

HANSER



Leseprobe

zu

„Kunststoffchemie für Ingenieure“

von Wolfgang Kaiser

ISBN (Buch): 978-3-446-45191-9

ISBN (E-Book): 978-3-446-46602-9

Weitere Informationen und Bestellungen unter
<http://www.hanser-fachbuch.de/9783446451919>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

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	Verstärkungsmittel	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 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 Kalandern (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 Ethylenopolymere (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	Polyisobutylen (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 Polyisobutylen.....	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 schlagzähen 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 Polyethylenphthalat (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	Polyethylenphthalat (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	Polyethylenphthalat (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	Polyphenylsulfid (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 Polyphenylsulfid.....	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

Vorwort zur fünften Auflage

Die seit Monaten vergriffene vierte Auflage veranlasste den Autor nochmals zur Feder zu greifen. Indes sollte der bisherige Umfang des Buches - als einführendes Werk gedacht - in etwa gewahrt bleiben und gleichzeitig dem Untertitel **neu bearbeitete und erweiterte Auflage** gerecht werden. Für den damit erzwungenen Entscheid zur Kürzung des bisherigen Inhalts erwies es sich als Glücksfall, dass zum Thema „*Technologie der Verarbeitung von Kunststoffen*“ seit längerer Zeit ein reichhaltiges Angebot an **Animationen** im Internet, z. B. zu den Themen Extrudieren oder Spritzgießen besteht. Zudem wird dieses Angebot durch Animationen seitens vieler Maschinenhersteller ergänzt, wodurch diese „virtuelle“ Suche eine perfekte Abrundung erfährt. Getreu dem Motto *Mut zur Lücke* erfährt damit das dritte Kapitel inhaltlich einschneidende Änderungen, weg vom ausführlichen Beschrieb der einzelnen Technologien, stattdessen Aufnahme eines Themas, das für die Technologie aller Werkstoffe fundamentale Bedeutung besitzt und in Anlehnung an den aus der Medizin entlehnten Begriff „Pathologie“ zu Wort kommt. Nur am Rande sei erwähnt, dass dieser so gewonnene Freiraum für alle Kapitel von Nutzen war.

Selbstredend bleibt indessen weiterhin der zentrale Anspruch dieses Fachbuchs erhalten: **Aktualisierte Grundlagen praxisnah vermitteln**. Freilich hätte der Verfasser, wenn er nur auf sich allein gestellt gewesen wäre, die dafür anspruchsvollen und umfangreichen Änderungen nicht im gleichen Masse aufs Neue vornehmen können, Zuerst gilt somit mein ganz besonderer Dank den Herren Prof. Dr. Jan Vermant (ETH Zürich), Prof. Dr. Walter Caseri (ETH Zürich), Prof. Dr. Theo Tervoort (ETH Zürich), Dr. Peter Attenberger (Vinnolit), Prof. Dr. Horst Briehl (Hochschule Furtwangen), Dr. Harald Geisler (DKI Hannover), Prof. Dr. Markus Grob (FH Nordwestschweiz), Dr. Klaus Kurz (Celanese), Dr. Alessandro Napoli (Huntsman), Dr. Frank Riedmiller (Vinnolit), Dipl. Ing. Michael Schaefer (Celanese), Dr. Daniel Sandholzer (Borealis), Dr. Dieter Veit (RWTH Aachen). Sie alle haben mit großem Engagement, kostbarer Zeit und profunder Sachkenntnis die einzelnen Kapitel kritisch durchgelesen und wo nötig Korrekturen und wertvolle Ergänzungen vorgenommen.

Ein weiterer Dank geht an zahlreiche Leser, darunter viele Kollegen von anderen Universitäten, Technischen Hochschulen oder Fachhochschulen sowie Studierende, die mich freundlicherweise auf Schreib- oder sonstige Fehler hingewiesen und/oder Verbesserungsvorschläge gemacht haben. Herrn Dipl. Ing. Stephan Tanner sei an dieser Stelle ein besonderes Kränzlein geflochten. Zum fünften Mal hat er mit viel Hingabe und Begeisterung bei der elektronischen Aufbereitung von chemischen Formeln, Bildern (Zeichnungen) und Tabellen unverzichtbare gute Dienste geleistet.

Nicht zuletzt gebührt erneut allen Mitarbeitenden des Carl Hanser Verlags, die an der Herstellung dieses Buches beteiligt waren, ein ganz großes Dankeschön; namentlich richtet sich dieser Dank an meine Lektorin Frau Dipl. Ing. Ulrike Wittmann, Herrn Dr. Mark Smith und Herrn Jörg Strohbach aus der Herstellungsabteilung des Fachverlags.

Möge das Buch der geneigten Leserin/dem geneigten Leser zum Lernen, Lehren, Nachschlagen sowie zur Materialwahl einmal mehr nützlich sein.

Vorwort zur ersten Auflage

Die technischen Errungenschaften unserer Zivilisation wären ohne die unzähligen Pionierleistungen der Ingenieure schlichtweg undenkbar („in jedem Ingenieur steckt bekanntlich ein Genie“). Zu Beginn stand meist ein kühner Gedanke bzw. eine zündende Idee, deren Umsetzung in die Realität jedoch geeigneter Werkstoffe bedurfte. In unserer Zeit wecken die Kunststoffe mit einer schier unerschöpflichen Bandbreite von Eigenschaften das besondere Interesse der Ingenieure. Allerdings erfordert der erfolgreiche Umgang mit diesen Werkstoffen ein Minimum an kunststoffchemischen Kenntnissen („Chemie ist nicht alles, aber alles ist nichts ohne Chemie“, Zitat frei nach Arthur Schopenhauer, deutscher Philosoph).

Erklärtes Ziel des Buches ist es denn auch, dieses Minimum an Kunststoffchemie an die Adresse der Ingenieure zu vermitteln. Dabei steht das Bemühen im Vordergrund – insbesondere, wenn der Leser über keine oder nur geringe chemische Vorkenntnisse verfügt – den Einstieg in das faszinierende Gebiet der Kunststoffchemie behutsam vorzunehmen. Zu diesem Zweck erleichtern jeweils am Anfang eines Kapitels mehrere Buchabschnitte ohne chemische Formeln den Zugang zu den einzelnen Kunststoffklassen. Indessen ließ es sich bei der zunehmend komplizierter werdenden chemischen Zusammensetzung und Struktur der Kunststoffe nicht immer vermeiden, gelegentlich auch in die Tiefe und Breite der Chemie vorzustößen. Das vorliegende Werk basiert auf dem in dritter Auflage erschienenen Buch „Einstieg in die Kunststoffchemie“ der beiden Autoren Bernhard Gnauck und Peter Fründt, das bereits seit mehreren Jahren vergriffen ist. In Absprache mit dem Verlag wurde daher eine vollständige Überarbeitung des Buches vorgenommen und wo nötig ergänzt. Dies betrifft vor allem die beiden Kapitel über „Grundlagen“ und „Technologie der Verarbeitung“, die für ein vertieftes Verständnis der Kunststoffe ratsam sind. Ein zusätzliches Kapitel befasst sich unter dem Titel „Kunststoffe als Sonderwerkstoffe“ mit ausgewählten Neuentwicklungen.

Mein besonderer Dank gilt den Herren Prof. Dr. P. Smith (ETH Zürich), PD Dr. W. Caseri (ETH Zürich), Dipl.-Ing. P.-O. Damm (ehem. BASF), Dr. W. Haese (Bayer MaterialScience), Dr. R. Furter (ehem. Huber&Suhner), Dr. K. Kurz (Ticona), Dr. U. Lauter (Vinnolit), Dipl.-Ing. E. Maurer (Emaform), Dipl.-Ing. H. Rischgasser (Kunststoff Verband Schweiz), Dr. Martin Roth (Huntsman), Dr. S. Schaaf (ehem. Ems Chemie), Ing. K. Schönenberger (F. Nauer), Dr. H. Vogt (Basell), und Dr. M. Werth (Arkema), deren Kommentare und konstruktive Kritik wesentlich zur Verbesserung des Manuskripts beigetragen haben. Ferner wurde ich bei der Gestaltung des Manuskripts von den Herren Dipl.-Ing. S. Tanner und Dipl.-Chem. F. Choffat unterstützt, welche die chemischen Formeln und Bilder (Zeichnungen) mit dem Computer erstellten.

Zur weiteren Information, insbesondere über Werkstoffeigenschaften und -prüfungen wird auf Hellerich/Harsch/Haenle: Werkstoff-Führer Kunststoffe, Carl Hanser Verlag München, verwiesen. Eine wertvolle Ergänzung bieten die Lehrbücher von Michaeli: Einführung in die Kunststoffverarbeitung und von Menges/Haberstroh/Michaeli/Schmachtenberg: Werkstoffkunde Kunststoffe, beide ebenfalls im Carl Hanser Verlag München erschienen. Des Weiteren befindet sich im Anhang eine Gesamtübersicht der vom Autor in diesem Buchberücksichtigten Fachliteratur.

Dem Carl Hanser Verlag sei gedankt für die angenehme und vertrauensvolle Zusammenarbeit, ein spezieller Dank gebührt an dieser Stelle Frau Dr. Chr. Strohm, Herrn Dr. W. Glenz, Frau I. Oberbeil sowie Herrn O. Immel.

Möge das Buch dem geneigten Leser zum Lernen, Lehren, Nachschlagen sowie zur Materialauswahl nützlich sein.

Zürich

Wolfgang Kaiser

Prof. Dr. phil. II Wolfgang Kaiser

Wolfgang Kaiser studierte und promovierte am Chemischen Institut der Universität Zürich. Anschließend folgten mehrere Jahre Industrietätigkeit im Bereich F+E auf dem Gebiet der Additive (J.R. Geigy AG, Basel). Danach die Berufung zum Professor an die FH Nordwestschweiz (ehemals HTL Brugg-Windisch).

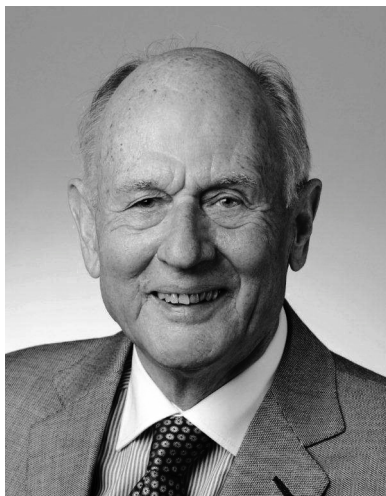
Vor Jahrzehnten formulierte der Autor für seine Studierenden den „Hauptsatz der Kunststofftechnik“:

Polymer-Rohstoff(e) + Zusatzstoff(e)  Kunststoff

Dieser erleichtert nach wie vor vielen Ingenieuren den Zugang zu den Kunststoffen als Werkstoffklasse mit eigenen Gesetzmäßigkeiten.

Anlässlich seines 70. Geburtstags wurde Wolfgang Kaiser von der ETH Zürich mit der Staudinger-Durrer-Medaille ausgezeichnet. Die Ehrung erfolgte in Anerkennung seiner großen Verdienste auf dem Gebiet der Polymertechnologie. Als „Kunststoff-Kaiser“ prägte er Hundertschaften von Ingenieuren in Windisch, in späteren Jahren auch am Departement Materialwissenschaft der ETH Zürich. Daneben übernahm er „berufsbegleitend“ den Aufbau und Betrieb des Kunststoff-Ausbildungs- und Technologie-Zentrums (KATZ) in Aarau und war dessen langjähriger erster Geschäftsführer in Personalunion. Er ist Begründer einer systematischen Aus- und Weiterbildung in Kunststofftechnik für Ingenieure in der Schweiz.

Wolfgang Kaiser ist darüber hinaus Autor und Koautor zahlreicher wissenschaftlicher Publikationen auf dem Gebiet der Kunststofftechnik.



1 Einführung

Alles Wissen stammt aus der Erfahrung.

Immanuel Kant

1.1 Werkstoffklassen

Als Werkstoffe werden alle festen Materialien wie Holz, Stahl, NE-Metalle, Leder, Steine, Glas, Keramik, Kunststoffe bezeichnet, die sich zur Herstellung von Werkstücken, beispielsweise Maschinenteilen und Gebrauchsgegenständen eignen.

Eine Einteilung der Werkstoffe nach den Kriterien anorganisch, organisch, natürlich und synthetisch zeigt Bild 1.1. Wie dieser Darstellung zu entnehmen ist, zählen außer den Kunststoffen auch die technisch genutzten Metalle sowie Glas und Keramik zu den synthetischen Werkstoffen. Die Herstellung dieser Materialien wird demnach maßgeblich durch synthetische, d. h. durch chemisch-technische Prozesse bestimmt (z. B. Redox-Reaktionen zur Entfernung des Sauerstoffs aus den Erzen). Aluminium und Stahl sind demzufolge als synthetisch-anorganische Werkstoffe zu definieren, Kunststoffe entsprechend als synthetisch-organische Werkstoffe. Eine andere Definition für Kunststoffe geht davon aus, dass diese Materialien in irgendeiner Phase ihrer Verarbeitung plastische Zustände durchlaufen (griechisch: plastikos, formen/formbar). Von diesem Merkmal eines plastischen Zustands leitet sich in den meisten anderen Sprachen der Name für die im Deutschen als Kunststoffe bezeichneten Werkstoffe ab, beispielsweise *plastics* (engl.); *matières plastiques* (franz.); *materie plastiche* (ital.); *plastico* (span.).

synthetisch-
organische
Werkstoffe

plastics

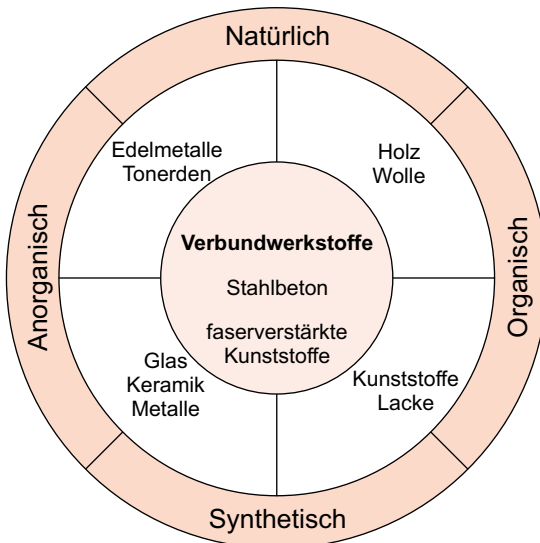


Bild 1.1: Werkstoffklassen (schematisch)

1.1.1 Werkstoffauswahl bei Kunststoffen

Die Eignung als Werkstoff wird in der Praxis für alle Werkstoffklassen vor allem durch ihr Eigenschaftsspektrum bestimmt. In Bild 1.2 sind beispielhaft einige Eigenschaftsgruppen zusammengestellt, die als Auswahlkriterien bei der Suche nach einem geeigneten Werkstoff eine zentrale Rolle spielen. Dazu kommen weitere Überlegungen, z. B. ökonomischer und ökologischer Art oder bezüglich der Gesetzgebung. Nur in den seltensten Fällen wird es daher gelingen den anvisierten „Ideal-Werkstoff“ zu finden. Wie an praktischen Beispielen leicht zu erkennen ist, müssen demzufolge sehr oft Kompromisse bei der Wahl eines Werkstoffs eingegangen werden. Auch hier gilt eben die goldene Regel: „Nur so gut wie nötig, nicht so gut wie möglich“.

„Nur so gut wie
nötig, nicht so
gut wie
möglich.“



Bild 1.2: Eigenschaftsspektrum von Werkstoffen (Auswahl)

Indes erfordern die Besonderheiten, die bei der Werkstoffauswahl von Kunststoffen auftreten, nebst dem bisher Gesagten das Hauptaugenmerk vorrangig auf die thermischen Eigenschaften sowie auf die physikalisch/chemische Beständigkeit gegen Einflüsse von außen zu lenken. Nicht umsonst trägt die größte Gruppe innerhalb der Kunststoffe die Bezeichnung *Thermoplaste*. Eine ebenso wichtige Erkenntnis beruht auf der Tatsache, dass die Eigenschaften einer Kunststoff-Formmasse nur einen Teil der Güte eines Bauteils oder Halbzeugs aus Kunststoff bestimmen. Die Erklärung dazu liefert der *Hauptsatz der Kunststofftechnik*, vgl. Abschnitt 2.5.3. Dahinter verbirgt sich die Komplexität, im gegenseitig voneinander abhängigen Zusammenspiel zwischen Eigenschaften, Konstruktion/Gestaltung und Verarbeitung zum Bauteil bzw. Halbzeug.

Bild 1.3 zeigt zu diesem Zweck in einer Übersicht den schematischen Ablauf bis zur endgültigen Werkstoffauswahl in Kombination mit einer kunststoffgerechten Konstruktion/Gestaltung (inkl. Werkzeug), z. B. eines spritzgegossenen Formteils („Spritzling“).

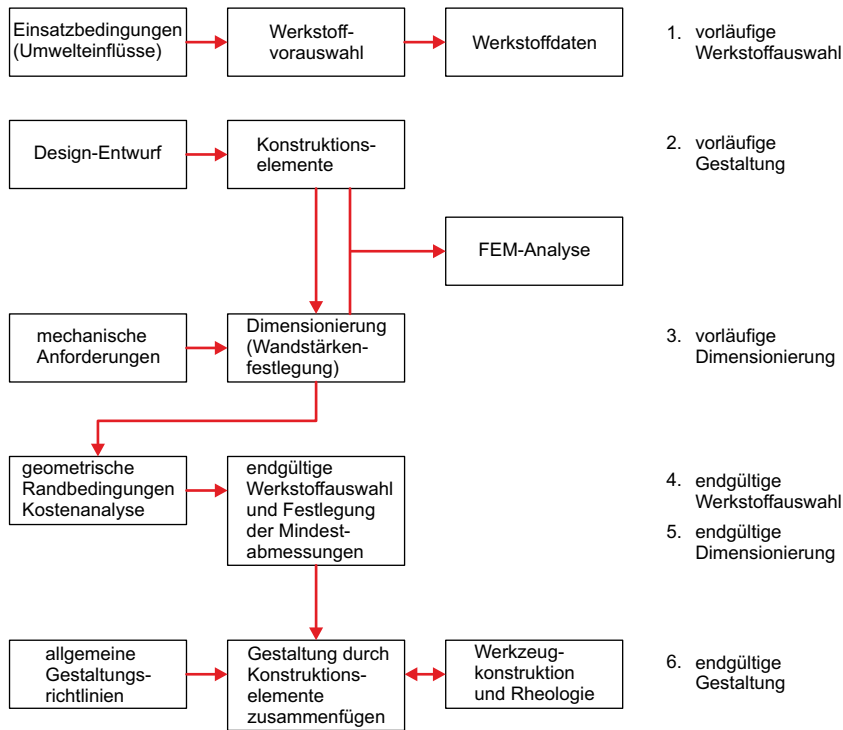


Bild 1.3: Vorgehensweise bei der Werkstoffauswahl eines spritzgegossenen Formteils

Quelle: VDI-K

1.1.2 Internationale Vereinbarungen/Normen – die geheimen Helfer

Wie im Abschnitt *Hinweise zur Benutzung des Buches* bereits erwähnt (Seite XI bis XV), findet sich eine Auflistung der wichtigsten Normen für einen Kunststofftyp jeweils am Anfang des betreffenden Kapitels, vgl. Kapitel 4 bis 15. Geht es um die aktuellen Normen für das Recycling von Kunststoffen sei auf Kapitel 16 verwiesen.

Überdies besteht für viele Bereiche der Technik (Automobilbranche, Bahnwesen, Elektrogeräte, Luftfahrt u. a.) die Möglichkeit sich vor der Werkstoffauswahl und/oder der Bewertung (Evaluation) eines Kunststoffs anhand bereits existierender Materialdatenblätter (Material Data Sheets) zu orientieren. Exemplarisch sei dies im Bereich der Automobilindustrie und die damit gegebenen Möglichkeiten aufgezeigt. Grundlage dafür bildet zunächst die Norm VDA 260, „Kraftfahrzeuge – Kennzeichnung von Bauteilen aus polymeren Werkstoffen“. Parallel dazu lässt sich das „International Material Data System“ (IMDS) nutzen, ein weltweit standardisiertes Austausch- und Verwaltungssystem für Materialdaten, an dem sich aktuell 35 Automobilhersteller und 120'000 Lieferanten/Zulieferer beteiligen.

2 Grundlagen

*Jede Erkenntnis muß ich mir selbst erarbeiten.
Alles muß ich neu durchdenken,
von Grund auf, ohne Vorurteile.
Albert Einstein*

Die Bezeichnung Kunststoffe geht auf Dr. Richard Escales, den Begründer einer Zeitschrift zurück, die erstmals im Jahre 1911 unter dem Titel „Kunststoffe“ erschien und sich mit der Erzeugung und Verwendung veredelter oder chemisch hergestellter

Etymologie des Wortes „Kunststoffe“ eine Zeitschrift, die den Namen gab

KUNSTSTOFFE

Zeitschrift für Erzeugung und Verwendung
veredelter oder chemisch hergestellter Stoffe

mit besonderer Berücksichtigung von Kunstseide und anderen Kunstfasern, von vulkanisiertem, devulkanisiertem (wiedergewonnenem) und künstlichem Kautschuk, Guttrapercha usw. sowie Ersatzstoffen von Zellhorn (Zelluloid) und ähnlichen Zellstoffserzeugnissen, von künstlichem Leder und Ledertuchen (Linoleum), von Kunstharzen, Kasein-Erzeugnissen usw.

mit Unterstützung von

Dr. Paul **Alexander** (Berlin), Dr. L. H. **Baekeland** (Yonkers, N. Y.), Professor Dr. M. **Bamberger** (Wien), Francis J. G. **Betzer** (Paris), Dr. Ludwig **Berend** (Wiesbaden), Dozent Dr. Ernst **Berl** (Tubize), Professor Max **Bottler** (Würzburg), Professor Dr. E. **Bronnert** (Dornach i. E.), Dr. Rudolf **Ditmar** (Graz), Dozent Dr. Karl **Dieterich** (Helfenberg-Dresden), Dr. Arthur **Eichengrün** (Berlin), Dr. H. **Fuchs** (Berlin), Dozent Reg.-Baumeister, M. **Gerstmeyer** (Berlin), Geh. Reg.-Rat Professor Dr. **Harries** (Kiel), Professor Dr. Alois **Herzog** (Sora), Professor Dr. F. W. **Hinrichsen** (Berlin), Direktor Julius **Hübner** (Manchester), Chefchemiker H. **Jentgen** (Pawłowski-Possad), Professor Dr. A. **Junghahn** (Berlin), Regierungsrat Dr. O. **Kausch** (Berlin), Dr. Arthur **Klein** (Pest), Arthur D. **Little** (Boston, Mass.), Dr. Graf H. **Luxburg** (Stettin), Dr. J. **Marcusson** (Berlin), Professor Dr. W. **Massot** (Krefeld), Dr. Karl **Piest** (Hanau), Professor Dr. Karl G. **Schwalbe** (Darmstadt), Professor Dr. Wilhelm **Suida** (Wien), Regierungsrat Dr. Karl **Süvern** (Berlin), Dr. W. **Vieweg** (Hanau), Geh. Reg.-Rat Professor Dr. H. **Wichelhaus** (Berlin), Edward C. **Worden** (Milburn, N.-J.) und anderen Sonderfachleuten

herausgegeben von

Dr. Richard Escales.

I. Jahrgang.



München 1911
J. F. Lehmann's Verlag.



Richard Escales

Bild 2.1: Titelblatt KUNSTSTOFFE, 1. Jahrgang, München 1911

„praktische
Chemie“



Quelle: 1377
Leopold Gmelin,
1988 Deutsche
Bundespost

anorganischen
oder
organischen
Ursprungs

Zusatzelemente

Stoffe aus der organischen Chemie befasste, vgl. Bild 2.1. Zitat aus *Gmelins Handbuch der Chemie, Band IV*:

„Die Chemie ist nicht bloß eine (theoretische) Wissenschaft, sondern **auch eine Kunst**. . . Dieses ist die „praktische Chemie“. (Leopold Gmelin, 1788-1853, deutscher Chemiker). Geht man von der Voraussetzung aus, dass dem Chemiker Dr. Richard Escales diese Umschreibung der experimentellen Chemie zur damaligen Zeit bekannt war, ließe sich damit seine Wortschöpfung „Kunststoffe“ für den Namen dieser Zeitschrift plausibel erklären.

Die Bezeichnung Kunststoffe geriet dergestalt zum Inbegriff einer einzigen Werkstoffklasse, ungeachtet der Tatsache, dass in der Technik keine Werkstoffklasse ohne künstlich hergestellte Stoffe (anorganischen oder organischen Ursprungs) auskommt. Indes erweist sich eine Beschränkung auf „Stoffe“ der organischen Chemie als außerordentlich hilfreich bei der Suche nach einem ersten Ansatz zur Umschreibung des Begriffs Kunststoffe: *Kunststoffe sind synthetisch-organische Werkstoffe*, vgl. Abschnitt 1.1. Der Ausdruck synthetisch weist darauf hin, dass sie ganz oder teilweise durch chemische Reaktionen („Synthesen“) entstanden sind. Mit organisch wird auf den Umstand verwiesen, dass ihr chemischer Aufbau überwiegend auf dem chemischen Element Kohlenstoff beruht. Kohlenstoff, chemisches Zeichen C, ist in der organischen Chemie meist vierbindig anzutreffen, so z. B. auch im einfachsten Kohlenwasserstoff Methan, CH_4 . Die riesige Zahl und Vielfalt der heute bekannten Verbindungen aus der organischen Chemie hängt mit der ausgeprägten Eigentümlichkeit des Kohlenstoffs zusammen, sich in fast unbegrenztem Umfang mit sich selbst und anderen, vorzugsweise nichtmetallischen chemischen Elementen zu verbinden, vor allem mit Wasserstoff (H), Sauerstoff (O) und Stickstoff (N). Merke: „Kunststoffe, NOCH und nöcher“. Doch das Ganze wäre unvollständig ohne einen Hinweis auf weitere in Kunststoffen da und dort vertretene chemische Elemente, z. B. Chlor (Cl), Fluor (F), Schwefel (S), Silizium (Si). Ganz zu schweigen von Metalloxiden, z. B. Titandioxid TiO_2 , sowie den metallorganischen Verbindungen, die auf vielfältige Art zum Einsatz gelangen. Sei es in Katalysatoren, die bei der Herstellung von Polymeren, z. B. Platin (Pt), Palladium (Pd) oder als Additive bei der Verarbeitung bzw. Kunststoffen unentbehrlich sind, z. B. Zinn (Sn), Zink (Zn); vgl. Abschnitt 2.5.3. Und was wäre die Welt der Kunststoffe ohne diese „Zusatzelemente“.

2.1 Was sind Kunststoffe

Einteilung der
Stoffe

Atome,
Moleküle

Eine weitere, verfeinerte Definition bezieht sich auf den molekularen Aufbau der Kunststoffe, der zunächst einer näheren Erläuterung einiger Grundbegriffe bedarf. Eine Einteilung aller vorkommenden Stoffe aus dem Blickwinkel der Chemie ergibt beim Vorliegen einheitlicher (homogener) Stoffe eine erste Unterscheidung in reine Stoffe und Stoffgemische. Die reinen Stoffe ihrerseits lassen sich weiter unterteilen in chemische Elemente und chemische Verbindungen, wie in Bild 2.2 gezeigt.

Die chemischen Elemente, auch als Grundstoffe der Chemie bezeichnet, lassen sich nicht weiter zerlegen, d. h. sie unterscheiden sich gegenseitig nur durch den Aufbau ihrer Atome (genauer durch die Zahl der Protonen im Atomkern!). So besteht das chemische Element Zink nur aus Zinkatomen, desgleichen Helium nur aus Heliumatomen, Kohlenstoff aus Kohlenstoffatomen, Wasserstoff aus Wasserstoffatomen usw. Entsprechend ihrem Eigenschaftsbild können sie vereinfacht in Metalle und Nichtmetalle unterteilt werden.

Bei den chemischen Verbindungen – aus mindestens zwei verschiedenen Elementen bestehend (und daher in diese chemisch zerlegbar) – erfolgt die übliche Einteilung in

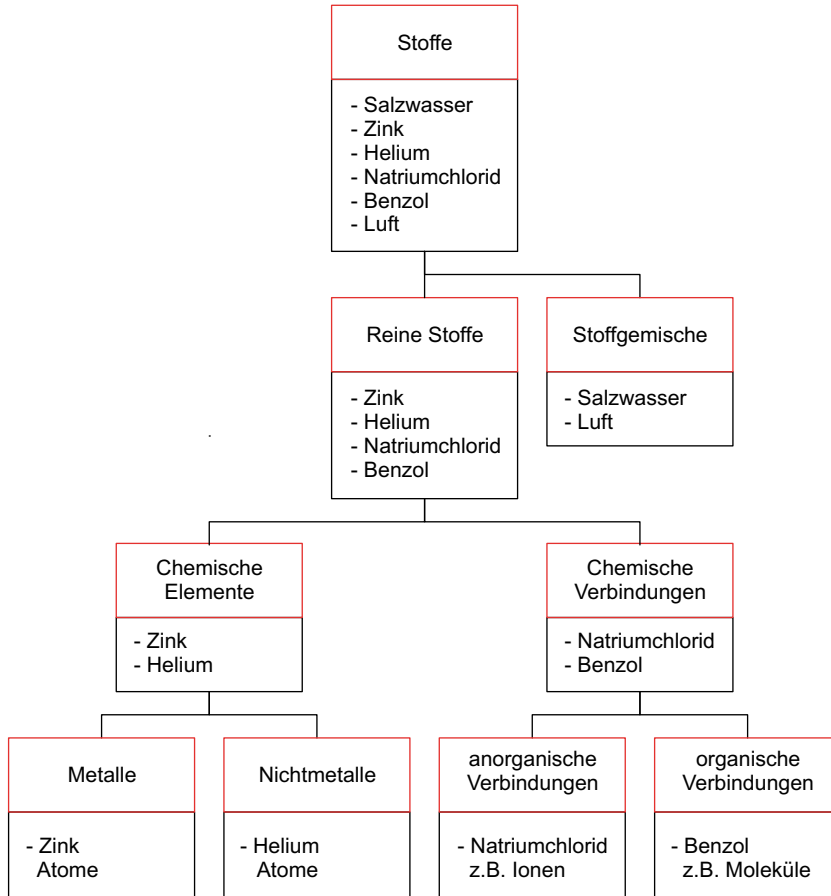
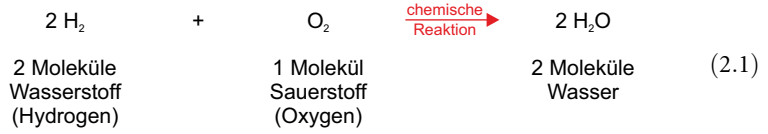


Bild 2.2: Zerlegung homogener Systeme (Beispiele)

anorganische und organische Verbindungen. Für ein vertieftes chemisches Verständnis ihrer Eigenschaften ist es nützlich, eine weitere Unterteilung hinsichtlich der vorherrschenden Bindungsart zwischen den einzelnen Atomen vorzunehmen. Bei Verbindungen erster Ordnung führt dies zu drei Grenztypen chemischer Bindungsarten, entsprechend den Möglichkeiten der Atome, die Edelgaskonfiguration zu erreichen: Ionenbindung, Atombindung und Metallbindung. Die Übergänge zwischen diesen Bindungsarten sind fließend. Chemische Verbindungen, die Atombindungen aufweisen, besitzen üblicherweise kleine, elektrisch neutrale Teilchen als „Grundstoffe“ (im Gegensatz z. B. zur Ionenbindung). Der Ausdruck Molekül (molecula, lat; „kleine Masse“) bezeichnet dabei diese elektrisch neutralen „Grundstoffe“. Die am Aufbau einer Atombindung beteiligten Atome stammen hauptsächlich von nichtmetallischen chemischen Elementen. So besteht beispielsweise die chemische Verbindung Wasser aus Wassermolekülen, d. h. es liegen ebenfalls Atombindungen vor. Die am Aufbau der Wassermoleküle beteiligten chemischen Elemente sind Wasserstoff und Sauerstoff, deren Atome sich im Verhältnis 2 : 1 als H_2O vereinigen. In der Zeichensprache der Chemie ergibt sich die mengenmäßige (stöchiometrische) Beziehung:



Befinden sich nun sehr viele dieser H_2O -Moleküle bei Raumtemperatur beieinander, so spricht man von der Flüssigkeit Wasser. Mit Hilfe der Avogadro-Konstante N_A ($6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$) kann dabei die Anzahl der vorhandenen Wassermoleküle berechnet werden, die in einer bestimmten Wassermenge enthalten sind. So befinden sich nach dieser Berechnung in 1 mol H_2O , d. h. in 18,01 g Wasser rund $6,022 \cdot 10^{23}$ Wassermoleküle.

Molmasse in g/mol

Anmerkung: Die Molmasse M in g/mol entspricht numerisch der relativen Molekülmasse eines Stoffes. Beispiele: H_2O , 18,01 g/mol; CH_4 , 16,04 g/mol.

Die relative Molekülmasse (veraltet: Molekulargewicht), M , ihrerseits ist die Summe der relativen Atommassen aller Atome, die zu einem Molekül gehören. Beispiele: H_2O , 18,01; CH_4 , 16,04; mit H, 1,0079; O, 15,9994; C, 12,011.

Wie bereits angedeutet wurde, lassen sich auf diese Weise auch die Elemente Kohlenstoff und Wasserstoff verbinden. Die daraus resultierenden Verbindungen nennt man sinngemäß Kohlenwasserstoffe, deren Moleküle ebenfalls über Atombindungen entstanden sind.

Makromolekül

Wie Untersuchungen an diversen Naturstoffen (Kautschuk, Eiweiß, Cellulose) sowie an Kunststoffen ergaben, enthalten auch diese Verbindungen als kleinste Teilchen Moleküle, die ihrerseits aus einer großen bis sehr großen Zahl von Atomen bestehen, vgl. Abschnitt 1.3. Mit dem Ausdruck *Makromolekül* soll dieser Besonderheit Rechnung getragen werden, wobei als unterste Grenze eine Beteiligung von mindestens 1000 Atomen pro Makromolekül angesehen wird. Im Gegensatz zu den niedermolekularen Verbindungen wie z. B. H_2O , spricht man hier auch von *hochmolekularen Stoffen*. Die Definition der Kunststoffe erfährt dadurch eine Erweiterung:

Definition der Kunststoffe

Kunststoffe sind synthetisch-organische Werkstoffe, die als wesentliche Bestandteile Makromoleküle enthalten.

Mit dieser Definition wird zugleich zum Ausdruck gebracht, dass Kunststoffe in der Regel Mischungen sind und dies sogar in zweifacher Hinsicht. Zum einen bestehen Kunststoffe nicht nur aus Makromolekülen, sondern sie enthalten normalerweise auch Anteile anderer Substanzen, Zusatzstoffe oder Additive genannt. Diese werden gezielt zur Veränderung (Modifizierung) des Eigenschaftsbildes bei der Aufbereitung und/oder der Verarbeitung zugesetzt oder geraten bei der Herstellung der Makromoleküle als Nebenprodukte in diese hinein, vgl. Abschnitt 2.5.3.

Zum zweiten variieren die in einem Kunststoff vorhandenen Makromoleküle in der Anzahl zugehöriger Atome pro Makromolekül und damit auch in ihrer *Molmasse*

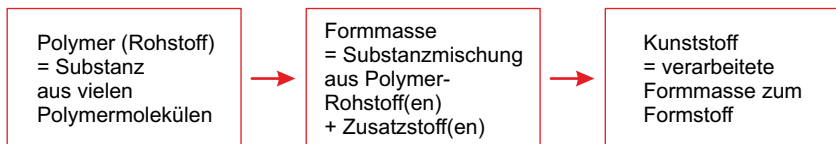


Bild 2.3: Unterscheidung der Begriffe: Polymer (Substanz), Formmasse (Substanz-Mischung), Kunststoff (Form-/Werkstoff)

bzw. *Molmassenverteilung*, vgl. Abschnitt 2.4.3. Da indessen diese Makromoleküle in der Regel aus vielen gleichen oder gleichartigen Teilchen aufgebaut sind, verwendet die Fachsprache der Chemie zur Präzisierung dieser Spezies Makromoleküle auch häufig die Bezeichnung *Polymermolekül(e)* (griechisch: polys, viele; meros, Teil), bzw. als Substanzbegriff *Polymer(e)*.

Polymer(e)

Nicht zuletzt kommt der Verarbeitung eine besondere Bedeutung zu. Denn seine *Endeigenschaften* als Werkstoff erhält ein Kunststoff erst durch den *Verarbeitungsprozess*. Es besteht also ein deutlicher Unterschied zwischen „*Polymer(en)*“ und „*Kunststoff(en)*“. Daher wird im Rahmen dieses Buches versucht, diese beiden Begriffe auseinander zu halten, vgl. Abschnitte 2.5.3 und 2.9.

Das nachfolgende Schema beschreibt zu diesem Zweck den Werdegang eines Kunststoffs – beginnend mit einem Polymer als Kunststoff-Rohstoff – in der Reihenfolge der Begriffe Polymer (Substanz), Formmasse (Substanzmischung), Kunststoff (Form-/Werkstoff), vgl. Bild 2.3. Das Wort Kunststoff, der ursprüngliche Sammelbegriff für eine ganze Werkstoffklasse, reduziert sich damit auf einen Terminus technicus zur Umschreibung eines bestimmten Form-/Werkstoffs, dessen *Endeigenschaften* offenkundig nicht nur durch polymeres Material bestimmt werden, vgl. Abschnitt 3.4.

Formmasse
Kunststoff

2.1.1 Einteilung der Kunststoffe

Unterteilt man nach dem Hauptkriterium für Kunststoffe, dass unter Anwendung von Wärme und/oder Druck eine einfache plastische Formgebung möglich ist, lassen sich zunächst zwei Arten definieren:

- unvernetzte,
- vernetzte Kunststoffe.

Dabei unterscheiden sich die unvernetzten von den vernetzten Kunststoffen durch ihr unterschiedliches Verhalten bei Erwärmung. So ist bei unvernetzten Materialien durch Erwärmung eine plastische Formgebung mehrmals möglich. Im Gegensatz dazu sind vernetzte nach einmaligem Durchlaufen ihres plastischen Zustands bei der Formgebung irreversibel zum Formstoff „ausgehärtet“ und erweichen bei erneutem Erwärmen nicht wieder.

Die in der Praxis vorwiegend verwendete Klassifizierung für Kunststoffe geht noch einen Schritt weiter und basiert auf den Unterschieden im *thermisch-mechanischen Verhalten*, vgl. Abschnitt 2.6.2.

Einteilung nach
dem thermisch-
mechanischen
Verhalten

Damit lassen sich schematisch drei Kategorien von Kunststoffen beschreiben:

- Thermoplaste (Nomen est Omen) und thermoplastische „Elastomere“,
- Elastomere,
- Duroplaste.

Zusätzlich werden die Thermoplaste nach ihrem Ordnungszustand unterschieden. Man kennt den *amorphen* (ungeordneten) und den *teilkristallinen* (teilweise geordneten) Zustand.

Dieses unterschiedliche Verhalten der Kunststoffe findet seine Erklärung in der Verschiedenheit im Aufbau der makromolekularen Struktur von Kunststoffen und wird Gegenstand der Ausführungen im Abschnitt 2.4 sein.

zwischen den Makromolekülen, die das Netz quasi als ein einziges „Riesenmolekül“ zusammenhalten. Im Gegensatz dazu steht die physikalische Vernetzung, bei der „nur“ physikalische (reversible) Kräfte wirksam sind, vgl. Bild 2.7.

Nicht zuletzt sei nochmals in Erinnerung gerufen, dass ein Kunststoff seine End Eigenschaften erst durch den Verarbeitungsprozess erhält. Weitere Einzelheiten sind in Abschnitt 2.5 beschrieben. Zuvor soll jedoch der Frage nachgegangen werden, wie solche Makromoleküle entstehen können, d. h. welche chemischen Prozesse zu Polymermolekülen führen.

2.2 Bildungsreaktionen für Makromoleküle – Polyreaktionen

Nahezu alle für die Technik bedeutenden Kunststoffe sind durch Synthesereaktionen entstanden, bei denen die Ausgangsstoffe zunächst als niedermolekulare Verbindungen in Form sog. Monomere (griechisch: monos, einzeln, allein; meros, Teil, Anteil), vorlagen. Daneben existiert die Möglichkeit, Kunststoffe durch chemische Umsetzungen an synthetischen Makromolekülen oder durch Umwandlung von Naturstoffen herzustellen, vgl. Abschnitt 2.2.6.

Im Folgenden sollen zunächst die Synthesereaktionen, auch *Polyreaktionen* bzw. Polymerbildungsreaktionen genannt, erläutert werden. Dabei wird als generischer Term für alle Synthesereaktionen der Oberbegriff **Polymerisation** festgelegt. Nach der Art der ablaufenden chemischen Reaktionen unterteilt man in die drei Klassen:

- Kettenpolymerisation (Polymerisation),
- Kondensationspolymerisation (Polykondensation),
- Additionspolymerisation (Polyaddition).

Eine Differenzierung nach dem Mechanismus der ablaufenden Polyreaktionen führt zu einer weiteren Einteilung in Kettenwachstumsreaktionen und Stufenwachstumsreaktionen, vgl. Bild 2.8.

Bildungsreaktionen/
Polyreaktionen

Oberbegriff
Polymerisation

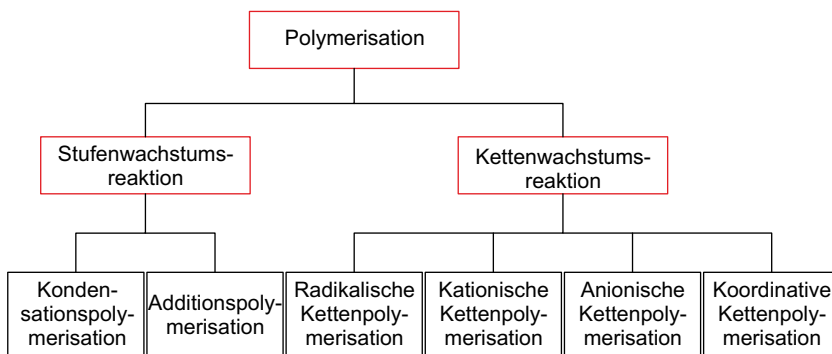


Bild 2.8: Einteilung der Polyreaktionen

2.2.1 Kettenpolymerisation

vom Monomer
zum Polymer

Voraussetzung für eine Kettenpolymerisation ist das Vorhandensein von reaktionsfähigen *Monomeren*, die sich in der Regel unter Aufbrechen einer Doppelbindung (z. B. zwischen zwei C-Atomen) oder durch Ringspaltung zu Makromolekülen, *Polymermolekülen*, aneinanderreihen, ohne dass irgendwelche Nebenprodukte abgespalten werden oder Atomwanderungen damit verbunden sind, vgl. Bild 2.9.

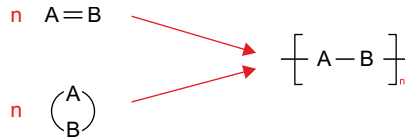
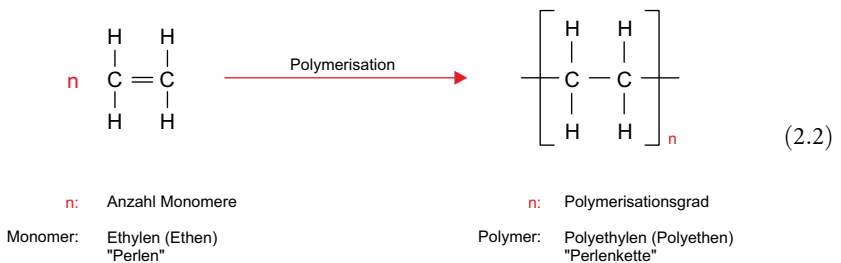


Bild 2.9: Schematische Darstellung der Kettenpolymerisation

Polymerisa-
tionsgrad
Polymerisate

So reagieren beispielsweise viele Ethylenmoleküle (E), $\text{CH}_2=\text{CH}_2$, als Monomere unter Aufbrechen ihrer Doppelbindungen zum Makromolekül Polyethylen (PE). Die Ethylenmoleküle im Polyethylen sind dabei mit den Perlen in einer Perlenkette vergleichbar. So wie die Gesamtlänge einer offenen Perlenkette weitgehend durch die Anzahl der Perlen bestimmt wird, so ist auch die Länge und Größe des Makromoleküls durch die Zahl der am Aufbau beteiligten Ethylenmoleküle festgelegt. Die Anzahl Perlen in der Perlenkette erhält in der Folge die wichtige Bezeichnung *Polymerisationsgrad* n . Synonym dazu werden durch Kettenpolymerisation entstandene Polymere auch als *Polymerisate* bezeichnet. Bei bekanntem Polymerisationsgrad n errechnet sich die Molmasse M des Makromoleküls aus dem Produkt „Molmasse einer Perle mal Anzahl Perlen“, z. B. Ethylen, C_2H_4 , $M = 28 \text{ g/mol}$; Polyethylen, $n \approx 700$ bis $230\,000$, $M \approx 20\,000$ bis $6,5 \text{ Millionen g/mol}$. Mit diesem Wissen lässt sich schematisch die folgende Gleichung aufstellen.



Teilreaktionen

Die Kettenpolymerisation kann – in Form ihrer kinetischen Einzelvorgänge – in die folgenden Teilreaktionen gegliedert werden:

- Initiierung/Startreaktion,
- Kettenwachstumsreaktion,
- Kettenübertragungsreaktion,
- Kettenabbruchreaktion.

Nach der Art des reaktiven Zentrums (freies Radikal, Carbeniumion, Carbanion, Koordinationskomplex), das den Kettenaufbau typisiert, ist zu unterscheiden in:

Art des reaktiven Zentrums

- radikalische Kettenpolymerisation,
- kationische Kettenpolymerisation, vgl. Abschnitt 2.2.1.2.,
- anionische Kettenpolymerisation, vgl. Abschnitt 2.2.1.3.,
- Kettenpolymerisation durch koordinative Katalyse, vgl. Abschnitt 2.2.1.4.

2.2.1.1 Radikalische Kettenpolymerisation

Am Beispiel der radikalischen Kettenpolymerisation von Vinylmonomeren der allgemeinen Formel $\text{CH}_2 = \text{CHR}$ (mit beispielsweise $\text{R} = \text{H}$ für Ethylen, $\text{R} = \text{Cl}$ für Vinylchlorid) ergeben sich die folgenden chemischen Reaktionen:

Initiierung/Startreaktion

Radikalische Kettenpolymerisationen werden durch reaktive Teilchen, die ein ungepaartes Elektron (*) besitzen, ausgelöst. Solche reaktiven Teilchen, *Radikale*, können z. B. durch sichtbares Licht oder andere energiereiche Strahlung (Röntgen-, Gamma-, UV-Strahlung) erzeugt werden. Häufig verwendet man zur Radikalbildung auch Verbindungen, *Initiatoren*, die bei geringer Temperaturerhöhung (zwischen 40 und 100 °C) in Radikale zerfallen. Weit verbreitet ist die Zugabe von Peroxiden als Radikalbildner, so z. B. beim „Aushärten“ von ungesättigten Polyesterharzen, vgl. Abschnitt 11.4.1. Die Initiierung bezeichnet den primären Prozess der Radikalbildung. In der anschließenden Startreaktion verbindet sich das Radikal mit einem Vinylmonomer unter Aufbrechen der C=C-Doppelbindung und erneuter Radikalbildung („Monomer-Radikale“). Schematisch lässt sich dieser Vorgang durch die beiden Einzelschritte darstellen.

Radikale

Initiatoren

Zerfall des Initiators I (Radikalbildung)

z. B. Zerfall von Benzoylperoxid:

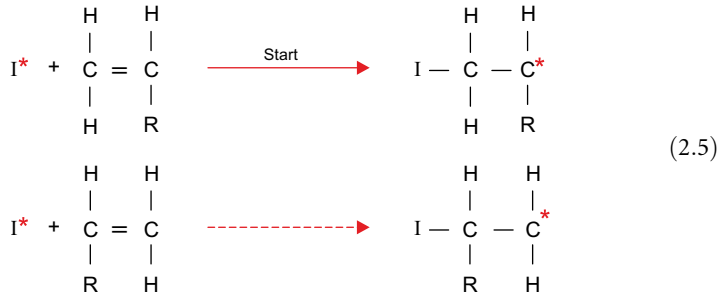
Zerfall des Initiators



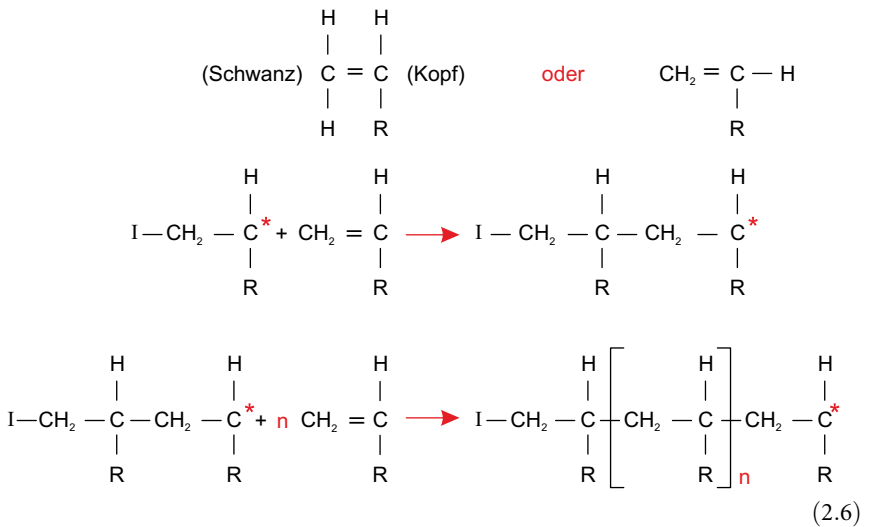
Allgemein:



Startreaktion *Startreaktion*



Ketten-
wachstum



Kettenwachstum

Jedes neu hinzukommende Monomer reagiert in Gegenwart eines „Polymer-Radikals“ unter Öffnung der Doppelbindung und fortlaufender Additionsreaktion zugleich. Für ein wachsendes Makromolekül lässt sich dieser Prozess am Beispiel einer „Kopf-Schwanz“-Polymerisation näher erläutern, d. h. der aktive Kopf der Kette reagiert mit dem Schwanz des Monomers unter gleichzeitiger Übertragung des aktiven Kopfs an das addierte Monomer.

„Kopf-
Schwanz“-
Polymerisation

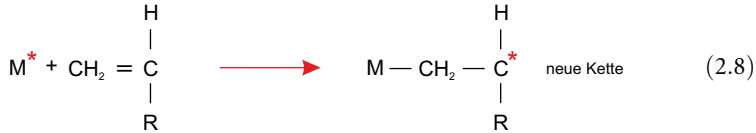
Kettenübertragung

Bei der Kettenübertragungsreaktion wird der aktive Kopf des wachsenden Kettenmoleküls auf ein bisher inaktives Molekül M-H übertragen.

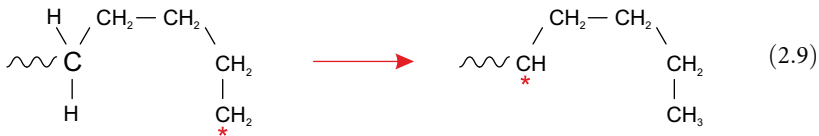


Das auf diese Art neu gebildete Radikal M^* kann zum Ausgangspunkt einer neuen Kette werden. Diese Kettenübertragung ist u. a. von besonderer Bedeutung für die Herstellung von Pfropfcopolymeren sowie für die Möglichkeit von Kettenverzweigungen, vgl. Abschnitt 2.4.1.1.

Pfropfcopoly-
mere, Ketten-
verzweigung



Sonderfall:

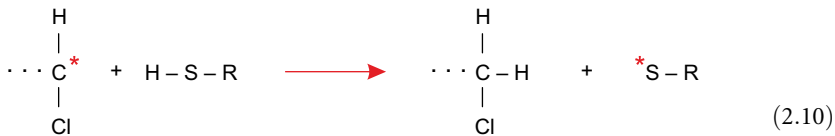


es entstehen Verzweigungen

Große Bedeutung besitzen in diesem Zusammenhang Substanzen (z. B. Thiole, $\text{R}-\text{S}-\text{H}$), bei denen die Geschwindigkeitskonstante der Übertragungsreaktion besonders groß ist und die als *Regler* für die Einstellung der Molmasse zugefügt werden. Ihre Funktionsweise basiert auf der Übernahme der Rolle des Initiatorradikals zur Fortsetzung der Polymerisation und bewirkt damit eine:

Aufgabe eines
Reglers

- Reduktion der mittleren Kettenlänge, ohne die gesamte Reaktion zu stoppen,
- Verminderung von meist unerwünschten Verzweigungen.



aktive Endgruppe + Thiol $\longrightarrow$ inaktive Endgruppe + Thio-Radikal

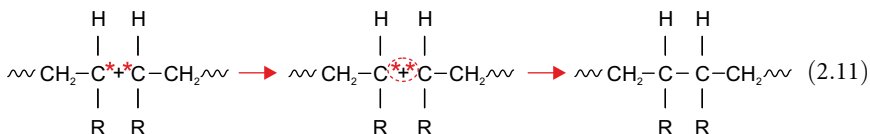
Kettenabbruch

Die Kettenabbruchreaktionen führen mit dem Verschwinden der reaktiven Zentren zu einem Wachstumsende des Makromoleküls. In der Praxis lassen sich drei Varianten ausmachen.

Abbruch der
radikalischen
Kettenpoly-
merisation

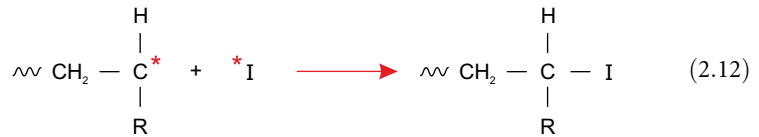
Rekombination

Vereinigung von zwei aktiven Endgruppen

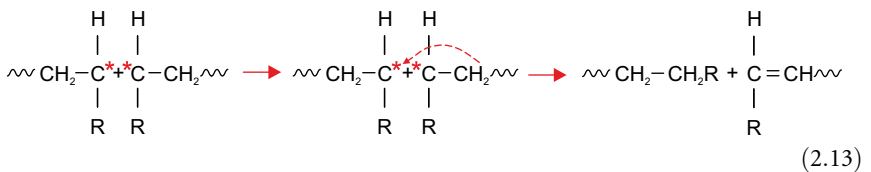


Initiatoraddition

Anlagerung eines Initiatorradikals

*Disproportionierung*

Reaktion zweier Radikale unter Bildung einer gesättigten sowie ungesättigten Verbindung, d. h. nur mit Einfachbindungen bzw. einer Doppelbindung zwischen den C-Atomen



Die endständigen reaktionsfähigen Doppelbindungen, die dabei entstehen, können in nachfolgenden Verarbeitungsprozessen empfindlich stören, beispielsweise beim Urformen in der Schmelze, vgl. Kapitel 3.

Die Abbruchreaktionen sind gleichzeitig ein Spiel des Zufalls, d. h. es entstehen Ketten verschiedener Länge, vgl. Abschnitt 2.1.2. Die Makromoleküle besitzen also nicht alle die gleiche Größe. Dies hat zur Folge, dass die Molmasse M um einen Mittelwert schwankt, der *mittlere Molmasse* genannt wird, abgekürzt $\bar{M}$, vgl. Abschnitt 2.4.3. Daher versucht man in der Praxis, die Abhängigkeit der mittleren Molmasse von der Häufigkeit der Abbruchreaktionen nicht ganz dem Zufall zu überlassen. Als einfache Regel gilt:

- wenig Initiator oder niedrige Polymerisationstemperatur = $\bar{M}$ zunehmend,
- viel Initiator oder höhere Polymerisationstemperatur = $\bar{M}$ abnehmend.

Der Vollständigkeit halber sollen an dieser Stelle die *Inhibitoren* erwähnt werden. Durch Zugabe von Inhibitoren (u. a. Hydrochinon, vgl. Formel 12.10) kann z. B. die vorzeitige Polymerisation der Monomere bei der Verarbeitung, dem Versand oder der Lagerung verhindert werden. Salopp formuliert sind sie „Beruhigungsmittel“ für Radikale.

Gefahr droht, wenn bei *höheren Umsätzen* einer homogenen Massepolymerisation eine zu starke Erwärmung als Folge eines ungehinderten Kettenwachstums auftritt. Verursacht durch eine chemische Reaktion, als Trommsdorff-Effekt (Gel-Effekt) bezeichnet, die einerseits eine starke Zunahme der Viskosität bewirkt, andererseits damit gleichzeitig die Diffusion der in ihrer Kettenbeweglichkeit eingeschränkten polymeren Radikale behindert. Ein Kettenabbruch, sei es durch Rekombination oder Disproportionierung, wird immer seltener. Indes bleibt die Beweglichkeit der Monomere und damit ihre Diffusion zu den Reaktionszentren bzw. das Entstehen fortlaufend neuer Kettenmoleküle erhalten. Gelingt es nicht rechtzeitig diesen Effekt unter Kontrolle zu bringen, kann es unter Umständen bis zur Explosion kommen. Besonders betroffen sind beispielsweise die radikalische Polymerisation von Methylmethacrylat, MMA, oder Styrol, S

Supplementär: Animationen zu radikalischer Polymerisation.

Mittlere
Molmasse $\bar{M}$

Inhibitoren

höheren
Umsätzen
eine zu starke
Erwärmung
Trommsdorff-
Effekt

16 Gesundheits-, Sicherheits- und Umweltaspekte von Kunststoffen

Alle Ding sind Gift und nichts ohn' Gift.

Allein die Dosis macht, dass ein Ding kein Gift ist.

Theophrastus Paracelsus (1493 bis 1541)

16.1 Gesundheits- und Sicherheitsaspekte von Kunststoffen

16.1.1 Gewerbetoxikologische Begriffe (Auswahl)

Die akute Toxizität einer Substanz entspricht deren Giftwirkung bei einmaliger (= akuter) Aufnahme. Die Aufnahme kann durch den Mund (= oral), durch die Haut (= dermal bzw. percutan) oder durch Einatmen (= Inhalieren) erfolgen.

Als Maßstab für die Giftigkeit einer Substanz dient die akute orale Toxizität. Darunter versteht man diejenige Dosis in mg, bezogen auf 1 kg Lebendgewicht, die nach oraler Verabreichung an Versuchstiere (meist Ratten) innerhalb von fünf Tagen für 50 % der Individuen tödlich wirkt. Sie wird ausgedrückt durch den akuten oralen LD₅₀-Wert (LD bzw. DL = tödliche, d. h. letale Dosis).

akute orale
Toxizität

LD₅₀-Wert

Bei einer akuten Inhalation toxischer Substanzen kann sowohl eine lokale Reizwirkung als auch eine Giftwirkung auf den Organismus die Folge sein (Resorption in der Lunge). Die akute Inhalationstoxizität von Gasen, Dämpfen und Staub wird normalerweise an Ratten in vierstündiger Prüfdauer getestet. Das Ergebnis wird als LC₅₀-Wert bezeichnet (letale Konzentration bzw. Konzentration in mg pro m³ Atemluft), bei der die vorhandene Konzentration für 50 % der Versuchstiere während der jeweils gewählten Expositionszeit tödlich wirkt.

LC₅₀-Wert

Führt die wiederholte Aufnahme von Substanzen – gleichgültig ob oral, dermal oder durch die Atemluft – zu Vergiftungen, so spricht man von subchronischer Toxizität. Chronische Toxizität umschreibt die gesundheitsschädigende Wirkung einer Substanz bei Verabreichung über einen größeren Lebensabschnitt. Hierbei stehen Fragen zu der Mutagenität und Kanzerogenität von Substanzen im Vordergrund, die Mutationen im Erbgefüge auszulösen bzw. Krebs zu erzeugen in der Lage sind.

subchronische
bzw.
chronische
Toxizität

16.1.2 Herstellung von Polymeren und Kunststoff-Formmassen

Sowohl bei der Synthese von Polymeren als auch bei der Herstellung von Kunststoff-Formmassen und ähnlichen Zubereitungen, wie Streichpasten, Klebstoffen, Lacken, Beschichtungsmitteln, können Gefahren für die Gesundheit, aber auch Brand-, ggf. Explosionsgefahren auftreten.

16.2 Umweltaspekte von Kunststoffen

Am „Reißbrett“ muss beginnen, wenn Umweltschutz das Sagen hat.

(frei nach Albert Bitzias alias Jeremias Gotthelf)

16.2.1 Nachhaltige Entwicklung

Recycling-
orientierte
Produktent-
wicklung

VDI Richtlinie 2243: **Recyclingorientierte** Produktentwicklung (Vorläufer seit 1981)

Normen: DIN EN ISO 11469, DIN EN ISO 14021, DIN EN 15343, DIN EN 15347

Rezyklate: DIN EN 15342 (PS), DIN EN 15344 (PE), Din EN 15345 (PP), DIN EN 15346 (PVC) und DIN EN 15348 (PET).

Kompostierbarkeitszeichen: DIN EN 13432 DIN EN 14995.

VDA 260, vgl. Abschnitt 1.1.2.

qualitatives
Wachstum

Stoffstrom-
management

Die Idee der nachhaltigen Entwicklung (englisch sustainable development) basiert auf der Ausgewogenheit eines globalen Zivilisationsprozesses, der zum einen die Lebenssituation der heutigen Generation verbessert (Entwicklung) ohne gleichzeitig die Lebenschancen künftiger Generationen zu gefährden (Erhaltung der Umwelt). Die Umsetzung dieser Idee gehört zu den zentralen Aufgaben der Entwicklungs- und Umweltpolitik. Von den verschiedenen Denkansätzen zur Lösung der anstehenden Probleme sei an dieser Stelle auf das Leitbild eines qualitativen Wachstums hingewiesen. Darunter versteht man die Vorgabe, das Wirtschaftswachstum vom Ressourcenverbrauch zu entkoppeln. Ansätze in diese Richtung legen den Schwerpunkt auf eine gezielte Wiederverwendung von Rohstoffen sowie auf die Schaffung eines Stoffstrommanagements. Letzteres fordert, dass Materialien, Immissionen und Abfälle ganzheitlich betrachtet und unter ökonomischen, ökologischen und sozialen Zielen eingesetzt und bewertet werden. An dieser Stelle scheint es angebracht erneut auf die im Abschnitt 1.4.2 kurz erwähnten „12 Grundprinzipien der grünen Chemie“ als Zusatzlektüre hinzuweisen, vgl. Literaturverzeichnis.

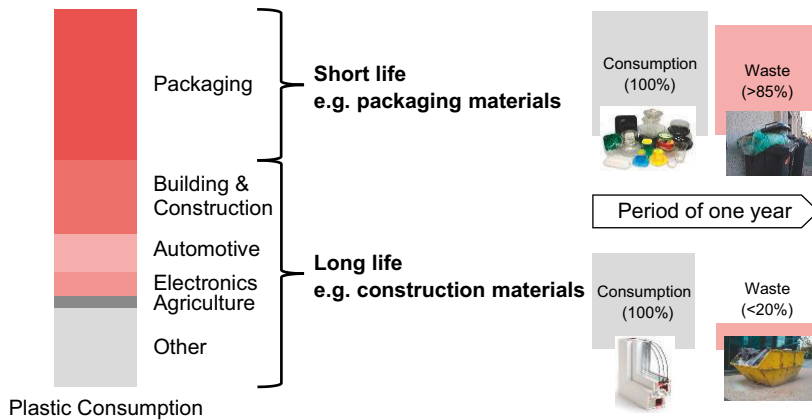
16.2.2 Lebensdauer von Erzeugnissen aus Kunststoff

Im Hinblick auf die nachfolgenden Ausführungen kommt dem Thema Lebensdauer erneut zentrale Bedeutung zu (vgl. Abschnitt 2.7); allerdings unter einer vollständig anderen Betrachtungsweise. Wie in Bild 16.1 dargestellt, finden Kunststoffe ihre Domäne vor allem im Bereich der Herstellung von langlebigen Erzeugnissen – oft jahrzehntelang – im Einsatz. Ausgenommen davon ihre Verwendung als Verpackungsmaterial, bei der Kurzlebigkeit und ihr nahes „Ableben“ für alle Materialien zum Problem werden kann.

16.2.3 Abfall- und Recyclinghierarchie

Um ein verantwortungsbewusstes Vorgehen beim Umgang mit Abfällen zu gewährleisten, wurde von der EU in ihren Richtlinien (2008/98/EG) über Abfälle eine Prioritätenliste erstellt, die der nachfolgenden Abfallhierarchie (in Artikel 4) zugrunde gelegt ist:

- a) Vermeidung,
- b) Vorbereitung zur Wiederverwendung,

**Bild 16.1:** Life time of plastic products

Quelle: Report_PE_Circular Economy 2018

- c) Recycling,
- d) sonstige Verwertung, z. B. energetische Verwertung,
- e) Beseitigung.

Grundsätzlich ist somit nach einer Produktentstehungs- und Produktnutzungsphase eine erneute Nutzung des Produkts oder der Werkstoffe des Produkts in Form eines Kreislaufs anzustreben.

Die erste und zugleich umweltfreundlichste Form dieses Kreislaufs bemüht sich um die Wieder- oder Weiterverwendung des Produkts, je nachdem, ob es in seiner ursprünglichen oder einer veränderten Funktion eingesetzt wird.

Die zweite Form wird als Wieder- oder Weiterverwertung der Werkstoffe bezeichnet, je nachdem, ob aus den Altwerkstoffen nach ihrer Aufbereitung die gleichen Werkstoffe oder andere Sekundärwerkstoffe hergestellt werden.

Zusätzlich zu diesem Produktrecycling ist auch ein Recycling möglichst aller Produktionsabfälle anzustreben, die bei der Herstellung von Werkstoff und Produkt entstehen; inbegriffen ein Abfallrecycling der Hilfs- und Betriebsstoffe, die für die Fertigungsprozesse erforderlich sind.

Wieder- oder Weiterverwendung

16.3 Abfallwirtschaft und Recycling aus Sicht der Kunststoffindustrie

16.3.1 Abfallwirtschaft

Damit verlässliche Angaben zu diesem Thema existieren, sind am Beispiel von Deutschland zwei zentrale Gesichtspunkte *aus erster Hand* bildlich dargestellt. Im Jahr 2018 betrug das Abfallaufkommen gesamthaft 417,2 Millionen Tonnen.

Sachwortverzeichnis

A

- Abbau von Polymeren 71
- abbaufähige Kunststoffe 600
- Abbaureaktion 128
- Abbindemechanismus der Klebung 241
- abgewandelte Naturstoffe 12
- ABS + PA Blends 338
- ABS + PC Blends 337
- Abwandlung durch Vernetzen 267
- Acetal 412
- Acetal-Thermoplaste 409
- Acetat-Reyon 371
- Acetylen 296, 553
- Acrylfaser 20
- Acrylglas 364
- Acrylkunststoff 16
- Acrylnitril 326, 399
- Acrylnitril-Butadien-Kautschuke NBR 513
- Acrylnitril-Butadien-Styrol ABS 331, 333
- Acrylnitril-Methylmethacrylat AMMA 365
- Acrylnitril-Styrol-Acrylat ASA 335
- Acrylsäuremethylester 363
- ACS 335
- Additionspolymerisation (Polyaddition) 45, 67
- Additive 40, 104, 151, 514
- Additive Fertigungsverfahren 216
- Adhäsion 239
- AES 335
- Agro-Plastik 30
- AHA-Schutz 584
- Aktivator 519
- akzessorische Verunreinigungen 129
- Alkoholyse 594
- Allophanat-Gruppe 546
- Allophansäure 546
- Allylgruppe 474
- alternierendes Copolymer 56
- Alterung 128
- Alterungsschutz 128
- Alterungsschutzmittel 519
- Alterungsvorgänge
 - chemische 128
 - physikalische 131
- Amid-imid-Gruppe 495
- Amidgruppe 379, 388
- Amin 543
- ω -Aminocarbonsäuren 380, 385
- Aminogruppe 63
- Aminoplaste 449
- 11-Aminoundecausäure 381
- amorph 41, 44, 91, 118, 395, 486, 501
- amorphes Polyamid 395
- amorphes Polyethylenterephthalat PET-A 349
- Amylopektin 571
- Amylose 571
- Animationen zu V
 - Birkenpech 11
 - Blasfolienanlagen 166
 - Carbon Nanotubes (CNT) 566
 - Compoundieren 152
 - Elastomeren/Gummi 512
 - Epoxidharzen 465
 - Erzeugung von PVC-Polymeren 300
 - Extrusionsanlagen 165
 - Extrusionsblasformanlagen 169
 - Funktion von Leuchtdioden 560
 - FVK-Urformen 201
 - PA 380
 - Phenolharzen 442
 - Photovoltaik 561
 - Polykondensation 66
 - Polymerisation und PMMA 362
 - PS-E Schaumstoffen 534
 - PTFE 423
 - PUR-Schaumstoffen 538
 - radikalischer Polymerisation 50
 - Schäumen 206
 - Spritzgießen 173
 - Spritz-Streckblasformen 172
- Anion 51
- anionische Kettenpolymerisation 52
- Anisotropie 102, 107, 487
- antiadhäsiv 423, 427
- Antioxidantien 108, 129
- Antiquietscheffekt 327
- Antistatika 109, 109
- Aramid 457, 489
- Aramid-Faser 193
- aromatische Dicarbonsäure 483
- aromatische Hydroxycarbonsäure 483
- aromatische Polyamide 489
- aromatischer Polyester 345, 483
- Arrhenius-Gleichung 158
- Arylimid-Gruppe 495

ASA + PC Blends 337
 ataktisch 88
 ataktisches Polystyrol 320
 Atom 38
 Atombindung 39, 72 f.
 äußere Alterungsursachen 128
 äußere Weichmachung 107
 äußerer Weichmacher 305
 Aufbau eines Extruders 161
 Aufbereiten (Compoundieren) 104, 145 f., 300
 Aufbereitungsverfahren 152, 300
 Aufspießen 488
 Aushärten 57 f.
 Autoxidation 129
 Autoxidationszyklus 130
 Avogadro-Konstante 40
 Azeotropkondensation 69
 Azodicarbonamid 532
 Azo-Verbindung 532

B

Barriere-Kunststoffe 127, 314, 394, 398
 Batch-Reaktor 62
 Bauarten des Kalenders 186
 Baumwolle 369
 Bedampfen 249
 Bedrucken 246
 Beflocken 250
 Begasung 531
 Beibehaltung des Polymerisationsgrads 70
 Benzidin 495
 Benzolring 322
 Benzoylperoxid 462
 Beschichten 145, 243 f.
 Beschleuniger 57, 439, 461, 519, 584
 besonders schlagfestes Polyvinylchlorid
 PVC-HI 303
 Bestrahlen 252
 Biegeumformen 224
 Bigbags 146
 Bi-Katalysatoren 265
 Billigplastik 33
 bimodale Molmassenverteilung 99
 Bindungen, physikalische 75
 Bindungsabstände 73
 Bindungsenergie 73 f., 76
 Bindungskräfte 72
 Biocide 527
 Biocomposites 569, 575, 576
 Biokompatibilität 568
 Biokunststoffe 569
 biologisch abbaubare Polymere 601
 Biomaterialien 568
 Bionik 567
 Bioplastics 569

Biopolymere 30, 569
 Bioreaktor 573
 1,1-Bis(4-hydroxyphenyl)-3,3,5-trimethyl-
 cyclohexan BPTMC 358
 Bisphenol A (BPA) 354, 355, 464, 468
 Bisphenol S 358
 Bisphenol TMC 358
 Biuret-Gruppe 545
 Blasfolienanlage 166
 Blasformen 168
 Blend 337 f.
 Blister-Verfahren 228
 Blockcopolymer 53, 56, 520
 Blockschaumstoffe 542
 BMC 184, 458
 Bohren 232
 Brandschutzmittel 109
 breite Molmassenverteilung 97
 Brennstoffzellen 563
 Butadien 517
 Butadien-1,3 328
 Butadien-Styrol-Kautschuk 328, 513
 Butan 533
 Butanol 533
 Butylacrylat 301
 Butylenglykol 460
 Butylhydroxytoluol BHT 132
 Butylkautschuk 513

C

C-Faser 457
 C=C-Doppelbindung 47
 ϵ -Caprolactam 381, 395
 ϵ -Caprolacton 601
 CAP 345
 Carbamid 450
 Carbonsäure 533
 Carbanion 52
 Carbeniumion 51
 Carbonsäureamidgruppe 379
 Carboxylgruppe 63, 480
 Carothers-Gleichung 66
 CB 345
 Celluloseacetobutyrat CAB 367
 Cellophan 571
 Cellulosewerkstoff 570
 Celluloid 15, 370
 Cellulose 71, 368
 Celluloseacetat CA 367
 Celluloseacetopropionat CAP 367
 Cellulosebutyrat CB 367
 Celluloseester CA, CP, CAB 367 ff.
 Celluloseether 570
 Cellulosepropionat CP 367
 Chargenkessel 58
 Chemiefasern 9, 188 ff.
 Chemikalienbeständigkeit 126

chemisch abbindende Klebstoffe
 (Reaktionskleber) 241
 chemische Beständigkeit 125
 chemische Bindung 72
 chemische Elemente 6, 38
 chemische Struktur 81
 chemische Verbindungen 38
 chemische Vernetzung 44, 57, 86, 121,
 511
 chemischer Alterungsvorgang 128
 chemisches Modifizieren 100
 chemisches Treibverfahren 203
 Chlorieren 305
 chloriertes Polyethylen PE-C 312 f.
 chloriertes Polyvinylchlorid PVC-C 304
 Chlorierung 71
 1-Chlor-2,3-epoxypropan 467
 Chlor-Kunststoffe 293
 Chloropren-Kautschuk 513
 Chlorsulfoniertes Polyethylen CSM 268
 Chlortrifluorethylen 434
 Chromophore 130
 chronische Toxizität 583
 chrono-mechanisches Verhalten 122
 cis-Butendisäure 460
 Citronensäure 532
 Clarifier 110
 CNT, Nanoröhren 565
 Coextrusion 166, 170
 Comonomere 55
 Compatibilizer 102
 Composites 106
 Compoundieren 144, 300
 Compression-RTM-Verfahren 200
 Copolymere 55
 Copolymerisation 101
 Copolymerisat 55
 Cossee-Arlman-Mechanismus 54
 Crazes 294
 Crazing 294
 CR-Typ 283
 Cyanatester-Harz 475
 cycloaliphatische Polyamide 390
 Cycloaliphatisches Epoxidharz 470
 Cycloalkan 533
 Cyclohexan-1,4-dimethylol (CHDM) 351
 1,4-Cyclohexandimethanol 352
 Cyclohexanonperoxid 462
 Cycloolefin-Copolymere (COC) 269
 Cyclopentan 533

D

Datenspeicher 558
 Degradation 601
 Dehnung 122
 Dehnviskosität 264
 Dehydrierung 328

Dendrimere 110
 Dendrimermolekül 43
 dendronisierte Polymere 44
 Denisov-Zyklus 133
 Depolymerisation 85, 412, 424
 Deponie 598
 Devulkanisationsverfahren 516
 Di-Hydroxymethylharnstoff 451
 Diallylphthalat 461
 Diamin 380, 386 ff., 498
 3,3'-Diaminobenzidin 497
 4,4'-Diaminodicyclohexylmethan PACM
 392
 4,4'-Diamino-diphenylether 495
 Diblockcopolymer 56
 Dibutylzinndilaurat 542
 Dicarbonsäure 380
 Diene 517
 Diethylentriamin 471
 Differential-Scanning-Calorimetry DSC
 137
 Differentialthermo-Analyse DTA 136
 Diffusion 127
 Diglycidether 468
 1,4-Dihydroxybenzol (Hydrochinon) 50,
 491
 diisocyanat 530, 543
 Diisodecylphthalat DIDP 308
 Diisononylphthalat DINP 308
 Dilatanz 112
 Dimeres 64
 Dimethylanilin 462
 Dimethylether 533
 2,6-Dimethylphenol 417
 3,3 Dimethyl-p-diaminodicyclohexylmethan
 MACM 392
 Diol 347
 Dioxolan 413
 Diphenole 483
 Diphenylcarbonat 356
 Diphenylether-Gruppe 480
 Diphenylketon-Gruppe 480
 Diphenylmethan-4,4'-diisocyanat, MDI
 495, 545
 Diphenylsulfid-Gruppe 480, 504
 Diphenylsulfon-Gruppe 480, 501
 Dipol 74
 Dipol-Dipol-Kraft 77
 Direkt-Veresterung 347
 Disaccharid 570
 dispergiert 329
 Dispersionskräfte 77
 dispersives Mischen 153
 Disproportionierung 50
 distributives Mischen 153
 DMC 184, 458
 DNA-Struktur 21
 Dodecandisäure 381

Doppelbindung 46, 57
 Doppelschneckenextruder 162
 Dotierung 553
 Downcycling 592
 Drahtummantelungsanlage 168
 Drehen 232
 Dreiblockcopolymer 528
 3D-Drucken 217
 Druckverformungsrest 516
 Drug-Delivery-System 10
 Dry-Blends 154, 310
 Dry-Jet-Wet-Spinnen 193
 Dryblend-Verfahren 310
 Dünnschichtkondensation 69
 Dünnschliff 140
 Dünnschnitt 140
 Durchflussskessel 58
 Durchflussrohr 58
 Duroplaste 41, 44, 121, 159, 439
 Dynamisch-Mechanische Analyse DMA 136

E

E-PVC 298
 ECHA 585
 Einbetten 216
 Einfrieren 103
 Einfriertemperatur 121, 309
 Einschneckenextruder 161
 Einteilung der Nebenvalenzbindung 76
 Elastizitätsmodul 122
 Elastomere/Gummi 41, 121, 159, 511–512
 – permanent vernetzte 512 f.
 – reversibel vernetzte 519 f.
 Elastomerlegierung 520
 Elektrete, Polymere 555
 elektrisch leitfähige Compounds 552
 elektrisch leitfähige Polymere 23
 Elektroaktive Kunststoffe 551
 Elektrodekantieren 426
 Elektrolumineszenz 559
 Elektronegativität 74
 Elektronenbeschleuniger 253
 Elektronenpaarbindung 73
 Elektrosinnen 193
 Emission 584
 Emulgator 59, 541
 Emulsion 59
 Emulsionspolymerisation 59
 Emulsions-Polyvinylchlorid E-PVC 297
 Endgruppe 83
 Endgruppen-Stabilisierung 413
 Energiebedarf 6
 enge Molmassenverteilung 97
 engmaschige Vernetzung 44
 Entformungsmittel 110
 Entropie 89
 entropie-elastisch 112

EPDM 282, 513
 Epichlorhydrin 464, 467
 Epoxid 20, 68
 Epoxidharz EP 465 ff.
 Erdöl 29
 Ermüdungsschutzmittel 519
 Erweichungstemperatur T_g 118
 Essigsäure 370, 491
 Essigsäureanhydrid 491
 Ester 345
 Ester-imid-Gruppe 495
 Estergruppe 345
 Ether-imid-Gruppe 495
 Ether-Thermoplast 409
 Ethylen 259
 Ethylen-Chlortrifluorethylen-Copolymer
 ECTFE 431, 434
 Ethylen-Copolymere mit α -Olefinen 265
 Ethylen-Copolymere 269
 Ethylendiamin 545
 Ethylenglykol 347, 460
 Ethylenoxid 346, 413
 Ethylen-Ethylacrylat-Copolymere (EEA)
 271
 Ethylen-Polymerisate, modifizierte 267
 Ethylen-Propylen-Kautschuk EPM 282
 Ethylen-Tetrafluorethylen-Copolymere ETFE
 431
 Ethylen-Vinylacetat-Copolymere (EVAC)
 270
 Ethylen-Vinylalkohol-Copolymere (EVOH)
 272
 Extender 107
 externe Gleitmittel 300
 Extruder 160
 Extruder-Schaumstoff 535
 Extrudieren (Strangpressen) 160 ff.
 Extrudierwerkzeug 163
 Extrusions-Streckblasformen 171
 Extrusionsanlage 160
 Extrusionsblasformen 169

F

Fällungspolymerisation 59
 Farbmittel 107, 151, 584
 Farbpigment 108
 Farbstoff 108
 Faserorientierungswinkel 198
 Faserspritzen 198
 Faserverstärkte Kunststoffe, FVK 197
 Faserwickeln 198
 FCKW/Fluorchloralkane 541
 FDA-Richtlinie 585
 Ferroelektrische Polymere 556
 Fertigungsverfahren 143
 Festkörperstruktur 89
 Festphasenkondensation 348

FFS-lines 229
 Fibrille 490
 Filmgießen (Foliengießen) 215
 flammhemmende Zusätze 109
 Flammenschutzmittel 109
 flammwidrig 294
 Fließhilfe 110
 Fließtemperaturbereich 119
 Fließverhalten 95, 111
 Fluidinjektionstechnik 179
 Fluor-Elastomere 435
 Fluor-Kunststoffe 423
 Fluor-Thermoplaste 429, 435
 Fluorchlorkohlenwasserstoff, FCKW 533
 Flüssigkristalline Polymere LCP 486
 Form-/Werkstoff 41
 Formaldehyd 412, 446, 450
 Formgießen 386
 Formmasse 41, 151
 Formschaumstoffe 542
 Formstoffe 151
 Formteil 159
 Fräsen 232
 Fügen 145, 233
 Fulluren 567
 Füllstoffe 105, 151, 519
 Fungistatika 105, 527
 funktionalisierte Polymere 558
 funktionelle Gruppe 63
 Funktionskunststoffe 558
 Funktionswerkstoffe 7
 FVK-Urformen 197

G

Galvanisierbarkeit 332
 Galvanisieren 249
 Gebrauchsadditive 104
 Gelcoat 201
 Gelcoat-Harze 461
 Gele 558
 Gelieren 308
 Gel-Spinnen 192
 Gelierprozess 244
 gemischtzellig 201
 Geschichte der Kunststoffe 11
 geschlossenzellig 201
 gesättigte Polyester 64, 346
 gewerbetoxikologische Begriffe 583
 Gewichtsmittel 98
 Gewindeschneiden 232
 Gießen 212
 Gießharz 440
 Glas 457
 Glasfaser 106
 Glastemperatur T_g 118, 309
 Glasübergangstemperatur T_g 121
 Gleichgewichtsreaktionen 62

Gleitmittel 110, 151
 Glucose 369
 Glycidester 468–469
 Glykolyse 594
 GMC 458
 GMT 185
 Granulieren 155
 Graphen 566
 Grenzflächenkondensation 68, 357
 Grundlagen des Spinnprozesses 189
 Grüne Chemie 28
 Gummi 121, 512 ff.
 Gummi-Schaumstoffe 549
 Guss-Polyamid 386

H

Haftvermittler 170
 Halbacetal 412
 Halbzeug 159
 HALS, HAS 133
 Handlaminieren 200
 Harnstoff-Formaldehyd-Schaumstoffe 548
 Harnstoffharz UF 449
 Harnstoff 450
 Hart-Polyvinylchlorid PVC-U 293
 Hartsegment 520, 529
 Hart-Weich-Kombination 523
 Härter 439
 Härtezeit 117
 Härtung 439
 Harzblase 445
 Harze 439
 Harzformstoff 440
 Harzmasse 440
 Harzmatte 441
 Harzträger 440
 HAS 133
 Hauptsatz der Kunststofftechnik 104, 135
 Hauptvalenzbindungen 72 ff.
 HBHV-Copolymer 574–576
 H-Brücken 388
 Heizelementschweißen 236
 Heißabschlag 155
 Heißmischung 310
 Heißprägen 248
 Helix 90
 Herstellung von Chemiefasern 189
 heterophasische Copolymere 277
 Hexafluorpropylen 432
 Hexahydrophthalsäure 470
 Hexahydrophthalsäure-diglycidester 470
 Hexa-Hydroxymethylmelamin 454
 Hexamethyldiamin 381
 Hexamethylentetramin 447
 High-Density-Polyethylen PE-HD 264
 Hilfsstoffe 541
 HM-C-Faser 400

Hochdruckanlage 207
 Hochdruckharze 440
 Hochdruckverfahren 259
 hochfeste Polymerfasern 22
 Hochleistungspolymere 479
 hochmolekulare Stoffe 40
 Hochofenprozess 594
 Homopolymerisate 55
 homöopolare Bindung 73
 Hookesches Gesetz 122
 HT-Faser 400
 Hybride Polymersysteme 564
 Hydrierung 593
 Hydrocellulose 571
 Hydrofluor-Kohlenwasserstoffe 533
 Hydrogele als Funktionspolymere 581
 Hydrolyse 370, 594
 hydrolytischer Abbau 349
 Hydroperoxid 129
 2-Hydroxybenzophenon 134
 Hydroxylgruppe 63
 Hydroxymethylgruppe 446
 β -Hydroxyvaleriansäure, HV 574
 hygroskopisch 272
 hyperverzweigtes Makromolekül 43

I

Imidgruppe 379, 492
 Imprägnieren 216
 in situ-Polymerisation 59, 386
 In-Mold Coating, IMC 248
 In-Mold Decoration, IMD 247
 In-Mold Labeling, IML 170, 247
 Induktionskräfte 78
 Induktionsschweißen 238
 Inertgas 69
 inert 585
 Inhibitor 50
 Initiatoraddition 50
 Initiator 47, 51 f.
 Initiierung/Startreaktion 47, 51
 innere Alterungsursachen 128
 innere Weichmachung 107, 370
 Insertion 260
 Integral-Schaumstoffe 107
 International Material Data System, IMDS 3
 interne Gleitmittel 300
 intrinsisch elektrisch leitfähige Polymere 553
 Ionenbindungen 79
 Ionomere 79
 irreversibel 512
 Isobuten-Isopren-Kautschuk 513
 Isobutylen 255
 Isocyanat 533, 584
 Isocyanatfreie Polyurethane (NIPU) 546
 Isophthalsäuredichlorid 490
 Isophthalsäure 351, 393, 460

Isopren-Kautschuke IR 513
 isotaktisch 88
 isotaktisches Polypropylen PP-it 87 f.

K

K-Wert 295
 Kalandrieren 186
 Kaltabschlag 155
 kalte Verbrennung 563
 Kaltformen 223
 Kalthärtung 462
 Kanzerogenität 583
 Kasein 14
 Katalysator 57
 Kation 51
 kationische Kettenpolymerisation 51
 Kautschuk 121
 Kautschuktyp 512
 Kerbschlagzähigkeit 414
 Keto-Enol-Tautomerie 134
 Kettenabbruch 49, 52 f.
 Kettencopolymerisation 55
 Kettenlänge 95
 Kettenpolymerisation 45–46
 Kettenstabilisierung 413
 Kettenübertragung 48, 51 f.
 Kettenverzweigung 49, 85
 Kettenwachstumsreaktion 45, 70
 Kettenwachstum 48, 51 f.
 Kevlar-Faser 490
 Kicker 533
 Kleben 239 ff.
 Ko-Kneter 154
 Kobaltsalze 462
 Kofler-Heizbank 140
 Kohlenhydrate 29
 Kohlenstofffasern (C-Fasern) 400
 Kohlenwasserstoffe 38
 Kohäsion 239
 kombinierte Verfahren 225
 Kondensation 62
 Kondensationscopolymerisation 63
 Kondensationsharze 440
 Kondensationspolymerisation
 (Polykondensation) 45, 62 f.
 Kondensationspolymerisation unter
 Ringschluss 496
 Konditionieren 252
 Konfiguration 44, 81, 87, 89
 Konstitution 44, 81 f.
 konstitutionelle Repetiereinheit 83
 koordinative Kettenpolymerisation 54
 koordinative Polyinsertion 54
 Kopf-Kopf-Anordnung 86
 Kopf-Schwanz-Anordnung 86
 Kopf-Schwanz-Polymerisation 48
 kovalente Bindungen 73

Kristallinität 93
 Kristallisationsgrad 93
 Kristallitschmelztemperatur 119
 Kristallkeimbildner 93
 Kristalllamellen 92
 Kunststoffe 1, 37, 41, 104, 143
 Kunststoff-Flaschen 314
 Kupplungsschicht 201
 Kurzkettenverzweigung 255
 Kurzzeichen für Kunststoffe 12

L

Lackieren 246
 Lactam 380, 384
 Laminat 457, 459, 466
 Laminierharze 441
 Laminierverfahren 458
 Länge eines Makromoleküls 42
 Langkettenverzweigung 255
 Laserbeschriften 248
 latent 471
 Latex 519
 ω -Laurinlactam 381
 LC₅₀-Wert 583
 lebende Polymere (living polymers) 53
 Lebensdauer 128
 Leiterpolymere 44, 497
 Leitfähigkeit 24
 Leitfähigkeitszusätze 109, 552
 Lichtemittierende Polymere 24, 559
 Lichtinduzierte Alterung 130
 Lichtschutzmittel 129, 519
 Lichtstabilisatoren 294
 lineare Polyolefine 22, 255
 lineare Verarbeitungs- und Nachschwindung 94
 Linters 369
 Littering 598
 Lösekerntechnik 181
 Lösemittel 151
 Lösungs-Additionspolymerisation 68
 Lösungs-Kondensationspolymerisation 68
 Lösungsverfahren 57, 261
 low profile (LP) 461
 low shrink (LS) 461
 lyotrop 486

M

M-Kautschuke 512
 m-Phenylendiamin 490
 m-Xylylendiamin 393
 Mahlgut 591
 MVR-Wert 96
 Makrokonformation 89
 Makromoleküle 16, 40 ff., 100
 MAK-Wert 584

Maleinimid-Gruppe 495
 Maleinsäure/cis-Butendisäure 460
 MAP-Verpackungen 579
 Maslowschen Bedürfnispyramide 8
 Massenfließrate 95
 Massenwirkungsgesetz, MWG 62
 Massepolymerisation-Polyvinylchlorid
 M-PVC 299
 Masterbatch 108
 Mastikation 71, 517
 MC 458
 mechanische Bindungen 72, 79
 mechanische Treibverfahren 203
 Mehrkomponenten-Spritzgießen 178
 mehrschichtige Flasche 171
 Melamin 454
 Melamin-Phenol-Formaldehyd 453
 Melamin-Polyester 453
 Melaminharz MF 452
 Melaminharze, modifizierte 453
 Memory-Effekt 171
 mesogen 486
 mesomorph 486
 meta-Kresol 445
 Metallfolien 180
 Metallisieren 248
 Metallocen-Katalysatoren 55
 Metallocen-katalysierte Ethylencopolymere
 PE-MC 266
 Metallocen-katalysiertes Polypropylen mPP
 280
 meta-Phenylendiamin 471
 Methacryl-imid-Gruppe 495
 Methacrylnitril 399
 Methacrylsäuremethylester 363
 Methacrylsäure 464
 Methanolyse 594
 Methylamin 366
 Methylcellulose 571
 Methylchlorid 533
 Methylenharnstoff-Gruppe 452
 Methylenmelamin-Gruppe 455
 Methylenphenol-Gruppe 448
 Methylethylketonperoxid 462
 Methyl-Fluor-Siloxan-Kautschuk MFQ 513
 Methylmethacrylat 363
 Methylmethacrylat-Acrylnitril-Butadien-
 Styrol MABS 365
 Methylmethacrylat-Polymerisate,
 modifizierte 364
 4-Methylpenten-1 287
 α -Methylstyrol 323
 MFR-Wert 95
 Micellen 59
 migrieren 309
 Mikrobielle Ökologie 27
 mikrobieller Angriff 306
 Mikrofibrillen 93

Mikropräzisions-Spritzgießen 411
 Mikro-Suspensionspolymerisation 297
 Milchsäure 533
 Milieu-Harz 461
 Mischen 152
 mittlere Molmasse 50, 95 f.
 mittlerer Polymerisationsgrad 98
 Modifizierung
 – physikalische 101
 – von teilaromatischen Polyamiden 396
 Modifizierung 100
 Molding Compounds 184, 458
 Molekulare Nanotechnologie 567
 Molekulargewicht 40
 Moleküle 38, 40
 Molmassenregler 357
 Molmassenverteilung 41, 95 f.
 Molmasse 40, 85, 96
 Mono-Hydroxymethylharnstoff 451
 Monomer casting 386
 Monomer 45
 Morphologie 93
 MuCell-Verfahren 180
 Mulchware 258
 Multiblockcopolymer 528
 Multifunktionalität, smart Polymers 564
 multimodale Molmassenverteilung 264
 Mutagenität 583

N

Nachfolgevorrichtung 164
 nachhaltige Entwicklung 586
 Nachschwindung 94
 Nanocomposites 566
 Nanofasern 193
 Nanoröhren CNT 565
 Nanotechnologie 567
 Nassspinnen 192
 Natriumhydrogencarbonat 532
 Natriumsulfid 506
 Naturkautschuk NR 31, 513, 517, 519
 Nebenvaleanzbindungen 72, 75, 388
 Nebenvaleanzkräfte 75, 118
 Newtonsches Fließgesetz 111
 Niederdruckanlage 207
 Niederdruckharze 440
 Niederdruckverfahren 260
 Nitril-Kautschuk 513
 Nitrilgruppe 379, 398
 nitrose Gase 585
 Nomex-Faser 490
 Norbornen 269
 Norrish-Reaktionen 130
 Novolake 442, 445 f.
 Nukleierungsmittel 93, 109, 348
 Nylon 18, 397
 Nylon-Rope-Trick 69

O

O-Kautschuke 512
 Oberflächenharze 461
 Oberflächenspannung/Oberflächenenergie 240
 Oberflächenvorbehandlung 247
 Octabins 146
 offenzellig 201
 OLEDs 559
 Olefine 255, 288
 α -Olefin 265
 One-shot-Verfahren 541
 On-line-Lackierbarkeit 418
 opak 256
 optische Aufheller 108 f.
 organische Chemie 38
 Organisole 245
 Orientierung 102, 171
 oxidative Kupplung 418

P

p-Dichlorbenzol 506
 p-Methylstyrol 323
 p-Phenylendiamin 490
 p.h.r. 308
 Paraffine 263
 Partikel-Schaumstoffe 534
 Pasten-Extrusion 424
 Pastenverarbeitung 307
 Pathogenese 146
 Pathologie eines Werkstoffs 146
 Pathologische Technologie 146–147, 149
 Pathologischer Befund bei den
 Aufbereitungsverfahren 156
 Pathologischer Befund beim Schweißen 238
 Pathologischer Befund beim Urformen 220
 Pathologischer Befund beim Umformen 229
 PC+ASA-Blends 359
 PC+LCP-Blends 359
 PC+PBT-Blends 359
 PE-HD (PE hoher Dichte) 255
 PE-LD (PE niedriger Dichte) 255, 264
 PE-LLD/PE-VLD (lineares PE niedriger/sehr niedriger Dichte) 264
 PE-MD (PE mittlerer Dichte) 255
 Pentan 533
 Perfluoralkoxy-Copolymer PFA 430
 Perfluorpropylvinylether 432
 Perkulationsgrenze 553
 Permeation 126–127
 Peroxid 47, 584
 Petrochemie 5
 petrochemische Verfahren 593

- PE-UHMW 264
 Pfpfcopolymere 56 f., 528
 Phasengrenzflächen-Verfahren 357
 Phasenvermittler 102
 Phenol-Formaldehyd-Harze 15, 441
 Phenol-Formaldehyd-Schaumstoffe 548
 Phenol 445
 Phenoplaste (Phenol-Formaldehyd-Kondensationsharze) PF 441 f.
 Phosgen 355
 photoabbaubare Polymere 602
 photoadressierbare Polymere 559
 Photolacke 562
 Photolithographie 562
 Photooxidation 602
 Photoresists 562
 photosensitiv 602
 Photosynthese 27, 29
 Phthalsäure 460
 physikalisch abbindende Klebstoffe 241
 physiologischen Unbedenklichkeit 295
 PICVD-Technologie 250
 Piezo- und Pyroelektrizität 556
 piezoelektrische Polymere 556
 PIR 546
 Planetenwalzenextruder 163
 Plasmabeschichten 250
 plasmainduzierte Polymerisation 62
 Plasmapolymerisation 62
 plastics 1
 plastischer Zustand 1
 Plastisole 245
 PMDI 545
 PMMA+ABS-Blends 366
 PO-Schaumstoffe 536
 Polarität 74, 77, 126
 Polieren 232
 Poly-4-methylpenten-1 (PMP) 286–287
 Polyacetale 410
 Polyacetylen PAC 553
 Polyacrylester 364
 Polyacrylnitril PAN 398 f.
 Polyaddition 45
 Polyaddukte 67
 Polyalkylenterephthalate 346
 – modifizierte 351
 Polyamid PA 63, 379
 Polyamid-imid 494, 498
 Polyanilin PANI 554
 Polyarylamid PARA 396, 495
 Polyarylate PAR 345, 483, 485
 Polyaryletherketone PAEK 480
 Polyarylsulfone PSU, PES, PPSU 501
 Polybenzimidazol 493, 497
 Polybismaleinimid 493, 499
 Polybutadien 328, 517
 Polybuten-1 (PB-1) 285
 Polybutylen-Adipat-Terephthalat PBAT 577
 Polybutylenoxid 529
 Polybutylensuccinat PBS 345
 Polybutylenterephthalat PBT 347 ff.
 Polycaprolacton PCL 578, 601
 Polycarbonat PC 21, 354 ff.
 Polycarbonat-Cokondensate 358
 Polycarbonate, modifizierte 357
 Polycarbonat-Siloxan-Blockcopolymere 359
 Polychlortrifluorethylen PCTFE 431, 434
 Polydiallylphthalatharz PDAP, PDAIP 474
 Polyelektrolytmembran PEM 564
 Polyestercarbonat PEC 360, 484
 Polyesterimid 494, 499
 Polyester-Polyole 544
 Polyesterurethan-Kautschuke 514, 521
 Polyester 20, 345 ff.
 Polyetheramid-Block-Copolymere 521, 530
 Poly-Ether-Block-Amide PEBA 530
 Polyetheretherketon PEEK 481 ff.
 Polyetherimid 494, 499
 Polyetherketon PEK 481 f.
 Polyetherketonetherketonketon 482
 Polyether-Polyole 543
 Polyethersulfon PES 501, 503
 Polyetherurethan-Kautschuk 514
 Polyethylen PE 17, 46, 255 ff.
 Polyethylendioxythiophen PEDOT 561
 Polyethylennaphthalat PEN 352
 Polyethylenterephthalat PET 348 ff.
 Polyformaldehyd 409
 Polyharnstoff 533, 543
 Polyhydroxyalkanoate PHA 573
 Polyhydroxybutyrat PHB 29
 Polyimid PI 492 ff.
 Polyimidazole 493
 Polyisobutylen (PIB) 283, 523
 Polyisocyanat 541 ff.
 Polyisocyanurat PIR 546
 Polyisopren 517
 Polyketon PK 274
 Polykondensate 63
 Polykondensation 45
 Polylactid PLA 10
 Polymerblends (Polyblends) 101, 352, 359
 Polymere Leuchtdioden PLEDs 559
 Polymere Photovoltaik PPV 560
 Polymergemische 101
 Polymerisate 46
 Polymerisation 45
 – in Emulsion 57, 59
 – in Lösung 57 f.
 – in Masse 58
 – in Substanz 57 f.
 – in Suspension (Perlpolymerisation) 57, 61
 – unter Fällung 57 f.

- Polymerisationsgrad n 46, 70, 98
 – mittlerer $\bar{P}$ 98
 Polymer 41 f.
 Polymer-LED 559
 Polymerlegierung 101–102
 Polymermatrix 106, 328
 Polymerelektronen 41
 Polymer-Rohstoff 104
 Polymethacrylimid-Schaumstoffe 548
 Polymethacrylmethylimid PMMI 366, 500
 Polymethylmethacrylat PMMA 362
 Polymilchsäure 10
 Polymorphismus 276
 Poly-m-phenylenisophthalamid PMPI 490
 Polyol 541, 543
 Polyol-Prepolymer 541
 Polyolefine 255 ff.
 Polyolefin-Schaumstoffe 536
 Polyoxymethylen POM 21, 410 ff.
 Polyoxymethylen, modifizierte 414
 Polyparaphenylenvinyle, PPV 554
 Polyparaphenylene 554
 Polyphenylchinolin 554
 Polyphenylenether PPE 416
 Polyphenylensulfid PPS 504, 554
 Polyphenylensulfon PPSU 501, 503
 Polyphthalamid, PPA 395
 Poly-p-phenylenterephthalamid PPTA 490
 Polypropylen PP 275 ff.
 Polypropylenglykol 544
 Polypropylenoxid 409, 545
 Polypyrrol PPY 554
 Polyreaktionen 45
 Polysaccharide PSAC 369, 570
 Polysiloxane 473
 Polystyrol, Integralschaumstoffe 206
 Polystyrol PS 18, 318 ff.
 Polystyrol-Schaumstoffe PS-E 204, 534 ff.
 – Hartschaumstoffe 534 f.
 – Integralschaumstoffe 535
 – Strukturschaumstoffe 536
 Polystyrolsulfonat PSS 561
 Polysulfid-Kautschuk 514
 Polysulfon PSU 501 f.
 Polysulfone, modifizierte 504
 Polytetrafluorethylen PTFE 75, 423 f.
 Polytetrafluoräthylen-Copolymer 427
 Polytetramethylenterephthalat 350
 Polythiophen PT 554
 Polytrimethylenterephthalat (PTT) 351
 Polyurethan-Schaumstoffe 206, 537 ff.
 Polyurethan 19, 67 f., 379, 543
 Polyvinylacetat (PVAC) 578
 Polyvinylalkohol PVAL (PVOH) 578, 602
 Polyvinylchlorid PVC 16, 293 ff.
 Polyvinylchlorid-Schaumstoffe 548
 Polyvinylfluorid PVF 431, 433
 Polyvinylidenchlorid PVDC 314
 Polyvinylidenfluorid PVDF 431, 433, 556
 POM-Copolymerisate 413
 POM-Homopolymerisat POM-H 412
 Porenstruktur 201
 Powder Injection Molding PIM 182
 PPE+PA-Blends 418
 PPE+PS-Blends 418
 Prepolymerverfahren 541
 Prepolymer 361, 496
 Prepregs 441
 Prepregverarbeitung 197
 Pressen 183
 Pressen von Thermoplasten 185
 Primäracetat 369
 Primärkreislauf 590
 Primärstruktur 81
 1,2,3-Propantriol (Glycerin) 545
 Propylen 255
 Protein-Struktur 15
 Proton 38
 PS + PE Blends 338
 PS-I 327
 PS-I + PPE Blends 337
 Pultrusion 199, 458
 Pulverbeschichten 245
 Pulverlacke 466
 PUR-Gießharze 474
 PUR-Schaumstoffe, 537 ff.
 – Halbhart-(semiflexible) Schaumstoffe 539
 – Hartschaumstoffe 538 f.
 – Integral-Halbhartschaumstoffe 540
 – Integral-Hartschaumstoff PUR-I 539
 – Weichschaumstoffe PUR-W 538
 PVC Hart-Folie 188
 PVC-Pasten 311
 Pyridin-Verfahren 356
 pyroelektrische Polymere 557
 Pyrolyse 445, 593
 Pyromellithsäuredianhydrid 495
- Q**
- Q-Kautschuk 512
 Quartärkreislauf 590
 Quaterpolymer 56
 Quinterpolymer 56
- R**
- R-Kautschuke 512
 Radikal 47
 radikalische Kettenpolymerisation 47
 Radom 467
 Rakel 244
 Ram-Extrusion 424
 Random-Copolymere 56 f.
 Rapid Prototyping (RP) 216
 Raschelware 258

Rauchgasdichte 481
 Raumgewicht 107, 202, 531
 REACH 585
 Reaction Injection Molding 209
 reactive processing 525
 Reaktionsharz-Duroplaste 456 f.
 Reaktionsharze 440, 461
 Reaktionsharzformstoff 440
 Reaktionsharzmasse 461
 Reaktionsmittel 439
 Reaktionsschaumgießen 206, 533
 Reaktionsspinnen 193
 Reaktionsgespritzgießen 533
 Reaktionsverlauf 64
 Reaktor 57
 Recken 104, 363
 Recyclierbarkeit 516
 Recyclinghierarchie 586
 Recyclingkreislauf 590
 Recycling 516, 587 ff.
 Redoxreaktionen 563
 Regenerat 591
 Regler 49
 Regranulat 591
 Reibungsschweißen 237
 Reinforced-Reaction-Injection-Molding 542
 Rekombination 49
 relative Molekülmasse 40 f.
 Relaxation 123
 Resitol 447
 Resit 447
 Resole 442 ff.
 Rheologie 111
 RIM-Technik 542
 RIM-Verfahren 209, 533
 Ringmolekül 44
 Ringspaltung 46
 Rohdichte 107
 Rohrestrusionsanlage 165
 Rohrreaktor 259
 Rotationsformen 215
 Rotationsgießen 215
 Rovings 457
 RRIM 210, 542
 RSG-Verfahren 199, 206, 533
 Rückprallelastizität 516
 Rührautoklave 259
 Rumpfladung 74

S

Sägen 232
 Sandwich-Bauelement 208
 Schadenverhütung/Schadensanalyse 135
 Schaum 107, 201, 584
 Schaumbildung 203
 Schaumstabilisator 542
 Schaumstoffe 531 ff.
 Schaumstoffplatten 208
 Schergeschwindigkeit 111, 115
 Schichtpressen 183, 185
 Schichtpressstoff 444, 453
 Schießbaumwolle 370
 Schlagzäh modifiziertes Polystyrol PS-I 327
 Schlagzähe Acrylnitril-Styrol-Formmassen
 ASA, AES, ACS 335
 Schlagzähes PMMA-HI 365
 schlagzähes PP SHIPP 282
 Schlagzähigkeit 100, 107, 303, 327, 414
 Schleifen 233
 Schleuderverfahren (Schleudergießen) 215
 Schmelz-Additionspolymerisation 68
 Schmelzefließrate 95
 Schmelzekerntechnik 181
 Schmelzindex 95
 Schmelz-Kondensationspolymerisation 68
 Schmelzkondensation 69, 356
 Schmelzspinnen 190
 Schmelztemperaturbereich 119
 Schmiermittel 110
 Schneckenspritzgießmaschine 173
 Schnecke 162
 Schrumpfung 353
 Schrumpfung (Memory-Effekt) 104
 Schub-/Scherspannung 111
 Schubmodul 118
 Schwanz-Schwanz-Anordnung 86
 Schwefelvulkanisation 506
 Schweißen 233
 schwerentflammbar 294
 Schwindung 93
 Schäumen 201
 Seitenketten-LCP 558
 Sekundäracetat 370
 Sekundärbindungen 75
 Sekundärkreislauf 590
 Sekundärstruktur 89
 Selbstpoliereffekt 367
 selbstverlöschend 294, 486
 Shore-Härtebereich 522
 Si-Wafer 562
 Silanvernetzung 257
 Silicone 19, 473
 Siliconharze 473
 Siliconöl 542
 siliertes Polyethylen 267
 Skinpack-Verfahren 228
 SMC 184, 458
 SMS 322
 Solarzellen 560
 solvolytisches Verfahren 593
 Sonderverfahren 178, 233
 Sonderwerkstoffe 551
 Spacer 486, 491
 Spannungs-Dehnungs-Diagramm 124
 Spannungsrissbeständigkeit 256

- Spannungsrissbildung 126
 spezifisches Volumen 94
 Sphärolith 92
 Spinnprozess 190
 Spinnverfahren 188
 Spritzblasformen 172
 Spritzgießen 173 ff.
 – von vernetzenden Polymeren 182
 Spritzgießen 173
 Spritzgießmaschine 175
 Spritzgießwerkzeug 175, 176
 Spritzpressen 183 f.
 Spritzprägen 181
 Spritz-Streckblasformen 172
 Stabilisatoren 108, 129, 299, 584
 statistische Copolymere 56
 statistisches Terpolymer 274
 Stereo-Kautschuk 517
 Stereolithographie (STL) 217
 stereospezifischer Katalysator 13
 Stereospezifität 54
 sterische Konfiguration 87
 Sternmolekül 43
 Stoffumwandlung 570
 Stoßelastizität 516
 Strahlenvernetzung 252
 Strahlungsschweißen 236
 Strangaufweitung 112
 Strecken 104
 Streichen und Gelieren von PVC-Weich-
 Pasten 244
 Streichverfahren 243
 Struktur von Gummi 16
 Strukturmerkmale 80
 Struktur-Schaumstoffe (Integral-) 107
 strukturviskos 111
 Stufenwachstumsreaktion 45, 63, 70
 Styrofoam-Verfahren 205
 Styrol mit α - bzw. p-Methylstyrol 322
 Styrol-Acrylnitril SAN 325 f.
 Styrol-Butadien SB 327
 Styrol-Butadien-Blockcopolymer SBS 331
 Styrol-Butadien-Kautschuk 513
 Styrolpolymere 319 ff.
 – modifizierte 324
 Styrolpolymere 319
 Styrol 57, 321
 Styropor-Verfahren 204, 534
 Stärkeblends 572
 Stärkewerkstoffe 571
 subchronische Toxizität 583
 Substanzmischung 41
 Substanz 41
 Suspendierhilfsmittel 61
 Suspensions-Polyvinylchlorid S-PVC 297
 Suspension 61
 sustainable development 586
 Switchboard-Modell 91
 syndiotaktisches Polystyrol PS-s 324
 syndiotaktisch 88
 Synergismus 133
 Syngas 27
 Synthesegas 593
 Synthesekautschuk/Gummi 17, 31, 512 ff.
- ## T
- Tafel-/Extrusionsanlage 165
 Tampondruck 247
 Tauchformen 216
 TDI 543
 Technoklima 125, 128
 Technologie 143
 Teflon 19
 teilaromatische Polyamide 392
 teilkristalline aliphatische Polyamide 379
 – modifizierte 389
 teilkristalline aliphatische Polyamide 379
 teilkristallines Polyethylenterephthalat
 PET-C 348
 teilkristallin 41, 118, 395
 (teil)kristallin 44
 teilkristallin 91
 Tempern 251
 Terephthalsäuredichlorid 490
 Terephthalsäure 346, 393, 460
 Terpolymere 56, 274
 Terpolymerisate 414
 Tertiärkreislauf 590
 Tertiärstruktur 90
 Tetrabrombisphenol A 469
 Tetrachlorbisphenol A 469
 Tetraedermodell 87
 Tetrafluorethylen-Hexafluorpropylen-
 Copolymer FEP 430
 Tetrafluorethylen-Hexafluorpropylen-
 Vinylidenfluorid-Terpolymer THV 431
 Tetrafluorethylen 426
 Tetrahydrophthalsäure 460
 2,2,4,4-Tetramethyl-1,3-cyclobutandiol
 CBDO 352
 Tetramethyldiamin 381
 Textile Flächengebilde 196
 Texturieren 195
 thermisch-mechanisches Verhalten 117
 Thermoanalyse TA 136
 Thermoelaste 120, 364, 423
 Thermofixieren 194
 Thermoformen 223
 Thermoformmaschine 228
 Thermografie 558
 Thermogravimetrische Analyse TGA 136
 Thermomechanische Analyse TMA 136
 Thermooptische Analyse TOA 136
 thermooxidative Alterung 129
 thermooxidativer Abbau 71

Thermoplaste 41, 117 f., 156
 thermoplastisch verarbeitbare Fluor-
 Kunststoffe 428, 430, 434
 thermoplastische Elastomere auf Olefinbasis,
 TPE-O/TPE-V TPO/TPV 525
 thermoplastische Elastomere auf Styrolbasis,
 TPE-S TPS 525
 thermoplastische Elastomere TPE 41,
 120 f., 512, 519 ff.
 thermoplastische Polyamid-Elastomere,
 TPE-A TPA 526
 thermoplastische Polyester-Elastomere,
 TPE-E TPC 526
 thermoplastische Polyurethan-Elastomere,
 TPE-U TPU 527
 Thermoplast-Schaum-Blasformen 533
 Thermoplast-Schaum-Extrusion 533
 Thermoplast-Schaum-Spritzgießen 533
 thermotrop 486
 Thiole 49
 tie-Moleküle 92
 Tissue Engineering 568
 T-Kautschuke 512
 Topologie 42
 Toxizität 583
 Tränken 216
 transluzent 256
 transparent 256
 Traubenzucker 369
 Treibmittel 107, 531, 541
 – chemische 531
 – mechanische 531
 – physikalische 531
 Treibverfahren, physikalische 203
 Trennen (Spanen) 145, 231 ff.
 Trennmittel 110
 2,4,6-Triamino-1,3,5-triazin 454
 Triazinharze 476
 Triblockcopolymere 56
 Triboelektrizität 557
 Tri-Hydroxymethylmelamin 454
 Trimellithsäureanhydrid 498
 1,1,1-Tris (4-hydroxyphenyl)-ethan THPE
 358
 Trioxan 412
 TRK-Wert 584
 Trockenmischungen 310
 Trockenspinnen 192
 Trommsdorff-Effekt 50, 364
 TSB-Verfahren 180 f.
 TSE-Verfahren 180, 533 f.
 Typen von Makromolekülen 43

U

U-Kautschuke 512
 u. a. Gelektrophorese 581
 u. a. Haargel 581

ultrahochfeste Fasern 24
 Umesterung 347, 356
 Umformen 145, 223
 Umwandlung von Naturstoffen 71
 Umwelteinflüsse 125
 ungesättigte Polyesterharze UP 57, 456
 UP-Reaktionsharzmasse 458
 Urethangruppe 67, 379, 543
 Urformen 145, 159
 UV-Absorber 108, 294
 UV-Sensibilisatoren 602
 UV-Stabilisatoren 108, 458

V

Vakuumgießen 213
 van der Waals-Bindungen 76
 van der Waalsche Kräfte 76
 Vanadiumbasis 280
 VDA 260 3
 Verarbeitungsadditive 104
 Verarbeitungsschwindung 94
 Verarbeitung 143
 Verbundwerkstoffe 106
 Veredeln 145, 245
 Veresterung 83
 Verfahrenstechnik beim Kalandrieren 187
 Verfahrenstechnik der Kettenpolymerisation
 57
 Vergrößerung des Polymerisationsgrads
 70
 Vermüllung 598
 vernetztes Polyethylen PE-X 252
 Vernetzung 65 ff., 101, 117, 434, 517
 – physikalische 45, 511
 Vernetzungsgrad 85
 Vernetzungsmittel 463, 518
 Vernetzung 64, 101, 117, 439, 518
 Verringerung des Polymerisationsgrads 71
 Verseifung 83
 Verstrecken 104, 194
 Verstärkungsmittel 519
 Verstärkungsstoffe 106, 151
 Verteiler 519
 Verweilzeit 116
 Verzweiger-Monomere 357
 Verzweigungsgrad 263, 85
 Vinylchlorid 297
 Vinylchlorid-Copolymerisate 301
 Vinylchlorid/Ethylen/Vinylacetat VCEVAC
 304
 Vinylchlorid/N-Cyclohexylmaleinimid
 302
 Vinylchlorid-Polymerisate, modifizierte
 300 ff.
 Vinyl-Elastomere 523
 Vinylesterharz VE 463
 Vinylfluorid 434

Vinylidenchlorid VDC 315
 Vinylidenchlorid-Copolymerisate 315
 Vinylidenfluorid 433
 Vinylmonomer 47
 viskos-elastisch 112
 Viskose 15
 Viskositätsfunktion 113
 Viskositätskurve 113
 Viskositätsskala 113
 Viskosität 95, 111, 113, 114
 Volatile Organic Compounds (VOCs) 415
 Volumenschwindung 94
 Volumen-/Töpfchen-Modell 94
 Vorbehandlungsverfahren 247
 Vorkondensat 451
 Vorstabilisierung 299
 Vortrocknen 156
 Vulkanisation 14, 121, 512, 516

W

Wärmestabilisatoren 109, 299
 Warmformen 223
 Warmgasschweißen 236
 Warmhärtung 462
 Wasseraufnahme 126
 wasserlösliche Polymere 602
 Wasserstoffbrückenbindungen 78, 388
 Weichmacher 107, 151, 306 ff., 370, 389, 418, 519
 Weich-Polyvinylchlorid PVC-P 305, 523
 Weichschaumstoffe 540
 Weichsegment 520, 529

weitmaschige Vernetzung 44
 Weißbruch 294
 Wendelstruktur (Helix) 90, 427
 Werkstoffdatenbanken 4
 Werkstoffklassen 1
 werkstoffliches Recycling 590
 Wiederholungseinheit 81
 Wirbelmischer 154, 311
 Wirbelsintern 245
 Wood Plastics Composites WPC 569

X

3,5-Xylenol 445
 1,3-Xylylendiamin 396

Z

Zahlenmittel 97
 Zellglas 371
 Zellstoff 369
 Zellstruktur 201, 531
 Zerkleinern 155
 Zersetzungstemperatur 73, 121
 Ziegler-Natta-Katalysatoren 54, 261
 Zirkonocene 280
 z-Mittel 98
 Zucker 369
 Zugdruckumformen 225
 Zugspannung 122
 Zugumformen 225
 Zusatzstoffe 40, 104 f., 151
 zwischenmolekulare Kräfte 75