
6.4.3	Anwendungsbeispiele	320
6.4.4	Der Weg zum Styrol-Acrylnitril	320
6.5	Schlagzäh modifiziertes Polystyrol (PS-I) (Styrol-Butadien SB)	321
6.5.1	Handelsnamen (Beispiele [®])	321
6.5.2	Eigenschaften	321
6.5.3	Verarbeitung (Beispiele)	322
6.5.4	Anwendungsbeispiele	322
6.5.5	Der Weg zum schlagzähem Polystyrol	322

6.6	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Polymerisate (ABS)	325
6.6.1	Handelsnamen (Beispiele [®])	326
6.6.2	Eigenschaften	326
6.6.3	Verarbeitung (Beispiele)	326
6.6.4	Anwendungsbeispiele	326
6.6.5	Der Weg zum Acrylnitril-Butadien-Styrol	327
6.7	Schlagzähe Acrylnitril-Styrol-Formmassen (ASA, AES, ACS)	329
6.7.1	Handelsnamen (Beispiele [®])	329
6.7.2	Eigenschaften, Verarbeitung und Anwendung von Acrylnitril-Styrol-Acrylat (ASA)	329
6.7.3	Der Weg zum Acrylnitril-Styrol-Acrylat	330
6.8	Blends	331
6.8.1	PS-I + PPE Blends	331
6.8.2	ABS + PC bzw. ASA + PC Blends	331
6.8.3	ABS + PA Blends	332
6.9	Geschichtliches zu den Styrolpolymeren	332
6.10	Tabellarischer Eigenschaftsvergleich	333
7	Ester-Thermoplaste	339
7.1	Ester-Gruppe in der Hauptkette	340
7.1.1	Polyalkylenterephthalate („gesättigte“ Polyester) (PET, PBT) und Polyethylenaphthalat (PEN)	340
7.1.1.1	Das Wichtigste in Kürze über Polyalkylenterephthalate	340
7.1.1.2	Der Weg zu den Polyalkylenterephthalaten	340
7.1.1.3	Polyethylenerephthalat (PET)	342
7.1.1.4	Polybutylenterephthalat (PBT)	344
7.1.1.5	Modifizierte Polyalkylenterephthalate	345
7.1.1.6	Polyethylenaphthalat (PEN)	346
7.1.1.7	Geschichtliches	346
7.1.2	Polycarbonat (PC)	347
7.1.2.1	Das Wichtigste in Kürze über Polycarbonat	347
7.1.2.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	347
7.1.2.3	Eigenschaften	348
7.1.2.4	Verarbeitung (Beispiele)	348
7.1.2.5	Anwendungsbeispiele	348
7.1.2.6	Der Weg zum Polycarbonat	349
7.1.2.7	Modifizierte Polycarbonate	351
7.1.2.8	Geschichtliches	353

7.1.3	Polyestercarbonat (PEC)	353
7.1.3.1	Das Wichtigste in Kürze	353
7.1.3.2	Handelsnamen (Beispiele ^R)	353
7.1.3.3	Eigenschaften	353
7.1.3.4	Verarbeitung (Beispiele)	354
7.1.3.5	Anwendungsbeispiele	354
7.1.3.6	Der Weg zu Polyestercarbonat	354
7.1.3.7	Geschichtliches	355
7.2	Ester in der Seitenkette	355
7.2.1	Polymethylmethacrylat (PMMA)	355
7.2.1.1	Das Wichtigste in Kürze	355
7.2.1.2	Handelsnamen (Beispiele ^R)	355
7.2.1.3	Eigenschaften	355
7.2.1.4	Verarbeitung (Beispiele)	356
7.2.1.5	Anwendungsbeispiele	356
7.2.1.6	Der Weg zum Polymethylmethacrylat	356
7.2.1.7	Modifizierte Methylmethacrylat-Polymerisate	357
7.2.1.8	Geschichtliches	359
7.3	Celluloseester (CA, CP, CAB)	360
7.3.1	Das Wichtigste in Kürze	360
7.3.2	Handelsnamen (Beispiele ^R)	360
7.3.3	Eigenschaften	360
7.3.4	Verarbeitung (Beispiele)	361
7.3.5	Anwendungsbeispiele	361
7.3.6	Der Weg zu den Celluloseestern	361
7.3.6.1	Der Ausgangsstoff Cellulose	361
7.3.6.2	Chemische Umsetzungen an Cellulose	362
7.3.7	Geschichtliches	363
7.4	Tabellarischer Eigenschaftsvergleich	364
8	Stickstoff-Thermoplaste	373
8.1	Polyamide (PA)	373
8.1.1	Teilkristalline aliphatische Polyamide	373
8.1.1.1	Das Wichtigste in Kürze	373
8.1.1.2	Handelsnamen (Beispiele ^R)	375
8.1.1.3	Eigenschaften	376
8.1.1.4	Verarbeitung (Beispiele)	377
8.1.1.5	Anwendungsbeispiele	378
8.1.1.6	Der Weg zu den teilkristallinen aliphatischen Polyamiden	378
8.1.1.7	Wasserstoffbrücken (H-Brücken)	382

8.1.2	Modifizierte teilkristalline aliphatische Polyamide	383
8.1.2.1	Chemische Modifizierung	383
8.1.2.2	Physikalische Modifizierung	383
8.1.2.3	Anwendungsbeispiele	384
8.1.3	Cycloaliphatische Polyamide	384
8.1.3.1	Das Wichtigste in Kürze	384
8.1.3.2	Handelsnamen (Beispiele ^R)	384
8.1.3.3	Eigenschaften	384
8.1.3.4	Verarbeitung (Beispiele)	385
8.1.3.5	Anwendungsbeispiele	385
8.1.3.6	Der Weg zu den cycloaliphatischen Polyamiden ...	385
8.1.4	Teilaromatische Polyamide	386
8.1.4.1	Das Wichtigste in Kürze	386
8.1.4.2	Handelsnamen (Beispiele ^R)	388
8.1.4.3	Eigenschaftsprofil im Vergleich zu Standard-Polyamiden	388
8.1.4.4	Verarbeitung (Beispiele)	388
8.1.4.5	Anwendungsbeispiele	388
8.1.4.6	Der Weg zu den teilaromatischen Polyamiden ...	389
8.1.5	Modifizierung von teilaromatischen Polyamiden	390
8.1.6	Geschichtliches	391
8.2	Polyacrylnitril PAN	392
8.2.1	Das Wichtigste in Kürze	392
8.2.2	Handelsnamen (Beispiel ^R)	392
8.2.3	Eigenschaften von Polyacrylnitril-Barriere-Kunststoffen	392
8.2.4	Verarbeitung und Anwendung (Beispiele)	393
8.2.5	Der Weg zu Polyacrylnitril-Barriere-Kunststoffen	393
8.2.6	PAC-/ PAN-Fasertransformation zu Kohlenstofffasern (C-Fasern)	394
8.2.7	Geschichtliches	395
8.3	Tabellarischer Eigenschaftsvergleich	395
9	Acetal- und Ether-Thermoplaste	403
9.1	Polyoxymethylen (Polyacetal) (POM)	404
9.1.1	Das Wichtigste in Kürze	404
9.1.2	Handelsnamen (Beispiele ^R)	404
9.1.3	Eigenschaften	404
9.1.4	Verarbeitung (Beispiele)	405
9.1.5	Anwendungsbeispiele	405

9.1.6	Der Weg zum Polyoxymethylen	406
9.1.6.1	POM-Homopolymerisat (POM-H)	406
9.1.6.2	POM-Copolymerisate (POM-Cop.)	407
9.1.6.3	Eigenschaftsunterschiede zwischen POM-Homo- und Copolymerisaten	408
9.1.7	Modifizierte Polyoxymethylen-Polymerisate	408
9.1.8	Geschichtliches	409
9.2	Polyphenylenether (PPE)	409
9.2.1	Das Wichtigste in Kürze	409
9.2.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	410
9.2.3	Eigenschaften	410
9.2.4	Verarbeitung (Beispiele)	410
9.2.5	Anwendungsbeispiele	410
9.2.6	Der Weg zum Polyphenylenether	411
9.2.7	Weitere modifizierte Polyphenylenether	412
9.2.8	Geschichtliches	412
9.3	Tabellarischer Eigenschaftsvergleich	412
10	Fluor-Kunststoffe	415
10.1	Polytetrafluorethylen (PTFE)	415
10.1.1	Das Wichtigste in Kürze	415
10.1.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	415
10.1.3	Eigenschaften	415
10.1.4	Verarbeitung (Beispiele)	416
10.1.5	Anwendungsbeispiele	417
10.1.6	Der Weg zum Polytetrafluorethylen	417
10.2	Thermoplastisch verarbeitbare Fluor-Kunststoffe	420
10.2.1	Das Wichtigste in Kürze	420
10.2.2	Fluorthermoplaste und Beispiele [®] von Handelsnamen	421
10.2.3	Eigenschaften	421
10.2.4	Verarbeitung (Beispiele)	421
10.2.5	Anwendungen	422
10.2.5.1	Spezielle Anwendungsbeispiele	422
10.2.6	Der Weg zu den thermoplastisch verarbeitbaren Fluor- Kunststoffen	423
10.2.6.1	Perfluorethylenpropylen FEP, auch Tetrafluor- ethylen-Hexafluorpropylen-Copolymer	423
10.2.6.2	Perfluoroalkoxy-Copolymer (PFA)	423
10.2.6.3	Ethylen-Tetrafluorethylen-Copolymer (ETFE)	424
10.2.6.4	Polyvinylidenfluorid (PVDF)	424

10.2.6.5	Tetrafluorethylen-Hexafluorpropylen-Vinylidenfluorid-Terpolymer TFEHFPVDF (THV)	424
10.2.6.6	Polyvinylfluorid (PVF)	425
10.2.6.7	Polychlortrifluorethylen (PCTFE)	425
10.2.6.8	Ethylen-Chlortrifluorethylen-Copolymer (ECTFE)	425
10.3	Geschichtliches zu den Fluorpolymeren	425
10.4	Tabellarischer Eigenschaftsvergleich	426
11	Duroplaste	429
11.1	Allgemeines über Herstellung und Eigenschaften	429
11.2	Phenoplaste (Phenol-Formaldehyd-Kondensationsharze) (PF)	431
11.2.1	Das Wichtigste in Kürze	431
11.2.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	432
11.2.3	Eigenschaften von PF-Formstoffen	432
11.2.4	Verarbeitung (Beispiele)	434
11.2.5	Anwendungsbeispiele	434
11.2.5.1	Harzformstoffe, Harzformteile	434
11.2.5.2	Schichtpressstoffe	434
11.2.5.3	PF-Harze	434
11.2.6	Der Weg zu den Phenolharzen	435
11.2.7	Geschichtliches	439
11.3	Aminoplaste	439
11.3.1	Harnstoffharze (Harnstoff-Formaldehyd-Kondensationsharze) (UF)	439
11.3.1.1	Das Wichtigste in Kürze	439
11.3.1.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	439
11.3.1.3	Eigenschaften	440
11.3.1.4	Verarbeitung, Anwendung (Beispiele)	441
11.3.1.5	Der Weg zum Harnstoffharz	441
11.3.2	Melaminharze (Melamin-Formaldehyd-Kondensationsharze) (MF)	443
11.3.2.1	Das Wichtigste in Kürze	443
11.3.2.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	443
11.3.2.3	Eigenschaften	443
11.3.2.4	Verarbeitung, Anwendung (Beispiele)	443
11.3.2.5	Eigenschaften und Anwendung von modifizierten Melaminharzen (Beispiele)	444
11.3.2.6	Der Weg zum Melaminharz	444
11.3.3	Geschichtliches	446
11.4	Reaktionsharz-Duroplaste	446

11.4.1	Ungesättigte Polyesterharze (UP)	446
11.4.1.1	Das Wichtigste in Kürze	446
11.4.1.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	447
11.4.1.3	Eigenschaften	447
11.4.1.4	Verarbeitung (Beispiele)	449
11.4.1.5	Anwendungsbeispiele	450
11.4.1.6	Der Weg zu den ungesättigten Polyesterharzen	451
11.4.1.7	Geschichtliches	455
11.4.2	Vinylesterharze (VE)	455
11.4.2.1	Eigenschaften	455
11.4.2.2	Verarbeitung, Anwendung (Beispiele)	455
11.4.2.3	Der Weg zu den Vinylesterharzen	456
11.4.2.4	Geschichtliches	456
11.4.3	Epoxidharze (EP)	457
11.4.3.1	Das Wichtigste in Kürze	457
11.4.3.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	457
11.4.3.3	Eigenschaften	457
11.4.3.4	Verarbeitung (Beispiele)	458
11.4.3.5	Anwendungsbeispiele	458
11.4.3.6	Der Weg zu den Epoxidharzen	459
11.4.3.7	Geschichtliches	464
11.5	Sonstige Harze	464
11.5.1	Siliconharze	464
11.5.2	Polydiallylphthalatharze (PDAP, PDAIP)	465
11.5.3	PUR-Gießharze	466
11.5.3.1	Elastomer-Gießharze	466
11.5.3.2	Harte PUR-Harze	466
11.5.4	Cyanatester-Harze	467

12 Hochleistungspolymere 469

12.1	Polyaryletherketone (PAEK)	470
12.1.1	Das Wichtigste in Kürze	470
12.1.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	470
12.1.3	Eigenschaften	470
12.1.4	Verarbeitung (Beispiele)	471
12.1.5	Anwendungsbeispiele	472
12.1.6	Der Weg zu den Polyaryletherketonen	472
12.1.7	Geschichtliches	472
12.2	Polyarylate (PAR)	473
12.2.1	Das Wichtigste in Kürze	473

12.2.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	473
12.2.3	Eigenschaften	473
12.2.4	Verarbeitung (Beispiele)	474
12.2.5	Anwendungsbeispiele	474
12.2.6	Der Weg zu den Polyarylaten	475
12.2.7	Geschichtliches	476
12.3	Flüssigkristalline Polymere (LCP)	476
12.3.1	Das Wichtigste in Kürze	476
12.3.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	476
12.3.3	Eigenschaften	476
12.3.3.1	Aufbau und Struktur der LCP	476
12.3.3.2	Eigenschaften von thermotropen LCP	478
12.3.4	Verarbeitung (Beispiele)	479
12.3.5	Anwendungsbeispiele	479
12.3.6	Der Weg zu den flüssigkristallinen Polymeren	480
12.3.6.1	Herstellung der lyotropen LCP	480
12.3.6.2	Herstellung der thermotropen LCP	481
12.3.7	Geschichtliches	482
12.4	Polyimide (PI)	482
12.4.1	Das Wichtigste in Kürze	482
12.4.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	483
12.4.3	Eigenschaften	483
12.4.4	Verarbeitung (Beispiele)	485
12.4.5	Anwendungsbeispiele	485
12.4.6	Der Weg zu den Polyimiden	485
12.4.7	Geschichtliches	490
12.5	Polyarylsulfone (PSU, PES, PPSU)	491
12.5.1	Das Wichtigste in Kürze	491
12.5.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	491
12.5.3	Eigenschaften	492
12.5.4	Verarbeitung (Beispiele)	492
12.5.5	Anwendungsbeispiele	492
12.5.6	Der Weg zu den Polyarylsulfonen	493
12.5.7	Geschichtliches	494
12.6	Polyphenylensulfid (PPS)	495
12.6.1	Das Wichtigste in Kürze	495
12.6.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	495
12.6.3	Eigenschaften	495
12.6.4	Verarbeitung (Beispiele)	496
12.6.5	Anwendungsbeispiele	496

12.6.6	Der Weg zu Polyphenylensulfid	496
12.6.7	Geschichtliches	496
12.7	Tabellarischer Eigenschaftsvergleich	497
13	Elastomere	503
13.1	Permanent vernetzte Elastomere/Gummi	504
13.1.1	Das Wichtigste in Kürze über vernetzte Elastomere	504
13.1.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	506
13.1.3	Eigenschaften	506
13.1.4	Verarbeitung (Beispiele)	508
13.1.5	Anwendungsbeispiele	508
13.1.6	Der Weg zu den permanent vernetzten Elastomeren	509
13.1.7	Geschichtliches	511
13.2	Reversibel vernetzte Elastomere/Thermoplastische Elastomere TPE ...	511
13.2.1	Das Wichtigste in Kürze über TPE	511
13.2.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	514
13.2.3	Allgemeine Eigenschaften	514
13.2.4	Einzeleigenschaften und Anwendungsbeispiele	517
13.2.4.1	Thermoplastische Elastomere auf Olefinbasis, TPE-O/TPE-V (TPO/TPV)	517
13.2.4.2	Thermoplastische Elastomere auf Styrolbasis, TPE-S (TPS)	517
13.2.4.3	Thermoplastische Polyester-Elastomere, TPE-E (TPC)	518
13.2.4.4	Thermoplastische Polyamid-Elastomere, TPE-A (TPA)	518
13.2.4.5	Thermoplastische Polyurethan-Elastomere, TPE-U (TPU)	519
13.2.5	Der Weg zu den thermoplastischen Elastomeren	520
13.2.5.1	TPE-O/TPE-V (TPO/TPV)	520
13.2.5.2	TPE-S (TPS)	521
13.2.5.3	TPE-E (TPC)	521
13.2.5.4	TPE-A (TPA)	521
13.2.5.5	TPE-U (TPU)	522
13.2.6	Geschichtliches	522
14	Schaumstoffe	523
14.1	Allgemeines über Herstellung und Eigenschaften	523
14.1.1	Handelsnamen (Beispiele [®])	526
14.2	Polystyrol-Schaumstoffe (PS-E)	526
14.2.1	Das Wichtigste in Kürze	526

14.2.2	Polystyrol-Hartschaumstoff, Partikel-Schaumstoff	526
14.2.2.1	Eigenschaften	526
14.2.2.2	Verarbeitung	527
14.2.2.3	Anwendungsbeispiele	527
14.2.3	Polystyrol-Hartschaumstoff, Extruder-Schaumstoff	527
14.2.3.1	Eigenschaften	527
14.2.3.2	Verarbeitung	527
14.2.3.3	Anwendungsbeispiele	527
14.2.4	Polystyrol-Integralschaumstoff	527
14.2.4.1	Eigenschaften	527
14.2.4.2	Verarbeitung (Beispiele)	528
14.2.4.3	Anwendungsbeispiele	528
14.3	Polyolefin-Schaumstoffe, PO-Schaumstoffe	528
14.3.1	Das Wichtigste in Kürze	528
14.3.2	Eigenschaften	528
14.3.3	Verarbeitung (Beispiele)	529
14.3.4	Anwendungsbeispiele	529
14.4	Polyurethan-Schaumstoffe, PUR-Schaumstoffe	529
14.4.1	Das Wichtigste in Kürze	529
14.4.2	PUR-Hartschaumstoffe, (PUR-H)	530
14.4.2.1	Eigenschaften	530
14.4.2.2	Anwendungsbeispiele	530
14.4.3	PUR-Weichschaumstoffe, (PUR-W)	530
14.4.3.1	Eigenschaften	530
14.4.3.2	Anwendungsbeispiele	531
14.4.4	PUR-Halbhart-(semiflexible) Schaumstoffe	531
14.4.4.1	Eigenschaften	531
14.4.4.2	Anwendungsbeispiele	531
14.4.5	PUR-Integral-Hartschaumstoffe, (PUR-I)	531
14.4.5.1	Eigenschaften	531
14.4.5.2	Anwendungsbeispiele	531
14.4.6	PUR-Integral-Halbhart- und Weichschaumstoffe	532
14.4.6.1	Eigenschaften	532
14.4.6.2	Anwendungsbeispiele	532
14.4.7	Der Weg zu den Polyurethan-Schaumstoffen	532
14.4.7.1	Polyurethan-Schäumsysteme	532
14.4.7.2	Chemie der PUR-Schäumsysteme	535
14.4.8	Geschichtliches	538
14.5	Weitere Schaumstoffe	539
14.5.1	Polyvinylchlorid-Schaumstoffe	539

14.5.2	Phenol-Formaldehyd-Schaumstoffe	539
14.5.3	Harnstoff-Formaldehyd-Schaumstoffe	539
14.5.4	Polymethacrylimid-Schaumstoffe	540
14.5.5	Gummi-Schaumstoffe	540
14.6	Tabellarischer Eigenschaftsvergleich	541
15	Kunststoffe als Sonderwerkstoffe	543
15.1	Elektroaktive Kunststoffe	543
15.1.1	Oberflächenbehandlungen	544
15.1.2	Elektrisch leitfähige Compounds	544
15.1.3	Intrinsisch elektrisch leitfähige Polymere	545
15.1.4	Polymere als Elektrete	547
15.1.5	Ferroelektrische Polymere (Piezo- und Pyroelektrizität)	548
15.1.6	Triboelektrizität (Reibungselektrizität)	549
15.2	Funktionskunststoffe	550
15.2.1	Polymere als Datenspeicher	550
15.2.2	Polymere Leuchtdioden, Polymer-LEDs (PLEDs)	551
15.2.3	Polymere Photovoltaik (PPV)	552
15.2.4	Photoresists	554
15.2.5	Brennstoffzellen	555
15.2.6	Hybride Polymersysteme	556
15.3	Nanotechnologie und Kunststoffe	557
15.3.1	Anwendung von Nanoröhren (CNT) als Zusatzstoffe für Kunststoffe	558
15.3.2	Graphen	558
15.3.3	Nanotechnologie als Schrittmacher in die Zukunft	559
15.4	Kunststoffe in der Medizintechnik	560
15.4.1	Polymilchsäure, Polylactid (PLA)	560
15.4.1.1	Das Wichtigste in Kürze	560
15.4.1.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	560
15.4.1.3	Eigenschaften, Verarbeitung, Anwendung	560
15.5	Biopolymere	562
15.5.1	Das Wichtigste in Kürze	562
15.5.2	Biokunststoffe – Kunststoffe aus nachwachsenden (biogenen) Rohstoffen (NWR)	563
15.5.2.1	Handelsnamen (Beispiele [®])	563
15.5.2.2	Cellulosewerkstoffe	564
15.5.2.3	Stärkewerkstoffe	565
15.5.2.4	Werkstoffe aus dem Bioreaktor	566
15.5.2.5	Werkstoffe durch chemische Synthese biobasierter Rohstoffe	568

15.5.2.6	Biocomposites als Werkstoffe	568
15.5.2.7	Blends als Werkstoffe	568
15.5.3	Biologisch abbaubare Kunststoffe (BAK)	569
15.5.3.1	Biokunststoffe neu definiert	569
15.5.4	Anwendungsbeispiele und Ausblick	569
16	Arbeitssicherheit, Gesundheits- und Umweltschutz beim Umgang mit Kunststoffen	571
16.1	Arbeitssicherheit und Gesundheitsschutz beim Umgang mit Kunststoffen	571
16.1.1	Gewerbetoikologische Begriffe (Auswahl)	571
16.1.2	Herstellung von Polymeren und Kunststoff-Formmassen ...	571
16.1.3	Verarbeitung und Prüfung von Kunststoffen	572
16.1.4	Anwendung von Kunststoffen	573
16.2	Umweltschutz beim Umgang mit Kunststoffen	574
16.2.1	Nachhaltige Entwicklung	574
16.2.2	Abfall- und Recyclinghierarchie	574
16.2.3	Grundsätzliche Aspekte beim Recycling von Kunststoffen ...	575
16.2.4	Recyclingkreisläufe von Kunststoffen	575
16.3	Abfallwirtschaft und Recycling aus Sicht der Kunststoffindustrie	576
16.3.1	Werkstoffliches Recycling	576
16.3.2	Rohstoffliches Recycling	577
16.3.2.1	Petrochemische Verfahren	578
16.3.2.2	Solvolytische Verfahren	578
16.3.2.3	Hochofenprozess	580
16.3.3	Energetische Nutzung	580
16.3.4	Deponie	582
16.3.5	Littering alias Vermüllung	583
16.3.6	Codierung erleichtert Recycling	584
16.4	Abbaufähige, resorbierbare Kunststoffe	584
16.4.1	Biologisch abbaubare Polymere (BAP)	584
16.4.2	Photoabbaubare Polymere	585
16.4.3	Wasserlösliche Polymere	585
17	Literaturverzeichnis	587
	Sachwortverzeichnis	591