

Inhalt

Vorwort zur sechsten Auflage	V
Vorwort zur ersten Auflage	VII
Prof. em. Dr. phil. II Wolfgang Kaiser	IX
Hinweise zur Benutzung des Buches.	XI
1 Einführung	1
1.1 Werkstoffklassen	1
1.1.1 Werkstoffauswahl bei Kunststoffen.	2
1.1.2 Internationale Vereinbarungen/Normen – die geheimen Helfer.	3
1.1.3 Werkstoffdatenbanken	4
1.2 Bedeutung der Kunststoffe	4
1.2.1 Wachstumsursachen	4
1.2.1.1 Die Petrochemie als Rohstofflieferant	5
1.2.1.2 Leichtgewicht Kunststoff	6
1.2.1.3 Energiegünstiges Verhalten	6
1.2.1.4 Komplexe Formteilgeometrien und hoher Automatisierungsgrad	7
1.2.1.5 Nutzung von Synergien	7
1.2.1.6 Hohe Wertschöpfung des Erdöls	8
1.2.2 Kunststoffe und die Grundbedürfnisse des Menschen	8
1.2.2.1 Nahrung	8
1.2.2.2 Bekleidung	9
1.2.2.3 Wohnung	9
1.2.2.4 Gesundheit	9
1.2.2.5 Soziale Bedürfnisse	10
1.3 Geschichte der Kunststoffe	11
1.3.1 Kurzer Abriss der Entwicklung der Polymerwissenschaften (ohne Copolymere und Blends)	14
1.4 Zukunft der Kunststoffe – Prognosen	25
1.4.1 Zukünftiger Pro-Kopf-Verbrauch von Kunststoff- Werkstoffen.	26
1.4.2 Erwartungen an Polymere	27

1.4.3	Zukünftige Rohstoffquellen	29
1.5	Wirtschaftsdaten und Grafiken zu Kunststoffen	31
1.5.1	Einteilung der Kunststoffproduktion nach Typ und Bedarf in Einsatzgebieten	31
1.5.2	Europe (EU 28) Entwicklung der Beschäftigtenzahl	33
1.5.3	Einteilung der Kunststoffe nach ihrem Eigenschaftsprofil.	34
2	Grundlagen.	37
2.1	Was sind Kunststoffe	38
2.1.1	Einteilung der Kunststoffe	41
2.1.2	Makromolekül-Architektur/Topologie.	42
2.2	Bildungsreaktionen für Makromoleküle – Polyreaktionen	45
2.2.1	Kettenpolymerisation	46
2.2.1.1	Radikalische Kettenpolymerisation	47
2.2.1.2	Kationische Kettenpolymerisation	51
2.2.1.3	Anionische Kettenpolymerisation	52
2.2.1.4	Koordinative Kettenpolymerisation/Polyinsertion	54
2.2.1.5	Homo- und Copolymerisate	55
2.2.1.6	Chemische Vernetzung durch Kettencopolymerisation	57
2.2.1.7	Verfahrenstechnik der Kettenpolymerisation	57
2.2.1.8	Plasmapolymerisation	62
2.2.2	Kondensationspolymerisation (Polykondensation)	62
2.2.3	Additionspolymerisation (Polyaddition)	67
2.2.4	Verfahrenstechnik der Kondensationspolymerisation und Additionspolymerisation	68
2.2.5	Einteilung nach dem Typ der Aufbaureaktionen	69
2.2.6	Chemische Umsetzungen an Makromolekülen	70
2.2.6.1	Vergrößerung des Polymerisationsgrads	70
2.2.6.2	Beibehaltung des Polymerisationsgrads	70
2.2.6.3	Verringerung des Polymerisationsgrads	71
2.2.6.4	Chemische Umsetzungen an makromolekularen Naturstoffen	71
2.3	Bindungskräfte in makromolekularen Systemen	72
2.3.1	Hauptvalenzbindungen	72
2.3.2	Nebervalenzbindungen	75
2.3.3	Ionenbindungen	79
2.3.4	Mechanische Bindungen	79

2.4	Strukturmerkmale von Kunststoffen	80
2.4.1	Chemische Struktur	81
2.4.1.1	Konstitution	81
2.4.1.2	Konfiguration	87
2.4.2	Festkörperstruktur	89
2.4.2.1	Räumliche Anordnung eines Makromoleküls	89
2.4.2.2	Räumliche Anordnung mehrerer Makromoleküle zu einem Verband	90
2.4.2.3	Kristallinität	93
2.4.3	Mittlere Molmasse \bar{M} und Molmassenverteilung	95
2.4.3.1	Kettenlänge	95
2.4.3.2	Molmasse M bei niedermolekularen Verbindungen	96
2.4.3.3	Mittlere Molmasse \bar{M} und Molmassenverteilung bei hochmolekularen Verbindungen	96
2.4.3.4	Mittlerer Polymerisationsgrad	98
2.4.3.5	Beeinflussung von Eigenschaften durch die mittlere Molmasse	99
2.5	Modifizierung von Polymeren und Kunststoffen	100
2.5.1	Chemisches Modifizieren von Polymeren	100
2.5.1.1	Steuerung von Synthesereaktionen	100
2.5.1.2	Copolymerisation	101
2.5.1.3	Andere chemische Modifikationen	101
2.5.2	Physikalische Modifizierung von Polymeren und Kunststoffen	101
2.5.2.1	Polymergemische und Polymerblends	101
2.5.2.2	Erhöhung der Ordnung in Polymeren	102
2.5.3	Modifizieren mit Zusatzstoffen (Additive)	104
2.5.3.1	Füllstoffe	105
2.5.3.2	Verstärkungsstoffe	106
2.5.3.3	Weichmacher	107
2.5.3.4	Treibmittel	107
2.5.3.5	Farbmittel	107
2.5.3.6	Stabilisatoren	108
2.5.3.7	Flammhemmende Zusätze	109
2.5.3.8	Weitere Additivgruppen	109
2.6	Wichtige Eigenschaften der Kunststoffe	111
2.6.1	Fließverhalten (Rheologie) von Kunststoff-Schmelzen	111
2.6.1.1	Viskositätsfunktionen von Thermoplastschmelzen	113

2.6.1.2	Zeitverhalten von thermisch instabilen Thermoplast-Schmelzen und reagierenden Formmassen.	115
2.6.2	Thermisch-mechanisches Verhalten	117
2.6.2.1	Thermoplaste.	117
2.6.2.2	Elastomere und Duroplaste	120
2.6.3	Chrono-mechanisches Verhalten	122
2.6.4	Verhalten gegen Umwelteinflüsse	125
2.6.4.1	Chemische Beständigkeit	125
2.7	Alterung und Alterungsschutz.	128
2.7.1	Alterung und Alterungsvorgänge	128
2.7.1.1	Chemische Alterungsvorgänge	128
2.7.1.2	Physikalische Alterungsvorgänge	131
2.7.2	Alterungsschutz	131
2.8	Wichtige Aspekte bei der Schadenverhütung und Schadensanalyse im Kunststoffbereich	135
2.8.1	Thermoanalyse (TA) zur Schadenverhütung/ Schadensanalyse.	136
2.8.1.1	Differential-Kalorimetrie (Differential-Scanning-Calorimetry), DSC	137
2.8.2	Mikroskopische Gefügeanalyse an Bauteilen und Halbzeug.	139
3	Technologie der Ver- und Bearbeitung von Kunststoffen	143
3.1	Allgemeines.	143
3.2	Begriffe und Einteilung der Fertigungsverfahren nach DIN 8850	143
3.2.1	Prinzip der wichtigsten Ver- und Bearbeitungsverfahren.	146
3.3	Pathologische Technologie	146
3.3.1	Pathologie eines Werkstoffs, Beispiel Kunststoff	146
3.3.2	Chemische Reaktionen bei der Ver- und Bearbeitung von Kunststoffen	147
3.3.2.1	Chemische Reaktionen im Aufgabenbereich des Verarbeiters.	148
3.3.2.2	Kunststofferzeugung beim Verarbeiter	149
3.4	Aufbereitung/Compoundierung	150
3.4.1	Maschinenhersteller (Beispiele [®])	152
3.4.2	Einteilung der Aufbereitungsverfahren	152
3.4.2.1	Orientierung an den Materialflüssen.	152
3.4.2.2	Dosieren und Mischen	152
3.4.2.3	Granulieren	155

	3.4.2.4	Zerkleinern	155
	3.4.2.5	Vortrocknen	156
	3.4.3	Pathologischer Befund bei den Aufbereitungsverfahren	156
3.5	Urformen		159
	3.5.1	Extrudieren (Strangpressen)	160
	3.5.1.1	Aufbau eines Extruders	161
	3.5.1.2	Hersteller von Extrusionsanlagen (Beispiele [®])	165
	3.5.1.3	Beispiele typischer Extrusionsanlagen	165
	3.5.2	Blasformen	168
	3.5.2.1	Extrusionsblasformen	169
	3.5.2.2	Extrusions-Streckblasformen	171
	3.5.2.3	Spritzblasformen	172
	3.5.2.4	Spritz-Streckblasformen	172
	3.5.3	Spritzgießen	173
	3.5.3.1	Hersteller von Spritzgießmaschinen (Beispiele [®])	173
	3.5.3.2	Verfahrenstechnik beim Spritzgießen	173
	3.5.3.3	Spritzgießmaschine	175
	3.5.3.4	Einflussgrößen auf die Formteilqualität beim Spritzgießen	176
	3.5.3.5	Sonderverfahren der Spritzgießtechnik	178
	3.5.3.6	Spritzgießen von vernetzenden Polymeren	182
	3.5.4	Pressen, Spritzpressen, Schichtpressen	183
	3.5.4.1	Formpressen von Duroplasten	183
	3.5.4.2	Pressen von Thermoplasten	185
	3.5.4.3	Spritzpressen von Duroplasten	185
	3.5.4.4	Schichtpressen von Duroplasten	185
	3.5.5	Kalandrieren	186
	3.5.5.1	Hersteller von Kalandernanlagen (Beispiele [®])	186
	3.5.5.2	Bauarten des Kalanders	186
	3.5.5.3	Verfahrenstechnik beim Kalandrieren	187
	3.5.6	Spinnverfahren	188
	3.5.6.1	Grundlagen des Spinnprozesses	189
	3.5.6.2	Herstellung von Chemiefasern	189
	3.5.6.3	Textile Definitionen	195
	3.5.6.4	Textile Flächengebilde	196
	3.5.7	Faserverbundkunststoff (FVK)-Urformen	197
	3.5.7.1	Prepregverarbeitung	197
	3.5.7.2	Faserspritzen	198
	3.5.7.3	Faserwickeln	198

	3.5.7.4	Pultrusion	199
	3.5.7.5	RTM-Verfahren	199
	3.5.7.6	Handlaminieren	200
3.5.8		Schäumen	201
	3.5.8.1	Herstellung eines Schaumstoffes	203
	3.5.8.2	Einteilung der Schäumverfahren	204
	3.5.8.3	Polystyrol-Schaumstoffe	204
	3.5.8.4	Polyurethan-Schaumstoffe	206
3.5.9		Gießen	212
	3.5.9.1	Vakuumgießen	213
	3.5.9.2	Rotationsformen (Rotationsgießen)	215
	3.5.9.3	Schleuderverfahren (Schleudergießen)	215
	3.5.9.4	Filmgießen (Foliengießen)	215
	3.5.9.5	Einbetten, Imprägnieren, Tränken	216
3.5.10		Tauchformen	216
3.5.11		Additive Fertigungsverfahren AF/Additive Manufacturing AM	216
	3.5.11.1	Das Wichtigste in Kürze über AF	216
	3.5.11.2	Allgemeines und Begriffserläuterungen	217
	3.5.11.3	Verfahren auf der Basis flüssig/pastös als Ausgangsform	218
	3.5.11.4	Verfahren mit Pulver als Ausgangsform	220
	3.5.11.5	Verfahren mit Granulat als Ausgangsform (AKF)	220
	3.5.11.6	Verfahren mit Filamenten als Ausgangsform	220
	3.5.11.7	Verfahren mit Folien als Ausgangsform	221
	3.5.11.8	Verfahren mit polymeren Gels als Ausgangsform	222
3.5.12		Pathologischer Befund beim Urformen	222
3.6		Umformen	225
	3.6.1	Hersteller von Thermoformmaschinen (Beispiele [®])	225
	3.6.2	Unterschiede im Warmformbereich zwischen amorphen und teilkristallinen Thermoplasten	226
	3.6.3	Einteilung der Warmformverfahren für Thermoplaste	226
	3.6.3.1	Biegeumformen	226
	3.6.3.2	Zugumformen	227
	3.6.3.3	Zugdruckumformen	227
	3.6.3.4	Kombinierte Verfahren	227
3.6.4		Verfahrenstechnik beim Warmformen	228
3.6.5		Thermoformmaschinen	230
3.6.6		Pathologischer Befund beim Umformen	231
3.6.7		Vor- und Nachteile des Warmformens	233

3.7	Trennen (Spanen)	233
3.8	Fügen	235
3.8.1	Schweißen	235
3.8.1.1	Hersteller von Schweißmaschinen für Thermoplaste	235
3.8.1.2	Grundlagen	236
3.8.1.3	Schweißverfahren (Auswahl)	238
3.8.1.4	Pathologischer Befund beim Schweißen	240
3.8.2	Kleben	241
3.8.2.1	Grundlagen	241
3.8.2.2	Abbindemechanismus der Klebung	243
3.8.2.3	Verfahrenstechnik	244
3.8.2.4	Arbeitsicherheit und Schutzmaßnahmen beim Umgang mit Klebstoffen	244
3.8.3	Mechanische Verbindungen	244
3.9	Beschichten	245
3.9.1	Einteilung der Beschichtungsverfahren	245
3.9.2	Streichverfahren	245
3.9.3	Pulverbeschichten	247
3.10	Veredeln	247
3.10.1	Lackieren von Kunststoffen	248
3.10.2	Bedrucken von Kunststoffen	248
3.10.3	Laserbeschriften	250
3.10.4	Heißprägen	250
3.10.5	Metallisieren	250
3.10.6	Beflocken	252
3.10.7	Plasmabeschichten	252
3.10.8	Tempern	253
3.10.9	Konditionieren	254
3.10.10	Bestrahlen	254
4	Polyolefine	257
4.1	Polyethylen (PE)	257
4.1.1	Das Wichtigste in Kürze	257
4.1.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	257
4.1.3	Eigenschaften	258
4.1.4	Verarbeitung und Anwendung	259
4.1.5	Anwendungsbeispiele	260
4.1.6	Der Weg zum Polyethylen	261
4.1.6.1	Hochdruckverfahren	261

	4.1.6.2	Niederdruckverfahren	262
4.1.7		Der molekulare Aufbau des Polyethylens	265
	4.1.7.1	Polyethylene mit multimodaler Molmassenverteilung	266
	4.1.7.2	Ethylen-Copolymere mit α -Olefinen.	267
	4.1.7.3	Metallocen-katalysierte Ethylen-copolymere (PE-MC)	268
4.2		Chemische Modifikation von Polyethylen	269
	4.2.1	Abwandlung durch Vernetzen	269
	4.2.2	Abwandlung durch chemische Veränderungen	270
	4.2.3	Weitere Ethylen-Copolymere	271
	4.2.3.1	Unpolare Ethylen-Copolymere	271
	4.2.3.2	Polare Ethylen-Copolymere	272
4.3		Polypropylen (PP)	277
	4.3.1	Das Wichtigste in Kürze	277
	4.3.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	277
	4.3.3	Eigenschaften	278
	4.3.4	Verarbeitung und Anwendung	279
	4.3.5	Anwendungsbeispiele	279
	4.3.6	Der Weg zum Polypropylen	280
	4.3.7	Der molekulare Aufbau von Polypropylen	281
	4.3.7.1	Isotaktisches Polypropylen (iPP)	282
	4.3.7.2	Syndiotaktisches Polypropylen (sPP)	282
	4.3.7.3	Ataktisches Polypropylen (aPP)	283
4.4		Modifikation von Polypropylen	283
	4.4.1	PP-Copolymere	283
	4.4.2	Gefüllte und verstärkte Polypropylene	284
	4.4.3	Chemische Modifikation am fertigen PP-Polymer	285
4.5		Polyisobutylen (PIB)	285
	4.5.1	Handelsnamen (Beispiele [®])	285
	4.5.2	Eigenschaften	285
	4.5.3	Verarbeitung (Beispiele)	286
	4.5.4	Anwendungsbeispiele	286
	4.5.5	Der Weg zum Polyisobutylen	286
4.6		Polybuten-1 (PB-1)	287
	4.6.1	Handelsnamen (Beispiele [®])	287
	4.6.2	Eigenschaften, Verarbeitung und Anwendung	287
	4.6.3	Der Weg zum Polybuten-1	288
4.7		Poly-4-methylpenten-1 (PMP)	288
	4.7.1	Handelsnamen (Beispiel [®])	288

4.7.2	Eigenschaften	288
4.7.3	Verarbeitung (Beispiele)	289
4.7.4	Anwendungsbeispiele	289
4.7.5	Der Weg zum Poly-4-methylpenten-1	289
4.8	Geschichtliches.	290
4.9	Tabellarischer Eigenschaftsvergleich	291
5	Halogenierte Kunststoffe I	295
5.1	Hart-PVC (Hart-Polyvinylchlorid), PVC-U (weichmacherfreies Polyvinylchlorid)	295
5.1.1	Das Wichtigste in Kürze über Hart-PVC.	295
5.1.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	296
5.1.3	Eigenschaften	296
5.1.4	Verarbeitung (Beispiele)	297
5.1.5	Anwendungsbeispiele	298
5.1.6	Der Weg zum Polyvinylchlorid.	298
5.2	Modifizierte Vinylchlorid-Polymere	302
5.2.1	Copolymere aus Vinylchlorid und anderen Comonomeren	303
5.2.1.1	Einteilung	303
5.2.1.2	Eigenschaften, Verarbeitung und Anwendung	304
5.2.1.3	Die Herstellung von Vinylchlorid-Copolymeren	304
5.2.2	Besonders schlagfestes Polyvinylchlorid (PVC-HI)	305
5.2.2.1	Eigenschaften, Verarbeitung und Anwendung.	305
5.2.2.2	Der Weg zum besonders schlagfesten Polyvinylchlorid	305
5.2.3	Chloriertes Polyvinylchlorid (PVC-C)	306
5.2.3.1	Eigenschaften, Verarbeitung und Anwendung.	306
5.2.3.2	Der Weg zum chlorierten Polyvinylchlorid.	307
5.3	Weich-PVC / PVC-P / weichgemachtes Polyvinylchlorid.	307
5.3.1	Das Wichtigste in Kürze über Weich-PVC	307
5.3.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	308
5.3.3	Eigenschaften	308
5.3.4	Verarbeitung (Beispiele)	309
5.3.5	Anwendungsbeispiele	309
5.3.6	Die Herstellung von Weich-Polyvinylchlorid	310
5.3.6.1	Weichmacher	310
5.3.6.2	Einarbeitung von Weichmachern	312
5.4	Chloriertes Polyethylen (PE-C)	314
5.4.1	Handelsnamen (Beispiele [®])	314

5.4.2	Eigenschaften, Verarbeitung und Anwendung	314
5.4.3	Der Weg zum chlorierten Polyethylen	314
5.5	Polyvinylidenchlorid (PVDC)	316
5.5.1	Das Wichtigste in Kürze	316
5.5.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	316
5.5.3	Eigenschaften, Verarbeitung und Anwendung von Vinylidenchlorid-Copolymerisaten	316
5.5.4	Der Weg zu den Vinylidenchlorid-Copolymerisaten	317
5.6	Geschichtliches	317
5.7	Tabellarischer Eigenschaftsvergleich	318
6	Polystyrol-Kunststoffe	321
6.1	Das Wichtigste in Kürze über Polystyrol-Kunststoffe	321
6.2	Polystyrol (PS)	322
6.2.1	Handelsnamen (Beispiele [®])	322
6.2.2	Ataktisches Polystyrol	322
6.2.2.1	Eigenschaften	322
6.2.2.2	Verarbeitung (Beispiele)	323
6.2.2.3	Anwendungsbeispiele	323
6.2.2.4	Der Weg zum Polystyrol	323
6.2.3	Stereoreguläre Polystyrole	325
6.3	Modifizierte Styrolpolymere (Abschnitt 6.4 bis 6.8)	326
6.4	Styrol-Acrylnitril-Copolymerisat (SAN)	327
6.4.1	Handelsnamen (Beispiele [®])	327
6.4.2	Eigenschaften und Verarbeitung	327
6.4.3	Anwendungsbeispiele	328
6.4.4	Der Weg zum Styrol-Acrylnitril	328
6.5	Schlagzäh modifiziertes Polystyrol (PS-I) (Styrol-Butadien SB)	329
6.5.1	Handelsnamen (Beispiele [®])	329
6.5.2	Eigenschaften	329
6.5.3	Verarbeitung (Beispiele)	330
6.5.4	Anwendungsbeispiele	330
6.5.5	Der Weg zum schlagzähem Polystyrol	330
6.6	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Polymerisate (ABS)	333
6.6.1	Handelsnamen (Beispiele [®])	334
6.6.2	Eigenschaften	334
6.6.3	Verarbeitung (Beispiele)	334
6.6.4	Anwendungsbeispiele	334
6.6.5	Der Weg zum Acrylnitril-Butadien-Styrol	335

6.7	Schlagzähe Acrylnitril-Styrol-Formmassen (ASA, AES, ACS)	337
6.7.1	Handelsnamen (Beispiele [®])	337
6.7.2	Eigenschaften, Verarbeitung und Anwendung von Acrylnitril-Styrol-Acrylat (ASA)	337
6.7.3	Der Weg zum Acrylnitril-Styrol-Acrylat	338
6.8	Blends	339
6.8.1	PS-I + PPE Blends	339
6.8.2	ABS + PC bzw. ASA + PC Blends	339
6.8.3	ABS + PA Blends	340
6.8.4	PS + PE Blends	340
6.9	Geschichtliches zu den Styrolpolymeren	340
6.10	Tabellarischer Eigenschaftsvergleich	342
7	Ester-Thermoplaste	347
7.1	Ester-Gruppe in der Hauptkette	348
7.1.1	Polyalkylenterephthalate („gesättigte“ Polyester) (PET, PBT) und Polyethylnaphthalat (PEN)	348
7.1.1.1	Das Wichtigste in Kürze über Polyalkylenterephthalate	348
7.1.1.2	Der Weg zu den Polyalkylenterephthalaten	348
7.1.1.3	Polyethylenterephthalat (PET)	350
7.1.1.4	Polybutylenterephthalat (PBT)	352
7.1.1.5	Polytrimethylenterephthalat (PTT)	353
7.1.1.6	Modifizierte Polyalkylenterephthalate	353
7.1.1.7	Polyethylnaphthalat (PEN)	354
7.1.1.8	Geschichtliches	355
7.1.2	Polycarbonat (PC)	356
7.1.2.1	Das Wichtigste in Kürze über Polycarbonat	356
7.1.2.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	356
7.1.2.3	Eigenschaften	356
7.1.2.4	Verarbeitung (Beispiele)	357
7.1.2.5	Anwendungsbeispiele	357
7.1.2.6	Der Weg zum Polycarbonat	357
7.1.2.7	Modifizierte Polycarbonate	359
7.1.2.8	Geschichtliches	362
7.1.3	Polyestercarbonat (PEC)	362
7.1.3.1	Das Wichtigste in Kürze	362
7.1.3.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	362
7.1.3.3	Eigenschaften	362
7.1.3.4	Verarbeitung (Beispiele)	363

	7.1.3.5	Anwendungsbeispiele	363
	7.1.3.6	Der Weg zu Polyestercarbonat.	363
	7.1.3.7	Geschichtliches	364
7.2		Ester in der Seitenkette	364
	7.2.1	Polymethylmethacrylat (PMMA)	364
	7.2.1.1	Das Wichtigste in Kürze.	364
	7.2.1.2	Handelsnamen (Beispiele [®]).	364
	7.2.1.3	Eigenschaften.	364
	7.2.1.4	Verarbeitung (Beispiele).	365
	7.2.1.5	Anwendungsbeispiele	365
	7.2.1.6	Der Weg zum Polymethylmethacrylat.	365
	7.2.1.7	Modifizierte Methylmethacrylate und Derivate	366
	7.2.1.8	Geschichtliches	368
7.3		Celluloseester (CA, CB, CP, CAB, CAP)	369
	7.3.1	Das Wichtigste in Kürze.	369
	7.3.2	Handelsnamen (Beispiele [®]).	369
	7.3.3	Eigenschaften.	369
	7.3.4	Verarbeitung (Beispiele)	370
	7.3.5	Anwendungsbeispiele	370
	7.3.6	Der Weg zu den Celluloseestern	370
	7.3.6.1	Der Ausgangsstoff Cellulose.	370
	7.3.6.2	Chemische Umsetzungen an Cellulose	371
	7.3.7	Geschichtliches.	372
7.4		Tabellarischer Eigenschaftsvergleich	373
8		Stickstoff-Thermoplaste	381
	8.1	Polyamide (PA)	381
	8.1.1	Teilkristalline aliphatische Polyamide	381
	8.1.1.1	Das Wichtigste in Kürze.	381
	8.1.1.2	Handelsnamen (Beispiele [®]).	383
	8.1.1.3	Eigenschaften.	384
	8.1.1.4	Verarbeitung (Beispiele).	385
	8.1.1.5	Anwendungsbeispiele	386
	8.1.1.6	Der Weg zu den teilkristallinen aliphatischen Polyamiden	386
	8.1.1.7	Wasserstoffbrücken (H-Brücken)	390
	8.1.2	Modifizierte teilkristalline aliphatische Polyamide.	391
	8.1.2.1	Chemische Modifizierung.	391
	8.1.2.2	Physikalische Modifizierung.	391
	8.1.2.3	Anwendungsbeispiele	392

8.1.3	Cycloaliphatische Polyamide	392
8.1.3.1	Das Wichtigste in Kürze	392
8.1.3.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	393
8.1.3.3	Eigenschaften	393
8.1.3.4	Verarbeitung (Beispiele)	393
8.1.3.5	Anwendungsbeispiele	393
8.1.3.6	Der Weg zu den cycloaliphatischen Polyamiden . . .	394
8.1.4	Teilaromatische Polyamide	394
8.1.4.1	Das Wichtigste in Kürze	394
8.1.4.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	396
8.1.4.3	Eigenschaftsprofil im Vergleich zu Standard-Polyamiden	396
8.1.4.4	Verarbeitung (Beispiele)	396
8.1.4.5	Anwendungsbeispiele	396
8.1.4.6	Der Weg zu den teilaromatischen Polyamiden	397
8.1.5	Modifizierung von teilaromatischen Polyamiden	398
8.1.6	Biopolyamide (Bio-PA)	398
8.1.7	Geschichtliches	399
8.2	Polyacrylnitril PAN	400
8.2.1	Das Wichtigste in Kürze	400
8.2.2	Handelsnamen (Beispiel [®])	400
8.2.3	Eigenschaften von Polyacrylnitril-Barriere- Kunststoffen	400
8.2.4	Verarbeitung und Anwendung (Beispiele)	401
8.2.5	Der Weg zu Polyacrylnitril-Barriere-Kunststoffen	401
8.2.6	PAN-Fasertransformation zu Kohlenstofffasern (C-Fasern)	402
8.2.7	Geschichtliches	403
8.3	Tabellarischer Eigenschaftsvergleich	403
9	Acetal- und Ether-Thermoplaste	411
9.1	Polyoxymethylen (Polyacetal) (POM)	412
9.1.1	Das Wichtigste in Kürze	412
9.1.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	412
9.1.3	Eigenschaften	412
9.1.4	Verarbeitung (Beispiele)	413
9.1.5	Anwendungsbeispiele	413
9.1.6	Der Weg zum Polyoxymethylen	414
9.1.6.1	POM-Homopolymerisat (POM-H)	414
9.1.6.2	POM-Copolymerisate (POM-C)	415

9.1.6.3	Eigenschaftsunterschiede zwischen POM-Homo- und Copolymerisaten	416
9.1.7	Modifizierte Polyoxymethylen-Polymerisate	416
9.1.8	Biopolyoxymethylen (Bio-POM)	417
9.1.8.1	Handelsnamen (Beispiele [®])	417
9.1.8.2	Der Weg zum Bio-POM.	417
9.1.9	Geschichtliches.	418
9.2	Polyphenylenether (PPE)	418
9.2.1	Das Wichtigste in Kürze	418
9.2.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	418
9.2.3	Eigenschaften	418
9.2.4	Verarbeitung (Beispiele)	419
9.2.5	Anwendungsbeispiele	419
9.2.6	Der Weg zum Polyphenylenether	420
9.2.7	Weitere modifizierte Polyphenylenether	421
9.2.8	Geschichtliches.	421
9.3	Tabellarischer Eigenschaftsvergleich	421
10	Halogenierte Kunststoffe II	425
10.1	Polytetrafluorethylen (PTFE)	425
10.1.1	Das Wichtigste in Kürze	425
10.1.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	425
10.1.3	Eigenschaften	425
10.1.4	Verarbeitung (Beispiele)	426
10.1.5	Anwendungsbeispiele	427
10.1.6	Der Weg zum Polytetrafluorethylen	428
10.2	Thermoplastisch verarbeitbare Fluor-Kunststoffe	430
10.2.1	Das Wichtigste in Kürze	431
10.2.2	Fluorthermoplaste und Beispiele [®] von Handelsnamen.	431
10.2.3	Eigenschaften	432
10.2.4	Verarbeitung (Beispiele)	432
10.2.5	Anwendungen	432
10.2.5.1	Spezielle Anwendungsbeispiele.	432
10.2.6	Der Weg zu den thermoplastisch verarbeitbaren Fluor-Kunststoffen	433
10.2.6.1	Perfluorethylenpropylen FEP, auch Tetrafluorethylen-Hexafluorpropylen-Copolymer	434
10.2.6.2	Perfluoroalkoxy-Copolymer (PFA)	434
10.2.6.3	Ethylen-Tetrafluorethylen-Copolymer (ETFE)	434
10.2.6.4	Polyvinylidenfluorid (PVDF)	435

10.2.6.5	Tetrafluorethylen-Hexafluorpropylen-Vinylidenfluorid-Terpolymer TFEHFPVDF (THV)	435
10.2.6.6	Polyvinylfluorid (PVF).....	435
10.2.6.7	Polychlortrifluorethylen (PCTFE).....	436
10.2.6.8	Ethylen-Chlortrifluorethylen-Copolymer (ECTFE).....	436
10.3	Geschichtliches zu den Fluorpolymeren	436
10.4	Tabellarischer Eigenschaftsvergleich	437
11	Duroplaste.....	441
11.1	Allgemeines über Herstellung und Eigenschaften	441
11.2	Phenoplaste (Phenol-Formaldehyd- Kondensationsharze) (PF)	443
11.2.1	Das Wichtigste in Kürze	443
11.2.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	444
11.2.3	Eigenschaften von PF-Formstoffen.....	444
11.2.4	Verarbeitung (Beispiele)	446
11.2.5	Anwendungsbeispiele	446
11.2.5.1	Harzformstoffe, Harzformteile	446
11.2.5.2	Schichtpressstoffe	446
11.2.5.3	PF-Harze	446
11.2.6	Der Weg zu den Phenolharzen.....	447
11.2.7	Geschichtliches	451
11.3	Aminoplaste	451
11.3.1	Harnstoffharze (Harnstoff-Formaldehyd- Kondensationsharze) (UF)	451
11.3.1.1	Das Wichtigste in Kürze	451
11.3.1.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	451
11.3.1.3	Eigenschaften	452
11.3.1.4	Verarbeitung, Anwendung (Beispiele).....	452
11.3.1.5	Der Weg zum Harnstoffharz.....	452
11.3.2	Melaminharze (Melamin-Formaldehyd- Kondensationsharze) (MF)	454
11.3.2.1	Das Wichtigste in Kürze	454
11.3.2.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	454
11.3.2.3	Eigenschaften	454
11.3.2.4	Verarbeitung, Anwendung (Beispiele).....	455
11.3.2.5	Eigenschaften und Anwendung von modifizierten Melaminharzen (Beispiele)	455
11.3.2.6	Der Weg zum Melaminharz	456

11.3.3	Geschichtliches	457
11.4	Reaktionsharz-Duroplaste	458
11.4.1	Ungesättigte Polyesterharze (UP).....	458
11.4.1.1	Das Wichtigste in Kürze.....	458
11.4.1.2	Handelsnamen (Beispiele [®]).....	458
11.4.1.3	Eigenschaften.....	458
11.4.1.4	Verarbeitung (Beispiele).....	460
11.4.1.5	Anwendungsbeispiele	461
11.4.1.6	Der Weg zu den ungesättigten Polyesterharzen	461
11.4.1.7	Geschichtliches	465
11.4.2	Vinylesterharze (VE).....	465
11.4.2.1	Eigenschaften.....	465
11.4.2.2	Verarbeitung, Anwendung (Beispiele).....	465
11.4.2.3	Der Weg zu den Vinylesterharzen.....	466
11.4.2.4	Geschichtliches	467
11.4.3	Epoxidharze (EP)	467
11.4.3.1	Das Wichtigste in Kürze.....	467
11.4.3.2	Handelsnamen (Beispiele [®]).....	467
11.4.3.3	Eigenschaften.....	467
11.4.3.4	Verarbeitung (Beispiele).....	468
11.4.3.5	Anwendungsbeispiele	468
11.4.3.6	Der Weg zu den Epoxidharzen	469
11.4.3.7	Geschichtliches	474
11.5	Sonstige Harze	475
11.5.1	Siliconharze	475
11.5.2	Polydiallylphthalatharze (PDAP, PDAIP)	476
11.5.2.1	Das Wichtigste in Kürze.....	476
11.5.2.2	Handelsnamen (Beispiele [®]).....	476
11.5.3	PUR-Gießharze	476
11.5.3.1	Elastomer-Gießharze.....	476
11.5.3.2	Harte PUR-Harze	477
11.5.4	Cyanatesterharze	477
11.6	Tabellarischer Eigenschaftsvergleich	478
12	Hochleistungspolymere	481
12.1	Polyaryletherketone (PAEK)	482
12.1.1	Das Wichtigste in Kürze.....	482
12.1.2	Handelsnamen (Beispiele [®]).....	482
12.1.3	Eigenschaften.....	482

12.1.4	Verarbeitung (Beispiele)	483
12.1.5	Anwendungsbeispiele	484
12.1.6	Der Weg zu den Polyaryletherketonen.	484
12.1.7	Geschichtliches	484
12.2	Polyarylate (PAR)	485
12.2.1	Das Wichtigste in Kürze	485
12.2.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	485
12.2.3	Eigenschaften	485
12.2.4	Verarbeitung (Beispiele)	486
12.2.5	Anwendungsbeispiele	486
12.2.6	Der Weg zu den Polyarylaten	487
12.2.7	Geschichtliches	487
12.3	Flüssigkristalline Polymere (LCP)	488
12.3.1	Das Wichtigste in Kürze	488
12.3.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	488
12.3.3	Eigenschaften	488
12.3.3.1	Aufbau und Struktur der LCP	488
12.3.3.2	Eigenschaften von thermotropen LCP	489
12.3.4	Verarbeitung (Beispiele)	491
12.3.5	Anwendungsbeispiele	491
12.3.6	Der Weg zu den flüssigkristallinen Polymeren	491
12.3.6.1	Herstellung der lyotropen LCP	491
12.3.6.2	Herstellung der thermotropen LCP	493
12.3.7	Geschichtliches	494
12.4	Polyimide (PI)	494
12.4.1	Das Wichtigste in Kürze	494
12.4.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	494
12.4.3	Eigenschaften	494
12.4.4	Verarbeitung (Beispiele)	496
12.4.5	Anwendungsbeispiele	496
12.4.6	Der Weg zu den Polyimiden	497
12.4.7	Geschichtliches	502
12.5	Polyarylsulfone (PSU, PES, PPSU)	503
12.5.1	Das Wichtigste in Kürze	503
12.5.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	503
12.5.3	Eigenschaften	503
12.5.4	Verarbeitung (Beispiele)	504
12.5.5	Anwendungsbeispiele	504
12.5.6	Der Weg zu den Polyarylsulfonen	504
12.5.7	Geschichtliches	506

12.6	Polyphenylensulfid (PPS).....	506
12.6.1	Das Wichtigste in Kürze.....	506
12.6.2	Handelsnamen (Beispiele [®]).....	506
12.6.3	Eigenschaften.....	506
12.6.4	Verarbeitung (Beispiele).....	507
12.6.5	Anwendungsbeispiele.....	507
12.6.6	Der Weg zu Polyphenylensulfid.....	508
12.6.7	Geschichtliches.....	508
12.7	Tabellarischer Eigenschaftsvergleich.....	508
13	Elastomere.....	513
13.1	Permanent vernetzte Elastomere/Gummi.....	514
13.1.1	Das Wichtigste in Kürze über vernetzte Elastomere.....	514
13.1.2	Handelsnamen (Beispiele [®]).....	516
13.1.3	Eigenschaften.....	518
13.1.4	Verarbeitung (Beispiele).....	518
13.1.5	Anwendungsbeispiele.....	519
13.1.6	Der Weg zu den permanent vernetzten Elastomeren.....	519
13.1.7	Geschichtliches.....	522
13.2	Reversibel vernetzte Elastomere/ Thermoplastische Elastomere TPE.....	522
13.2.1	Das Wichtigste in Kürze über TPE.....	522
13.2.2	Handelsnamen (Beispiele [®]).....	524
13.2.3	Allgemeine Eigenschaften.....	524
13.2.4	Einzeleigenschaften und Anwendungsbeispiele.....	527
13.2.4.1	Thermoplastische Elastomere auf Olefinbasis, TPE-O/TPE-V.....	527
13.2.4.2	Thermoplastische Elastomere auf Styrolbasis, TPE-S.....	528
13.2.4.3	Thermoplastische Polyester-Elastomere, TPE-E.....	528
13.2.4.4	Thermoplastische Polyamid-Elastomere, TPE-A.....	529
13.2.4.5	Thermoplastische Polyurethan-Elastomere, TPE-U (TPU).....	529
13.2.5	Der Weg zu den thermoplastischen Elastomeren.....	530
13.2.5.1	TPE-O/TPE-V.....	531
13.2.5.2	TPE-S.....	531
13.2.5.3	TPE-E.....	531
13.2.5.4	TPE-A.....	532
13.2.5.5	TPE-U (TPU).....	532

13.2.6	Geschichtliches	532
14	Schaumstoffe	533
14.1	Allgemeines über Herstellung und Eigenschaften	533
14.1.1	Handelsnamen (Beispiele [®])	536
14.2	Polystyrol-Schaumstoffe (PS-E)	536
14.2.1	Das Wichtigste in Kürze	536
14.2.2	Polystyrol-Hartschaumstoff, Partikel-Schaumstoff	536
14.2.2.1	Eigenschaften	536
14.2.2.2	Verarbeitung	537
14.2.2.3	Anwendungsbeispiele	537
14.2.3	Polystyrol-Hartschaumstoff, Extruder-Schaumstoff	537
14.2.3.1	Eigenschaften	537
14.2.3.2	Verarbeitung	537
14.2.3.3	Anwendungsbeispiele	537
14.2.4	Polystyrol-Integralschaumstoff	537
14.2.4.1	Eigenschaften	537
14.2.4.2	Verarbeitung (Beispiele)	538
14.2.4.3	Anwendungsbeispiele	538
14.3	Polyolefin-Schaumstoffe, PO-Schaumstoffe	538
14.3.1	Das Wichtigste in Kürze	538
14.3.2	Eigenschaften	538
14.3.3	Verarbeitung (Beispiele)	539
14.3.4	Anwendungsbeispiele	539
14.4	Polyurethan-Schaumstoffe, PUR-Schaumstoffe	539
14.4.1	Das Wichtigste in Kürze	539
14.4.2	PUR-Hartschaumstoffe, (PUR-H)	540
14.4.2.1	Eigenschaften	540
14.4.2.2	Anwendungsbeispiele	540
14.4.3	PUR-Weichschaumstoffe, (PUR-W)	540
14.4.3.1	Eigenschaften	540
14.4.3.2	Anwendungsbeispiele	541
14.4.4	PUR-Halbhart-(semiflexible) Schaumstoffe	541
14.4.4.1	Eigenschaften	541
14.4.4.2	Anwendungsbeispiele	541
14.4.5	PUR-Integral-Hartschaumstoffe, (PUR-I)	541
14.4.5.1	Eigenschaften	541
14.4.5.2	Anwendungsbeispiele	541
14.4.6	PUR-Integral-Halbhart- und Weichschaumstoffe	542

14.4.6.1	Eigenschaften	542
14.4.6.2	Anwendungsbeispiele	542
14.4.7	Der Weg zu den Polyurethan-Schaumstoffen	542
14.4.7.1	Polyurethan-Schäumsysteme	542
14.4.7.2	Chemie der PUR-Schäumsysteme	545
14.4.8	Isocyanatfreie Polyurethane (NIPU) NIPU, Non-Isocyanat-Polyurethan	548
14.4.8.1	Biobasierte NIPU-Schäume	549
14.4.9	Geschichtliches	549
14.5	Weitere Schaumstoffe	550
14.5.1	Polyvinylchlorid-Schaumstoffe	550
14.5.2	Phenol-Formaldehyd-Schaumstoffe	550
14.5.3	Harnstoff-Formaldehyd-Schaumstoffe	550
14.5.4	Polymethacrylimid-Schaumstoffe	550
14.5.5	Gummi-Schaumstoffe	551
14.6	Tabellarischer Eigenschaftsvergleich	552
15	Kunststoffe als Sonderwerkstoffe	553
15.1	Elektroaktive Kunststoffe	553
15.1.1	Oberflächenbehandlungen	554
15.1.2	Elektrisch leitfähige Compounds	554
15.1.3	Intrinsisch elektrisch leitfähige Polymere	555
15.1.4	Polymere als Elektrete	557
15.1.5	Ferroelektrische Polymere (Piezo- und Pyroelektrizität)	558
15.1.6	Triboelektrizität (Reibungselektrizität)	559
15.2	Funktionskunststoffe	560
15.2.1	Polymere als Datenspeicher	560
15.2.2	Polymere Leuchtdioden, Polymer-LEDs (PLEDs)	561
15.2.3	Polymere Photovoltaik (PPV)	562
15.2.4	Photoresists	564
15.2.5	Brennstoffzellen	565
15.2.6	Hybride Polymersysteme	566
15.3	Nanotechnologie und Kunststoffe	567
15.3.1	Anwendung von Nanoröhren (CNT) als Zusatzstoffe für Kunststoffe	568
15.3.2	Graphen	568
15.3.3	Nanotechnologie als Schrittmacher in die Zukunft	569
15.4	Kunststoffe in der Medizintechnik	570
15.4.1	Exemplarische Beispiele aus der Chirurgie	570
15.4.1.1	Poly lactide (PLA)	570

15.4.2	Scaffolds für Tissue Engineering.....	570
15.5	Biopolymere.....	571
15.5.1	Das Wichtigste in Kürze.....	571
15.5.2	Biokunststoffe – Kunststoffe aus nachwachsenden (biogenen) Rohstoffen (NAWARO).....	572
15.5.2.1	Handelsnamen (Beispiele [®]).....	572
15.5.2.2	Cellulosewerkstoffe.....	572
15.5.2.3	Stärkewerkstoffe.....	573
15.5.2.4	Werkstoffe aus dem Bioreaktor.....	575
15.5.2.5	Werkstoffe durch chemische Synthese biobasierter Rohstoffe.....	576
15.5.2.6	Biocomposites als Werkstoffe.....	580
15.5.2.7	Blends als Werkstoffe.....	580
15.5.3	Biologisch abbaubare Kunststoffe (BAK).....	580
15.5.3.1	Biokunststoffe neu definiert.....	582
15.5.4	Anwendungsbeispiele und Ausblick.....	582
15.6	Gele.....	583
15.6.1	Aufbau der festen Struktur.....	583
15.6.1.1	Nebenvalenzbindungen/Nebenvalenzgele.....	584
15.6.1.2	Hauptvalenzbindungen/Hauptvalenzgele.....	584
15.6.2	Anwendungsbeispiele.....	584
15.6.2.1	Hydrogele als Funktionspolymere.....	584
15.7	Tabellarischer Eigenschaftsvergleich.....	585
16	Gesundheits-, Sicherheits- und Nachhaltigkeitsaspekte.....	587
16.1	Das Wichtigste in Kürze.....	587
16.2	Gesundheits- und Sicherheitsaspekte von Kunststoffen.....	587
16.2.1	Gewerbetoxikologische Begriffe (Auswahl).....	587
16.2.2	Herstellung von Polymeren und Kunststoff-Formmassen....	588
16.2.3	Verarbeitung und Prüfung von Kunststoffen.....	589
16.2.4	Anwendung von Kunststoffen.....	589
16.3	Nachhaltigkeitsaspekte.....	590
16.3.1	Nachhaltige Entwicklung.....	590
16.3.2	Sustainable Development Goals (SDGs).....	591
16.3.2.1	Kunststoffe und ihr Beitrag zu den SDGs.....	591
16.3.2.2	Kunststoffe als Hilfsmittel im Unterricht.....	592
16.3.2.3	Lebensdauer von Erzeugnissen aus Kunststoff.....	592
16.3.3	Kunststoffverpackungen – ihr Beitrag zur Nachhaltigkeit....	593
16.3.3.1	Ausgangslage.....	593
16.3.3.2	Kreislaufwirtschaft durch Verwertung.....	594

17 Recycling und Umweltschutz	595
17.1 Das Wichtigste in Kürze	595
17.2 Recycling	595
17.2.1 Abfall- und Recyclinghierarchie	595
17.2.2 Abfallwirtschaft und Recycling aus Sicht der Kunststoffindustrie	596
17.2.2.1 Abfallwirtschaft	596
17.2.2.2 Kunststoffabfälle 2021	596
17.2.3 Grundsätzliche Aspekte beim Recycling von Kunststoffen ...	596
17.2.4 Recyclingkreisläufe von Kunststoffen	598
17.2.4.1 Werkstoffliches Recycling	599
17.2.4.2 Rohstoffliches Recycling	602
17.2.4.3 Kontrollierte energetische Verwertung („energy“) ..	605
17.3 Umweltschutz	612
17.3.1 Deponie	612
17.3.2 Littering alias Vermüllung	613
17.3.3 Codierung erleichtert Recycling	614
17.3.4 Recyclinggerechte Konstruktion	615
17.3.4.1 Recyclinggerechtes Konstruieren mit Kunststoffen ...	615
17.3.5 Abbaufähige, resorbierbare Kunststoffe	615
17.3.5.1 Biologisch abbaubare Kunststoffe (BAK)	616
17.3.5.2 Photoabbaubare Kunststoffe	616
17.3.5.3 Wasserlösliche Polymere	617
17.4 Zusammenfassung und Ausblick	617
17.4.1 Ausblick	618
18 Literaturverzeichnis	619
Sachwortverzeichnis	625