

# Inhalt

<b>Vorwort</b> . . . . .	V
<b>Hinweise zur Benutzung des Buches</b> . . . . .	VII
<b>1 Einführung</b> . . . . .	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 . . . . .	6
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) . . . . .	11
1.4 Zukunft der Kunststoffe – Prognosen . . . . .	22
1.4.1 Pro-Kopf-Verbrauch von Kunststoff-Werkstoffen . . . . .	23
1.4.2 Erwartungen an Polymere . . . . .	23
1.4.3 Zukünftige Rohstoffquellen . . . . .	24
<b>2 Grundlagen</b> . . . . .	27
2.1 Was sind Kunststoffe . . . . .	28
2.1.1 Einteilung der Kunststoffe . . . . .	31
2.1.2 Makromolekül-Architektur/Topologie . . . . .	31
2.2 Bildungsreaktionen für Makromoleküle – Polyreaktionen . . . . .	34
2.2.1 Kettenpolymerisation . . . . .	35
2.2.1.1 Radikalische Kettenpolymerisation . . . . .	36
2.2.1.2 Kationische Kettenpolymerisation . . . . .	40
2.2.1.3 Anionische Kettenpolymerisation . . . . .	41
2.2.1.4 Koordinative Kettenpolymerisation/Polyinsertion . . . . .	43

2.2.1.5	Homo- und Copolymerisate . . . . .	45
2.2.1.6	Chemische Vernetzung durch Kettencopolymerisation . . . . .	45
2.2.1.7	Verfahrenstechnik der Kettenpolymerisation . . . . .	46
2.2.1.8	Plasmapolymerisation . . . . .	51
2.2.2	Kondensationspolymerisation (Polykondensation) . . . . .	51
2.2.3	Additionspolymerisation (Polyaddition) . . . . .	54
2.2.4	Verfahrenstechnik der Kondensationspolymerisation und Additionspolymerisation . . . . .	56
2.2.5	Einteilung nach dem Typ der Aufbaureaktionen . . . . .	57
2.2.6	Chemische Umsetzungen an Makromolekülen . . . . .	58
2.2.6.1	Vergrößerung des Polymerisationsgrads . . . . .	58
2.2.6.2	Beibehaltung des Polymerisationsgrads . . . . .	58
2.2.6.3	Verringerung des Polymerisationsgrads . . . . .	58
2.2.6.4	Chemische Umsetzungen an makromolekularen Naturstoffen . . . . .	59
2.3	Bindungskräfte in makromolekularen Systemen . . . . .	59
2.3.1	Hauptvalenzbindungen . . . . .	60
2.3.2	Nebervalenzbindungen . . . . .	63
2.3.3	Ionenbindungen . . . . .	66
2.3.4	Mechanische Bindungen . . . . .	66
2.4	Strukturmerkmale von Kunststoffen . . . . .	67
2.4.1	Chemische Struktur . . . . .	68
2.4.1.1	Konstitution . . . . .	68
2.4.1.2	Konfiguration . . . . .	74
2.4.2	Festkörperstruktur . . . . .	76
2.4.2.1	Räumliche Anordnung eines Makromoleküls . . . . .	76
2.4.2.2	Räumliche Anordnung mehrerer Makromoleküle zu einem Verband . . . . .	77
2.4.2.3	Kristallinität . . . . .	80
2.4.3	Mittlere Molmasse $\bar{M}$ und Molmassenverteilung . . . . .	81
2.4.3.1	Kettenlänge . . . . .	81
2.4.3.2	Molmasse $M$ bei niedermolekularen Verbindungen . . . . .	82
2.4.3.3	Mittlere Molmasse $\bar{M}$ und Molmassenverteilung bei hochmolekularen Verbindungen . . . . .	82
2.4.3.4	Mittlerer Polymerisationsgrad . . . . .	84
2.4.3.5	Beeinflussung von Eigenschaften durch die mittlere Molmasse . . . . .	84
2.5	Modifizierung von Polymeren und Kunststoffen . . . . .	86
2.5.1	Chemisches Modifizieren von Polymeren . . . . .	86
2.5.1.1	Steuerung von Synthesereaktionen . . . . .	86
2.5.1.2	Copolymerisation . . . . .	86
2.5.1.3	Andere chemische Modifikationen . . . . .	87
2.5.2	Physikalische Modifizierung von Polymeren und Kunststoffen . . . . .	87
2.5.2.1	Polymergemische und Polymerblends . . . . .	87
2.5.2.2	Erhöhung der Ordnung in Polymeren . . . . .	87

2.5.3	Modifizieren mit Zusatzstoffen (Additive)	89
2.5.3.1	Füllstoffe	91
2.5.3.2	Verstärkungsstoffe	91
2.5.3.3	Weichmacher	92
2.5.3.4	Treibmittel	93
2.5.3.5	Farbmittel	93
2.5.3.6	Stabilisatoren	94
2.5.3.7	Flammhemmende Zusätze	94
2.5.3.8	Weitere Additivgruppen	95
2.6	Wichtige Eigenschaften der Kunststoffe	96
2.6.1	Fließverhalten (Rheologie) von Kunststoff-Schmelzen	96
2.6.1.1	Viskositätsfunktionen von Thermoplastschmelzen	98
2.6.1.2	Zeitverhalten von thermisch instabilen Thermoplast-Schmelzen und reagierenden Formmassen	101
2.6.2	Thermisch-mechanisches Verhalten	103
2.6.2.1	Thermoplaste	103
2.6.2.2	Elastomere und Duroplaste	105
2.6.3	Chrono-mechanisches Verhalten	107
2.6.4	Verhalten gegen Umwelteinflüsse	110
2.6.4.1	Chemische Beständigkeit	110
2.6.4.2	Alterung und Technoklima	112
2.7	Wirtschaftsdaten und Grafiken zu Kunststoffen	114
2.7.1	Einteilung der Kunststoffe nach Produktion, Verbrauch und Wachstum	114
2.7.2	Einteilung der Kunststoffe nach ihren Einsatzgebieten und Anwendungsmöglichkeiten	115
<b>3</b>	<b>Technologie der Verarbeitung von Kunststoffen</b>	<b>119</b>
3.1	Allgemeines	119
3.2	Begriffe und Einteilung der Fertigungsverfahren nach DIN 8850	120
3.3	Prinzip der wichtigsten Ver- und Bearbeitungsverfahren	121
3.4	Aufbereitung	122
3.4.1	Einteilung der Aufbereitungsverfahren	123
3.4.1.1	Mischen	124
3.4.1.2	Granulieren	126
3.4.1.3	Zerkleinern	127
3.4.1.4	Vortrocknen	128
3.5	Urformen	128
3.5.1	Extrudieren (Strangpressen)	129
3.5.1.1	Aufbau eines Extruders	130
3.5.1.2	Beispiele typischer Extrusionsanlagen	135
3.5.2	Blasformen	139
3.5.2.1	Extrusionsblasformen	140
3.5.2.2	Extrusions-Streckblasformen	142

3.5.2.3	Spritzblasformen . . . . .	143
3.5.2.4	Spritz-Streckblasformen . . . . .	143
3.5.3	Spritzgießen . . . . .	144
3.5.3.1	Verfahrenstechnik beim Spritzgießen . . . . .	144
3.5.3.2	Spritzgießmaschine . . . . .	146
3.5.3.3	Qualitätsmerkmale von Spritzgießformteilen . . . . .	147
3.5.3.4	Sonderverfahren der Spritzgießtechnik. . . . .	149
3.5.3.5	Spritzgießen von vernetzenden Polymeren . . . . .	153
3.5.4	Pressen, Spritzpressen, Schichtpressen . . . . .	154
3.5.4.1	Pressen von Duroplasten . . . . .	154
3.5.4.2	Pressen von Thermoplasten . . . . .	156
3.5.4.3	Spritzpressen von Duroplasten . . . . .	156
3.5.4.4	Schichtpressen von Duroplasten . . . . .	156
3.5.5	Kalandrieren . . . . .	157
3.5.5.1	Bauarten des Kalanders . . . . .	157
3.5.5.2	Verfahrenstechnik beim Kalandrieren . . . . .	157
3.5.6	Spinnverfahren . . . . .	159
3.5.6.1	Grundlagen des Spinnprozesses . . . . .	160
3.5.6.2	Herstellung von Chemiefasern . . . . .	160
3.5.6.3	Textile Definitionen . . . . .	165
3.5.6.4	Textile Flächegebilde . . . . .	166
3.5.7	FVK-Urformen . . . . .	167
3.5.7.1	Prepregverarbeitung . . . . .	167
3.5.7.2	Faserspritzen . . . . .	167
3.5.7.3	Faserwickeln . . . . .	167
3.5.7.4	Pultrusion . . . . .	169
3.5.7.5	RTM-Verfahren . . . . .	169
3.5.7.6	Handlaminieren . . . . .	169
3.5.8	Schäumen . . . . .	170
3.5.8.1	Herstellung eines Schaumstoffes . . . . .	172
3.5.8.2	Einteilung der Schäumverfahren . . . . .	173
3.5.8.3	Polystyrol-Schaumstoffe . . . . .	174
3.5.8.4	Polyurethan-Schaumstoffe . . . . .	176
3.5.9	Gießen . . . . .	181
3.5.9.1	Vakuumgießen . . . . .	182
3.5.9.2	Rotationsformen (Rotationsgießen) . . . . .	184
3.5.9.3	Schleuderverfahren (Schleudergießen) . . . . .	185
3.5.9.4	Filmgießen (Foliengießen) . . . . .	185
3.5.9.5	Einbetten, Imprägnieren, Tränken . . . . .	186
3.5.10	Tauchformen . . . . .	186
3.5.11	Rapid Prototyping (RP) . . . . .	187

3.6	Umformen . . . . .	189
3.6.1	Unterschiede im Warmformbereich zwischen amorphen und teilkristallinen Thermoplasten . . . . .	189
3.6.2	Einteilung der Warmformverfahren für Thermoplaste . . . . .	189
3.6.2.1	Biegeumformen . . . . .	190
3.6.2.2	Zugumformen . . . . .	191
3.6.2.3	Druckumformen . . . . .	191
3.6.2.4	Zugdruckumformen . . . . .	192
3.6.2.5	Kombinierte Verfahren . . . . .	192
3.6.3	Verfahrenstechnik beim Warmformen . . . . .	193
3.6.4	Thermoformmaschinen . . . . .	194
3.6.5	Vor- und Nachteile des Warmformens . . . . .	196
3.7	Trennen (Spanen) . . . . .	196
3.8	Fügen . . . . .	198
3.8.1	Schweißen . . . . .	198
3.8.1.1	Heizelementschweißen . . . . .	201
3.8.1.2	Wargassschweißen . . . . .	201
3.8.1.3	Strahlungsschweißen . . . . .	201
3.8.1.4	Reibungsschweißen . . . . .	201
3.8.1.5	Induktionsschweißen . . . . .	203
3.8.2	Kleben . . . . .	203
3.8.2.1	Grundlagen . . . . .	203
3.8.2.2	Abbindemechanismus der Klebung . . . . .	204
3.8.2.3	Verfahrenstechnik . . . . .	205
3.8.3	Mechanische Verbindungen . . . . .	206
3.9	Beschichten . . . . .	206
3.9.1	Einteilung der Beschichtungsverfahren . . . . .	206
3.9.2	Streichverfahren . . . . .	206
3.9.3	Pulverbeschichten . . . . .	208
3.10	Veredeln . . . . .	209
3.10.1	Lackieren von Kunststoffen . . . . .	209
3.10.2	Bedrucken von Kunststoffen . . . . .	210
3.10.3	Laserbeschriften . . . . .	211
3.10.4	Heißprägen . . . . .	211
3.10.5	Metallisieren . . . . .	212
3.10.6	Beflocken . . . . .	213
3.10.7	Plasmabeschichten . . . . .	213
3.10.8	Tempern . . . . .	215
3.10.9	Konditionieren . . . . .	215
3.10.10	Bestrahlen . . . . .	216

<b>4 Polyolefine</b>	219
4.1 Polyethylen PE	219
4.1.1 Das Wichtigste in Kürze	219
4.1.2 Handelsnamen (Beispiele)	219
4.1.3 Eigenschaften	220
4.1.4 Verarbeitung (Beispiele)	221
4.1.5 Anwendungsbeispiele	222
4.1.6 Der Weg zum Polyethylen	222
4.1.6.1 Hochdruckverfahren	223
4.1.6.2 Niederdruckverfahren	224
4.1.7 Der molekulare Aufbau des Polyethylens	225
4.2 Modifizierte Ethylen-Polymerisate	227
4.2.1 Unpolare Ethylen-Copolymere	228
4.2.1.1 Ethylen-Copolymere mit $\alpha$ -Olefinen	228
4.2.1.2 Metallocen-katalysierte Ethylen copolymere PE-MC	229
4.2.1.3 Bimodale Copolymere	230
4.2.1.4 Cycloolefin-Copolymere COC	230
4.2.2 Polare Ethylen-Copolymere	231
4.2.2.1 Ethylen-Copolymere mit ungesättigten Estern	231
4.2.2.2 Ethylen-Copolymere mit ungesättigten Alkoholen	233
4.2.2.3 Ethylen copolymere mit ungesättigten Carbonsäuren bzw. ihren Salzen	233
4.2.2.4 Polyketone PK	234
4.2.3 Chemisch abgewandeltes Polyethylen	235
4.2.3.1 Abwandlung durch Vernetzen	235
4.2.3.2 Abwandlung durch chemische Veränderungen	236
4.3 Polypropylen PP	237
4.3.1 Das Wichtigste in Kürze	237
4.3.2 Handelsnamen (Beispiele)	237
4.3.3 Eigenschaften	237
4.3.4 Verarbeitung (Beispiele)	238
4.3.5 Anwendungsbeispiele	238
4.3.6 Der Weg zum Polypropylen	239
4.3.7 Der molekulare Aufbau des Polypropylens	240
4.3.7.1 Isotaktisches Polypropylen (PP-it)	240
4.3.7.2 Syndiotaktisches Polypropylen (PP-st)	241
4.3.7.3 Ataktisches Polypropylen (PP-at)	242
4.4 Modifizierte Propylen-Polymerisate	242
4.4.1 Propylen-Copolymere	243
4.4.1.1 Random-(statistische) Copolymere PP-R	243
4.4.1.2 Heterophasische Copolymere	243
4.4.2 Polymerblends	243
4.4.3 Gefüllte und verstärkte Polypropylene	244

4.4.4	Anwendungsbeispiele von modifizierten Propylenpolymerisaten . . . . .	244
4.4.4.1	Propylen/Ethylen-Copolymerisate . . . . .	244
4.4.4.2	PP/EPM- und PP/EPDM-Werkstoffe . . . . .	244
4.5	Polyisobutylen PIB . . . . .	245
4.5.1	Handelsnamen (Beispiele) . . . . .	245
4.5.2	Eigenschaften . . . . .	245
4.5.3	Verarbeitung (Beispiele) . . . . .	245
4.5.4	Anwendungsbeispiele . . . . .	245
4.5.5	Der Weg zum Polyisobutylen . . . . .	246
4.6	Polybuten-1 PB . . . . .	246
4.6.1	Handelsnamen (Beispiele) . . . . .	246
4.6.2	Eigenschaften, Verarbeitung und Anwendung . . . . .	246
4.6.3	Der Weg zum Polybuten-1 . . . . .	247
4.7	Poly-4-methylpenten-1 PMP . . . . .	248
4.7.1	Handelsname (Beispiel) . . . . .	248
4.7.2	Eigenschaften . . . . .	248
4.7.3	Verarbeitung (Beispiele) . . . . .	248
4.7.4	Anwendungsbeispiele . . . . .	248
4.7.5	Der Weg zum Poly-4-methylpenten-1 . . . . .	248
4.8	Geschichtliches . . . . .	249
4.9	Tabellarischer Eigenschaftsvergleich . . . . .	250
<b>5</b>	<b>Chlor-Kunststoffe . . . . .</b>	<b>255</b>
5.1	Hart-Polyvinylchlorid PVC-U (Hart-PVC, weichmacherfreies PVC) . . . . .	255
5.1.1	Das Wichtigste in Kürze über Hart-Polyvinylchlorid . . . . .	255
5.1.2	Handelsnamen (Beispiele) . . . . .	255
5.1.3	Eigenschaften . . . . .	255
5.1.4	Verarbeitung (Beispiele) . . . . .	257
5.1.5	Anwendungsbeispiele . . . . .	257
5.1.6	Der Weg zum Polyvinylchlorid . . . . .	258
5.2	Modifizierte Vinylchlorid-Polymerisate . . . . .	261
5.2.1	Vinylchlorid-Copolymere . . . . .	261
5.2.1.1	Einteilung . . . . .	261
5.2.1.2	Eigenschaften, Verarbeitung und Anwendung . . . . .	263
5.2.1.3	Der Weg zu den Vinylchlorid-Copolymeren . . . . .	263
5.2.2	Besonders schlagfestes Polyvinylchlorid PVC-HI . . . . .	264
5.2.2.1	Eigenschaften, Verarbeitung und Anwendung . . . . .	264
5.2.2.2	Der Weg zum besonders schlagfesten Polyvinylchlorid . . . . .	264
5.2.3	Chloriertes Polyvinylchlorid PVC-C . . . . .	265
5.2.3.1	Eigenschaften, Verarbeitung und Anwendung . . . . .	265
5.2.3.2	Der Weg zum chlorierten Polyvinylchlorid . . . . .	266

5.3	Weich-Polyvinylchlorid PVC-P (Weich-PVC, weichmacherhaltiges PVC) . . . . .	266
5.3.1	Das Wichtigste in Kürze über Weich-Polyvinylchlorid . . . . .	266
5.3.2	Handelsnamen (Beispiele) . . . . .	267
5.3.3	Eigenschaften . . . . .	267
5.3.4	Verarbeitung (Beispiele) . . . . .	267
5.3.5	Anwendungsbeispiele . . . . .	268
5.3.6	Der Weg zum Weich-Polyvinylchlorid . . . . .	268
	5.3.6.1 Weichmacher . . . . .	269
	5.3.6.2 Einarbeitung von Weichmachern . . . . .	271
5.4	Chloriertes Polyethylen PE-C . . . . .	272
5.4.1	Eigenschaften, Verarbeitung und Anwendung . . . . .	272
5.4.2	Der Weg zum chlorierten Polyethylen . . . . .	272
5.5	Polyvinylidenchlorid PVDC . . . . .	274
5.5.1	Das Wichtigste in Kürze . . . . .	274
5.5.2	Eigenschaften, Verarbeitung und Anwendung von Vinylidenchlorid-Copolymerisaten . . . . .	274
5.5.3	Der Weg zu den Vinylidenchlorid-Copolymerisaten . . . . .	274
5.6	Geschichtliches . . . . .	275
5.7	Tabellarischer Eigenschaftsvergleich . . . . .	275
<b>6</b>	<b>Polystyrol-Kunststoffe</b> . . . . .	<b>279</b>
6.1	Das Wichtigste in Kürze über Polystyrol-Kunststoffe . . . . .	279
6.2	Polystyrol PS . . . . .	280
6.2.1	Handelsnamen (Beispiele) . . . . .	280
6.2.2	Ataktisches Polystyrol . . . . .	280
	6.2.2.1 Eigenschaften . . . . .	280
	6.2.2.2 Verarbeitung (Beispiele) . . . . .	280
	6.2.2.3 Anwendungsbeispiele . . . . .	281
	6.2.2.4 Der Weg zum Polystyrol . . . . .	281
6.2.3	Stereoreguläre Polystyrole . . . . .	283
6.3	Modifizierte Styrolpolymere (Abschnitt 6.4 bis 6.8) . . . . .	284
6.4	Styrol-Acrylnitril-Copolymerisat SAN . . . . .	285
6.4.1	Handelsnamen (Beispiele) . . . . .	285
6.4.2	Eigenschaften und Verarbeitung von Styrol-Acrylnitril . . . . .	285
6.4.3	Anwendungsbeispiele . . . . .	285
6.4.4	Der Weg zum Styrol-Acrylnitril . . . . .	286
6.5	Schlagzäh modifiziertes Polystyrol PS-I (Styrol-Butadien SB) . . . . .	287
6.5.1	Handelsnamen (Beispiele) . . . . .	287
6.5.2	Eigenschaften von schlagzähem Polystyrol (PS-I) . . . . .	287
6.5.3	Verarbeitung (Beispiele) . . . . .	287



6.5.4	Anwendungsbeispiele . . . . .	287
6.5.5	Der Weg zum schlagzähen Polystyrol . . . . .	288
6.6	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Polymerisate ABS . . . . .	291
6.6.1	Handelsnamen (Beispiele) . . . . .	291
6.6.2	Eigenschaften . . . . .	291
6.6.3	Verarbeitung (Beispiele) . . . . .	292
6.6.4	Anwendungsbeispiele . . . . .	292
6.6.5	Der Weg zum Acrylnitril-Butadien-Styrol . . . . .	293
6.7	Schlagzähe Acrylnitril-Styrol-Formmassen ASA, AES, ACS . . . . .	295
6.7.1	Handelsnamen (Beispiele) . . . . .	295
6.7.2	Eigenschaften, Verarbeitung und Anwendung von Acrylnitril-Styrol-Acrylat ASA . . . . .	295
6.7.3	Der Weg zum Acrylnitril-Styrol-Acrylat . . . . .	296
6.8	Blends . . . . .	296
6.8.1	PS-I + PPE Blends . . . . .	296
6.8.2	ABS + PC bzw. ASA + PC Blends . . . . .	297
6.8.3	ABS + PA Blends . . . . .	297
6.9	Geschichtliches zu den Styrolpolymeren . . . . .	298
6.10	Tabellarischer Eigenschaftsvergleich . . . . .	299
<b>7</b>	<b>Ester-Thermoplaste . . . . .</b>	<b>305</b>
7.1	Ester-Gruppe in der Hauptkette . . . . .	306
7.1.1	Polyalkylenterephthalate (gesättigte Polyester) PET und PBT und Polyethylenaphthalat PEN . . . . .	306
7.1.1.1	Das Wichtigste in Kürze über Polyalkylenterephthalate . . . . .	306
7.1.1.2	Der Weg zu den Polyalkylenterephthalaten . . . . .	306
7.1.1.3	Polyethylenerephthalat PET . . . . .	308
7.1.1.4	Polybutylenterephthalat PBT . . . . .	309
7.1.1.5	Modifizierte Polyalkylenterephthalate . . . . .	310
7.1.1.6	Polyethylenaphthalat PEN . . . . .	311
7.1.1.7	Geschichtliches . . . . .	311
7.1.2	Polycarbonat PC . . . . .	312
7.1.2.1	Das Wichtigste in Kürze über Polycarbonat . . . . .	312
7.1.2.2	Handelsnamen (Beispiele) . . . . .	312
7.1.2.3	Eigenschaften . . . . .	312
7.1.2.4	Verarbeitung (Beispiele) . . . . .	313
7.1.2.5	Anwendungsbeispiele . . . . .	313
7.1.2.6	Der Weg zum Polycarbonat . . . . .	314
7.1.2.7	Modifizierte Polycarbonate . . . . .	316
7.1.2.8	Geschichtliches . . . . .	318
7.1.3	Polyestercarbonat PEC . . . . .	318
7.1.3.1	Das Wichtigste in Kürze . . . . .	318
7.1.3.2	Handelsnamen (Beispiele) . . . . .	318

7.1.3.3	Eigenschaften . . . . .	318
7.1.3.4	Verarbeitung (Beispiele) . . . . .	319
7.1.3.5	Anwendungsbeispiele . . . . .	319
7.1.3.6	Der Weg zu Polyestercarbonat . . . . .	319
7.1.3.7	Geschichtliches . . . . .	320
7.2	Ester in der Seitenkette . . . . .	320
7.2.1	Polymethylmethacrylat PMMA . . . . .	320
7.2.1.1	Das Wichtigste in Kürze . . . . .	320
7.2.1.2	Handelsnamen (Beispiele) . . . . .	320
7.2.1.3	Eigenschaften . . . . .	320
7.2.1.4	Verarbeitung (Beispiele) . . . . .	320
7.2.1.5	Anwendungsbeispiele . . . . .	321
7.2.1.6	Der Weg zum Polymethylmethacrylat . . . . .	321
7.2.1.7	Modifizierte Methylmethacrylat-Polymerisate . . . . .	322
7.2.1.8	Geschichtliches . . . . .	324
7.3	Celluloseester CA, CP, CAB . . . . .	324
7.3.1	Das Wichtigste in Kürze . . . . .	324
7.3.2	Handelsnamen (Beispiele) . . . . .	324
7.3.3	Eigenschaften . . . . .	325
7.3.4	Verarbeitung (Beispiele) . . . . .	325
7.3.5	Anwendungsbeispiele . . . . .	326
7.3.6	Der Weg zu den Celluloseestern . . . . .	326
7.3.6.1	Der Ausgangsstoff Cellulose . . . . .	326
7.3.6.2	Regenerierte Cellulose . . . . .	327
7.3.6.3	Chemische Umsetzungen an Cellulose . . . . .	327
7.3.7	Geschichtliches . . . . .	328
7.4	Tabellarischer Eigenschaftsvergleich . . . . .	329
<b>8</b>	<b>Stickstoff-Thermoplaste . . . . .</b>	<b>337</b>
8.1	Polyamide PA . . . . .	337
8.1.1	Teilkristalline aliphatische Polyamide . . . . .	337
8.1.1.1	Das Wichtigste in Kürze . . . . .	337
8.1.1.2	Handelsnamen (Beispiele) . . . . .	339
8.1.1.3	Eigenschaften . . . . .	339
8.1.1.4	Verarbeitung (Beispiele) . . . . .	341
8.1.1.5	Anwendungsbeispiele . . . . .	341
8.1.1.6	Der Weg zu den teilkristallinen aliphatischen Polyamiden . . . . .	342
8.1.1.7	Wasserstoffbrücken (H-Brücken) . . . . .	345
8.1.2	Modifizierte teilkristalline aliphatische Polyamide . . . . .	346
8.1.2.1	Chemische Modifizierung . . . . .	346
8.1.2.2	Physikalische Modifizierung . . . . .	346
8.1.2.3	Anwendungsbeispiele . . . . .	347

8.1.3	Teilaromatische Polyamide . . . . .	347
8.1.3.1	Das Wichtigste in Kürze . . . . .	347
8.1.3.2	Handelsnamen (Beispiele) . . . . .	348
8.1.3.3	Eigenschaftsprofil im Vergleich zu Standard-Polyamiden . . . . .	348
8.1.3.4	Verarbeitung (Beispiele) . . . . .	349
8.1.3.5	Anwendungsbeispiele . . . . .	349
8.1.3.6	Der Weg zu den teilaromatischen Polyamiden . . . . .	349
8.1.4	Modifizierung von teilaromatischen Polyamiden . . . . .	351
8.1.5	Geschichtliches . . . . .	351
8.2	Polyacrylnitril PAN . . . . .	352
8.2.1	Das Wichtigste in Kürze . . . . .	352
8.2.2	Handelsname (Beispiel) . . . . .	353
8.2.3	Eigenschaften von Polyacrylnitril-Barriere-Kunststoffen . . . . .	353
8.2.4	Verarbeitung und Anwendung (Beispiele) . . . . .	353
8.2.5	Der Weg zu Polyacrylnitril-Barriere-Kunststoffen . . . . .	353
8.2.6	PAC- / PAN-Fasertransformation zu Kohlenstofffasern (C-Fasern) . . . . .	354
8.2.7	Geschichtliches . . . . .	355
8.3	Tabellarischer Eigenschaftsvergleich . . . . .	355
<b>9</b>	<b>Acetal- und Ether-Thermoplaste . . . . .</b>	<b>363</b>
9.1	Polyoxymethylen (Poyacetal) POM . . . . .	364
9.1.1	Das Wichtigste in Kürze . . . . .	364
9.1.2	Handelsnamen (Beispiele) . . . . .	364
9.1.3	Eigenschaften . . . . .	364
9.1.4	Verarbeitung (Beispiele) . . . . .	365
9.1.5	Anwendungsbeispiele . . . . .	365
9.1.6	Der Weg zum Polyoxymethylen . . . . .	365
9.1.6.1	POM-Homopolymerisat POM-H . . . . .	365
9.1.6.2	POM-Copolymerisate POM-Cop . . . . .	367
9.1.6.3	Eigenschaftsunterschiede zwischen POM-Homo-und Copolymerisaten . . . . .	368
9.1.7	Modifizierte Polyoxymethylen-Polymerisate . . . . .	368
9.1.8	Geschichtliches . . . . .	369
9.2	Polyphenylenether PPE . . . . .	369
9.2.1	Das Wichtigste in Kürze . . . . .	369
9.2.2	Handelsnamen (Beispiele) . . . . .	369
9.2.3	Eigenschaften . . . . .	369
9.2.4	Verarbeitung (Beispiele) . . . . .	370
9.2.5	Anwendungsbeispiele . . . . .	370
9.2.6	Der Weg zum Polyphenylenether . . . . .	370
9.2.7	Weitere modifizierte Polyphenylenether . . . . .	371
9.2.8	Geschichtliches . . . . .	372
9.3	Tabellarischer Eigenschaftsvergleich . . . . .	372

<b>10 Fluor-Kunststoffe</b>	375
10.1 Polytetrafluorethylen PTFE	375
10.1.1 Das Wichtigste in Kürze	375
10.1.2 Handelsnamen (Beispiele)	375
10.1.3 Eigenschaften	375
10.1.4 Verarbeitung (Beispiele)	376
10.1.5 Anwendungsbeispiele	376
10.1.6 Der Weg zum Polytetrafluorethylen	377
10.2 Thermoplastisch verarbeitbare Fluor-Kunststoffe	379
10.2.1 Das Wichtigste in Kürze	379
10.2.2 Fluorthermoplaste und Beispiele von Handelsnamen	380
10.2.3 Eigenschaften	380
10.2.4 Verarbeitung (Beispiele)	380
10.2.5 Anwendungen	381
10.2.5.1 Spezielle Anwendungsbeispiele	381
10.2.6 Der Weg zu den thermoplastisch verarbeitbaren Fluor-Kunststoffen	382
10.2.6.1 Perfluorethylenpropylen FEP, auch Tetrafluorethylen-Hexafluorpropylen-Copolymer	382
10.2.6.2 Perfluoroalkoxy-Copolymer PFA	382
10.2.6.3 Ethylen-Tetrafluorethylen-Copolymer ETFE	383
10.2.6.4 Polyvinylidenfluorid PVDF	383
10.2.6.5 Tetrafluorethylen-Hexafluorpropylen-Vinylidenfluorid-Terpolymer TFEHFPVDF (THV)	383
10.2.6.6 Polyvinylfluorid PVF	383
10.2.6.7 Polychlortrifluorethylen PCTFE	384
10.2.6.8 Ethylen-Chlortrifluorethylen-Copolymer ECTFE	384
10.3 Geschichtliches zu den Fluorpolymeren	384
10.4 Tabellarischer Eigenschaftsvergleich	385
<b>11 Duroplaste</b>	389
11.1 Allgemeines über Herstellung und Eigenschaften	389
11.2 Phenoplaste (Phenol-Formaldehyd-Kondensationsharze) PF	391
11.2.1 Das Wichtigste in Kürze	391
11.2.2 Handelsnamen (Beispiele)	392
11.2.3 Eigenschaften von PF-Formstoffen	392
11.2.4 Verarbeitung (Beispiele)	393
11.2.5 Anwendungsbeispiele	394
11.2.5.1 Harzformstoffe, Harzformteile	394
11.2.5.2 Schichtpressstoffe	394
11.2.5.3 PF-Harze	394
11.2.6 Der Weg zu den Phenolharzen	395
11.2.7 Geschichtliches	398

11.3	Aminoplaste . . . . .	399
11.3.1	Harnstoffharze (Harnstoff-Formaldehyd-Kondensationsharze) UF . . . . .	399
11.3.1.1	Das Wichtigste in Kürze . . . . .	399
11.3.1.2	Handelsnamen (Beispiele) . . . . .	399
11.3.1.3	Eigenschaften . . . . .	399
11.3.1.4	Verarbeitung, Anwendung (Beispiele) . . . . .	400
11.3.1.5	Der Weg zum Harnstoffharz . . . . .	401
11.3.2	Melaminharze (Melamin-Formaldehyd-Kondensationsharze) MF . . . . .	402
11.3.2.1	Das Wichtigste in Kürze . . . . .	402
11.3.2.2	Handelsnamen (Beispiele) . . . . .	403
11.3.2.3	Eigenschaften . . . . .	403
11.3.2.4	Verarbeitung, Anwendung (Beispiele) . . . . .	403
11.3.2.5	Eigenschaften und Anwendung von modifizierten Melaminharzen (Beispiele) . . . . .	403
11.3.2.6	Der Weg zum Melaminharz . . . . .	404
11.3.3	Geschichtliches . . . . .	405
11.4	Reaktionsharz-Duroplaste . . . . .	406
11.4.1	Ungesättigte Polyesterharze UP . . . . .	406
11.4.1.1	Das Wichtigste in Kürze . . . . .	406
11.4.1.2	Handelsnamen (Beispiele) . . . . .	406
11.4.1.3	Eigenschaften . . . . .	407
11.4.1.4	Verarbeitung (Beispiele) . . . . .	409
11.4.1.5	Anwendungsbeispiele . . . . .	410
11.4.1.6	Der Weg zu den ungesättigten Polyesterharzen . . . . .	410
11.4.1.7	Geschichtliches . . . . .	414
11.4.2	Vinylesterharze VE . . . . .	414
11.4.2.1	Eigenschaften . . . . .	414
11.4.2.2	Verarbeitung, Anwendung (Beispiele) . . . . .	414
11.4.2.3	Der Weg zu den Vinylesterharzen . . . . .	415
11.4.2.4	Geschichtliches . . . . .	416
11.4.3	Epoxidharze EP . . . . .	416
11.4.3.1	Das Wichtigste in Kürze . . . . .	416
11.4.3.2	Handelsnamen (Beispiele) . . . . .	416
11.4.3.3	Eigenschaften . . . . .	416
11.4.3.4	Verarbeitung (Beispiele) . . . . .	417
11.4.3.5	Anwendungsbeispiele . . . . .	417
11.4.3.6	Der Weg zu den Epoxidharzen . . . . .	418
11.4.3.7	Geschichtliches . . . . .	423
11.5	Sonstige Harze . . . . .	423
11.5.1	Siliconharze . . . . .	423
11.5.2	Polydiallylphthalatharze PDAP, PDAIP . . . . .	424

11.5.3	PUR-Gießharze . . . . .	425
11.5.3.1	Elastomer-Gießharze . . . . .	425
11.5.3.2	Harte PUR-Harze . . . . .	425
11.5.4	Cyanatester-Harze . . . . .	426

**12 Hochleistungspolymere . . . . . 427**

12.1	Polyaryletherketone PAEK . . . . .	428
12.1.1	Das Wichtigste in Kürze . . . . .	428
12.1.2	Handelsnamen (Beispiele) . . . . .	428
12.1.3	Eigenschaften . . . . .	428
12.1.4	Verarbeitung (Beispiele) . . . . .	429
12.1.5	Anwendungsbeispiele . . . . .	429
12.1.6	Der Weg zu den Polyaryletherketonen . . . . .	430
12.1.7	Geschichtliches . . . . .	430
12.2	Polyarylate (PAR) . . . . .	431
12.2.1	Das Wichtigste in Kürze . . . . .	431
12.2.2	Handelsnamen (Beispiele) . . . . .	431
12.2.3	Eigenschaften von PAR . . . . .	431
12.2.4	Verarbeitung (Beispiele) . . . . .	432
12.2.5	Anwendungsbeispiele . . . . .	432
12.2.6	Der Weg zu den Polyarylaten . . . . .	432
12.2.7	Geschichtliches . . . . .	433
12.3	Flüssigkristalline Polymere LCP . . . . .	434
12.3.1	Das Wichtigste in Kürze . . . . .	434
12.3.2	Handelsnamen (Beispiele) . . . . .	434
12.3.3	Eigenschaften . . . . .	434
12.3.3.1	Aufbau und Struktur der LCP . . . . .	434
12.3.3.2	Eigenschaften von thermotropen LCP . . . . .	436
12.3.4	Verarbeitung (Beispiele) . . . . .	437
12.3.5	Anwendungsbeispiele . . . . .	437
12.3.6	Der Weg zu den flüssigkristallinen Polymeren . . . . .	437
12.3.6.1	Herstellung der lyotropen LCP . . . . .	437
12.3.6.2	Herstellung der thermotropen LCP . . . . .	439
12.3.7	Geschichtliches . . . . .	439
12.4	Polyimide PI . . . . .	440
12.4.1	Das Wichtigste in Kürze . . . . .	440
12.4.2	Handelsnamen (Beispiele) . . . . .	440
12.4.3	Eigenschaften . . . . .	440
12.4.4	Verarbeitung (Beispiele) . . . . .	442
12.4.5	Anwendungsbeispiele . . . . .	442
12.4.6	Der Weg zu den Polyimiden . . . . .	442
12.4.7	Geschichtliches . . . . .	447

12.5	Polyarylsulfone PSU, PES, PPSU . . . . .	448
12.5.1	Das Wichtigste in Kürze . . . . .	448
12.5.2	Handelsnamen (Beispiele) . . . . .	448
12.5.3	Eigenschaften von Polysulfonen . . . . .	448
12.5.4	Verarbeitung (Beispiele) . . . . .	449
12.5.5	Anwendungsbeispiele . . . . .	449
12.5.6	Der Weg zu den Polyarylsulfonen . . . . .	450
12.5.7	Geschichtliches . . . . .	451
12.6	Polyphenylsulfid PPS . . . . .	451
12.6.1	Das Wichtigste in Kürze . . . . .	451
12.6.2	Handelsnamen (Beispiele) . . . . .	451
12.6.3	Eigenschaften . . . . .	452
12.6.4	Verarbeitung (Beispiele) . . . . .	452
12.6.5	Anwendungsbeispiele . . . . .	452
12.6.6	Der Weg zu Polyphenylsulfid . . . . .	453
12.6.7	Geschichtliches . . . . .	453
12.7	Tabellarischer Eigenschaftsvergleich . . . . .	453
<b>13</b>	<b>Elastomere . . . . .</b>	<b>459</b>
13.1	Permanent vernetzte Elastomere/Gummi . . . . .	460
13.1.1	Das Wichtigste in Kürze über vernetzte Elastomere . . . . .	460
13.1.2	Handelsnamen (Beispiele) . . . . .	460
13.1.3	Eigenschaften . . . . .	462
13.1.4	Verarbeitung (Beispiele) . . . . .	464
13.1.5	Anwendungsbeispiele . . . . .	464
13.1.6	Der Weg zu den permanent vernetzten Elastomeren . . . . .	464
13.1.7	Geschichtliches . . . . .	467
13.2	Reversibel vernetzte Elastomere/Thermoplastische Elastomere TPE . . . . .	467
13.2.1	Das Wichtigste in Kürze über TPE . . . . .	467
13.2.2	Handelsnamen (Beispiele) . . . . .	469
13.2.3	Allgemeine Eigenschaften . . . . .	469
13.2.4	Einzeleigenschaften und Anwendungsbeispiele . . . . .	472
13.2.4.1	Thermoplastische Elastomere auf Olefinbasis, TPE-O/TPE-V (TPO/TPV) . . . . .	472
13.2.4.2	Thermoplastische Elastomere auf Styrolbasis, TPE-S (TPS) . . . . .	473
13.2.4.3	Thermoplastische Polyester-Elastomere, TPE-E (TPC) . . . . .	473
13.2.4.4	Thermoplastische Polyamid-Elastomere, TPE-A (TPA) . . . . .	474
13.2.4.5	Thermoplastische Polyurethan-Elastomere, TPE-U (TPU) . . . . .	474
13.2.5	Der Weg zu den thermoplastischen Elastomeren. . . . .	475
13.2.5.1	TPE-O/TPE-V (TPO/TPV) . . . . .	476
13.2.5.2	TPE-S (TPS) . . . . .	476

13.2.5.3	TPE-E (TPC)	476
13.2.5.4	TPE-A (TPA)	477
13.2.5.5	TPE-U (TPU)	477
13.2.6	Geschichtliches	477

## 14 Schaumstoffe . . . . . 479

14.1	Allgemeines über Herstellung und Eigenschaften	479
14.1.1	Handelsnamen (Beispiele)	482
14.2	Polystyrol-Schaumstoffe PS-E	482
14.2.1	Das Wichtigste in Kürze	482
14.2.2	Polystyrol-Hartschaumstoff, Partikel-Schaumstoff	482
14.2.2.1	Eigenschaften	482
14.2.2.2	Verarbeitung	482
14.2.2.3	Anwendungsbeispiele	482
14.2.3	Polystyrol-Hartschaumstoff, Extruder-Schaumstoff	483
14.2.3.1	Eigenschaften	483
14.2.3.2	Verarbeitung	483
14.2.3.3	Anwendungsbeispiele	483
14.2.4	Polystyrol-Integralschaumstoff	483
14.2.4.1	Eigenschaften	483
14.2.4.2	Verarbeitung (Beispiele)	483
14.2.4.3	Anwendungsbeispiele.	484
14.3	Polyolefin-Schaumstoffe, PO-Schaumstoffe	484
14.3.1	Das Wichtigste in Kürze	484
14.3.2	Eigenschaften	484
14.3.3	Verarbeitung (Beispiele)	484
14.3.4	Anwendungsbeispiele	484
14.4	Polyurethan-Schaumstoffe, PUR-Schaumstoffe	485
14.4.1	Das Wichtigste in Kürze	485
14.4.2	PUR-Hartschaumstoffe, PUR-H	486
14.4.2.1	Eigenschaften	486
14.4.2.2	Anwendungsbeispiele	486
14.4.3	PUR-Weichschaumstoffe, PUR-W	486
14.4.3.1	Eigenschaften	486
14.4.3.2	Anwendungsbeispiele	486
14.4.4	PUR-Halbhart-(semiflexible) Schaumstoffe	486
14.4.4.1	Eigenschaften	486
14.4.4.2	Anwendungsbeispiele	487
14.4.5	PUR-Integral-Hartschaumstoffe, PUR-I	487
14.4.5.1	Eigenschaften	487
14.4.5.2	Anwendungsbeispiele	487



14.4.6	PUR-Integral-Halbhart- und Weichschaumstoffe . . . . .	487
14.4.6.1	Eigenschaften . . . . .	487
14.4.6.2	Anwendungsbeispiele . . . . .	488
14.4.7	Der Weg zu den Polyurethan-Schaumstoffen . . . . .	488
14.4.7.1	Polyurethan-Schäumsysteme . . . . .	488
14.4.7.2	Chemie der PUR-Schäumsysteme . . . . .	490
14.4.8	Geschichtliches . . . . .	494
14.5	Weitere Schaumstoffe . . . . .	494
14.5.1	Polyvinylchlorid-Schaumstoffe . . . . .	494
14.5.2	Phenol-Formaldehyd-Schaumstoffe . . . . .	494
14.5.3	Harnstoff-Formaldehyd-Schaumstoffe . . . . .	494
14.5.4	Polymethacrylimid-Schaumstoffe . . . . .	495
14.5.5	Gummi-Schaumstoffe . . . . .	495
14.6	Tabellarischer Eigenschaftsvergleich . . . . .	495
<b>15</b>	<b>Kunststoffe als Sonderwerkstoffe . . . . .</b>	<b>497</b>
15.1	Elektrisch leitende Kunststoffe . . . . .	497
15.1.1	Oberflächenbehandlungen . . . . .	497
15.1.2	Elektrisch leitfähige Compounds . . . . .	498
15.1.3	Intrinsisch elektrisch leitfähige Polymere . . . . .	499
15.2	Funktionskunststoffe . . . . .	501
15.2.1	Polymere als Datenspeicher . . . . .	501
15.2.2	Polymere Leuchtdioden, Polymer-LEDs . . . . .	502
15.2.3	Photoresists . . . . .	503
15.3	Kunststoffe in der Medizintechnik . . . . .	505
15.3.1	Polymilchsäure, Polylactid, PLA . . . . .	505
15.4	Kunststoffe aus dem Bioreaktor . . . . .	507
15.4.1	Polyhydroxybuttersäure, Poly- $\beta$ -hydroxybutyrat, PHB . . . . .	507
15.4.2	Schäume aus Naturstoffen . . . . .	508
15.5	Kunststoffe aus nachwachsenden Rohstoffen, NWR . . . . .	508
<b>16</b>	<b>Arbeitssicherheit, Gesundheits- und Umweltschutz beim Umgang mit Kunststoffen . . . . .</b>	<b>511</b>
16.1	Arbeitssicherheit und Gesundheitsschutz beim Umgang mit Kunststoffen . . . . .	511
16.1.1	Gewerbetoxikologische Begriffe (Auswahl) . . . . .	511
16.1.2	Herstellung von Polymeren und Kunststoff-Formmassen . . . . .	511
16.1.3	Verarbeitung und Prüfung von Kunststoffen . . . . .	512
16.1.4	Anwendung von Kunststoffen . . . . .	513
16.2	Umweltschutz beim Umgang mit Kunststoffen . . . . .	513
16.2.1	Nachhaltige Entwicklung . . . . .	513
16.2.2	Recyclinghierarchie . . . . .	514
16.2.3	Grundsätzliche Aspekte beim Recycling von Kunststoffen . . . . .	514
16.2.4	Recyclingkreisläufe von Kunststoffen . . . . .	514

16.3	Abfallwirtschaft und Recycling aus Sicht der Kunststoffindustrie . . . . .	515
16.3.1	Werkstoffliches Recycling . . . . .	515
16.3.2	Rohstoffliches Recycling . . . . .	516
16.3.2.1	Petrochemische Verfahren . . . . .	516
16.3.2.2	Solvolytische Verfahren . . . . .	517
16.3.2.3	Hochofenprozess . . . . .	517
16.3.3	Energetische Nutzung . . . . .	519
16.3.4	Deponie . . . . .	520
16.4	Abbaufähige, resorbierbare Kunststoffe . . . . .	520
16.4.1	Biologisch abbaubare Polymere . . . . .	520
16.4.2	Photoabbaubare Polymere . . . . .	521
16.4.3	Wasserlösliche Polymere . . . . .	521
<b>17</b>	<b>Literaturverzeichnis . . . . .</b>	<b>523</b>
<b>18</b>	<b>Sachwortverzeichnis . . . . .</b>	<b>525</b>