

# HANSER

Inhaltsverzeichnis

Wolfgang Kaiser

Kunststoffchemie für Ingenieure

Von der Synthese bis zur Anwendung

ISBN: 978-3-446-43047-1

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser.de/978-3-446-43047-1>

sowie im Buchhandel.

# Inhalt

<b>Vorwort zur dritten Auflage</b> .....	V
<b>Vorwort</b> .....	VI
<b>Hinweise zur Benutzung des Buches</b> .....	IX
<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 .....	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) .....	11
1.4 Zukunft der Kunststoffe – Prognosen .....	22
1.4.1 Pro-Kopf-Verbrauch von Kunststoff-Werkstoffen .....	23
1.4.2 Erwartungen an Polymere .....	24
1.4.3 Zukünftige Rohstoffquellen .....	24
1.5 Wirtschaftsdaten und Grafiken zu Kunststoffen .....	27
1.5.1 Einteilung der Kunststoffe nach Bedarf und Anwendungs- gebieten .....	27
1.5.1 Einteilung der Kunststoffe nach ihrem Eigenschaftsprofil .....	29
<b>2 Grundlagen</b> .....	31
2.1 Was sind Kunststoffe .....	32

2.1.1	Einteilung der Kunststoffe .....	35
2.1.2	Makromolekül-Architektur/Topologie .....	35
2.2	Bildungsreaktionen für Makromoleküle – Polyreaktionen .....	39
2.2.1	Kettenpolymerisation .....	39
2.2.1.1	Radikalische Kettenpolymerisation .....	40
2.2.1.2	Kationische Kettenpolymerisation .....	44
2.2.1.3	Anionische Kettenpolymerisation .....	46
2.2.1.4	Koordinative Kettenpolymerisation/Polyinsertion ..	47
2.2.1.5	Homo- und Copolymerisate .....	49
2.2.1.6	Chemische Vernetzung durch Kettencopolymerisation .....	50
2.2.1.7	Verfahrenstechnik der Kettenpolymerisation .....	51
2.2.1.8	Plasmapolymerisation .....	55
2.2.2	Kondensationspolymerisation (Polykondensation) .....	56
2.2.3	Additionspolymerisation (Polyaddition) .....	59
2.2.4	Verfahrenstechnik der Kondensationspolymerisation und Additionspolymerisation .....	60
2.2.5	Einteilung nach dem Typ der Aufbaureaktionen .....	62
2.2.6	Chemische Umsetzungen an Makromolekülen .....	62
2.2.6.1	Vergrößerung des Polymerisationsgrads .....	63
2.2.6.2	Beibehaltung des Polymerisationsgrads .....	63
2.2.6.3	Verringerung des Polymerisationsgrads .....	63
2.2.6.4	Chemische Umsetzungen an makromolekularen Naturstoffen .....	64
2.3	Bindungskräfte in makromolekularen Systemen .....	64
2.3.1	Hauptvalenzbindungen .....	65
2.3.2	Nebervalenzbindungen .....	68
2.3.3	Ionenbindungen .....	71
2.3.4	Mechanische Bindungen .....	72
2.4	Strukturmerkmale von Kunststoffen .....	73
2.4.1	Chemische Struktur .....	73
2.4.1.1	Konstitution .....	74
2.4.1.2	Konfiguration .....	79
2.4.2	Festkörperstruktur .....	81
2.4.2.1	Räumliche Anordnung eines Makromoleküls .....	82
2.4.2.2	Räumliche Anordnung mehrerer Makromoleküle zu einem Verband .....	83
2.4.2.3	Kristallinität .....	85
2.4.3	Mittlere Molmasse $\bar{M}$ und Molmassenverteilung .....	86
2.4.3.1	Kettenlänge .....	87
2.4.3.2	Molmasse $M$ bei niedermolekularen Verbindungen ..	88

2.4.3.3	Mittlere Molmasse $\bar{M}$ und Molmassenverteilung bei hochmolekularen Verbindungen . . . . .	88
2.4.3.4	Mittlerer Polymerisationsgrad . . . . .	90
2.4.3.5	Beeinflussung von Eigenschaften durch die mittlere Molmasse . . . . .	90
2.5	Modifizierung von Polymeren und Kunststoffen . . . . .	91
2.5.1	Chemisches Modifizieren von Polymeren . . . . .	92
2.5.1.1	Steuerung von Synthesereaktionen . . . . .	92
2.5.1.2	Copolymerisation . . . . .	92
2.5.1.3	Andere chemische Modifikationen . . . . .	93
2.5.2	Physikalische Modifizierung von Polymeren und Kunststoffen . . . . .	93
2.5.2.1	Polymergemische und Polymerblends . . . . .	93
2.5.2.2	Erhöhung der Ordnung in Polymeren . . . . .	94
2.5.3	Modifizieren mit Zusatzstoffen (Additive) . . . . .	95
2.5.3.1	Füllstoffe . . . . .	97
2.5.3.2	Verstärkungsstoffe . . . . .	97
2.5.3.3	Weichmacher . . . . .	98
2.5.3.4	Treibmittel . . . . .	99
2.5.3.5	Farbmittel . . . . .	99
2.5.3.6	Stabilisatoren . . . . .	100
2.5.3.7	Flammhemmende Zusätze . . . . .	100
2.5.3.8	Weitere Additivgruppen . . . . .	101
2.6	Wichtige Eigenschaften der Kunststoffe . . . . .	102
2.6.1	Fließverhalten (Rheologie) von Kunststoff-Schmelzen . . . . .	102
2.6.1.1	Viskositätsfunktionen von Thermoplastschmelzen . . . . .	104
2.6.1.2	Zeitverhalten von thermisch instabilen Thermoplast-Schmelzen und reagierenden Formmassen . . . . .	107
2.6.2	Thermisch-mechanisches Verhalten . . . . .	109
2.6.2.1	Thermoplaste . . . . .	109
2.6.2.2	Elastomere und Duroplaste . . . . .	112
2.6.3	Chrono-mechanisches Verhalten . . . . .	114
2.6.4	Verhalten gegen Umwelteinflüsse . . . . .	116
2.6.4.1	Chemische Beständigkeit . . . . .	116
2.7	Alterung und Alterungsschutz . . . . .	119
2.7.1	Alterung und Alterungsvorgänge . . . . .	119
2.7.1.1	Chemische Alterungsvorgänge . . . . .	120
2.7.1.2	Physikalische Alterungsvorgänge . . . . .	122
2.7.2	Alterungsschutz . . . . .	123
2.8	Chemische Reaktionen bei der Kunststoffverarbeitung . . . . .	126
2.8.1	Chemische Reaktionen im Aufgabenbereich des Verarbeiters . . . . .	127

2.8.1.1	Gezielte chemische Reaktionen während der Verarbeitung.....	127
2.8.1.2	Unerwünschte chemische Reaktionen während der Verarbeitung als Begleiterscheinung.....	128
2.8.1.3	Chemische Reaktionen außerhalb der Verarbeitung, jedoch vom Verarbeiter durch Zugabe von Hilfsmitteln beeinflussbar.....	128
2.8.2	Kunststoffherzeugung beim Verarbeiter.....	128
<b>3</b>	<b>Technologie der Verarbeitung von Kunststoffen.....</b>	<b>131</b>
3.1	Allgemeines.....	131
3.2	Begriffe und Einteilung der Fertigungsverfahren nach DIN 8850.....	132
3.3	Prinzip der wichtigsten Ver- und Bearbeitungsverfahren.....	133
3.4	Aufbereitung.....	134
3.4.1	Einteilung der Aufbereitungsverfahren.....	135
3.4.1.1	Mischen.....	136
3.4.1.2	Granulieren.....	138
3.4.1.3	Zerkleinern.....	139
3.4.1.4	Vortrocknen.....	140
3.5	Urformen.....	141
3.5.1	Extrudieren (Strangpressen).....	142
3.5.1.1	Aufbau eines Extruders.....	143
3.5.1.2	Beispiele typischer Extrusionsanlagen.....	148
3.5.2	Blasformen.....	152
3.5.2.1	Extrusionsblasformen.....	152
3.5.2.2	Extrusions-Streckblasformen.....	155
3.5.2.3	Spritzblasformen.....	156
3.5.2.4	Spritz-Streckblasformen.....	156
3.5.3	Spritzgießen.....	157
3.5.3.1	Verfahrenstechnik beim Spritzgießen.....	157
3.5.3.2	Spritzgießmaschine.....	158
3.5.3.3	Einflussgrößen auf die Formteilqualität beim Spritzgießen.....	161
3.5.3.4	Sonderverfahren der Spritzgießtechnik.....	162
3.5.3.5	Spritzgießen von vernetzenden Polymeren.....	167
3.5.4	Pressen, Spritzpressen, Schichtpressen.....	167
3.5.4.1	Pressen von Duroplasten.....	168
3.5.4.2	Pressen von Thermoplasten.....	169
3.5.4.3	Spritzpressen von Duroplasten.....	169
3.5.4.4	Schichtpressen von Duroplasten.....	170

3.5.5	Kalandrieren.....	170
3.5.5.1	Bauarten des Kalanders .....	170
3.5.5.2	Verfahrenstechnik beim Kalandrieren .....	171
3.5.6	Spinnverfahren.....	172
3.5.6.1	Grundlagen des Spinnprozesses .....	173
3.5.6.2	Herstellung von Chemiefasern .....	174
3.5.6.3	Textile Definitionen.....	178
3.5.6.4	Textile Flächengebilde.....	179
3.5.7	FVK-Urformen .....	180
3.5.7.1	Prepregverarbeitung .....	181
3.5.7.2	Faserspritzen .....	181
3.5.7.3	Faserwickeln .....	182
3.5.7.4	Pultrusion .....	182
3.5.7.5	RTM-Verfahren.....	182
3.5.7.6	Handlaminieren .....	184
3.5.8	Schäumen .....	185
3.5.8.1	Herstellung eines Schaumstoffes.....	186
3.5.8.2	Einteilung der Schäumverfahren.....	187
3.5.8.3	Polystyrol-Schaumstoffe .....	188
3.5.8.4	Polyurethan-Schaumstoffe .....	190
3.5.9	Gießen.....	196
3.5.9.1	Vakuumgießen .....	197
3.5.9.2	Rotationsformen (Rotationsgießen).....	199
3.5.9.3	Schleuderverfahren (Schleudergießen) .....	200
3.5.9.4	Filmgießen (Foliengießen).....	200
3.5.9.5	Einbetten, Imprägnieren, Tränken .....	201
3.5.10	Tauchformen .....	201
3.5.11	Rapid Prototyping (RP) .....	202
3.6	Umformen .....	204
3.6.1	Unterschiede im Warmformbereich zwischen amorphen und teilkristallinen Thermoplasten.....	204
3.6.2	Einteilung der Warmformverfahren für Thermoplaste.....	205
3.6.2.1	Biegeumformen .....	205
3.6.2.2	Zugumformen .....	205
3.6.2.3	Druckumformen .....	207
3.6.2.4	Zugdruckumformen .....	207
3.6.2.5	Kombinierte Verfahren .....	208
3.6.3	Verfahrenstechnik beim Warmformen .....	208
3.6.4	Thermoformmaschinen .....	210
3.6.5	Vor- und Nachteile des Warmformens .....	212

3.7	Trennen (Spanen).....	212
3.8	Fügen .....	214
3.8.1	Schweißen.....	214
3.8.1.1	Heizelementschweißen .....	216
3.8.1.2	Wärmgasschweißen .....	217
3.8.1.3	Strahlungsschweißen.....	217
3.8.1.4	Reibungsschweißen .....	218
3.8.1.5	Induktionsschweißen .....	219
3.8.2	Kleben.....	219
3.8.2.1	Grundlagen.....	219
3.8.2.2	Abbindemechanismus der Klebung.....	220
3.8.2.3	Verfahrenstechnik .....	221
3.8.3	Mechanische Verbindungen .....	222
3.9	Beschichten .....	222
3.9.1	Einteilung der Beschichtungsverfahren .....	222
3.9.2	Streichverfahren .....	223
3.9.3	Pulverbeschichten.....	224
3.10	Veredeln .....	225
3.10.1	Lackieren von Kunststoffen .....	226
3.10.2	Bedrucken von Kunststoffen .....	226
3.10.3	Laserbeschriften .....	228
3.10.4	Heißprägen .....	228
3.10.5	Metallisieren.....	228
3.10.6	Beflocken .....	230
3.10.7	Plasmabeschichten .....	230
3.10.8	Tempern .....	231
3.10.9	Konditionieren .....	232
3.10.10	Bestrahlen .....	232
<b>4</b>	<b>Polyolefine</b> .....	<b>235</b>
4.1	Polyethylen (PE).....	235
4.1.1	Das Wichtigste in Kürze.....	235
4.1.2	Handelsnamen (Beispiele) .....	235
4.1.3	Eigenschaften.....	236
4.1.4	Verarbeitung (Beispiele) .....	237
4.1.5	Anwendungsbeispiele.....	238
4.1.6	Der Weg zum Polyethylen .....	238
4.1.6.1	Hochdruckverfahren.....	239
4.1.6.2	Niederdruckverfahren.....	240
4.1.7	Der molekulare Aufbau des Polyethylens .....	241

4.2	Modifizierte Ethylen-Polymerisate . . . . .	244
4.2.1	Unpolare Ethylen-Copolymere . . . . .	245
4.2.1.1	Ethylen-Copolymere mit $\alpha$ -Olefinen . . . . .	245
4.2.1.2	Metallocen-katalysierte Ethylencopolymere (PE-MC) . . . . .	245
4.2.1.3	Polyethylene mit multimodaler Molmassen- verteilung . . . . .	246
4.2.1.4	Cycloolefin-Copolymere (COC) . . . . .	247
4.2.2	Polare Ethylen-Copolymere . . . . .	247
4.2.2.1	Ethylen-Copolymere mit ungesättigten Estern . . . . .	247
4.2.2.2	Ethylen-Copolymere mit ungesättigten Alkoholen . . . . .	249
4.2.2.3	Ethylen-Copolymere mit ungesättigten Carbon- säuren bzw. ihren Salzen . . . . .	250
4.2.2.4	Polyketone (PK) . . . . .	251
4.2.3	Chemisch abgewandeltes Polyethylen . . . . .	251
4.2.3.1	Abwandlung durch Vernetzen . . . . .	251
4.2.3.2	Abwandlung durch chemische Veränderungen . . . . .	254
4.3	Polypropylen (PP) . . . . .	254
4.3.1	Das Wichtigste in Kürze . . . . .	254
4.3.2	Handelsnamen (Beispiele) . . . . .	255
4.3.3	Eigenschaften . . . . .	255
4.3.4	Verarbeitung (Beispiele) . . . . .	255
4.3.5	Anwendungsbeispiele . . . . .	256
4.3.6	Der Weg zum Polypropylen . . . . .	256
4.3.7	Der molekulare Aufbau des Polypropylens . . . . .	257
4.3.7.1	Isotaktisches Polypropylen (PP-i) . . . . .	258
4.3.7.2	Syndiotaktisches Polypropylen (PP-s) . . . . .	260
4.3.7.3	Ataktisches Polypropylen (PP-a) . . . . .	260
4.4	Modifizierte Propylen-Polymerisate . . . . .	261
4.4.1	Propylen-Copolymere . . . . .	261
4.4.1.1	Random-(statistische) Copolymere (PP-R) . . . . .	261
4.4.1.2	Heterophasische Copolymere . . . . .	261
4.4.2	Polymerblends . . . . .	262
4.4.3	Gefüllte und verstärkte Polypropylene . . . . .	262
4.4.4	Anwendungsbeispiele von modifizierten Propylenpolymerisaten . . . . .	263
4.4.4.1	Propylen/Ethylen-Copolymerisate . . . . .	263
4.4.4.2	PP/EPM- und PP/EPDM-Werkstoffe . . . . .	263
4.5	Polyisobutylen (PIB) . . . . .	263
4.5.1	Handelsnamen (Beispiele) . . . . .	263
4.5.2	Eigenschaften . . . . .	263



4.5.3	Verarbeitung (Beispiele) .....	264
4.5.4	Anwendungsbeispiele .....	264
4.5.5	Der Weg zum Polyisobutylen .....	264
4.6	Polybuten-1 (PB-1) .....	265
4.6.1	Handelsnamen (Beispiele) .....	265
4.6.2	Eigenschaften, Verarbeitung und Anwendung .....	265
4.6.3	Der Weg zum Polybuten-1 .....	266
4.7	Poly-4-methylpenten-1 (PMP) .....	266
4.7.1	Handelsname (Beispiel) .....	266
4.7.2	Eigenschaften .....	266
4.7.3	Verarbeitung (Beispiele) .....	267
4.7.4	Anwendungsbeispiele .....	267
4.7.5	Der Weg zum Poly-4-methylpenten-1 .....	267
4.8	Geschichtliches .....	268
4.9	Tabellarischer Eigenschaftsvergleich .....	269
<b>5</b>	<b>Chlor-Kunststoffe</b> .....	<b>273</b>
5.1	Hart-Polyvinylchlorid (PVC-U) (Hart-PVC, weichmacherfreies PVC) .....	273
5.1.1	Das Wichtigste in Kürze über Hart-Polyvinylchlorid .....	273
5.1.2	Handelsnamen (Beispiele) .....	273
5.1.3	Eigenschaften .....	273
5.1.4	Verarbeitung (Beispiele) .....	275
5.1.5	Anwendungsbeispiele .....	275
5.1.6	Der Weg zum Polyvinylchlorid .....	276
5.2	Modifizierte Vinylchlorid-Polymerisate .....	279
5.2.1	Vinylchlorid-Copolymere .....	280
5.2.1.1	Einteilung .....	280
5.2.1.2	Eigenschaften, Verarbeitung und Anwendung .....	281
5.2.1.3	Der Weg zu den Vinylchlorid-Copolymeren .....	282
5.2.2	Besonders schlagfestes Polyvinylchlorid (PVC-HI) .....	282
5.2.2.1	Eigenschaften, Verarbeitung und Anwendung .....	282
5.2.2.2	Der Weg zum besonders schlagfesten Polyvinylchlorid .....	282
5.2.3	Chloriertes Polyvinylchlorid (PVC-C) .....	284
5.2.3.1	Eigenschaften, Verarbeitung und Anwendung .....	284
5.2.3.2	Der Weg zum chlorierten Polyvinylchlorid .....	284
5.3	Weich-Polyvinylchlorid (PVC-P) (Weich-PVC, weichmacherhaltiges PVC) .....	285
5.3.1	Das Wichtigste in Kürze über Weich-Polyvinylchlorid .....	285
5.3.2	Handelsnamen (Beispiele) .....	285

5.3.3	Eigenschaften .....	285
5.3.4	Verarbeitung (Beispiele).....	286
5.3.5	Anwendungsbeispiele .....	286
5.3.6	Der Weg zum Weich-Polyvinylchlorid .....	287
5.3.6.1	Weichmacher.....	287
5.3.6.2	Einarbeitung von Weichmachern.....	289
5.4	Chloriertes Polyethylen (PE-C) .....	291
5.4.1	Eigenschaften, Verarbeitung und Anwendung .....	291
5.4.2	Der Weg zum chlorierten Polyethylen .....	291
5.5	Polyvinylidenchlorid (PVDC) .....	292
5.5.1	Das Wichtigste in Kürze .....	292
5.5.2	Handelsnamen (Beispiele).....	293
5.5.3	Eigenschaften, Verarbeitung und Anwendung von Vinylidenchlorid-Copolymerisaten .....	293
5.5.4	Der Weg zu den Vinylidenchlorid-Copolymerisaten.....	293
5.6	Geschichtliches.....	294
5.7	Tabellarischer Eigenschaftsvergleich .....	294
<b>6</b>	<b>Polystyrol-Kunststoffe .....</b>	<b>297</b>
6.1	Das Wichtigste in Kürze über Polystyrol-Kunststoffe .....	297
6.2	Polystyrol (PS).....	298
6.2.1	Handelsnamen (Beispiele).....	298
6.2.2	Ataktisches Polystyrol.....	298
6.2.2.1	Eigenschaften .....	298
6.2.2.2	Verarbeitung (Beispiele).....	299
6.2.2.3	Anwendungsbeispiele .....	299
6.2.2.4	Der Weg zum Polystyrol .....	299
6.2.3	Stereoreguläre Polystyrole .....	301
6.3	Modifizierte Styrolpolymere (Abschnitt 6.4 bis 6.8).....	302
6.4	Styrol-Acrylnitril-Copolymerisat (SAN) .....	303
6.4.1	Handelsnamen (Beispiele).....	303
6.4.2	Eigenschaften und Verarbeitung .....	303
6.4.3	Anwendungsbeispiele .....	304
6.4.4	Der Weg zum Styrol-Acrylnitril.....	304
6.5	Schlagzäh modifiziertes Polystyrol (PS-I) (Styrol-Butadien SB).....	305
6.5.1	Handelsnamen (Beispiele).....	305
6.5.2	Eigenschaften .....	305
6.5.3	Verarbeitung (Beispiele).....	306
6.5.4	Anwendungsbeispiele .....	306
6.5.5	Der Weg zum schlagzähem Polystyrol.....	306

6.6	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Polymerisate (ABS) .....	309
6.6.1	Handelsnamen (Beispiele) .....	310
6.6.2	Eigenschaften.....	310
6.6.3	Verarbeitung (Beispiele) .....	310
6.6.4	Anwendungsbeispiele.....	310
6.6.5	Der Weg zum Acrylnitril-Butadien-Styrol .....	311
6.7	Schlagzähe Acrylnitril-Styrol-Formmassen (ASA, AES, ACS).....	313
6.7.1	Handelsnamen (Beispiele) .....	313
6.7.2	Eigenschaften, Verarbeitung und Anwendung von Acrylnitril-Styrol-Acrylat (ASA) .....	313
6.7.3	Der Weg zum Acrylnitril-Styrol-Acrylat .....	314
6.8	Blends .....	315
6.8.1	PS-I + PPE Blends .....	315
6.8.2	ABS + PC bzw. ASA + PC Blends .....	315
6.8.3	ABS + PA Blends .....	316
6.9	Geschichtliches zu den Styrolpolymeren.....	316
6.10	Tabellarischer Eigenschaftsvergleich .....	317
<b>7</b>	<b>Ester-Thermoplaste .....</b>	<b>323</b>
7.1	Ester-Gruppe in der Hauptkette .....	324
7.1.1	Polyalkylterephthalate (gesättigte Polyester) (PET, PBT) und Polyethylenphthalat (PEN) .....	324
7.1.1.1	Das Wichtigste in Kürze über Polyalkylterephthalate .....	324
7.1.1.2	Der Weg zu den Polyalkylterephthalaten.....	324
7.1.1.3	Polyethylterephthalat (PET) .....	326
7.1.1.4	Polybutylterephthalat (PBT).....	328
7.1.1.5	Modifizierte Polyalkylterephthalate.....	328
7.1.1.6	Polyethylenphthalat (PEN) .....	330
7.1.1.7	Geschichtliches.....	330
7.1.2	Polycarbonat (PC) .....	331
7.1.2.1	Das Wichtigste in Kürze über Polycarbonat.....	331
7.1.2.2	Handelsnamen (Beispiele).....	331
7.1.2.3	Eigenschaften .....	331
7.1.2.4	Verarbeitung (Beispiele).....	332
7.1.2.5	Anwendungsbeispiele .....	332
7.1.2.6	Der Weg zum Polycarbonat .....	333
7.1.2.7	Modifizierte Polycarbonate .....	335
7.1.2.8	Geschichtliches.....	337

7.1.3	Polyestercarbonat (PEC) .....	337
7.1.3.1	Das Wichtigste in Kürze.....	337
7.1.3.2	Handelsnamen (Beispiele) .....	337
7.1.3.3	Eigenschaften .....	337
7.1.3.4	Verarbeitung (Beispiele) .....	338
7.1.3.5	Anwendungsbeispiele .....	338
7.1.3.6	Der Weg zu Polyestercarbonat .....	338
7.1.3.7	Geschichtliches .....	339
7.2	Ester in der Seitenkette .....	339
7.2.1	Polymethylmethacrylat (PMMA).....	339
7.2.1.1	Das Wichtigste in Kürze.....	339
7.2.1.2	Handelsnamen (Beispiele) .....	339
7.2.1.3	Eigenschaften .....	339
7.2.1.4	Verarbeitung (Beispiele) .....	340
7.2.1.5	Anwendungsbeispiele .....	340
7.2.1.6	Der Weg zum Polymethylmethacrylat .....	340
7.2.1.7	Modifizierte Methylnmethacrylat-Polymerisate.....	341
7.2.1.8	Geschichtliches .....	343
7.3	Celluloseester (CA, CP, CAB).....	344
7.3.1	Das Wichtigste in Kürze .....	344
7.3.2	Handelsnamen (Beispiele).....	344
7.3.3	Eigenschaften .....	344
7.3.4	Verarbeitung (Beispiele).....	345
7.3.5	Anwendungsbeispiele .....	345
7.3.6	Der Weg zu den Celluloseestern .....	345
7.3.6.1	Der Ausgangsstoff Cellulose .....	345
7.3.6.2	Chemische Umsetzungen an Cellulose .....	346
7.3.7	Geschichtliches.....	347
7.4	Tabellarischer Eigenschaftsvergleich .....	348
<b>8</b>	<b>Stickstoff-Thermoplaste .....</b>	<b>357</b>
8.1	Polyamide (PA) .....	357
8.1.1	Teilkristalline aliphatische Polyamide.....	357
8.1.1.1	Das Wichtigste in Kürze.....	357
8.1.1.2	Handelsnamen (Beispiele) .....	359
8.1.1.3	Eigenschaften .....	360
8.1.1.4	Verarbeitung (Beispiele) .....	361
8.1.1.5	Anwendungsbeispiele .....	361
8.1.1.6	Der Weg zu den teilkristallinen aliphatischen Polyamiden .....	362
8.1.1.7	Wasserstoffbrücken (H-Brücken) .....	365

8.1.2	Modifizierte teilkristalline aliphatische Polyamide .....	366
8.1.2.1	Chemische Modifizierung .....	366
8.1.2.2	Physikalische Modifizierung .....	367
8.1.2.3	Anwendungsbeispiele .....	367
8.1.3	Teilaromatische Polyamide .....	368
8.1.3.1	Das Wichtigste in Kürze .....	368
8.1.3.2	Handelsnamen (Beispiele) .....	369
8.1.3.3	Eigenschaftsprofil im Vergleich zu Standard-Polyamiden .....	369
8.1.3.4	Verarbeitung (Beispiele) .....	369
8.1.3.5	Anwendungsbeispiele .....	370
8.1.3.6	Der Weg zu den teilaromatischen Polyamiden .....	370
8.1.4	Modifizierung von teilaromatischen Polyamiden .....	371
8.1.5	Geschichtliches .....	372
8.2	Polyacrylnitril PAN .....	373
8.2.1	Das Wichtigste in Kürze .....	373
8.2.2	Handelsname (Beispiel) .....	373
8.2.3	Eigenschaften von Polyacrylnitril-Barriere-Kunststoffen .....	373
8.2.4	Verarbeitung und Anwendung (Beispiele) .....	374
8.2.5	Der Weg zu Polyacrylnitril-Barriere-Kunststoffen .....	374
8.2.6	PAC-/ PAN-Fasertransformation zu Kohlenstofffasern (C-Fasern) .....	375
8.2.7	Geschichtliches .....	376
8.3	Tabellarischer Eigenschaftsvergleich .....	376
<b>9</b>	<b>Acetal- und Ether-Thermoplaste .....</b>	<b>383</b>
9.1	Polyoxymethylen (Polyacetal) (POM) .....	384
9.1.1	Das Wichtigste in Kürze .....	384
9.1.2	Handelsnamen (Beispiele) .....	384
9.1.3	Eigenschaften .....	384
9.1.4	Verarbeitung (Beispiele) .....	385
9.1.5	Anwendungsbeispiele .....	385
9.1.6	Der Weg zum Polyoxymethylen .....	386
9.1.6.1	POM-Homopolymerisat (POM-H) .....	386
9.1.6.2	POM-Copolymerisate (POM-Cop.) .....	387
9.1.6.3	Eigenschaftsunterschiede zwischen POM-Homo- und Copolymerisaten .....	388
9.1.7	Modifizierte Polyoxymethylen-Polymerisate .....	388
9.1.8	Geschichtliches .....	389
9.2	Polyphenylenether (PPE) .....	389
9.2.1	Das Wichtigste in Kürze .....	389

9.2.2	Handelsnamen (Beispiele).....	390
9.2.3	Eigenschaften .....	390
9.2.4	Verarbeitung (Beispiele).....	390
9.2.5	Anwendungsbeispiele .....	390
9.2.6	Der Weg zum Polyphenylenether .....	391
9.2.7	Weitere modifizierte Polyphenylenether.....	392
9.2.8	Geschichtliches.....	392
9.3	Tabellarischer Eigenschaftsvergleich .....	392
<b>10</b>	<b>Fluor-Kunststoffe .....</b>	<b>395</b>
10.1	Polytetrafluorethylen (PTFE) .....	395
10.1.1	Das Wichtigste in Kürze .....	395
10.1.2	Handelsnamen (Beispiele).....	395
10.1.3	Eigenschaften .....	395
10.1.4	Verarbeitung (Beispiele).....	396
10.1.5	Anwendungsbeispiele .....	397
10.1.6	Der Weg zum Polytetrafluorethylen .....	397
10.2	Thermoplastisch verarbeitbare Fluor-Kunststoffe.....	400
10.2.1	Das Wichtigste in Kürze .....	400
10.2.2	Fluorthermoplaste und Beispiele von Handelsnamen.....	401
10.2.3	Eigenschaften .....	401
10.2.4	Verarbeitung (Beispiele).....	401
10.2.5	Anwendungen .....	402
	10.2.5.1 Spezielle Anwendungsbeispiele .....	402
10.2.6	Der Weg zu den thermoplastisch verarbeitbaren Fluor-Kunststoffen .....	403
	10.2.6.1 Perfluorethylenpropylen FEP, auch Tetrafluorethylen-Hexafluorpropylen-Copolymer.....	403
	10.2.6.2 Perfluoroalkoxy-Copolymer (PFA).....	403
	10.2.6.3 Ethylen-Tetrafluorethylen-Copolymer (ETFE) .....	404
	10.2.6.4 Polyvinylidenfluorid (PVDF) .....	404
	10.2.6.5 Tetrafluorethylen-Hexafluorpropylen-Vinylidenfluorid-Terpolymer TFEHFPVDF (THV).....	404
	10.2.6.6 Polyvinylfluorid (PVF) .....	404
	10.2.6.7 Polychlortrifluorethylen (PCTFE) .....	405
	10.2.6.8 Ethylen-Chlortrifluorethylen-Copolymer (ECTFE). .....	405
10.3	Geschichtliches zu den Fluorpolymeren.....	405
10.4	Tabellarischer Eigenschaftsvergleich .....	406
<b>11</b>	<b>Duroplaste .....</b>	<b>409</b>
11.1	Allgemeines über Herstellung und Eigenschaften .....	409
11.2	Phenoplaste (Phenol-Formaldehyd-Kondensationsharze) (PF) .....	411

11.2.1	Das Wichtigste in Kürze .....	411
11.2.2	Handelsnamen (Beispiele) .....	412
11.2.3	Eigenschaften von PF-Formstoffen .....	412
11.2.4	Verarbeitung (Beispiele) .....	414
11.2.5	Anwendungsbeispiele .....	414
	11.2.5.1 Harzformstoffe, Harzformteile .....	414
	11.2.5.2 Schichtpresstoffe .....	414
	11.2.5.3 PF-Harze .....	414
11.2.6	Der Weg zu den Phenolharzen .....	415
11.2.7	Geschichtliches .....	419
11.3	Aminoplaste .....	419
11.3.1	Harnstoffharze (Harnstoff-Formaldehyd-Kondensations- harze) (UF) .....	419
	11.3.1.1 Das Wichtigste in Kürze .....	419
	11.3.1.2 Handelsnamen (Beispiele) .....	419
	11.3.1.3 Eigenschaften .....	420
	11.3.1.4 Verarbeitung, Anwendung (Beispiele) .....	421
	11.3.1.5 Der Weg zum Harnstoffharz .....	421
11.3.2	Melaminharze (Melamin-Formaldehyd-Kondensations- harze) (MF) .....	423
	11.3.2.1 Das Wichtigste in Kürze .....	423
	11.3.2.2 Handelsnamen (Beispiele) .....	423
	11.3.2.3 Eigenschaften .....	423
	11.3.2.4 Verarbeitung, Anwendung (Beispiele) .....	423
	11.3.2.5 Eigenschaften und Anwendung von modifizierten Melaminharzen (Beispiele) .....	424
	11.3.2.6 Der Weg zum Melaminharz .....	424
11.3.3	Geschichtliches .....	426
11.4	Reaktionsharz-Duroplaste .....	426
11.4.1	Ungesättigte Polyesterharze (UP) .....	426
	11.4.1.1 Das Wichtigste in Kürze .....	426
	11.4.1.2 Handelsnamen (Beispiele) .....	427
	11.4.1.3 Eigenschaften .....	427
	11.4.1.4 Verarbeitung (Beispiele) .....	429
	11.4.1.5 Anwendungsbeispiele .....	430
	11.4.1.6 Der Weg zu den ungesättigten Polyesterharzen ....	431
	11.4.1.7 Geschichtliches .....	435
11.4.2	Vinylesterharze (VE) .....	435
	11.4.2.1 Eigenschaften .....	435
	11.4.2.2 Verarbeitung, Anwendung (Beispiele) .....	435

11.4.2.3	Der Weg zu den Vinylesterharzen .....	436
11.4.2.4	Geschichtliches .....	436
11.4.3	Epoxidharze (EP) .....	437
11.4.3.1	Das Wichtigste in Kürze.....	437
11.4.3.2	Handelsnamen (Beispiele) .....	437
11.4.3.3	Eigenschaften .....	437
11.4.3.4	Verarbeitung (Beispiele) .....	438
11.4.3.5	Anwendungsbeispiele .....	438
11.4.3.6	Der Weg zu den Epoxidharzen.....	439
11.4.3.7	Geschichtliches .....	444
11.5	Sonstige Harze.....	444
11.5.1	Siliconharze .....	444
11.5.2	Polydiallylphthalatharze (PDAP, PDAIP).....	445
11.5.3	PUR-Gießharze .....	446
11.5.3.1	Elastomer-Gießharze.....	446
11.5.3.2	Harte PUR-Harze.....	446
11.5.4	Cyanatester-Harze .....	447
<b>12</b>	<b>Hochleistungspolymere.....</b>	<b>449</b>
12.1	Polyaryletherketone (PAEK) .....	450
12.1.1	Das Wichtigste in Kürze .....	450
12.1.2	Handelsnamen (Beispiele).....	450
12.1.3	Eigenschaften .....	450
12.1.4	Verarbeitung (Beispiele).....	451
12.1.5	Anwendungsbeispiele .....	452
12.1.6	Der Weg zu den Polyaryletherketonen.....	452
12.1.7	Geschichtliches.....	452
12.2	Polyarylate (PAR) .....	453
12.2.1	Das Wichtigste in Kürze .....	453
12.2.2	Handelsnamen (Beispiele).....	453
12.2.3	Eigenschaften .....	453
12.2.4	Verarbeitung (Beispiele).....	454
12.2.5	Anwendungsbeispiele .....	454
12.2.6	Der Weg zu den Polyarylaten.....	455
12.2.7	Geschichtliches.....	456
12.3	Flüssigkristalline Polymere (LCP) .....	456
12.3.1	Das Wichtigste in Kürze .....	456
12.3.2	Handelsnamen (Beispiele).....	456
12.3.3	Eigenschaften .....	456
12.3.3.1	Aufbau und Struktur der LCP .....	456
12.3.3.2	Eigenschaften von thermotropen LCP.....	458



12.3.4	Verarbeitung (Beispiele) .....	459
12.3.5	Anwendungsbeispiele.....	459
12.3.6	Der Weg zu den flüssigkristallinen Polymeren.....	460
12.3.6.1	Herstellung der lyotropen LCP .....	460
12.3.6.2	Herstellung der thermotropen LCP .....	461
12.3.7	Geschichtliches .....	462
12.4	Polyimide.....	462
12.4.1	Das Wichtigste in Kürze.....	462
12.4.2	Handelsnamen (Beispiele) .....	462
12.4.3	Eigenschaften.....	462
12.4.4	Verarbeitung (Beispiele) .....	464
12.4.5	Anwendungsbeispiele.....	464
12.4.6	Der Weg zu den Polyimiden .....	465
12.4.7	Geschichtliches .....	470
12.5	Polyarylsulfone (PSU, PES, PPSU).....	471
12.5.1	Das Wichtigste in Kürze.....	471
12.5.2	Handelsnamen (Beispiele) .....	471
12.5.3	Eigenschaften.....	471
12.5.4	Verarbeitung (Beispiele) .....	472
12.5.5	Anwendungsbeispiele.....	472
12.5.6	Der Weg zu den Polyarylsulfonen.....	472
12.5.7	Geschichtliches .....	474
12.6	Polyphenylensulfid (PPS) .....	474
12.6.1	Das Wichtigste in Kürze.....	474
12.6.2	Handelsnamen (Beispiele) .....	474
12.6.3	Eigenschaften.....	474
12.6.4	Verarbeitung (Beispiele) .....	475
12.6.5	Anwendungsbeispiele.....	475
12.6.6	Der Weg zu Polyphenylensulfid.....	476
12.6.7	Geschichtliches .....	476
12.7	Tabellarischer Eigenschaftsvergleich .....	476
<b>13</b>	<b>Elastomere</b> .....	<b>481</b>
13.1	Permanent vernetzte Elastomere/Gummi .....	482
13.1.1	Das Wichtigste in Kürze über vernetzte Elastomere.....	482
13.1.2	Handelsnamen (Beispiele) .....	484
13.1.3	Eigenschaften.....	484
13.1.4	Verarbeitung (Beispiele) .....	486
13.1.5	Anwendungsbeispiele.....	486

13.1.6	Der Weg zu den permanent vernetzten Elastomeren .....	487
13.1.7	Geschichtliches .....	489
13.2	Reversibel vernetzte Elastomere/Thermoplastische Elastomere TPE ..	489
13.2.1	Das Wichtigste in Kürze über TPE .....	489
13.2.2	Handelsnamen (Beispiele) .....	492
13.2.3	Allgemeine Eigenschaften .....	492
13.2.4	Einzeleigenschaften und Anwendungsbeispiele .....	495
13.2.4.1	Thermoplastische Elastomere auf Olefinbasis, TPE-O/TPE-V (TPO/TPV) .....	495
13.2.4.2	Thermoplastische Elastomere auf Styrolbasis, TPE-S (TPS) .....	495
13.2.4.3	Thermoplastische Polyester-Elastomere, TPE-E (TPC) .....	496
13.2.4.4	Thermoplastische Polyamid-Elastomere, TPE-A (TPA) .....	496
13.2.4.5	Thermoplastische Polyurethan-Elastomere, TPE-U (TPU) .....	497
13.2.5	Der Weg zu den thermoplastischen Elastomeren .....	498
13.2.5.1	TPE-O/TPE-V (TPO/TPV) .....	498
13.2.5.2	TPE-S (TPS) .....	499
13.2.5.3	TPE-E (TPC) .....	499
13.2.5.4	TPE-A (TPA) .....	499
13.2.5.5	TPE-U (TPU) .....	500
13.2.6	Geschichtliches .....	500
<b>14</b>	<b>Schaumstoffe .....</b>	<b>501</b>
14.1	Allgemeines über Herstellung und Eigenschaften .....	501
14.1.1	Handelsnamen (Beispiele) .....	504
14.2	Polystyrol-Schaumstoffe (PS-E) .....	504
14.2.1	Das Wichtigste in Kürze .....	504
14.2.2	Polystyrol-Hartschaumstoff, Partikel-Schaumstoff .....	504
14.2.2.1	Eigenschaften .....	504
14.2.2.2	Verarbeitung .....	505
14.2.2.3	Anwendungsbeispiele .....	505
14.2.3	Polystyrol-Hartschaumstoff, Extruder-Schaumstoff .....	505
14.2.3.1	Eigenschaften .....	505
14.2.3.2	Verarbeitung .....	505
14.2.3.3	Anwendungsbeispiele .....	505
14.2.4	Polystyrol-Integralschaumstoff .....	505
14.2.4.1	Eigenschaften .....	505

	14.2.4.2	Verarbeitung (Beispiele).....	506
	14.2.4.3	Anwendungsbeispiele .....	506
14.3		Polyolefin-Schaumstoffe, PO-Schaumstoffe .....	506
	14.3.1	Das Wichtigste in Kürze.....	506
	14.3.2	Eigenschaften.....	506
	14.3.3	Verarbeitung (Beispiele) .....	507
	14.3.4	Anwendungsbeispiele.....	507
14.4		Polyurethan-Schaumstoffe, PUR-Schaumstoffe .....	507
	14.4.1	Das Wichtigste in Kürze.....	507
	14.4.2	PUR-Hartschaumstoffe, (PUR-H).....	508
	14.4.2.1	Eigenschaften .....	508
	14.4.2.2	Anwendungsbeispiele .....	508
	14.4.3	PUR-Weichschaumstoffe, (PUR-W).....	508
	14.4.3.1	Eigenschaften .....	508
	14.4.3.2	Anwendungsbeispiele .....	509
	14.4.4	PUR-Halbhart-(semiflexible) Schaumstoffe .....	509
	14.4.4.1	Eigenschaften .....	509
	14.4.4.2	Anwendungsbeispiele .....	509
	14.4.5	PUR-Integral-Hartschaumstoffe, (PUR-I).....	509
	14.4.5.1	Eigenschaften .....	509
	14.4.5.2	Anwendungsbeispiele .....	509
	14.4.6	PUR-Integral-Halbhart- und Weichschaumstoffe .....	510
	14.4.6.1	Eigenschaften .....	510
	14.4.6.2	Anwendungsbeispiele .....	510
	14.4.7	Der Weg zu den Polyurethan-Schaumstoffen.....	510
	14.4.7.1	Polyurethan-Schäumsysteme.....	510
	14.4.7.2	Chemie der PUR-Schäumsysteme.....	513
	14.4.8	Geschichtliches .....	516
14.5		Weitere Schaumstoffe.....	517
	14.5.1	Polyvinylchlorid-Schaumstoffe.....	517
	14.5.2	Phenol-Formaldehyd-Schaumstoffe .....	517
	14.5.3	Harnstoff-Formaldehyd-Schaumstoffe .....	517
	14.5.4	Polymethacrylimid-Schaumstoffe .....	518
	14.5.5	Gummi-Schaumstoffe .....	518
14.6		Tabellarischer Eigenschaftsvergleich .....	519
<b>15</b>		<b>Kunststoffe als Sonderwerkstoffe .....</b>	<b>521</b>
	15.1	Elektrisch leitende Kunststoffe.....	521
	15.1.1	Oberflächenbehandlungen .....	521

15.1.2	Elektrisch leitfähige Compounds . . . . .	522
15.1.3	Intrinsisch elektrisch leitfähige Polymere . . . . .	523
15.2	Funktionskunststoffe . . . . .	525
15.2.1	Polymere als Datenspeicher . . . . .	525
15.2.2	Polymere Leuchtdioden, Polymer-LEDs (PLEDs) . . . . .	526
15.2.3	Polymere Photovoltaik (PPV) . . . . .	527
15.2.4	Photoresists . . . . .	529
15.3	Nanotechnologie und Kunststoffe . . . . .	530
15.3.1	Anwendung von Nanoröhren (CNT) als Zusatzstoffe für Kunststoffe . . . . .	531
15.3.2	Nanotechnologie als Schrittmacher in die Zukunft . . . . .	532
15.4	Kunststoffe in der Medizintechnik . . . . .	533
15.4.1	Polymilchsäure, Polylactid (PLA) . . . . .	533
15.4.1.1	Das Wichtigste in Kürze . . . . .	533
15.4.1.2	Handelsnamen (Beispiele) . . . . .	533
15.4.1.3	Eigenschaften, Verarbeitung, Anwendung . . . . .	533
15.5	Biopolymere . . . . .	535
15.5.1	Das Wichtigste in Kürze . . . . .	535
15.5.2	Biokunststoffe – Kunststoffe aus nachwachsenden (biogenen) Rohstoffen (NWR) . . . . .	536
15.5.2.1	Handelsnamen (Beispiele) . . . . .	536
15.5.2.2	Cellulosewerkstoffe . . . . .	537
15.5.2.3	Stärkewerkstoffe . . . . .	538
15.5.2.4	Werkstoffe aus dem Bioreaktor . . . . .	539
15.5.2.5	Werkstoffe durch chemische Synthese biobasier- ter Rohstoffe . . . . .	541
15.5.2.6	Biocomposites als Werkstoffe . . . . .	541
15.5.2.7	Blends als Werkstoffe . . . . .	541
15.5.3	Biologisch abbaubare Kunststoffe (BAK) . . . . .	541
15.5.3.1	Biokunststoffe neu definiert . . . . .	542
15.5.4	Anwendungsbeispiele und Ausblick . . . . .	542
<b>16</b>	<b>Arbeitssicherheit, Gesundheits- und Umweltschutz beim Umgang mit Kunststoffen . . . . .</b>	<b>545</b>
16.1	Arbeitssicherheit und Gesundheitsschutz beim Umgang mit Kunststoffen . . . . .	545
16.1.1	Gewerbetoxikologische Begriffe (Auswahl) . . . . .	545
16.1.2	Herstellung von Polymeren und Kunststoff-Formmassen . . . . .	545
16.1.3	Verarbeitung und Prüfung von Kunststoffen . . . . .	546
16.1.4	Anwendung von Kunststoffen . . . . .	547

16.2	Umweltschutz beim Umgang mit Kunststoffen .....	548
16.2.1	Nachhaltige Entwicklung .....	548
16.2.2	Abfall- und Recyclinghierarchie .....	548
16.2.3	Grundsätzliche Aspekte beim Recycling von Kunststoffen ...	549
16.2.4	Recyclingkreisläufe von Kunststoffen .....	549
16.3	Abfallwirtschaft und Recycling aus Sicht der Kunststoffindustrie .....	550
16.3.1	Werkstoffliches Recycling .....	550
16.3.2	Rohstoffliches Recycling .....	551
16.3.2.1	Petrochemische Verfahren .....	551
16.3.2.2	Solvolytische Verfahren .....	552
16.3.2.3	Hochofenprozess .....	552
16.3.3	Energetische Nutzung .....	552
16.3.4	Deponie .....	555
16.3.5	Codierung erleichtert Recycling .....	555
16.4	Abbaufähige, resorbierbare Kunststoffe .....	555
16.4.1	Biologisch abbaubare Polymere (BAP) .....	556
16.4.2	Photoabbaubare Polymere .....	557
16.4.3	Wasserlösliche Polymere .....	557
<b>17</b>	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>559</b>
	<b>Sachwortverzeichnis</b> .....	<b>563</b>