

Inhalt

Vorwort zur fünften Auflage	V
Vorwort zur ersten Auflage	VII
Prof. 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	33
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	Nebenvalenzbindungen	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 $\overline{M}$ 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 $\overline{M}$ 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	Verstärkungstoffe	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	Kunststoffherzeugung beim Verarbeiter	149
3.4	Aufbereitung/Compoundierung	150
3.4.1	Maschinenhersteller (Beispiele®)	152
3.4.2	Einteilung der Aufbereitungs-Walzwerkverfahren	152
3.4.2.1	Einteilung der Aufbereitungs- Walzwerkverfahren	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/3D-Druckverfahren (Additive Manufacturing AM)	216
3.5.11.1	Polymerisation als Basis für AM	217
3.5.11.2	Kunststoffe als Basis für AM	219
3.5.12	Pathologischer Befund beim Urformen	220
3.6	Umformen	223
3.6.1	Hersteller von Thermoformmaschinen (Beispiele®)	223
3.6.2	Unterschiede im Warmformbereich zwischen amorphen und teilkristallinen Thermoplasten	224
3.6.3	Einteilung der Warmformverfahren für Thermoplaste	224
3.6.3.1	Biegeumformen	224
3.6.3.2	Zugumformen	225
3.6.3.3	Zugdruckumformen	225
3.6.3.4	Kombinierte Verfahren	225
3.6.4	Verfahrenstechnik beim Warmformen	226
3.6.5	Thermoformmaschinen	228
3.6.6	Pathologischer Befund beim Umformen	229
3.6.7	Vor- und Nachteile des Warmformens	231
3.7	Trennen (Spanen)	231
3.8	Fügen	233
3.8.1	Schweißen	233
3.8.1.1	Hersteller von Schweißmaschinen für Thermoplaste	233
3.8.1.2	Grundlagen	234

3.8.1.3	Schweißverfahren (Auswahl)	236
3.8.1.4	Pathologischer Befund beim Schweißen	238
3.8.2	Kleben	239
3.8.2.1	Grundlagen	239
3.8.2.2	Abbindemechanismus der Klebung	241
3.8.2.3	Verfahrenstechnik	242
3.8.2.4	Arbeitssicherheit und Schutzmaßnahmen beim Umgang mit Klebstoffen	242
3.8.3	Mechanische Verbindungen	242
3.9	Beschichten	243
3.9.1	Einteilung der Beschichtungsverfahren	243
3.9.2	Streichverfahren	243
3.9.3	Pulverbeschichten	245
3.10	Veredeln	245
3.10.1	Lackieren von Kunststoffen	246
3.10.2	Bedrucken von Kunststoffen	246
3.10.3	Laserbeschriften	248
3.10.4	Heißprägen	248
3.10.5	Metallisieren	248
3.10.6	Beflocken	250
3.10.7	Plasmabeschichten	250
3.10.8	Tempern	251
3.10.9	Konditionieren	252
3.10.10	Bestrahlen	252
4	Polyolefine	255
4.1	Polyethylen (PE)	255
4.1.1	Das Wichtigste in Kürze	255
4.1.2	Handelsnamen (Beispiele®)	255
4.1.3	Eigenschaften	256
4.1.4	Verarbeitung und Anwendung	257
4.1.5	Anwendungsbeispiele	258
4.1.6	Der Weg zum Polyethylen	259
4.1.6.1	Hochdruckverfahren	259
4.1.6.2	Niederdruckverfahren	260
4.1.7	Der molekulare Aufbau des Polyethylens	263
4.1.7.1	Polyethylene mit multimodaler Molmassenverteilung	264
4.1.7.2	Ethylen-Copolymere mit α -Olefinen	265
4.1.7.3	Metallocen-katalysierte Ethylencopolymere (PE-MC)	266

4.2	Chemische Modifikation von Polyethylen.....	267
4.2.1	Abwandlung durch Vernetzen.....	267
4.2.2	Abwandlung durch chemische Veränderungen.....	268
4.2.3	Weitere Ethylen-Copolymere.....	269
4.2.3.1	Unpolare Ethylen-Copolymere.....	269
4.2.3.2	Polare Ethylen-Copolymere.....	270
4.3	Polypropylen (PP).....	275
4.3.1	Das Wichtigste in Kürze.....	275
4.3.2	Handelsnamen (Beispiele®).....	275
4.3.3	Eigenschaften.....	276
4.3.4	Verarbeitung und Anwendung.....	277
4.3.5	Anwendungsbeispiele.....	277
4.3.6	Der Weg zum Polypropylen.....	278
4.3.7	Der molekulare Aufbau von Polypropylen.....	279
4.3.7.1	Isotaktisches Polypropylen (iPP).....	280
4.3.7.2	Syndiotaktisches Polypropylen (sPP).....	280
4.3.7.3	Ataktisches Polypropylen (aPP).....	281
4.4	Modifikation von Polypropylen.....	281
4.4.1	PP-Copolymere.....	281
4.4.2	Gefüllte und verstärkte Polypropylene.....	282
4.4.3	Chemische Modifikation am fertigen PP-Polymer.....	283
4.5	Polyisobutylene (PIB).....	283
4.5.1	Handelsnamen (Beispiele®).....	283
4.5.2	Eigenschaften.....	283
4.5.3	Verarbeitung (Beispiele).....	284
4.5.4	Anwendungsbeispiele.....	284
4.5.5	Der Weg zum Polyisobutylene.....	284
4.6	Polybuten-1 (PB-1).....	285
4.6.1	Handelsnamen (Beispiele®).....	285
4.6.2	Eigenschaften, Verarbeitung und Anwendung.....	285
4.6.3	Der Weg zum Polybuten-1.....	286
4.7	Poly-4-methylpenten-1 (PMP).....	286
4.7.1	Handelsnamen (Beispiel®).....	286
4.7.2	Eigenschaften.....	286
4.7.3	Verarbeitung (Beispiele).....	287
4.7.4	Anwendungsbeispiele.....	287
4.7.5	Der Weg zum Poly-4-methylpenten-1.....	287
4.8	Geschichtliches.....	288
4.9	Tabellarischer Eigenschaftsvergleich.....	289

5	Halogenierte Kunststoffe I	293
5.1	Hart-PVC (Hart-Polyvinylchlorid) PVC-U (weichmacherfreies Polyvinylchlorid)	293
5.1.1	Das Wichtigste in Kürze über Hart-PVC-U	293
5.1.2	Handelsnamen (Beispiele®)	294
5.1.3	Eigenschaften	294
5.1.4	Verarbeitung (Beispiele)	295
5.1.5	Anwendungsbeispiele	296
5.1.6	Der Weg zum Polyvinylchlorid	296
5.2	Modifizierte Vinylchlorid-Polymerisate	300
5.2.1	Vinylchlorid-Copolymere	301
5.2.1.1	Einteilung	301
5.2.1.2	Eigenschaften, Verarbeitung und Anwendung	302
5.2.1.3	Der Weg zu den Vinylchlorid-Copolymeren	302
5.2.2	Besonders schlagfestes Polyvinylchlorid (PVC-HI)	303
5.2.2.1	Eigenschaften, Verarbeitung und Anwendung	303
5.2.2.2	Der Weg zum besonders schlagfesten Polyvinylchlorid	303
5.2.3	Chloriertes Polyvinylchlorid (PVC-C)	304
5.2.3.1	Eigenschaften, Verarbeitung und Anwendung	304
5.2.3.2	Der Weg zum chlorierten Polyvinylchlorid	305
5.3	Weich-Polyvinylchlorid (PVC-P) (Weich PVC, weichmacherhaltiges PVC)	305
5.3.1	Das wichtigste in Kürze über Weich-Polyvinylchlorid	305
5.3.2	Handelsnamen (Beispiele®)	306
5.3.3	Eigenschaften	306
5.3.4	Verarbeitung (Beispiele)	307
5.3.5	Anwendungsbeispiele	307
5.3.6	Der Weg zum Weich-Polyvinylchlorid	308
5.3.6.1	Weichmacher	308
5.3.6.2	Einarbeitung von Weichmachern	310
5.4	Chloriertes Polyethylen (PE-C)	312
5.4.1	Handelsnamen (Beispiele®)	312
5.4.2	Eigenschaften, Verarbeitung und Anwendung	312
5.4.3	Der Weg zum chlorierten Polyethylen	312
5.5	Polyvinylidenchlorid (PVDC)	314
5.5.1	Das Wichtigste in Kürze	314
5.5.2	Handelsnamen (Beispiele®)	314

5.5.3	Eigenschaften, Verarbeitung und Anwendung von Vinylidenchlorid-Copolymerisaten	314
5.5.4	Der Weg zu den Vinylidenchlorid-Copolymerisaten	315
5.6	Geschichtliches	315
5.7	Tabellarischer Eigenschaftsvergleich	316
6	Polystyrol-Kunststoffe.....	319
6.1	Das Wichtigste in Kürze über Polystyrol-Kunststoffe.....	319
6.2	Polystyrol (PS).....	320
6.2.1	Handelsnamen (Beispiele®)	320
6.2.2	Ataktisches Polystyrol	320
6.2.2.1	Eigenschaften	320
6.2.2.2	Verarbeitung (Beispiele).....	321
6.2.2.3	Anwendungsbeispiele	321
6.2.2.4	Der Weg zum Polystyrol	321
6.2.3	Stereoreguläre Polystyrole.....	323
6.3	Modifizierte Styrolpolymere (Abschnitt 6.4 bis 6.8).....	324
6.4	Styrol-Acrylnitril-Copolymerisat (SAN).....	325
6.4.1	Handelsnamen (Beispiele®)	325
6.4.2	Eigenschaften und Verarbeitung	325
6.4.3	Anwendungsbeispiele	326
6.4.4	Der Weg zum Styrol-Acrylnitril	326
6.5	Schlagzäh modifiziertes Polystyrol (PS-I) (Styrol-Butadien SB)	327
6.5.1	Handelsnamen (Beispiele®)	327
6.5.2	Eigenschaften.....	327
6.5.3	Verarbeitung (Beispiele)	328
6.5.4	Anwendungsbeispiele.....	328
6.5.5	Der Weg zum schlagzähenden Polystyrol	328
6.6	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Polymerisate (ABS).....	331
6.6.1	Handelsnamen (Beispiele®)	332
6.6.2	Eigenschaften.....	332
6.6.3	Verarbeitung (Beispiele)	332
6.6.4	Anwendungsbeispiele.....	332
6.6.5	Der Weg zum Acrylnitril-Butadien-Styrol.....	333
6.7	Schlagzähe Acrylnitril-Styrol-Formmassen (ASA, AES, ACS)	335
6.7.1	Handelsnamen (Beispiele®)	335
6.7.2	Eigenschaften, Verarbeitung und Anwendung von Acrylnitril-Styrol-Acrylat (ASA).....	335
6.7.3	Der Weg zum Acrylnitril-Styrol-Acrylat	336

6.8	Blends	337
6.8.1	PS-I + PPE Blends	337
6.8.2	ABS + PC bzw. ASA + PC Blends	337
6.8.3	ABS + PA Blends	338
6.8.4	PS + PE Blends	338
6.9	Geschichtliches zu den Styrolpolymeren	338
6.10	Tabellarischer Eigenschaftsvergleich	340
7	Ester-Thermoplaste	345
7.1	Ester-Gruppe in der Hauptkette	346
7.1.1	Polyalkylenterephthalate („gesättigte“ Polyester) (PET, PBT) und Polyethylenaphthalat (PEN).....	346
7.1.1.1	Das Wichtigste in Kürze über Polyalkylenterephthalate	346
7.1.1.2	Der Weg zu den Polyalkylenterephthalaten	346
7.1.1.3	Polyethylenterephthalat (PET).....	348
7.1.1.4	Polybutylenterephthalat (PBT)	350
7.1.1.5	Polytrimethylenterephthalat (PTT).....	351
7.1.1.6	Modifizierte Polyalkylenterephthalate	351
7.1.1.7	Polyethylenaphthalat (PEN)	352
7.1.1.8	Geschichtliches	353
7.1.2	Polycarbonat (PC).....	354
7.1.2.1	Das Wichtigste in Kürze über Polycarbonat	354
7.1.2.2	Handelsnamen (Beispiele®).....	354
7.1.2.3	Eigenschaften	354
7.1.2.4	Verarbeitung (Beispiele)	355
7.1.2.5	Anwendungsbeispiele	355
7.1.2.6	Der Weg zum Polycarbonat.....	355
7.1.2.7	Modifizierte Polycarbonate	357
7.1.2.8	Geschichtliches	360
7.1.3	Polyestercarbonat (PEC)	360
7.1.3.1	Das Wichtigste in Kürze.....	360
7.1.3.2	Handelsnamen (Beispiele®).....	360
7.1.3.3	Eigenschaften	360
7.1.3.4	Verarbeitung (Beispiele).....	361
7.1.3.5	Anwendungsbeispiele	361
7.1.3.6	Der Weg zu Polyestercarbonat	361
7.1.3.7	Geschichtliches	362
7.2	Ester in der Seitenkette	362
7.2.1	Polymethylmethacrylat (PMMA)	362

7.2.1.1	Das Wichtigste in Kürze	362
7.2.1.2	Handelsnamen (Beispiele®)	362
7.2.1.3	Eigenschaften	362
7.2.1.4	Verarbeitung (Beispiele).....	363
7.2.1.5	Anwendungsbeispiele	363
7.2.1.6	Der Weg zum Polymethylmethacrylat	363
7.2.1.7	Modifizierte Methylmethacrylate und Derivate.....	364
7.2.1.8	Geschichtliches.....	366
7.3	Celluloseester (CA, CB, CP, CAB, CAP).....	367
7.3.1	Das Wichtigste in Kürze	367
7.3.2	Handelsnamen (Beispiele®)	367
7.3.3	Eigenschaften.....	367
7.3.4	Verarbeitung (Beispiele)	368
7.3.5	Anwendungsbeispiele.....	368
7.3.6	Der Weg zu den Celluloseestern	368
7.3.6.1	Der Ausgangsstoff Cellulose	368
7.3.6.2	Chemische Umsetzungen an Cellulose.....	369
7.3.7	Geschichtliches	370
7.4	Tabellarischer Eigenschaftsvergleich	371
8	Stickstoff-Thermoplaste	379
8.1	Polyamide (PA).....	379
8.1.1	Teilkristalline aliphatische Polyamide.....	379
8.1.1.1	Das Wichtigste in Kürze	379
8.1.1.2	Handelsnamen (Beispiele®)	381
8.1.1.3	Eigenschaften	382
8.1.1.4	Verarbeitung (Beispiele).....	383
8.1.1.5	Anwendungsbeispiele	384
8.1.1.6	Der Weg zu den teilkristallinen aliphatischen Polyamiden.....	384
8.1.1.7	Wasserstoffbrücken (H-Brücken).....	388
8.1.2	Modifizierte teilkristalline aliphatische Polyamide.....	389
8.1.2.1	Chemische Modifizierung	389
8.1.2.2	Physikalische Modifizierung	389
8.1.2.3	Anwendungsbeispiele	390
8.1.3	Cycloaliphatische Polyamide	390
8.1.3.1	Das Wichtigste in Kürze	390
8.1.3.2	Handelsnamen (Beispiele®)	391
8.1.3.3	Eigenschaften	391
8.1.3.4	Verarbeitung (Beispiele).....	391

8.1.3.5	Anwendungsbeispiele	391
8.1.3.6	Der Weg zu den cycloaliphatischen Polyamiden....	392
8.1.4	Teilaromatische Polyamide	392
8.1.4.1	Das Wichtigste in Kürze.....	392
8.1.4.2	Handelsnamen (Beispiele®).....	394
8.1.4.3	Eigenschaftsprofil im Vergleich zu Standard-Polyamiden	394
8.1.4.4	Verarbeitung (Beispiele).....	394
8.1.4.5	Anwendungsbeispiele	394
8.1.4.6	Der Weg zu den teilaromatischen Polyamiden	395
8.1.5	Modifizierung von teilaromatischen Polyamiden.....	396
8.1.6	Geschichtliches.....	396
8.2	Polyacrylnitril PAN.....	398
8.2.1	Das Wichtigste in Kürze	398
8.2.2	Handelsnamen (Beispiel®)	398
8.2.3	Eigenschaften von Polyacrylnitril-Barriere- Kunststoffen	398
8.2.4	Verarbeitung und Anwendung (Beispiele).....	399
8.2.5	Der Weg zu Polyacrylnitril-Barriere-Kunststoffen	399
8.2.6	PAN-Fasertransformation zu Kohlenstofffasern (C-Fasern).....	400
8.2.7	Geschichtliches.....	400
8.3	Tabellarischer Eigenschaftsvergleich	401
9	Acetal- und Ether-Thermoplaste.....	409
9.1	Polyoxymethylen (Polyacetal) (POM).....	410
9.1.1	Das Wichtigste in Kürze	410
9.1.2	Handelsnamen (Beispiele®)	410
9.1.3	Eigenschaften	410
9.1.4	Verarbeitung (Beispiele).....	411
9.1.5	Anwendungsbeispiele	411
9.1.6	Der Weg zum Polyoxymethylen.....	412
9.1.6.1	POM-Homopolymerisat (POM-H)	412
9.1.6.2	POM-Copolymerisate (POM-C).....	413
9.1.6.3	Eigenschaftsunterschiede zwischen POM-Homo- und Copolymerisaten	414
9.1.7	Modifizierte Polyoxymethylen-Polymerisate	414
9.1.8	Geschichtliches.....	415
9.2	Polyphenylenether (PPE).....	416
9.2.1	Das Wichtigste in Kürze	416
9.2.2	Handelsnamen (Beispiele®)	416

9.2.3	Eigenschaften	416
9.2.4	Verarbeitung (Beispiele)	417
9.2.5	Anwendungsbeispiele	417
9.2.6	Der Weg zum Polyphenylenether	417
9.2.7	Weitere modifizierte Polyphenylenether	418
9.2.8	Geschichtliches	419
9.3	Tabellarischer Eigenschaftsvergleich	419
10	Halogenierte Kunststoffe II	423
10.1	Polytetrafluorethylen (PTFE)	423
10.1.1	Das Wichtigste in Kürze	423
10.1.2	Handelsnamen (Beispiele®)	423
10.1.3	Eigenschaften	423
10.1.4	Verarbeitung (Beispiele)	424
10.1.5	Anwendungsbeispiele	425
10.1.6	Der Weg zum Polytetrafluorethylen	426
10.2	Thermoplastisch verarbeitbare Fluor-Kunststoffe	428
10.2.1	Das Wichtigste in Kürze	429
10.2.2	Fluorthermoplaste und Beispiele® von Handelsnamen	429
10.2.3	Eigenschaften	430
10.2.4	Verarbeitung (Beispiele)	430
10.2.5	Anwendungen	430
	10.2.5.1 Spezielle Anwendungsbeispiele	430
10.2.6	Der Weg zu den thermoplastisch verarbeitbaren Fluor-Kunststoffen	431
	10.2.6.1 Perfluorethylenpropylen FEP, auch Tetrafluorethylen- Hexafluorpropylen-Copolymer	432
	10.2.6.2 Perfluoroalkoxy-Copolymer (PFA)	432
	10.2.6.3 Ethylen-Tetrafluorethylen-Copolymer (ETFE)	432
	10.2.6.4 Polyvinylidenfluorid (PVDF)	433
	10.2.6.5 Tetrafluorethylen-Hexafluorpropylen- Vinylidenfluorid-Terpolymer TFEHFPVDF (THV)	433
	10.2.6.6 Polyvinylfluorid (PVF)	433
	10.2.6.7 Polychlortrifluorethylen (PCTFE)	434
	10.2.6.8 Ethylen-Chlortrifluorethylen-Copolymer (ECTFE)	434
10.3	Geschichtliches zu den Fluorpolymeren	434
10.4	Tabellarischer Eigenschaftsvergleich	435

11 Duroplaste	439
11.1 Allgemeines über Herstellung und Eigenschaften.	439
11.2 Phenoplaste (Phenol-Formaldehyd- Kondensationsharze) (PF)	441
11.2.1 Das Wichtigste in Kürze	441
11.2.2 Handelsnamen (Beispiele®)	442
11.2.3 Eigenschaften von PF-Formstoffen	442
11.2.4 Verarbeitung (Beispiele)	444
11.2.5 Anwendungsbeispiele	444
11.2.5.1 Harzformstoffe, Harzformteile	444
11.2.5.2 Schichtpressstoffe	444
11.2.5.3 PF-Harze	444
11.2.6 Der Weg zu den Phenolharzen	445
11.2.7 Geschichtliches.	449
11.3 Aminoplaste	449
11.3.1 Harnstoffharze (Harnstoff-Formaldehyd- Kondensationsharze) (UF)	449
11.3.1.1 Das Wichtigste in Kürze	449
11.3.1.2 Handelsnamen (Beispiele®)	449
11.3.1.3 Eigenschaften	450
11.3.1.4 Verarbeitung, Anwendung (Beispiele)	450
11.3.1.5 Der Weg zum Harnstoffharz	450
11.3.2 Melaminharze (Melamin-Formaldehyd- Kondensationsharze) (MF)	452
11.3.2.1 Das Wichtigste in Kürze	452
11.3.2.2 Handelsnamen (Beispiele®)	452
11.3.2.3 Eigenschaften	452
11.3.2.4 Verarbeitung, Anwendung (Beispiele)	453
11.3.2.5 Eigenschaften und Anwendung von modifizierten Melaminharzen (Beispiele)	453
11.3.2.6 Der Weg zum Melaminharz	454
11.3.3 Geschichtliches.	455
11.4 Reaktionsharz-Duroplaste	456
11.4.1 Ungesättigte Polyesterharze (UP)	456
11.4.1.1 Das Wichtigste in Kürze	456
11.4.1.2 Handelsnamen (Beispiele®)	456
11.4.1.3 Eigenschaften	456
11.4.1.4 Verarbeitung (Beispiele)	458
11.4.1.5 Anwendungsbeispiele	459
11.4.1.6 Der Weg zu den ungesättigten Polyesterharzen.	459

11.4.1.7	Geschichtliches.....	463
11.4.2	Vinylesterharze (VE)	463
11.4.2.1	Eigenschaften	463
11.4.2.2	Verarbeitung, Anwendung (Beispiele).....	463
11.4.2.3	Der Weg zu den Vinylesterharzen.....	464
11.4.2.4	Geschichtliches.....	465
11.4.3	Epoxidharze (EP)	465
11.4.3.1	Das Wichtigste in Kürze	465
11.4.3.2	Handelsnamen (Beispiele®)	465
11.4.3.3	Eigenschaften	465
11.4.3.4	Verarbeitung (Beispiele).....	466
11.4.3.5	Anwendungsbeispiele	466
11.4.3.6	Der Weg zu den Epoxidharzen	467
11.4.3.7	Geschichtliches.....	472
11.5	Sonstige Harze.....	473
11.5.1	Siliconharze	473
11.5.2	Polydiallylphthalatharze (PDAP, PDAIP)	474
11.5.2.1	Das Wichtigste in Kürze	474
11.5.2.2	Handelsnamen (Beispiele®).....	474
11.5.3	PUR-Gießharze	474
11.5.3.1	Elastomer-Gießharze.....	474
11.5.3.2	Harte PUR-Harze	475
11.5.4	Cyanatester-Harze.....	475
11.6	Tabellarischer Eigenschaftsvergleich	476
12	Hochleistungspolymere.....	479
12.1	Polyaryletherketone (PAEK).....	480
12.1.1	Das Wichtigste in Kürze	480
12.1.2	Handelsnamen (Beispiele®)	480
12.1.3	Eigenschaften.....	480
12.1.4	Verarbeitung (Beispiele)	481
12.1.5	Anwendungsbeispiele	482
12.1.6	Der Weg zu den Polyaryletherketonen.....	482
12.1.7	Geschichtliches	482
12.2	Polyarylate (PAR).....	483
12.2.1	Das Wichtigste in Kürze	483
12.2.2	Handelsnamen (Beispiele®)	483
12.2.3	Eigenschaften.....	483
12.2.4	Verarbeitung (Beispiele)	484
12.2.5	Anwendungsbeispiele.....	484

12.2.6	Der Weg zu den Polyarylaten.....	485
12.2.7	Geschichtliches.....	485
12.3	Flüssigkristalline Polymere (LCP)	486
12.3.1	Das Wichtigste in Kürze	486
12.3.2	Handelsnamen (Beispiele®)	486
12.3.3	Eigenschaften	486
12.3.3.1	Aufbau und Struktur der LCP	486
12.3.3.2	Eigenschaften von thermotropen LCP.....	487
12.3.4	Verarbeitung (Beispiele).....	489
12.3.5	Anwendungsbeispiele	489
12.3.6	Der Weg zu den flüssigkristallinen Polymeren	489
12.3.6.1	Herstellung der lyotropen LCP	489
12.3.6.2	Herstellung der thermotropen LCP	491
12.3.7	Geschichtliches.....	492
12.4	Polyimide (PI)	492
12.4.1	Das Wichtigste in Kürze	492
12.4.2	Handelsnamen (Beispiele®)	492
12.4.3	Eigenschaften	492
12.4.4	Verarbeitung (Beispiele).....	494
12.4.5	Anwendungsbeispiele	494
12.4.6	Der Weg zu den Polyimiden	495
12.4.7	Geschichtliches.....	500
12.5	Polyarylsulfone (PSU, PES, PPSU)	501
12.5.1	Das Wichtigste in Kürze	501
12.5.2	Handelsnamen (Beispiele®)	501
12.5.3	Eigenschaften	501
12.5.4	Verarbeitung (Beispiele).....	502
12.5.5	Anwendungsbeispiele	502
12.5.6	Der Weg zu den Polyarylsulfonen	502
12.5.7	Geschichtliches.....	504
12.6	Polyphenylensulfid (PPS)	504
12.6.1	Das Wichtigste in Kürze	504
12.6.2	Handelsnamen (Beispiele®)	504
12.6.3	Eigenschaften	504
12.6.4	Verarbeitung (Beispiele).....	505
12.6.5	Anwendungsbeispiele	505
12.6.6	Der Weg zu Polyphenylensulfid.....	506
12.6.7	Geschichtliches.....	506
12.7	Tabellarischer Eigenschaftsvergleich	506

13 Elastomere	511
13.1 Permanent vernetzte Elastomere/Gummi	512
13.1.1 Das Wichtigste in Kürze über vernetzte Elastomere	512
13.1.2 Handelsnamen (Beispiele®)	514
13.1.3 Eigenschaften	514
13.1.4 Verarbeitung (Beispiele)	516
13.1.5 Anwendungsbeispiele	516
13.1.6 Der Weg zu den permanent vernetzten Elastomeren	517
13.1.7 Geschichtliches	519
13.2 Reversibel vernetzte Elastomere/ Thermoplastische Elastomere TPE	519
13.2.1 Das Wichtigste in Kürze über TPE	519
13.2.2 Handelsnamen (Beispiele®)	522
13.2.3 Allgemeine Eigenschaften	522
13.2.4 Einzeleigenschaften und Anwendungsbeispiele	525
13.2.4.1 Thermoplastische Elastomere auf Olefinbasis, TPE-O/TPE-V (TPO/TPV)	525
13.2.4.2 Thermoplastische Elastomere auf Styrolbasis, TPE-S (TPS)	525
13.2.4.3 Thermoplastische Polyester-Elastomere, TPE-E (TPC)	526
13.2.4.4 Thermoplastische Polyamid-Elastomere, TPE-A (TPA)	526
13.2.4.5 Thermoplastische Polyurethan-Elastomere, TPE-U (TPU)	527
13.2.5 Der Weg zu den thermoplastischen Elastomeren	528
13.2.5.1 TPE-O/TPE-V (TPO/TPV)	528
13.2.5.2 TPE-S (TPS)	529
13.2.5.3 TPE-E (TPC)	529
13.2.5.4 TPE-A (TPA)	529
13.2.5.5 TPE-U (TPU)	530
13.2.6 Geschichtliches	530
14 Schaumstoffe	531
14.1 Allgemeines über Herstellung und Eigenschaften	531
14.1.1 Handelsnamen (Beispiele®)	534
14.2 Polystyrol-Schaumstoffe (PS-E)	534
14.2.1 Das Wichtigste in Kürze	534
14.2.2 Polystyrol-Hartschaumstoff, Partikel-Schaumstoff	534
14.2.2.1 Eigenschaften	534

	14.2.2.2	Verarbeitung	535
	14.2.2.3	Anwendungsbeispiele	535
14.2.3		Polystyrol-Hartschaumstoff, Extruder-Schaumstoff	535
	14.2.3.1	Eigenschaften	535
	14.2.3.2	Verarbeitung	535
	14.2.3.3	Anwendungsbeispiele	535
14.2.4		Polystyrol-Integralschaumstoff	535
	14.2.4.1	Eigenschaften	535
	14.2.4.2	Verarbeitung (Beispiele)	536
	14.2.4.3	Anwendungsbeispiele	536
14.3		Polyolefin-Schaumstoffe, PO-Schaumstoffe	536
	14.3.1	Das Wichtigste in Kürze	536
	14.3.2	Eigenschaften	536
	14.3.3	Verarbeitung (Beispiele)	537
	14.3.4	Anwendungsbeispiele	537
14.4		Polyurethan-Schaumstoffe, PUR-Schaumstoffe	537
	14.4.1	Das Wichtigste in Kürze	537
	14.4.2	PUR-Hartschaumstoffe, (PUR-H)	538
	14.4.2.1	Eigenschaften	538
	14.4.2.2	Anwendungsbeispiele	538
	14.4.3	PUR-Weichschaumstoffe, (PUR-W)	538
	14.4.3.1	Eigenschaften	538
	14.4.3.2	Anwendungsbeispiele	539
	14.4.4	PUR-Halbhart-(semiflexible) Schaumstoffe	539
	14.4.4.1	Eigenschaften	539
	14.4.4.2	Anwendungsbeispiele	539
	14.4.5	PUR-Integral-Hartschaumstoffe, (PUR-I)	539
	14.4.5.1	Eigenschaften	539
	14.4.5.2	Anwendungsbeispiele	539
	14.4.6	PUR-Integral-Halbhart- und Weichschaumstoffe	540
	14.4.6.1	Eigenschaften	540
	14.4.6.2	Anwendungsbeispiele	540
	14.4.7	Der Weg zu den Polyurethan-Schaumstoffen	540
	14.4.7.1	Polyurethan-Schäumsysteme	540
	14.4.7.2	Chemie der PUR-Schäumsysteme	543
	14.4.8	Isocyanatfreie Polyurethane (NIPU) NIPU, Non-Isocyanat-Polyurethan	546
	14.4.8.1	Biobasierte NIPU-Schäume	547
	14.4.9	Geschichtliches	547
14.5		Weitere Schaumstoffe	548

14.5.1	Polyvinylchlorid-Schaumstoffe	548
14.5.2	Phenol-Formaldehyd-Schaumstoffe	548
14.5.3	Harnstoff-Formaldehyd-Schaumstoffe	548
14.5.4	Polymethacrylimid-Schaumstoffe	548
14.5.5	Gummi-Schaumstoffe	549
14.6	Tabellarischer Eigenschaftsvergleich	550
15	Kunststoffe als Sonderwerkstoffe.....	551
15.1	Elektroaktive Kunststoffe	551
15.1.1	Oberflächenbehandlungen	552
15.1.2	Elektrisch leitfähige Compounds.....	552
15.1.3	Intrinsisch elektrisch leitfähige Polymere.....	553
15.1.4	Polymere als Elektrete	555
15.1.5	Ferroelektrische Polymere (Piezo- und Pyroelektrizität)	556
15.1.6	Triboelektrizität (Reibungselektrizität).....	557
15.2	Funktionskunststoffe	558
15.2.1	Polymere als Datenspeicher	558
15.2.2	Polymere Leuchtdioden, Polymer-LEDs (PLEDs)	559
15.2.3	Polymere Photovoltaik (PPV)	560
15.2.4	Photoresists	562
15.2.5	Brennstoffzellen.....	563
15.2.6	Hybride Polymersysteme.....	564
15.3	Nanotechnologie und Kunststoffe.....	565
15.3.1	Anwendung von Nanoröhren (CNT) als Zusatzstoffe für Kunststoffe	566
15.3.2	Graphen	566
15.3.3	Nanotechnologie als Schrittmacher in die Zukunft.....	567
15.4	Kunststoffe in der Medizintechnik	568
15.4.1	Exemplarische Beispiele aus der Chirurgie	568
15.4.1.1	Polylactide.....	568
15.4.2	Scaffolds für Tissue Engineering	568
15.5	Biopolymere.....	569
15.5.1	Das Wichtigste in Kürze	569
15.5.2	Biokunststoffe – Kunststoffe aus nachwachsenden (biogenen) Rohstoffen (NAWARO)	570
15.5.2.1	Handelsnamen (Beispiele®)	570
15.5.2.2	Cellulosewerkstoffe.....	570
15.5.2.3	Stärkewerkstoffe.....	571
15.5.2.4	Werkstoffe aus dem Bioreaktor	573
15.5.2.5	Werkstoffe durch chemische Synthese biobasierter Rohstoffe.....	574

15.5.2.6	Biocomposites als Werkstoffe	576
15.5.2.7	Blends als Werkstoffe	577
15.5.3	Biologisch abbaubare Kunststoffe (BAK)	577
15.5.3.1	Biokunststoffe neu definiert	579
15.5.4	Anwendungsbeispiele und Ausblick	579
15.6	Gele	580
15.6.1	Aufbau der festen Struktur	580
15.6.1.1	Nebenvalenzbindungen/Nebenvalenzgele	580
15.6.1.2	Hauptvalenzbindungen/Hauptvalenzgele	581
15.6.2	Anwendungsbeispiele	581
15.6.2.1	Hydrogele als Funktionspolymere	581
15.7	Tabellarischer Eigenschaftsvergleich	582
16	Gesundheits-, Sicherheits- und Umweltaspekte von Kunststoffen	583
16.1	Gesundheits- und Sicherheitsaspekte von Kunststoffen	583
16.1.1	Gewerbetoxikologische Begriffe (Auswahl)	583
16.1.2	Herstellung von Polymeren und Kunststoff- Formmassen	583
16.1.3	Verarbeitung und Prüfung von Kunststoffen	584
16.1.4	Anwendung von Kunststoffen	585
16.2	Umweltaspekte von Kunststoffen	586
16.2.1	Nachhaltige Entwicklung	586
16.2.2	Lebensdauer von Erzeugnissen aus Kunststoff	586
16.2.3	Abfall- und Recyclinghierarchie	586
16.3	Abfallwirtschaft und Recycling aus Sicht der Kunststoffindustrie	587
16.3.1	Abfallwirtschaft	587
16.3.1.1	Kunststoffabfälle 2018	589
16.3.2	Grundsätzliche Aspekte beim Recycling von Kunststoffen	589
16.3.3	Recyclingkreisläufe von Kunststoffen	590
16.3.3.1	Werkstoffliches Recycling	590
16.3.3.2	Rohstoffliches chemisches Recycling	593
16.3.3.3	Kontrollierte energetische Nutzung	595
16.3.4	Deponie	598
16.3.5	Littering alias Vermüllung	598
16.3.6	Codierung erleichtert Recycling	599
16.4	Abbaufähige, resorbierbare Kunststoffe	600
16.4.1	Biologisch abbaubare Kunststoffe (BAK)	601
16.4.2	Photoabbaubare Polymere	602
16.4.3	Wasserlösliche Polymere	602

16.5	Cradle to Cradle, C2C („Von der Wiege zur Wiege“)	602
17	Literaturverzeichnis	605
	Sachwortverzeichnis	611