

Kunststoffchemie für Ingenieure

Von der Synthese bis zur Anwendung

Bearbeitet von
Wolfgang Kaiser

4., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage 2015. Buch. 636 S. Hardcover

ISBN 978 3 446 44638 0

Format (B x L): 17,6 x 24,6 cm

Gewicht: 1288 g

[Weitere Fachgebiete > Technik > Verfahrenstechnik, Chemieingenieurwesen, Lebensmitteltechnik > Technologie der Kunststoffe und Polymere](#)

schnell und portofrei erhältlich bei

beck-shop.de
DIE FACHBUCHHANDLUNG

Die Online-Fachbuchhandlung beck-shop.de ist spezialisiert auf Fachbücher, insbesondere Recht, Steuern und Wirtschaft. Im Sortiment finden Sie alle Medien (Bücher, Zeitschriften, CDs, eBooks, etc.) aller Verlage. Ergänzt wird das Programm durch Services wie Neuerscheinungsdienst oder Zusammenstellungen von Büchern zu Sonderpreisen. Der Shop führt mehr als 8 Millionen Produkte.

HANSER



Leseprobe

Wolfgang Kaiser

Kunststoffchemie für Ingenieure

Von der Synthese bis zur Anwendung

ISBN (Buch): 978-3-446-44638-0

ISBN (E-Book): 978-3-446-44774-5

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-44638-0>

sowie im Buchhandel.

Vorwort zur vierten Auflage

„Well, nobody's perfect!“, tönt es zum Schluss im Kultfilm „*Some like it hot*“ („*Manche mögen's heiß*“). Ein kurzer Blick auf den Mittelteil im Impressum dieses Buches (Seite vis-à-vis) ver gegenwärtigt, dass diese aufmunternden Worte auch im Bereich der Fachbücher – selbst für eine vierte Auflage – nicht fehl am Platz sind. Überdies erweist sich der Filmtitel „*Manche mögen's heiß*“ auch als wichtiges Kriterium bei der Auswahl von Kunststoffen was ihre Temperaturbeständigkeit betrifft. Im speziellen gilt dies für Hochleistungskunststoffe. Allerdings kann hier der Vermerk: „doch nur mit Maß und Ziel“ nicht schaden. Seit dem Erscheinen der ersten Auflage (Herbst 2005) sind ziemlich exakt zehn Jahre vergangen. Grund genug, dem zentralen Anspruch dieses Fachbuches auch in der vierten Auflage erneut gebührend Rechnung zu tragen: **Aktualisierte Grundlagen praxisnah vermitteln**. Selbstredend hätten diese anspruchsvollen und umfangreichen Anpassungen nicht im gleichen Maße aufs Neue vorgenommen werden können, wenn der Verfasser nur auf sich allein gestellt gewesen wäre.

Zuallererst gilt somit mein ganz besonderer Dank den Herren Prof. Dr. Paul Smith (ETH Zürich), Prof. Dr. Walter Caseri (ETH Zürich), Prof. Dr. Theo Tervoort (ETH Zürich), Prof. Dr. Erich Kramer (FH Nordwestschweiz), Dr. Peter Attenberger (Vinnolit), Dr. Harald Geisler (DIK Hannover), Dipl.-Ing. Georg Haberl (Vinnolit), Dr. Wilfried Haese (Bayer MaterialScience), Dr. Manfred Hewel (EMS Chemie), Dr. Oliver Jünger (Celanese), Dr. Klaus Kurz (Celanese), Dipl.-Ing. Eduard Maurer (Emaform), Dr. Martin Roth (ehemals Huntsman), Dr. Daniel Sandholzer (Borealis) und Dipl.-Ing. Michael Schäfer (Celanese). Sie alle haben mit viel Engagement, Zeit, Mühe und Sachverstand die einzelnen Kapitel kritisch durchgesehen 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 auf Schreibfehler oder sonstige Fehler hingewiesen und/oder Verbesserungsvorschläge gemacht haben. In gewohnt routinierter Weise aber auch mit viel Hingabe und Begeisterung wurde ich erneut von Herrn Dipl.-Ing. Stephan Tanner (bzb Buchs/SG) bei der elektronischen Aufbereitung von chemischen Formeln, Bildern (Zeichnungen) und Tabellen unterstützt.

Nicht zuletzt gebührt auch dieses Mal 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 Ulrike Wittmann, Herrn Dr. Mark Smith und Herrn Jörg Strohbach.

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

Zürich, im Herbst 2015

Wolfgang Kaiser

Inhalt

Vorwort zur vierten Auflage	V
Prof. Dr. Phil. II Wolfgang Kaiser	VII
Hinweise zur Benutzung des Buches.....	IX
1 Einführung	1
1.1 Werkstoffklassen	1
1.2 Bedeutung der Kunststoffe	3
1.2.1 Wachstumsursachen	4
1.2.1.1 Die Petrochemie als Rohstofflieferant	4
1.2.1.2 Leichtgewicht Kunststoff	4
1.2.1.3 Energiegünstiges Verhalten	4
1.2.1.4 Komplexe Formteilgeometrien und hoher Automatisierungsgrad	5
1.2.1.5 Nutzung von Synergien	5
1.2.2 Kunststoffe und die Grundbedürfnisse des Menschen	6
1.2.2.1 Nahrung	6
1.2.2.2 Gesundheit	7
1.2.2.3 Kleidung	7
1.2.2.4 Wohnung	8
1.2.2.5 Kommunikation	8
1.3 Geschichte der Kunststoffe	8
1.3.1 Kurzer Abriss der Entwicklung der Polymerwissenschaften (ohne Copolymeren und Blends)	12
1.4 Zukunft der Kunststoffe – Prognosen	23
1.4.1 Zukünftiger Pro Kopf-Verbrauch von Kunststoff-Werkstoffen ..	24
1.4.2 Erwartungen an Polymere	25
1.4.3 Zukünftige Rohstoffquellen	25
1.5 Wirtschaftsdaten und Grafiken zu Kunststoffen	28
1.5.1 Einteilung der Kunststoffe nach Bedarf und Anwendungsgebieten	28
1.5.2 Einteilung der Kunststoffe nach ihrem Eigenschaftsprofil	28
2 Grundlagen	33
2.1 Was sind Kunststoffe	34

2.1.1	Einteilung der Kunststoffe	37
2.1.2	Makromolekül-Architektur/Topologie	38
2.2	Bildungsreaktionen für Makromoleküle – Polyreaktionen	41
2.2.1	Kettenpolymerisation	42
2.2.1.1	Radikalische Kettenpolymerisation	43
2.2.1.2	Kationische Kettenpolymerisation	46
2.2.1.3	Anionische Kettenpolymerisation	48
2.2.1.4	Koordinative Kettenpolymerisation/Polyinsertion ..	50
2.2.1.5	Homo- und Copolymerisate	51
2.2.1.6	Chemische Vernetzung durch Kettencopolymerisation	53
2.2.1.7	Verfahrenstechnik der Kettenpolymerisation	53
2.2.1.8	Plasmapolymerisation	58
2.2.2	Kondensationspolymerisation (Polykondensation)	58
2.2.3	Additionspolymerisation (Polyaddition)	62
2.2.4	Verfahrenstechnik der Kondensationspolymerisation und Additionspolymerisation	63
2.2.5	Einteilung nach dem Typ der Aufbaureaktionen	64
2.2.6	Chemische Umsetzungen an Makromolekülen	65
2.2.6.1	Vergrößerung des Polymerisationsgrads	65
2.2.6.2	Beibehaltung des Polymerisationsgrads	65
2.2.6.3	Verringerung des Polymerisationsgrads	66
2.2.6.4	Chemische Umsetzungen an makromolekularen Naturstoffen	66
2.3	Bindungs Kräfte in makromolekularen Systemen	67
2.3.1	Hauptvalenzbindungen	67
2.3.2	Nebenvalenzbindungen	70
2.3.3	Ionenbindungen	74
2.3.4	Mechanische Bindungen	74
2.4	Strukturmerkmale von Kunststoffen	75
2.4.1	Chemische Struktur	76
2.4.1.1	Konstitution	76
2.4.1.2	Konfiguration	82
2.4.2	Festkörperstruktur	84
2.4.2.1	Räumliche Anordnung eines Makromoleküls	84
2.4.2.2	Räumliche Anordnung mehrerer Makromoleküle zu einem Verband	85
2.4.2.3	Kristallinität	88
2.4.3	Mittlere Molmasse \bar{M} und Molmassenverteilung	90
2.4.3.1	Kettenlänge	90
2.4.3.2	Molmasse M bei niedermolekularen Verbindungen	91

2.4.3.3	Mittlere Molmasse \overline{M} und Molmassenverteilung bei hochmolekularen Verbindungen	91
2.4.3.4	Mittlerer Polymerisationsgrad	93
2.4.3.5	Beeinflussung von Eigenschaften durch die mittlere Molmasse	94
2.5	Modifizierung von Polymeren und Kunststoffen	95
2.5.1	Chemisches Modifizieren von Polymeren	95
2.5.1.1	Steuerung von Synthesereaktionen	95
2.5.1.2	Copolymerisation	96
2.5.1.3	Andere chemische Modifikationen	96
2.5.2	Physikalische Modifizierung von Polymeren und Kunststoffen	96
2.5.2.1	Polymergemische und Polymerblends	96
2.5.2.2	Erhöhung der Ordnung in Polymeren	97
2.5.3	Modifizieren mit Zusatzstoffen (Additive)	99
2.5.3.1	Füllstoffe	100
2.5.3.2	Verstärkungsstoffe	101
2.5.3.3	Weichmacher	102
2.5.3.4	Treibmittel	102
2.5.3.5	Farbmittel	102
2.5.3.6	Stabilisatoren	103
2.5.3.7	Flammhemmende Zusätze	104
2.5.3.8	Weitere Additivgruppen	104
2.6	Wichtige Eigenschaften der Kunststoffe	106
2.6.1	Fließverhalten (Rheologie) von Kunststoff-Schmelzen	106
2.6.1.1	Viskositätsfunktionen von Thermoplastschmelzen ..	108
2.6.1.2	Zeitverhalten von thermisch instabilen Thermoplast-Schmelzen und reagierenden Formmassen ...	110
2.6.2	Thermisch-mechanisches Verhalten	112
2.6.2.1	Thermoplaste	112
2.6.2.2	Elastomere und Duroplaste	115
2.6.3	Chrono-mechanisches Verhalten	117
2.6.4	Verhalten gegen Umwelteinflüsse	120
2.6.4.1	Chemische Beständigkeit	120
2.7	Alterung und Alterungsschutz	123
2.7.1	Alterung und Alterungsvorgänge	123
2.7.1.1	Chemische Alterungsvorgänge	123
2.7.1.2	Physikalische Alterungsvorgänge	126
2.7.2	Alterungsschutz	126
2.8	Chemische Reaktionen bei der Kunststoffverarbeitung	130
2.8.1	Chemische Reaktionen im Aufgabenbereich des Verarbeiters	131

2.8.1.1	Gezielte chemische Reaktionen während der Verarbeitung	131
2.8.1.2	Unerwünschte chemische Reaktionen während der Verarbeitung als Begleiterscheinung	131
2.8.1.3	Chemische Reaktionen außerhalb der Verarbeitung, jedoch vom Verarbeiter durch Zugabe von Hilfsmitteln beeinflussbar	131
2.8.2	Kunststofferzeugung beim Verarbeiter	132
2.9	Wichtige Aspekt bei der Schadenverhütung und Schadensanalyse im Kunststoffbereich	133
2.9.1	Thermoanalyse (TA) zur Schadenverhütung/Schadensanalyse	134
2.9.1.1	Differential-Kalorimetrie (Differential Scanning-Calorimetry), DSC	135
2.9.2	Mikroskopische Gefügeanalyse an Bauteilen und Halbzeug	138
3	Technologie der Verarbeitung von Kunststoffen	141
3.1	Allgemeines	141
3.2	Begriffe und Einteilung der Fertigungsverfahren nach DIN 8850	142
3.3	Prinzip der wichtigsten Ver- und Bearbeitungsverfahren	143
3.4	Aufbereitung	144
3.4.1	Einteilung der Aufbereitungsverfahren	145
3.4.1.1	Mischen	146
3.4.1.2	Granulieren	148
3.4.1.3	Zerkleinern	149
3.4.1.4	Vortrocknen	150
3.5	Urformen	151
3.5.1	Extrudieren (Strangpressen)	152
3.5.1.1	Aufbau eines Extruders	153
3.5.1.2	Beispiele typischer Extrusionsanlagen	158
3.5.2	Blasformen	162
3.5.2.1	Extrusionsblasformen	162
3.5.2.2	Extrusions-Streckblasformen	165
3.5.2.3	Spritzblasformen	166
3.5.2.4	Spritz-Streckblasformen	166
3.5.3	Spritzgießen	167
3.5.3.1	Verfahrenstechnik beim Spritzgießen	167
3.5.3.2	Spritzgießmaschine	168
3.5.3.3	Einflussgrößen auf die Formteilqualität beim Spritzgießen	171
3.5.3.4	Sonderverfahren der Spritzgießtechnik	172
3.5.3.5	Spritzgießen von vernetzenden Polymeren	177

3.5.4	Pressen, Spritzpressen, Schichtpressen	177
3.5.4.1	Pressen von Duroplasten	178
3.5.4.2	Pressen von Thermoplasten	179
3.5.4.3	Spritzpressen von Duroplasten	179
3.5.4.4	Schichtpressen von Duroplasten	180
3.5.5	Kalandrieren	180
3.5.5.1	Bauarten des Kalanders	180
3.5.5.2	Verfahrenstechnik beim Kalandrieren	181
3.5.6	Spinnverfahren	182
3.5.6.1	Grundlagen des Spinnprozesses	183
3.5.6.2	Herstellung von Chemiefasern	184
3.5.6.3	Textile Definitionen	189
3.5.6.4	Textile Flächengebilde	190
3.5.7	FVK-Urformen	191
3.5.7.1	Prepregverarbeitung	192
3.5.7.2	Faserspritzen	192
3.5.7.3	Faserwickeln	193
3.5.7.4	Pultrusion	193
3.5.7.5	RTM-Verfahren	193
3.5.7.6	Handlaminieren	195
3.5.8	Schäumen	196
3.5.8.1	Herstellung eines Schaumstoffes	197
3.5.8.2	Einteilung der Schäumverfahren	198
3.5.8.3	Polystyrol-Schaumstoffe	199
3.5.8.4	Polyurethan-Schaumstoffe	201
3.5.9	Gießen	207
3.5.9.1	Vakuumgießen	208
3.5.9.2	Rotationsformen (Rotationsgießen)	210
3.5.9.3	Schleuderverfahren (Schleudergießen)	211
3.5.9.4	Filmgießen (Foliengießen)	211
3.5.9.5	Einbetten, Imprägnieren, Tränken	212
3.5.10	Tauchformen	212
3.5.11	Additive Fertigungsverfahren (Additive Manufacturing AM)	213
3.5.11.1	Polymerisation als Basis für AM	214
3.5.11.2	Selektives Lasersintern (SLS)	216
3.5.11.3	Fused Layer Modeling (FLM)	216
3.5.11.4	Layer Laminate Manufacturing (LLM, auch LOM [®])	216
3.5.11.5	Aerosolprinting und Bioplotter	216

3.6	Umformen	217
3.6.1	Unterschiede im Warmformbereich zwischen amorphen und teilkristallinen Thermoplasten	217
3.6.2	Einteilung der Warmformverfahren für Thermoplaste	218
3.6.2.1	Biegeumformen	218
3.6.2.2	Zugumformen	218
3.6.2.3	Druckumformen	220
3.6.2.4	Zugdruckumformen	220
3.6.2.5	Kombinierte Verfahren	221
3.6.3	Verfahrenstechnik beim Warmformen	221
3.6.4	Thermoformmaschinen	223
3.6.5	Vor- und Nachteile des Warmformens	225
3.7	Trennen (Spanen)	225
3.8	Fügen	227
3.8.1	Schweißen	227
3.8.1.1	Heizelementschweißen	229
3.8.1.2	Warmgasschweißen	230
3.8.1.3	Strahlungsschweißen	230
3.8.1.4	Reibungsschweißen	231
3.8.1.5	Induktionsschweißen	232
3.8.2	Kleben	232
3.8.2.1	Grundlagen	232
3.8.2.2	Abbindemechanismus der Klebung	233
3.8.2.3	Verfahrenstechnik	235
3.8.3	Mechanische Verbindungen	235
3.9	Beschichten	235
3.9.1	Einteilung der Beschichtungsverfahren	235
3.9.2	Streichverfahren	236
3.9.3	Pulverbeschichten	237
3.10	Veredeln	238
3.10.1	Lackieren von Kunststoffen	239
3.10.2	Bedrucken von Kunststoffen	239
3.10.3	Laserbeschriften	241
3.10.4	Heißprägen	241
3.10.5	Metallisieren	241
3.10.6	Beflocken	243
3.10.7	Plasmabeschichten	243
3.10.8	Tempern	244
3.10.9	Konditionieren	245
3.10.10	Bestrahlen	245

4 Polyolefine	249
4.1 Polyethylen (PE)	249
4.1.1 Das Wichtigste in Kürze	249
4.1.2 Handelsnamen (Beispiele [®])	249
4.1.3 Eigenschaften	250
4.1.4 Verarbeitung und Anwendung	251
4.1.5 Anwendungsbeispiele	252
4.1.6 Der Weg zum Polyethylen	253
4.1.6.1 Hochdruckverfahren	253
4.1.6.2 Niederdruckverfahren	254
4.1.7 Der molekulare Aufbau des Polyethylen	256
4.1.7.1 Polyethylen mit multimodaler Molmassen- verteilung	258
4.1.7.2 Ethylen-Copolymere mit α -Olefinen	259
4.1.7.3 Metallocen-katalysierte Ethylen-copolymere (PE-MC)	260
4.2 Chemische Modifikation von Polyethylen	260
4.2.1 Abwandlung durch Vernetzen	260
4.2.2 Abwandlung durch chemische Veränderungen	262
4.2.3 Weitere Ethylen-Copolymere	263
4.2.3.1 Unpolare Ethylen-Copolymere	263
4.2.3.2 Polare Ethylen-Copolymere	263
4.3 Polypropylen (PP)	269
4.3.1 Das Wichtigste in Kürze	269
4.3.2 Handelsnamen (Beispiele [®])	269
4.3.3 Eigenschaften	270
4.3.4 Verarbeitung und Anwendung	271
4.3.5 Anwendungsbeispiele	271
4.3.6 Der Weg zum Polypropylen	272
4.3.7 Der molekulare Aufbau von Polypropylen	273
4.3.7.1 Isotaktisches Polypropylen (iPP)	274
4.3.7.2 Syndiotaktisches Polypropylen (sPP)	274
4.3.7.3 Ataktisches Polypropylen (aPP)	275
4.4 Modifikation von Polypropylen	275
4.4.1 PP-Copolymere	275
4.4.2 Gefüllte und verstärkte Polypropylene	276
4.4.3 Chemische Modifikation am fertigen PP-Polymer	277
4.5 Polysisobutylen (PIB)	277
4.5.1 Handelsnamen (Beispiele [®])	277
4.5.2 Eigenschaften	277

4.5.3	Verarbeitung (Beispiele)	278
4.5.4	Anwendungsbeispiele	278
4.5.5	Der Weg zum Polyisobutylen	278
4.6	Polybuten-1 (PB)	279
4.6.1	Handelsnamen (Beispiele [®])	279
4.6.2	Eigenschaften, Verarbeitung und Anwendung	279
4.6.3	Der Weg zum Polybuten-1	280
4.7	Poly-4-methylpenten-1 (PMP)	280
4.7.1	Handelsnamen (Beispiel [®])	280
4.7.2	Eigenschaften	280
4.7.3	Verarbeitung (Beispiele)	281
4.7.4	Anwendungsbeispiele	281
4.7.5	Der Weg zum Poly-4-methylpenten-1	281
4.8	Geschichtliches	282
4.9	Tabellarischer Eigenschaftsvergleich	283
5	Chlor-Kunststoffe	287
5.1	Hart-Polyvinylchlorid (PVC-U) (Hart-PVC, weichmacherfreies PVC)	287
5.1.1	Das Wichtigste in Kürze über Hart-Polyvinylchlorid	287
5.1.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	287
5.1.3	Eigenschaften	288
5.1.4	Verarbeitung (Beispiele)	289
5.1.5	Anwendungsbeispiele	290
5.1.6	Der Weg zum Polyvinylchlorid	290
5.2	Modifizierte Vinylchlorid-Polymerate	294
5.2.1	Vinylchlorid-Copolymere	294
5.2.1.1	Einteilung	294
5.2.1.2	Eigenschaften, Verarbeitung und Anwendung	296
5.2.1.3	Der Weg zu den Vinylchlorid-Copolymeren	296
5.2.2	Besonders schlagfestes Polyvinylchlorid (PVC-HI)	297
5.2.2.1	Eigenschaften, Verarbeitung und Anwendung	297
5.2.2.2	Der Weg zum besonders schlagfesten Polyvinylchlorid	297
5.2.3	Chloriertes Polyvinylchlorid (PVC-C)	298
5.2.3.1	Eigenschaften, Verarbeitung und Anwendung	298
5.2.3.2	Der Weg zum chlorierten Polyvinylchlorid	299
5.3	Weich-Polyvinylchlorid (PVC-P) (Weich-PVC, weichmacherhaltiges PVC)	299
5.3.1	Das Wichtigste in Kürze über Weich-Polyvinylchlorid	299
5.3.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	300

5.3.3	Eigenschaften	300
5.3.4	Verarbeitung (Beispiele)	301
5.3.5	Anwendungsbeispiele	301
5.3.6	Der Weg zum Weich-Polyvinylchlorid	302
5.3.6.1	Weichmacher	302
5.3.6.2	Einarbeitung von Weichmachern	304
5.4	Chloriertes Polyethylen (PE-C)	306
5.4.1	Eigenschaften, Verarbeitung und Anwendung	306
5.4.2	Der Weg zum chlorierten Polyethylen	306
5.5	Polyvinylidenchlorid (PVDC)	307
5.5.1	Das Wichtigste in Kürze	307
5.5.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	308
5.5.3	Eigenschaften, Verarbeitung und Anwendung von Vinylidenchlorid-Copolymerisaten	308
5.5.4	Der Weg zu den Vinylidenchlorid-Copolymerisaten	308
5.6	Geschichtliches	309
5.7	Tabellarischer Eigenschaftsvergleich	309
6	Polystyrol-Kunststoffe	313
6.1	Das Wichtigste in Kürze über Polystyrol-Kunststoffe	313
6.2	Polystyrol (PS)	314
6.2.1	Handelsnamen (Beispiele [®])	314
6.2.2	Ataktisches Polystyrol	314
6.2.2.1	Eigenschaften	314
6.2.2.2	Verarbeitung (Beispiele)	315
6.2.2.3	Anwendungsbeispiele	315
6.2.2.4	Der Weg zum Polystyrol	315
6.2.3	Stereoreguläre Polystyrole	317
6.3	Modifizierte Styrolpolymere (Abschnitt 6.4 bis 6.8)	318
6.4	Styrol-Acrylnitril-Copolymerisat (SAN)	319
6.4.1	Handelsnamen (Beispiele [®])	319
6.4.2	Eigenschaften und Verarbeitung	319
6.4.3	Anwendungsbeispiele	320
6.4.4	Der Weg zum Styrol-Acrylnitril	320
6.5	Schlagzäh modifiziertes Polystyrol (PS-I) (Styrol-Butadien SB)	321
6.5.1	Handelsnamen (Beispiele [®])	321
6.5.2	Eigenschaften	321
6.5.3	Verarbeitung (Beispiele)	322
6.5.4	Anwendungsbeispiele	322
6.5.5	Der Weg zum schlagzähnen Polystyrol	322

6.6	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Polymerisate (ABS)	325
6.6.1	Handelsnamen (Beispiele [®])	326
6.6.2	Eigenschaften	326
6.6.3	Verarbeitung (Beispiele)	326
6.6.4	Anwendungsbeispiele	326
6.6.5	Der Weg zum Acrylnitril-Butadien-Styrol	327
6.7	Schlagzähe Acrylnitril-Styrol-Formmassen (ASA, AES, ACS)	329
6.7.1	Handelsnamen (Beispiele [®])	329
6.7.2	Eigenschaften, Verarbeitung und Anwendung von Acrylnitril-Styrol-Acrylat (ASA)	329
6.7.3	Der Weg zum Acrylnitril-Styrol-Acrylat	330
6.8	Blends	331
6.8.1	PS-I + PPE Blends	331
6.8.2	ABS + PC bzw. ASA + PC Blends	331
6.8.3	ABS + PA Blends	332
6.9	Geschichtliches zu den Styrolpolymeren	332
6.10	Tabellarischer Eigenschaftsvergleich	333
7	Ester-Thermoplaste	339
7.1	Ester-Gruppe in der Hauptkette	340
7.1.1	Polyalkylenterephthalate („gesättigte“ Polyester) (PET, PBT) und Polyethylenphthalat (PEN)	340
7.1.1.1	Das Wichtigste in Kürze über Polyalkylenterephthalate	340
7.1.1.2	Der Weg zu den Polyalkylenterephthalaten	340
7.1.1.3	Polyethylenterephthalat (PET)	342
7.1.1.4	Polybutylenterephthalat (PBT)	344
7.1.1.5	Modifizierte Polyalkylenterephthalate	345
7.1.1.6	Polyethylenphthalat (PEN)	346
7.1.1.7	Geschichtliches	346
7.1.2	Polycarbonat (PC)	347
7.1.2.1	Das Wichtigste in Kürze über Polycarbonat	347
7.1.2.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	347
7.1.2.3	Eigenschaften	348
7.1.2.4	Verarbeitung (Beispiele)	348
7.1.2.5	Anwendungsbeispiele	348
7.1.2.6	Der Weg zum Polycarbonat	349
7.1.2.7	Modifizierte Polycarbonate	351
7.1.2.8	Geschichtliches	353

7.1.3	Polyestercarbonat (PEC)	353
7.1.3.1	Das Wichtigste in Kürze	353
7.1.3.2	Handelsnamen (Beispiele®)	353
7.1.3.3	Eigenschaften	353
7.1.3.4	Verarbeitung (Beispiele)	354
7.1.3.5	Anwendungsbeispiele	354
7.1.3.6	Der Weg zu Polyestercarbonat	354
7.1.3.7	Geschichtliches	355
7.2	Ester in der Seitenkette	355
7.2.1	Polymethylmethacrylat (PMMA)	355
7.2.1.1	Das Wichtigste in Kürze	355
7.2.1.2	Handelsnamen (Beispiele®)	355
7.2.1.3	Eigenschaften	355
7.2.1.4	Verarbeitung (Beispiele)	356
7.2.1.5	Anwendungsbeispiele	356
7.2.1.6	Der Weg zum Polymethylmethacrylat	356
7.2.1.7	Modifizierte Methylmethacrylat-Polymerisate	357
7.2.1.8	Geschichtliches	359
7.3	Celluloseester (CA, CP, CAB)	360
7.3.1	Das Wichtigste in Kürze	360
7.3.2	Handelsnamen (Beispiele®)	360
7.3.3	Eigenschaften	360
7.3.4	Verarbeitung (Beispiele)	361
7.3.5	Anwendungsbeispiele	361
7.3.6	Der Weg zu den Celluloseestern	361
7.3.6.1	Der Ausgangsstoff Cellulose	361
7.3.6.2	Chemische Umsetzungen an Cellulose	362
7.3.7	Geschichtliches	363
7.4	Tabellarischer Eigenschaftsvergleich	364
8	Stickstoff-Thermoplaste	373
8.1	Polyamide (PA)	373
8.1.1	Teilkristalline aliphatische Polyamide	373
8.1.1.1	Das Wichtigste in Kürze	373
8.1.1.2	Handelsnamen (Beispiele®)	375
8.1.1.3	Eigenschaften	376
8.1.1.4	Verarbeitung (Beispiele)	377
8.1.1.5	Anwendungsbeispiele	378
8.1.1.6	Der Weg zu den teilkristallinen aliphatischen Polyamiden	378
8.1.1.7	Wasserstoffbrücken (H-Brücken)	382

8.1.2	Modifizierte teilkristalline aliphatische Polyamide	383
8.1.2.1	Chemische Modifizierung	383
8.1.2.2	Physikalische Modifizierung	383
8.1.2.3	Anwendungsbeispiele	384
8.1.3	Cycloaliphatische Polyamide	384
8.1.3.1	Das Wichtigste in Kürze	384
8.1.3.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	384
8.1.3.3	Eigenschaften	384
8.1.3.4	Verarbeitung (Beispiele)	385
8.1.3.5	Anwendungsbeispiele	385
8.1.3.6	Der Weg zu den cycloaliphatischen Polyamiden ...	385
8.1.4	Teilaromatische Polyamide	386
8.1.4.1	Das Wichtigste in Kürze	386
8.1.4.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	388
8.1.4.3	Eigenschaftsprofil im Vergleich zu Standard- Polyamiden	388
8.1.4.4	Verarbeitung (Beispiele)	388
8.1.4.5	Anwendungsbeispiele	388
8.1.4.6	Der Weg zu den teilaromatischen Polyamiden ...	389
8.1.5	Modifizierung von teilaromatischen Polyamiden	390
8.1.6	Geschichtliches	391
8.2	Polyacrylnitril PAN	392
8.2.1	Das Wichtigste in Kürze	392
8.2.2	Handelsnamen (Beispiel [®])	392
8.2.3	Eigenschaften von Polyacrylnitril-Barriere- Kunststoffen	392
8.2.4	Verarbeitung und Anwendung (Beispiele)	393
8.2.5	Der Weg zu Polyacrylnitril-Barriere-Kunststoffen	393
8.2.6	PAC-/ PAN-Fasertransformation zu Kohlenstofffasern (C-Fasern)	394
8.2.7	Geschichtliches	395
8.3	Tabellarischer Eigenschaftsvergleich	395
9	Acetal- und Ether-Thermoplaste	403
9.1	Polyoxymethylen (Polyacetal) (POM)	404
9.1.1	Das Wichtigste in Kürze	404
9.1.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	404
9.1.3	Eigenschaften	404
9.1.4	Verarbeitung (Beispiele)	405
9.1.5	Anwendungsbeispiele	405

9.1.6	Der Weg zum Polyoxymethylen	406
9.1.6.1	POM-Homopolymerisat (POM-H)	406
9.1.6.2	POM-Copolymerisate (POM-Cop.)	407
9.1.6.3	Eigenschaftsunterschiede zwischen POM-Homo- und Copolymerisaten	408
9.1.7	Modifizierte Polyoxyethylen-Polymerisate	408
9.1.8	Geschichtliches	409
9.2	Polyphenylenether (PPE)	409
9.2.1	Das Wichtigste in Kürze	409
9.2.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	410
9.2.3	Eigenschaften	410
9.2.4	Verarbeitung (Beispiele)	410
9.2.5	Anwendungsbeispiele	410
9.2.6	Der Weg zum Polyphenylenether	411
9.2.7	Weitere modifizierte Polyphenylenether	412
9.2.8	Geschichtliches	412
9.3	Tabellarischer Eigenschaftsvergleich	412
10	Fluor-Kunststoffe	415
10.1	Polytetrafluorethylen (PTFE)	415
10.1.1	Das Wichtigste in Kürze	415
10.1.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	415
10.1.3	Eigenschaften	415
10.1.4	Verarbeitung (Beispiele)	416
10.1.5	Anwendungsbeispiele	417
10.1.6	Der Weg zum Polytetrafluorethylen	417
10.2	Thermoplastisch verarbeitbare Fluor-Kunststoffe	420
10.2.1	Das Wichtigste in Kürze	420
10.2.2	Fluorthermoplaste und Beispiele [®] von Handelsnamen	421
10.2.3	Eigenschaften	421
10.2.4	Verarbeitung (Beispiele)	421
10.2.5	Anwendungen	422
10.2.5.1	Spezielle Anwendungsbeispiele	422
10.2.6	Der Weg zu den thermoplastisch verarbeitbaren Fluor-Kunststoffen	423
10.2.6.1	Perfluorethylenpropylen FEP, auch Tetrafluor- ethylen-Hexafluorpropylen-Copolymer	423
10.2.6.2	Perfluoroalkoxy-Copolymer (PFA)	423
10.2.6.3	Ethylen-Tetrafluorethylen-Copolymer (ETFE)	424
10.2.6.4	Polyvinylidenfluorid (PVDF)	424

10.2.6.5	Tetrafluorethylen-Hexafluorpropylen-Vinyliden-fluorid-Terpolymer TFEHFPVDF (THV)	424
10.2.6.6	Polyvinylfluorid (PVF)	425
10.2.6.7	Polychlortrifluorethylen (PCTFE)	425
10.2.6.8	Ethylen-Chlortrifluorethylen-Copolymer (ECTFE)	425
10.3	Geschichtliches zu den Fluorpolymeren	425
10.4	Tabellarischer Eigenschaftsvergleich	426
11	Duroplaste	429
11.1	Allgemeines über Herstellung und Eigenschaften	429
11.2	Phenoplaste (Phenol-Formaldehyd-Kondensationsharze) (PF)	431
11.2.1	Das Wichtigste in Kürze	431
11.2.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	432
11.2.3	Eigenschaften von PF-Formstoffen	432
11.2.4	Verarbeitung (Beispiele)	434
11.2.5	Anwendungsbeispiele	434
11.2.5.1	Harzformstoffe, Harzformteile	434
11.2.5.2	Schichtpressstoffe	434
11.2.5.3	PF-Harze	434
11.2.6	Der Weg zu den Phenolharzen	435
11.2.7	Geschichtliches	439
11.3	Aminoplaste	439
11.3.1	Harnstoffharze (Harnstoff-Formaldehyd-Kondensationsharze) (UF)	439
11.3.1.1	Das Wichtigste in Kürze	439
11.3.1.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	439
11.3.1.3	Eigenschaften	440
11.3.1.4	Verarbeitung, Anwendung (Beispiele)	441
11.3.1.5	Der Weg zum Harnstoffharz	441
11.3.2	Melaminharze (Melamin-Formaldehyd-Kondensationsharze) (MF)	443
11.3.2.1	Das Wichtigste in Kürze	443
11.3.2.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	443
11.3.2.3	Eigenschaften	443
11.3.2.4	Verarbeitung, Anwendung (Beispiele)	443
11.3.2.5	Eigenschaften und Anwendung von modifizierten Melaminharzen (Beispiele)	444
11.3.2.6	Der Weg zum Melaminharz	444
11.3.3	Geschichtliches	446
11.4	Reaktionsharz-Duroplaste	446

11.4.1	Ungesättigte Polyesterharze (UP)	446
11.4.1.1	Das Wichtigste in Kürze	446
11.4.1.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	447
11.4.1.3	Eigenschaften	447
11.4.1.4	Verarbeitung (Beispiele)	449
11.4.1.5	Anwendungsbeispiele	450
11.4.1.6	Der Weg zu den ungesättigten Polyesterharzen	451
11.4.1.7	Geschichtliches	455
11.4.2	Vinylesterharze (VE)	455
11.4.2.1	Eigenschaften	455
11.4.2.2	Verarbeitung, Anwendung (Beispiele)	455
11.4.2.3	Der Weg zu den Vinylesterharzen	456
11.4.2.4	Geschichtliches	456
11.4.3	Epoxidharze (EP)	457
11.4.3.1	Das Wichtigste in Kürze	457
11.4.3.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	457
11.4.3.3	Eigenschaften	457
11.4.3.4	Verarbeitung (Beispiele)	458
11.4.3.5	Anwendungsbeispiele	458
11.4.3.6	Der Weg zu den Epoxidharzen	459
11.4.3.7	Geschichtliches	464
11.5	Sonstige Harze	464
11.5.1	Siliconharze	464
11.5.2	Polydiallylphthalatharze (PDAP, PDAIP)	465
11.5.3	PUR-Gießharze	466
11.5.3.1	Elastomer-Gießharze	466
11.5.3.2	Harte PUR-Harze	466
11.5.4	Cyanatester-Harze	467
12	Hochleistungspolymer	469
12.1	Polyaryletherketone (PAEK)	470
12.1.1	Das Wichtigste in Kürze	470
12.1.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	470
12.1.3	Eigenschaften	470
12.1.4	Verarbeitung (Beispiele)	471
12.1.5	Anwendungsbeispiele	472
12.1.6	Der Weg zu den Polyaryletherketonen	472
12.1.7	Geschichtliches	472
12.2	Polyarylate (PAR)	473
12.2.1	Das Wichtigste in Kürze	473

12.2.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	473
12.2.3	Eigenschaften	473
12.2.4	Verarbeitung (Beispiele)	474
12.2.5	Anwendungsbeispiele	474
12.2.6	Der Weg zu den Polyarylaten	475
12.2.7	Geschichtliches	476
12.3	Flüssigkristalline Polymere (LCP)	476
12.3.1	Das Wichtigste in Kürze	476
12.3.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	476
12.3.3	Eigenschaften	476
12.3.3.1	Aufbau und Struktur der LCP	476
12.3.3.2	Eigenschaften von thermotropen LCP	478
12.3.4	Verarbeitung (Beispiele)	479
12.3.5	Anwendungsbeispiele	479
12.3.6	Der Weg zu den flüssigkristallinen Polymeren	480
12.3.6.1	Herstellung der lyotropen LCP	480
12.3.6.2	Herstellung der thermotropen LCP	481
12.3.7	Geschichtliches	482
12.4	Polyimide (PI)	482
12.4.1	Das Wichtigste in Kürze	482
12.4.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	483
12.4.3	Eigenschaften	483
12.4.4	Verarbeitung (Beispiele)	485
12.4.5	Anwendungsbeispiele	485
12.4.6	Der Weg zu den Polyimiden	485
12.4.7	Geschichtliches	490
12.5	Polyarylsulfone (PSU, PES, PPSU)	491
12.5.1	Das Wichtigste in Kürze	491
12.5.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	491
12.5.3	Eigenschaften	492
12.5.4	Verarbeitung (Beispiele)	492
12.5.5	Anwendungsbeispiele	492
12.5.6	Der Weg zu den Polyarylsulfonen	493
12.5.7	Geschichtliches	494
12.6	Polyphenylensulfid (PPS)	495
12.6.1	Das Wichtigste in Kürze	495
12.6.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	495
12.6.3	Eigenschaften	495
12.6.4	Verarbeitung (Beispiele)	496
12.6.5	Anwendungsbeispiele	496

12.6.6	Der Weg zu Polyphenylensulfid	496
12.6.7	Geschichtliches	496
12.7	Tabellarischer Eigenschaftsvergleich	497
13	Elastomere	503
13.1	Permanent vernetzte Elastomere/Gummi	504
13.1.1	Das Wichtigste in Kürze über vernetzte Elastomere	504
13.1.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	506
13.1.3	Eigenschaften	506
13.1.4	Verarbeitung (Beispiele)	508
13.1.5	Anwendungsbeispiele	508
13.1.6	Der Weg zu den permanent vernetzten Elastomeren	509
13.1.7	Geschichtliches	511
13.2	Reversibel vernetzte Elastomere/Thermoplastische Elastomere TPE ...	511
13.2.1	Das Wichtigste in Kürze über TPE	511
13.2.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	514
13.2.3	Allgemeine Eigenschaften	514
13.2.4	Einzeleigenschaften und Anwendungsbeispiele	517
13.2.4.1	Thermoplastische Elastomere auf Olefinbasis, TPE-O/TPE-V (TPO/TPV)	517
13.2.4.2	Thermoplastische Elastomere auf Styrolbasis, TPE-S (TPS)	517
13.2.4.3	Thermoplastische Polyester-Elastomere, TPE-E (TPC)	518
13.2.4.4	Thermoplastische Polyamid-Elastomere, TPE-A (TPA)	518
13.2.4.5	Thermoplastische Polyurethan-Elastomere, TPE-U (TPU)	519
13.2.5	Der Weg zu den thermoplastischen Elastomeren	520
13.2.5.1	TPE-O/TPE-V (TPO/TPV)	520
13.2.5.2	TPE-S (TPS)	521
13.2.5.3	TPE-E (TPC)	521
13.2.5.4	TPE-A (TPA)	521
13.2.5.5	TPE-U (TPU)	522
13.2.6	Geschichtliches	522
14	Schaumstoffe	523
14.1	Allgemeines über Herstellung und Eigenschaften	523
14.1.1	Handelsnamen (Beispiele [®])	526
14.2	Polystyrol-Schaumstoffe (PS-E)	526
14.2.1	Das Wichtigste in Kürze	526

14.2.2	Polystyrol-Hartschaumstoff, Partikel-Schaumstoff	526
14.2.2.1	Eigenschaften	526
14.2.2.2	Verarbeitung	527
14.2.2.3	Anwendungsbeispiele	527
14.2.3	Polystyrol-Hartschaumstoff, Extruder-Schaumstoff	527
14.2.3.1	Eigenschaften	527
14.2.3.2	Verarbeitung	527
14.2.3.3	Anwendungsbeispiele	527
14.2.4	Polystyrol-Integralschaumstoff	527
14.2.4.1	Eigenschaften	527
14.2.4.2	Verarbeitung (Beispiele)	528
14.2.4.3	Anwendungsbeispiele	528
14.3	Polyolefin-Schaumstoffe, PO-Schaumstoffe	528
14.3.1	Das Wichtigste in Kürze	528
14.3.2	Eigenschaften	528
14.3.3	Verarbeitung (Beispiele)	529
14.3.4	Anwendungsbeispiele	529
14.4	Polyurethan-Schaumstoffe, PUR-Schaumstoffe	529
14.4.1	Das Wichtigste in Kürze	529
14.4.2	PUR-Hartschaumstoffe, (PUR-H)	530
14.4.2.1	Eigenschaften	530
14.4.2.2	Anwendungsbeispiele	530
14.4.3	PUR-Weichschaumstoffe, (PUR-W)	530
14.4.3.1	Eigenschaften	530
14.4.3.2	Anwendungsbeispiele	531
14.4.4	PUR-Halbhart-(semiflexible) Schaumstoffe	531
14.4.4.1	Eigenschaften	531
14.4.4.2	Anwendungsbeispiele	531
14.4.5	PUR-Integral-Hartschaumstoffe, (PUR-I)	531
14.4.5.1	Eigenschaften	531
14.4.5.2	Anwendungsbeispiele	531
14.4.6	PUR-Integral-Halbhart- und Weichschaumstoffe	532
14.4.6.1	Eigenschaften	532
14.4.6.2	Anwendungsbeispiele	532
14.4.7	Der Weg zu den Polyurethan-Schaumstoffen	532
14.4.7.1	Polyurethan-Schäumsysteme	532
14.4.7.2	Chemie der PUR-Schäumsysteme	535
14.4.8	Geschichtliches	538
14.5	Weitere Schaumstoffe	539
14.5.1	Polyvinylchlorid-Schaumstoffe	539

14.5.2	Phenol-Formaldehyd-Schaumstoffe	539
14.5.3	Harnstoff-Formaldehyd-Schaumstoffe	539
14.5.4	Polymethacrylimid-Schaumstoffe	540
14.5.5	Gummi-Schaumstoffe	540
14.6	Tabellarischer Eigenschaftsvergleich	541
15	Kunststoffe als Sonderwerkstoffe	543
15.1	Elektroaktive Kunststoffe	543
15.1.1	Oberflächenbehandlungen	544
15.1.2	Elektrisch leitfähige Compounds	544
15.1.3	Intrinsisch elektrisch leitfähige Polymere	545
15.1.4	Polymere als Elektrete	547
15.1.5	Ferroelektrische Polymere (Piezo- und Pyroelektrizität)	548
15.1.6	Triboelektrizität (Reibungselektrizität)	549
15.2	Funktionskunststoffe	550
15.2.1	Polymere als Datenspeicher	550
15.2.2	Polymere Leuchtdioden, Polymer-LEDs (PLEDs)	551
15.2.3	Polymere Photovoltaik (PPV)	552
15.2.4	Photoresists	554
15.2.5	Brennstoffzellen	555
15.2.6	Hybride Polymersysteme	556
15.3	Nanotechnologie und Kunststoffe	557
15.3.1	Anwendung von Nanoröhren (CNT) als Zusatzstoffe für Kunststoffe	558
15.3.2	Graphen	558
15.3.3	Nanotechnologie als Schrittmacher in die Zukunft	559
15.4	Kunststoffe in der Medizintechnik	560
15.4.1	Polymilchsäure, Polylactid (PLA)	560
15.4.1.1	Das Wichtigste in Kürze	560
15.4.1.2	Handelsnamen (Beispiele®)	560
15.4.1.3	Eigenschaften, Verarbeitung, Anwendung	560
15.5	Biopolymere	562
15.5.1	Das Wichtigste in Kürze	562
15.5.2	Biokunststoffe – Kunststoffe aus nachwachsenden (biogenen) Rohstoffen (NWR)	563
15.5.2.1	Handelsnamen (Beispiele®)	563
15.5.2.2	Cellulosewerkstoffe	564
15.5.2.3	Stärkewerkstoffe	565
15.5.2.4	Werkstoffe aus dem Bioreaktor	566
15.5.2.5	Werkstoffe durch chemische Synthese biobasierter Rohstoffe	568

15.5.2.6	Biocomposites als Werkstoffe	568
15.5.2.7	Blends als Werkstoffe	568
15.5.3	Biologisch abbaubare Kunststoffe (BAK)	569
15.5.3.1	Biokunststoffe neu definiert	569
15.5.4	Anwendungsbeispiele und Ausblick	569
16	Arbeitssicherheit, Gesundheits- und Umweltschutz beim Umgang mit Kunststoffen	571
16.1	Arbeitssicherheit und Gesundheitsschutz beim Umgang mit Kunststoffen	571
16.1.1	Gewerbetoxikologische Begriffe (Auswahl)	571
16.1.2	Herstellung von Polymeren und Kunststoff-Formmassen ...	571
16.1.3	Verarbeitung und Prüfung von Kunststoffen	572
16.1.4	Anwendung von Kunststoffen	573
16.2	Umweltschutz beim Umgang mit Kunststoffen	574
16.2.1	Nachhaltige Entwicklung	574
16.2.2	Abfall- und Recyclinghierarchie	574
16.2.3	Grundsätzliche Aspekte beim Recycling von Kunststoffen ...	575
16.2.4	Recyclingkreisläufe von Kunststoffen	575
16.3	Abfallwirtschaft und Recycling aus Sicht der Kunststoffindustrie	576
16.3.1	Werkstoffliches Recycling	576
16.3.2	Rohstoffliches Recycling	577
16.3.2.1	Petrochemische Verfahren	578
16.3.2.2	Solvolytische Verfahren	578
16.3.2.3	Hochofenprozess	580
16.3.3	Energetische Nutzung	580
16.3.4	Deponie	582
16.3.5	Littering alias Vermüllung	583
16.3.6	Codierung erleichtert Recycling	584
16.4	Abbaufähige, resorbierbare Kunststoffe	584
16.4.1	Biologisch abbaubare Polymere (BAP)	584
16.4.2	Photoabbaubare Polymere	585
16.4.3	Wasserlösliche Polymere	585
17	Literaturverzeichnis	587
	Sachwortverzeichnis	591

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 Hundertstaufen 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.



1.3.1 Kurzer Abriss der Entwicklung der Polymerwissenschaften (ohne Copolymeren und Blends)

Quelle: P. Smith und Natalie Stutzmann, ETH Zürich

Kunststoff aus Kasein 1530

Bartholomäus Schobinger (1500–1585)

Der St. Galler Bartholomäus Schobinger verrät Wolfgang Seidel, Mönch in Tegernsee und Andechs, eine geheime Rezeptur:

„Wenn man den Anweisungen folge leiste, kann man daraus Tischplatten, Trinkgeschirr und Medaillons gießen – also alles, was man will.“

Erste überlieferte Rezeptur für einen Kunststoff

Vulkanisation von Kautschuk 1839



Charles Goodyear (1800–1860)

Die Verwendung von Naturkautschuk, der aus dem Milchsaft bestimmter Pflanzenarten gewonnen werden kann, ist bereits in Abbildungen mexikanischer Indianer aus dem 10. Jahrhundert dargestellt.

Charles Goodyears Vulkanisation (= weitmaschige Vernetzung der Polymerketten) mit Schwefel macht den Kautschuk elastisch und haltbar, und dadurch erst technisch einsetzbar.

U.S. Patent 3633



Kautschuk: caa ocho (indianisch): tränender Baum

Celluloid 1870



John W. Hyatt (1837–1920)

J. W. Hyatt entwickelt den ersten kommerziell erfolgreichen Kunststoff auf Grund Parkes' leicht entflammbarer Nitrocellulose-Campher-Mischung (Celluloid).

U.S. Patent 105338

Anwendungen: Photographische Filme (eingeführt von George Eastman 1884), Tischtennisbälle, Kämme

Viskose 1892



Charles Cross (1855–1935)

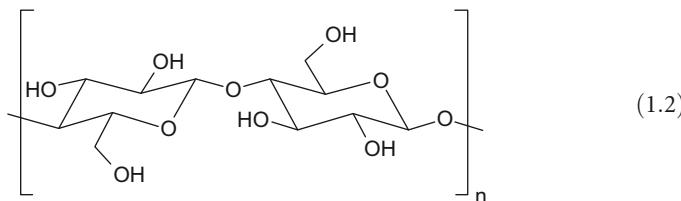
Edward Bevan (1856–1921)

Clayton Beadle (1868–1917)

Hilaire Bernigaud, Comte de Chardonnet (1839–1924)

C. Cross, E. Bevan und C. Beadle entwickeln, basierend auf Chardonnet's Methode zur Regenerierung von Cellulose (1884), einen Prozess zur Herstellung von Viskose. Durch eine chemische Reaktion werden die Polymermoleküle vorübergehend modifiziert, damit die Cellulose verarbeitbar wird.

U.S. Patent 520770



Anwendungen: Cellophan®-Filme, Rayon®-Fasern (rayonner (franz.): glänzen)

Protein-Struktur 1906

Emil H. Fischer (1852–1919)

Um 1900 sind 16 von den 20 Aminosäuren, welche als Grundbausteine der Proteine gelten, bekannt.

E. H. Fischer beschreibt das Formen von chemischen Verbindungen in Proteinen mit einem korrekten Mechanismus (Peptid-Verbindungen zwischen benachbarten Aminosäuren).

1906 prägt E. H. Fischer den Ausdruck „Polypeptid“:

Ber. Chem. Ges. 39, 530 (1906)



Bakelit (Phenol-Formaldehyd-Harz) 1907

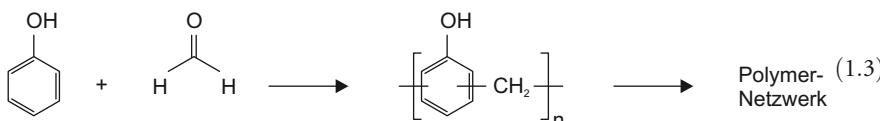
Leo H. Baekeland (1863–1944)

L. H. Baekeland meldet 1907 grundlegende Patente zur Herstellung von Phenol-Formaldehyd-Harzen (PF) an.

Die von ihm gegründete Bakelitegesellschaft startet erste technische Produktion von PF-Harzen, den ältesten vollsynthetischen Kunststoffen, 1910.



U.S. Patent 942699



Anwendung: Isolatoren, Stecker, Schalter, Billardkugeln, Radiogeräte

Struktur von Gummi 1910

Samuel S. Pickles (1878–1962)

S. S. Pickles schlägt für Gummi eine (zyklische) Kettenstruktur vor:

J. Chem. Soc. 97, 1085 (1910)

Er erhält 1939 die Colwyn-Goldmedaille für seine wertvollen Beiträge für die Gummi-Industrie.



Polyvinylchlorid (PVC) 1912

Friedrich Klatte (1880–1934)

F. Klatte, Griesheim-Elektron, lässt die Polymerisation und industrielle Produktion von Polyvinylchlorid (PVC) patentieren.



Bezogen auf die Größe der Molmassen stehen die „Hyperbranched Polymers“ über den Dendrimeren und dienen u. a. als Beschichtungen/Überzüge für Oberflächen. Wie ihre Bezeichnung bereits vermuten lässt, ähneln sie in etwa einem stark verzweigten und dicht belaubten Ast. Ganz zuoberst sind nach dieser Betrachtungsweise die dendronisierten Polymere einzuordnen, die man sich als kleine Zylinder vorstellen kann („entstanden aus einem ringsum mit Dendrimeren dicht bewachsenen stäbchenförmigen Makromolekül“). Futuristisch betrachtet könnten diese Zylinder beispielsweise als Gleitrollen oder Antriebswellen bei Nanomaschinen zum Einsatz kommen, vgl. Abschnitt 15.3.

Ergänzt sei diese architektonische Vielfalt durch drei Sonderfälle: Ringmoleküle sowie Leiter- und Halbleiter-Moleküle. Mit dem Begriff Leiter wird der Aufbau der Moleküle – vergleichbar einer Leiter mit Holmen und Sprossen – zum Ausdruck gebracht, vgl. Bild 2.6.

Doch selbst für den Fall eines linearen Makromoleküls in Form eines langen Fadens bestehen bei näherer Betrachtungsweise vielfältige Möglichkeiten im Kettenaufbau, die sich insbesondere durch die Art, Zahl und Verknüpfung der Grundbausteine ergeben, *Konstitution* genannt.

So können die miteinander verknüpften Kettenatome, die an beiden Enden je eine Endgruppe tragen, alles C-Atome (wie bei PE) oder aber verschiedenartig sein, z. B. neben C- auch O-Atome, wie im Falle von Polyoxymethylen (POM), aufweisen, vgl. Abschnitt 9.1. Auch ähnelt eine lineare Kette gelegentlich einem „Stacheldraht“, dessen „Stacheln“ verschiedene Positionen zueinander einnehmen können, dies betrifft im Besonderen die räumliche Anordnung von kleinen Seitengruppen (Atome und Atomgruppen) längs der Ketten, *Konfiguration* genannt, beispielsweise im Polypropylen (PP), vgl. Abschnitt 4.3.

Überdies besteht für ein Makromolekül die Möglichkeit, verschiedene Anordnungen (Lagen) im Raum einnehmen zu können: die Art der räumlichen Gestalt eines Makromoleküls wird *Konformation* genannt.

Schließlich kann die räumliche Anordnung der Makromoleküle zueinander variieren, d. h. das Zusammenfügen mehrerer Ketten zu einem dreidimensionalen Verband kann auf verschiedene Weise geschehen. Neben den bereits erwähnten Ordnungszuständen amorph und (teil)kristallin sind weit- und engmaschige Vernetzungen zwischen benachbarten Makromolekülen möglich. Die Vernetzungen können dabei sowohl chemischer als auch physikalischer Natur sein. Von chemischer Vernetzung spricht man beim Vorliegen chemischer Bindungen innerhalb und

Konstitution

Konfiguration

Konformation

vernetzte
Makromolekül-
ketten

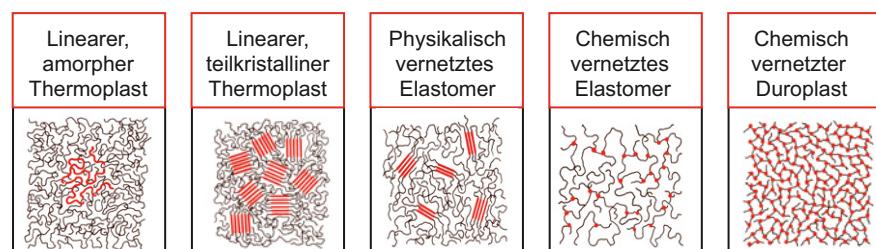


Bild 2.7: Schematische Darstellung der zweidimensionalen Projektionen verschiedenartiger Polymere

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

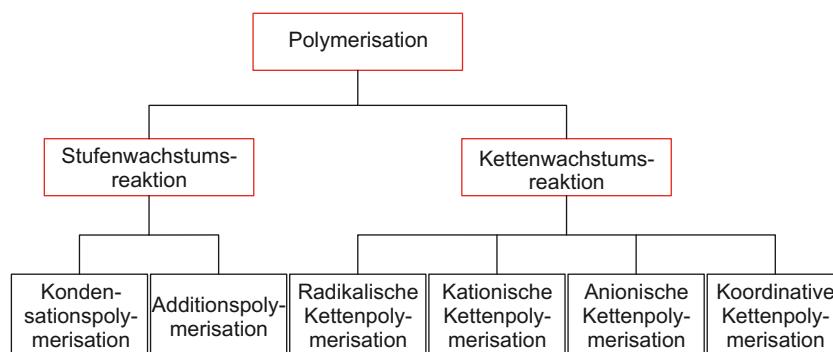


Bild 2.8: Einteilung der Polyreaktionen

- enge Molmassenverteilung
- breite Molmassenverteilung

die Molmasse in einer ersten Näherung zu $M > 10^4$ g/mol errechnen. Tatsächlich bewegen sich die mittleren Molmassen \bar{M} der meisten Kunststoffe in der Größenordnung zwischen 10^4 und 10^6 g/mol. Diese riesige Spanne ist allerdings in der Praxis eher die Ausnahme (z. B. bei PE), doch eine mehr oder weniger breite Verteilung der Molmassen gehört zum Erscheinungsbild eines jeden Kunststoffs. Auch ist typischerweise die zu erwartende Verteilung, die sog. Molmassenverteilung, asymmetrisch, vgl. Bild 2.45. Eine enge Molmassenverteilung verschafft u. a. den Vorteil eines engeren thermischen Erweichungsbereichs infolge höherer Gleichmäßigkeit der Ketten. Umgekehrt wirken bei einer breiten Molmassenverteilung die niedermolekularen Anteile im Verarbeitungsprozess als „Schmiermittel“, aus dem sich vielfältiger Nutzen ziehen lässt, so z. B. auch als Verträglichkeitsvermittler zur Herstellung von Polyblends. Zur genaueren Beschreibung eines Polymers werden zusätzlich sog. Mittelwerte verwendet, aus denen sich wertvolle Informationen hinsichtlich bestimmter Eigenschaften eines Kunststoffs ergeben. So besteht z. B. eine direkte Beziehung zwischen dem Zahlenmittel \bar{M}_n und der Festigkeit oder zwischen dem Gewichtsmittel \bar{M}_w und der Viskosität. Für die Erfassung der einzelnen Mittelwerte gelangen mehrere Messmethoden zur Anwendung, z. B. Osmose (\bar{M}_n) oder Lichtstreuung (\bar{M}_w).

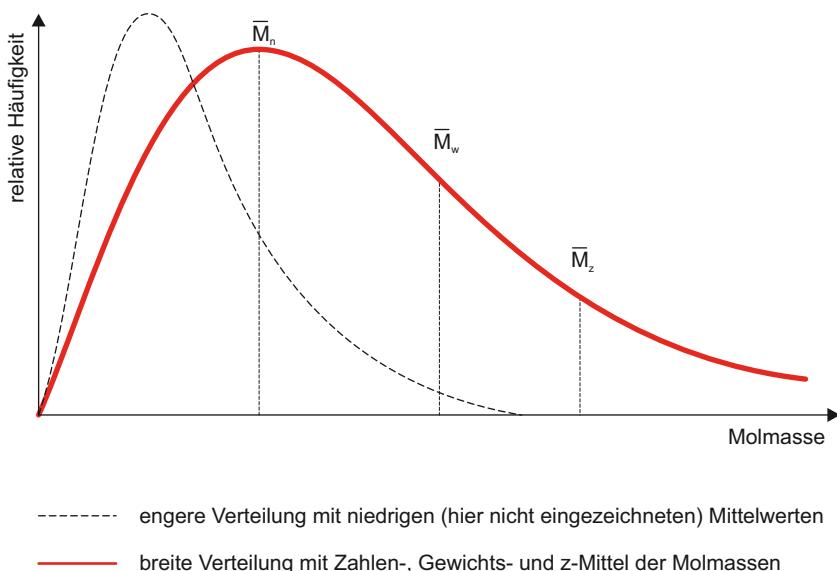


Bild 2.45: Molmassenverteilungen mit Angabe der Lage verschiedener Mittelwerte

Mittelwerte

Am Beispiel der beiden Mittelwerte, dem Zahlen- bzw. Gewichtsmittel sei das Gesagte näher erläutert.

Das Zahlenmittel errechnet sich nach der Formel zu

$$\bar{M}_n = \frac{\sum n_i \cdot M_i}{\sum n_i} = \frac{\sum m_i}{\sum n_i} \quad (2.44)$$

Dabei bedeutet n_i die Zahl der Moleküle einer Spezies i mit der Molmasse M_i , wie sie z. B. bei der Fraktionierung (schrittweises Ausfällen der Makromoleküle mit steigender Kettenlänge) eines Kunststoffs entsteht.

Fraktionierung

Das Gewichtsmittel dagegen definiert sich statt der Zahl über den Massenanteil m_i der Moleküle mit der Molmasse M_i .

$$\overline{M_w} = \frac{\sum m_i \cdot M_i}{\sum m_i} = \frac{\sum n_i \cdot M_i^2}{\sum n_i \cdot M_i} \quad (2.45)$$

Zur Beschreibung mechanischer Eigenschaften werden oft höhere Durchschnittswerte gebraucht. Als Basis dafür dient das z -Mittel:

$$\overline{M_z} = \frac{\sum m_i \cdot M_i^2}{\sum m_i \cdot M_i} = \frac{\sum n_i \cdot M_i^3}{\sum n_i \cdot M_i^2} \quad (2.46)$$

Aus dem Quotienten der beiden Mittelwerte $\overline{M_n}$ und $\overline{M_w}$ lässt sich die Breite der Verteilung, auch als (Poly)Dispersität ($\overline{M_w}/\overline{M_n}$) bezeichnet, abschätzen. Für viele Polymerisationen pendelt dieser Wert zwischen 2 und 4. Statt der Dispersität wird häufig auch die Uneinheitlichkeit u angegeben, u errechnet sich nach der Formel

$$u = \frac{\overline{M_w}}{\overline{M_n}} - 1 \quad (2.47)$$

Daneben existieren noch weitere Mittelwerte, wie beispielsweise das Messungen leicht zugängliche Viskositätsmittel, $\overline{M_\eta}$.

2.4.3.4 Mittlerer Polymerisationsgrad

Eine andere Methode zur Erfassung der Kettenlänge ist die Angabe des mittleren Polymerisationsgrads, \overline{P} , der durch die folgende Formel berechnet wird:

mittlerer Polymerisationsgrad \overline{P}

$$\overline{P} = \frac{\overline{M}}{M_0} \quad (2.48)$$

M_0 entspricht der Molmasse des Monomers bzw. der konstitutionellen Wiederholungseinheit. Für \overline{M} ist die mittlere Molmasse einzusetzen, d. h. der Mittelwert für \overline{P} hängt davon ab, welcher Wert für \overline{M} eingesetzt wird. Für ein Polyethylen mit dem Zahlenmittel $\overline{M_n} = 56\,000 \text{ g/mol}$ und $M_0 = 28 \text{ g/mol}$ ergibt sich somit ein mittlerer Polymerisationsgrad von $\overline{P}_n = 2\,000$. Auch lässt sich mit Hilfe der Avogadro-Konstante N_A sehr einfach die absolute Masse eines einzelnen Makromoleküls berechnen. Allerdings bleiben die erhaltenen Werte immer noch winzig klein. So ergibt sich für ein Makromolekül des Polyethylen mit einer Molmasse von $M = 30\,000\,000 \text{ g/mol}$:

absolute Masse eines Makromoleküls

$$m = \frac{\overline{M}}{N_A} = \frac{30\,000\,000 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}}{6,023 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}} = 4,98 \cdot 10^{-18} \text{ g} = 4,98 \text{ ag} \quad (2.49)$$

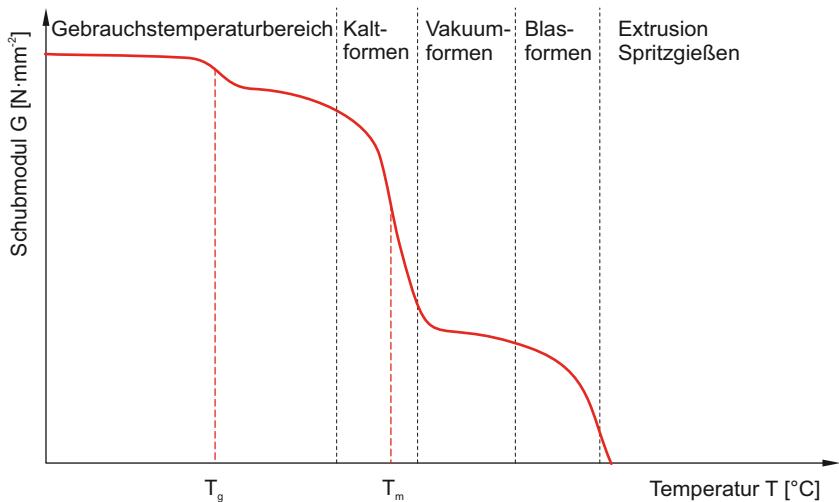


Bild 2.63: Schematische Schubmodul-Temperatur-Kurve eines teilkristallinen Thermoplasten

Proportionalität, die zwischen Molmasse und T_g besteht und daher bei Kunststoffen (in der Mehrheit ein Gemisch unterschiedlicher Molmassen bzw. von Makromolekülen verschiedener Länge) die Angabe exakter Temperaturwerte behindert, vgl. Abschnitt 2.4.3. Der damit verbundene Abfall des Schubmoduls (eine Folge der zunehmenden Brownschen Molekularbewegung) verhilft zunächst zu einem lederartigen und oberhalb von T_g zu einem kautschuk-elastischen/gummiartigen Verhalten. So lassen sich amorphe Thermoplaste oberhalb von T_g vakuumformen (auch als „Warm- oder Thermoformen“ bezeichnet), d. h. Thermoplast-Halbzeuge, wie Rohre, Tafelzuschnitte, können nach Erwärmen unter Übergang in diesen weichgummiähnlichen, elastischen Zustand („thermoelastischer“ Zustand) z. B. durch Tiefziehen oder Biegen in eine andere geometrische Form gebracht und diese durch Abkühlen unter T_g fixiert werden. Eine weitere Temperaturerhöhung führt schließlich in den Fließtemperaturbereich, d. h. hier gleiten die Ketten bei geringer Belastung aneinander ab. Urformprozesse wie Extrudieren und Spritzgießen sind dank des viskosen Fließens möglich. Typische amorphe Thermoplaste sind Polystyrol (PS), Polyvinylchlorid (PVC), Polymethylmethacrylat (PMMA), Celluloseacetat (CA), Celluloseacetobutyryat (CAB) sowie alle unvernetzten Copolymerisate von Polystyrol.

Bei den teilkristallinen Thermoplasten liegen Teilbereiche der Makromoleküle in einer bestimmten Ordnung vor, z. B. im einfachsten Fall in einer parallelen Ausrichtung von Molekülfadenstücken, wie das aus Bild 2.41, vgl. Abschnitt 2.4.2.2, zu ersehen ist. Die Anordnung in den Bereichen mit Abschnitten von parallelen fadenartigen Makromolekülen entspricht der Ordnung der Atome oder Moleküle in Kristallen. Als Folge davon besitzen diese Polymere zusätzlich zur Glasübergangstemperatur T_g eine Kristallitschmelztemperatur T_m (exakter: Schmelztemperaturbereich). Da die Nebenvalenzkräfte in den kristallinen Bereichen im Vergleich zu den amorphen erheblich größer sind, erschweren diese Kristallgitterstrukturen unterhalb ihrer Schmelztemperatur eine hohe Verformung. Selbst das Vakuumformen erfordert daher als Warmumformverfahren eine Erwärmung des Materials bis in den Kristallitschmelzbereich. Gleichzeitig zeigen jedoch die wichtigen teilkristallinen Polymere bei

Warmformen von amorphen Thermoplasten oberhalb T_g

Kristallitschmelztemperatur T_m bei teilkristallinen Thermoplasten

Raumtemperatur und darüber – also im Gebrauchstemperaturbereich – ein hart-zähes Werkstoffverhalten, da ihre amorphen Bereiche meist erst bei tieferen Temperaturen einfrieren. Zu den teilkristallinen Thermoplasten gehören z. B. Polyethylen (PE), Polypropylen (PP), Polyoxymethylen (POM), Polybutylenterephthalat (PBT) und viele Polyamide (PA).

Sind die unvernetzten Makromoleküle sehr lang, d. h. ist der Polymerisationsgrad bzw. die Molmasse sehr hoch oder sind die Makromoleküle ein wenig vernetzt, so verhält sich ein solcher Kunststoff beim Erwärmen nicht wie ein üblicher Thermoplast. Diese bei Normaltemperatur festen Kunststoffe werden beim Erwärmen nicht plastisch formbar oder gar schmelzflüssig, sondern sie erreichen nur einen weich-gummiartig-elastischen Zustand. Daher nennt man solche Materialien auch *Thermoelaste*, vgl. Abschnitt 2.3.2.

Ferner kennt man Thermoplaste, deren Makromoleküle abschnittsweise aus zwei, gelegentlich auch aus mehreren verschiedenen Bausteinen („Monomeren“) bestehen. Führt einer der Bestandteile dabei zu weichen (gummiartigen), der andere zu harten (glasigen) Bereichen („Phasen“), so sind solche Kunststoffe – meist Block- oder Ppropfcopolymerate – bei Normaltemperatur weichgummiartig-elastisch; doch im Gegensatz zu den Elastomeren nur physikalisch vernetzt, vgl. Abschnitt 13.2. Beim Erwärmen bis in den Fließbereich werden sie wie die üblichen Thermoplaste plastisch formbar. Man nennt sie daher *thermoplastische Elastomere* (TPE), vgl. Bild 2.64.

Thermoelaste

physikalisch
vernetzt
thermo-
plastische
Elastomere (TPE)

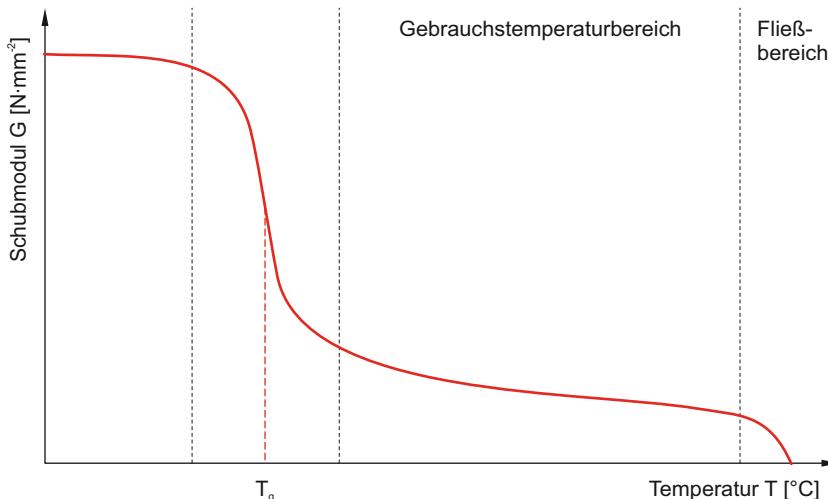


Bild 2.64: Schematische Schubmodul-Temperatur-Kurve eines thermoplastischen Elastomers

2.6.2.2 Elastomere und Duroplaste

Es gibt aber auch Kunststoffe, die bei Wärmezufuhr nicht plastisch formbar werden. Bei diesen Kunststoffen ist zu unterscheiden, ob sie bei Normaltemperatur gummiartig-elastisch sind oder ob sie harte, feste Werkstoffe darstellen.

3.2 Begriffe und Einteilung der Fertigungsverfahren nach DIN 8850

Herstellung eines Körpers

Fertigungsverfahren heißen nach DIN 8850 alle Verfahren zur Herstellung von geometrisch bestimmten festen Körpern. Die allgemeine Einteilung der Fertigungsverfahren erfolgt in Hauptgruppen, vgl. Bild 3.2. Diese Einteilung basiert auf der Überlegung, dass die Herstellung eines Körpers entweder die Schaffung einer Ausgangsform (Urform) aus formlosem Stoff, die Änderung der Form oder die Änderung der Stoffeigenschaften bedingt. Merkmale für die Hauptgruppen der Fertigungsverfahren sind in Bild 3.3 ersichtlich.

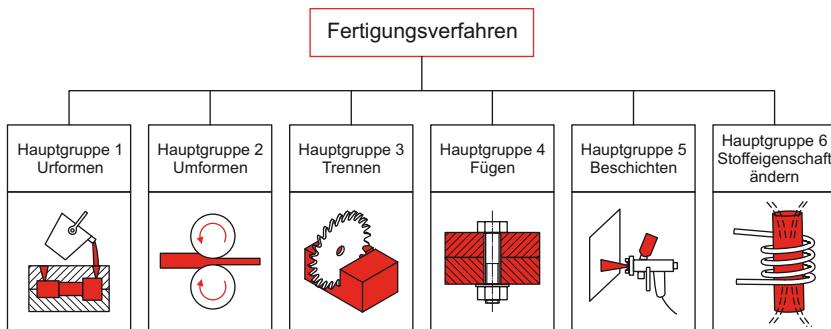


Bild 3.2: Einteilung der Hauptgruppen

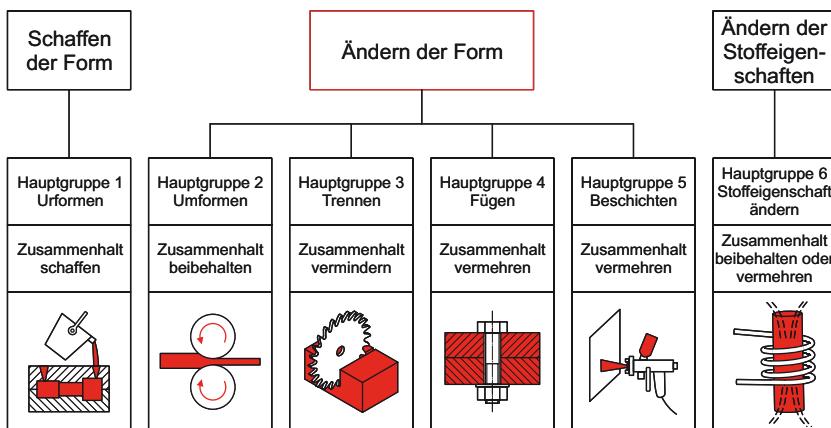


Bild 3.3: Merkmale für die Hauptgruppen der Fertigungsverfahren

Unter Zuhilfenahme dieser Merkmale lassen sich die Fertigungsverfahren der Kunststofftechnik in die folgenden Haupt- und Untergruppen einteilen, vgl. Bild 3.4. Neu wird als Merkmal für die Hauptgruppe 6 der Oberbegriff Veredeln eingeführt. Damit

soll zum Ausdruck gebracht werden, dass die in dieser Gruppe aufgeführten Verfahren im Allgemeinen einer Wertmehrung der Erzeugnisse dienen, insbesondere durch Verbesserung der Eigenschaften ihrer Oberflächen. Die klassischen Fertigungsverfahren zum Ändern der Stoffeigenschaften, wie sie vor allem bei den metallischen Werkstoffen zum Einsatz gelangen (z. B. Aufkohlen), treten somit in den Hintergrund im Vergleich zur Bedeutung oberflächenbezogener Prozesse bei Formteilen und Halbzeugen aus Kunststoff. Gleichzeitig bildet das Veredeln eine wichtige Ergänzung zum Ändern von Eigenschaften auf der rohstofflichen Ebene, vgl. Abschnitt 2.5, Modifizierung von Polymeren und Kunststoffen.

Nicht zuletzt bietet sich eine Einteilung der Fertigungsverfahren unter Einbeziehung der Technologie des Aufbereitens an, da diese Verfahren die Eigenschaften der anschließend gefertigten Bauteile bzw. Halbzeuge in fundamentaler Weise mitbestimmen. Damit verbundene Mischprozesse werden auch als Compoundieren bezeichnet. Zudem finden sich nicht selten Beispiele in der Praxis, wo einzelne Aufbereitungsvorgänge auf klassischen Verarbeitungsmaschinen stattfinden.

Aufbereiten,
Compoundieren

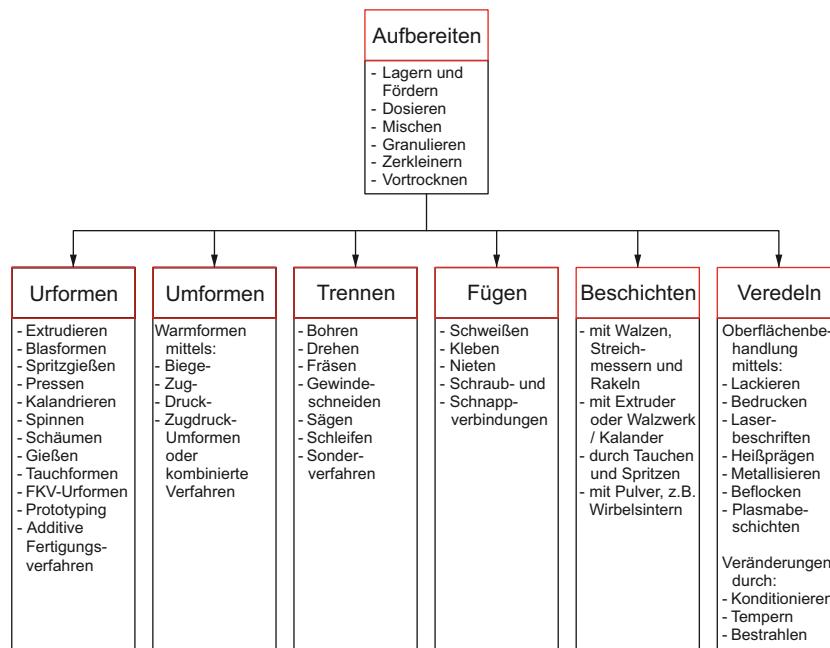


Bild 3.4: Einteilung der Fertigungsverfahren in der Kunststofftechnik

3.3 Prinzip der wichtigsten Ver- und Bearbeitungsverfahren

Die in Bild 3.4 bereits vermittelte Übersicht gibt einen Eindruck von den vielfältigen Möglichkeiten, mit denen Kunststoffe ver- und bearbeitet werden können. Zugleich entpuppt sich diese gewaltige Verfahrensbreite und -tiefe als einer der ganz großen

4 Polyolefine

Trivialnamen haben es so an sich. Gelegentlich basieren sie auf einer einzigen, oft zufälligen Beobachtung. Ein Paradebeispiel dafür liefert die Bezeichnung Olefine. Der Beiname Olefine für die Stoffklasse der Alkene geht auf chemische Experimente im vorletzten Jahrhundert zurück, bei denen sich die Gase Ethylen, Propylen und Isobutylen mit dem ebenfalls gasförmigen Chlor zu flüssigen, ölartigen/ölbildenden Substanzen („Olefine“) vereinigten. Doch die Polymere dieser Gase sind alles andere als ölartige/ölbildende Substanzen – eher aus „Ölen“ gebildet. Es sei denn, man beziehe in das Wort Polyolefine das chemische Recycling mit ein, bei dem diese „Polyalkene“ wiederum zu Ölen werden. Also doch Polyolefine!

4.1 Polyethylen (PE)

4.1.1 Das Wichtigste in Kürze

Polyethylen ist ein teilkristalliner, unpolarer, durch radikalische oder katalytische Kettenpolymerisation herstellbarer Thermoplast mit einer Glasübergangstemperatur von $T_g \approx 70$ bis 125°C . Je nach Polymerisationsbedingungen entstehen Makromoleküle, die sich in ihrer mittleren Kettenlänge, mittleren Molmasse, Molmassenverteilung und in ihrem Verzweigungsgrad, sowie im Gehalt oder in der Verteilung von Comonomeren unterscheiden. Daraus lassen sich vier Haupttypen ableiten: PE-LD (PE niedriger Dichte) ist ein vielfach verzweigtes Homopolymer bzw. Copolymer und enthält neben Kurz- auch Langkettenverzweigungen. PE-HD (PE hoher Dichte), PE-MD (PE mittlerer Dichte) und PE-LLD (lineares PE niedriger Dichte) bestehen aus weitgehend linearen Ketten, die abhängig von der Art und Menge der Comonomere kurzketige Verzweigungen besitzen. Alle PE-Typen sind elektrisch hochwertige Isolierstoffe (z. B. für Kabel) und chemisch sehr gut beständig. Mit großem Abstand wichtigstes Einsatzgebiet für PE-LD und PE-LLD ist der Foliensektor. Bei den PE-HD-Typen geht fast ein Drittel in den Verpackungssektor, z. B. für die Lagerung und den Transport flüssiger Füllgüter (Blasformteile). Es folgen Spritzgießteile, z. B. Flaschentransportkästen und Extrudate, z. B. Rohre und Folien.

teilkristalliner
unpolarer
Thermoplast

vier Haupt-
typen

PE ist der wichtigste Standardkunststoff mit der größten Produktionsmenge. Einen Vergleich von Eigenschaften ermöglicht Abschnitt 4.9 am Ende dieses Kapitels. Normen: DIN EN ISO 1872; DIN EN ISO 11542 (PE-UHMW).

4.1.2 Handelsnamen (Beispiele[®])

Escoren, Enable, Exceed, ExxonMobil, Paxxon (ExxonMobil); Braskem, UTEC (Braskem); Agility, Attane, Continuum, Dowlex, Dow (Dow); Alathon, Hostalen, Lupolen,

Microthene, Petrothene, Purell, Starflex (LyondellBasell); Borealis, Borcell, Borlink, BorPEX, Bormed, Visico (Borealis); Marlex, MarFlex, mPact (Chevron Phillips); INEOS, Eltex, Rigidex (Ineos); NOVAPOL, SCLAIR, SURPASS (Nova Chemicals); Sabic, Vestolen A (Sabic); Lumicene, Total Petrochemicals (Total); Clearflex, Eraclene, Flexirene, Riblene (Versalis).

Verschiedenartigkeit im Gefügeaufbau

4.1.3 Eigenschaften

Unterschiede im Werkstoffverhalten der einzelnen PE-Typen erklären sich primär durch ihre Verschiedenartigkeit im Gefügeaufbau, d. h. der unterschiedlichen Kristallinität, vgl. Bild 4.1. Die Technik verwendet diese Erkenntnis systematisch und auf vielfältige Weise für eine gezielte Steuerung wichtiger Produkteigenschaften. So zeigen Dichte, Steifigkeit, Härte, Abriebfestigkeit, Gebrauchstemperatur und Chemikalienbeständigkeit eine direkte Abhängigkeit vom kristallinen Anteil. Demgegenüber ist der amorphe Anteil wichtig für die mechanische Festigkeit, Zähigkeit, Kerbschlagzähigkeit sowie die Spannungsrißbeständigkeit.

PE-HD

Dichte: 0,94 bis 0,97 g/cm³
Smp. (DSC): ca. 128 bis 136 °C



PE-MD

Dichte: 0,93 bis 0,94 g/cm³
Smp. (DSC): ca. 125 bis 128 °C



PE-VLD / PE-LLD

Dichte: 0,90 bis 0,93 g/cm³
Smp. (DSC): ca. 115 bis 125 °C



PE-LD

Dichte: 0,915 bis 0,935 g/cm³
Smp. (DSC): ca. 106 bis 118 °C

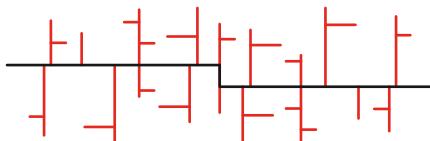


Bild 4.1: Schematische Darstellung der unterschiedlichen Strukturen bei PE (nach LyondellBasell)

hohe Dehnbarkeit und hervorragende Schlagzähigkeit

Je nach Schichtdicke, die zwischen einer einigen µm dünnen Folie oder einem mehrere Zentimeter dicken Block liegen kann, ist PE fast glasklar bis stark milchig-getrübt („transparent“ bis „transluzent“) oder sogar undurchsichtig („opak“). PE-LD hat dabei eine bessere Transparenz als PE-HD. Im Vergleich zu den meisten anderen Thermoplasten besitzt Polyethylen eine niedrige Festigkeit, Härte und Steifigkeit, jedoch eine hohe Dehnbarkeit und hervorragende Schlagzähigkeit (auch in der Kälte) sowie ein günstiges Gleitreibungsverhalten. Bei Langzeitbelastung kann eine starke Kriechverformung auftreten, der durch Zusatz von Kurzglasfasern (Werkstoff-Kurzzeichen dann: PE-GF) entgegengewirkt werden kann. PE hat einen wachsartigen Griff und besitzt eine große Wärmedehnung, besonders PE-LD.

Tabelle 4.6 Eigenschaftsvergleich der Polyethylen und von Polybuten-1

Eigenschaft	Einheit	PE-LD	PE-MD	PE-HD	PE-UHMW	PE-LLD	PB-1
Dichte	g/cm ³	0,915–0,935	0,925–0,935	0,94–0,97	0,93–0,94	0,915–0,935	0,930–0,945
Zug-E-Modul	MPa	200–400	400–800	600–1400	700–800	300–700	400–600
Streckspannung	MPa	8–10	11–18	18–30	ca. 22	20–30	Ca. 20
Streckdehnung	%	ca. 20	10–15	8–12	ca. 15	ca. 15	Ca. 20
Nominelle Bruchdehnung	%	>50	>50	>50	>50	>50	>50
Schmelztemperatur	°C	105–118	120–125	126–135	130–135	126	126–130
Formbeständigkeitstemperatur HDT/A 1,8 MPa	°C	–	30–37	38–50	42–49	ca. 40	55–60
Längenausdehnungskoeffizient, (23–55 °C)	10 ⁻⁵ /K	23–25	18–23	14–18	15–20	18–20	13
Brennbarkeit UL 94 bei 1,6 mm Dicke	Klasse	HB*	HB*	HB*	HB*	HB*	HB*
Dielektrizitätszahl bei 100 Hz	–	2,3	2,3	ca. 2,4	2–2,4	2,3	2,5
Dielektrischer Verlustfaktor bei 100 Hz	× 10 ⁻⁴	2–2,4	2	1–2	ca. 2	2	2–5
Spezifischer Durchgangswiderstand	Ω × m	>10 ¹⁵	>10 ¹⁴				
Spezifischer Oberflächenwiderstand	Ω	>10 ¹³					
Elektrische Durchschlagfestigkeit	kV/mm	30–40	30–40	30–40	30–40	30–40	20–40
Vergleichszahl der Kriechwegbildung CTI/A	–	600	600	600	600	600	600
Aufnahme von Wasser bei 23 °C/100% RF	%	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,1
Feuchteaufnahme bei 23 °C/50% RF, Sättigung	%	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05

* auch als V-2 bis V-0 verfügbar

Tabelle 4.7: Eigenschaftsvergleich der Polypropylene

16.2 Umweltschutz beim Umgang mit Kunststoffen

16.2.1 Nachhaltige Entwicklung

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. Bisher aufgestellte Ökobilanzen klammerten ökonomische und soziale Aspekte aus und erfassten nur die umweltrelevanten Daten eines Unternehmens systematisch in Form einer Input-Output-Bilanz.

qualitatives
Wachstum

Stoffstrom-
management

16.2.2 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,
- 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.

Wieder- oder
Weiter-
verwendung

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.

16.2.3 Grundsätzliche Aspekte beim Recycling von Kunststoffen

Verfolgt man die Entwicklungsgeschichte der Kunststoffe als selbstständige Werkstoffklasse bis in ihre Anfänge zurück, so stellt man fest, dass es diesen Materialien selten vergönnt war, neue oder gar revolutionäre Entwicklungen auszulösen. Stattdessen mussten sich die Polymere als Neulinge zuerst einmal bei althergebrachten Bauteilen bewähren und vor allem billiger sein. Die kunststofferzeugende und -verarbeitende Industrie war daher schon immer gezwungen, eine größtmögliche Materialausnutzung zu erreichen, um im Konkurrenzkampf mit anderen Werkstoffklassen bestehen zu können. So gesehen haben Energieverteuerung und Umweltschutz diese Bemühungen wohl verstärkt, aber nicht ausgelöst. Als Einstieg in die nachfolgenden Ausführungen empfiehlt es sich vorgängig die im Abschnitt 1.2.1 behandelten Sachverhalte zu reflektieren und daraus eigene Schlüsse zu ziehen.

16.2.4 Recyclingkreisläufe von Kunststoffen

Für die Praxis ergeben sich die folgenden Recyclingkreisläufe, vgl. Bild 16.1.

- Im Primärkreislauf, auch als innerbetriebliches Recycling bezeichnet, kommen Produktionsabfälle erneut als Primärwerkstoffe zur Herstellung des Produkts zum Einsatz.
- Im Sekundärkreislauf, auch als Wieder- oder Weiterverwendung bezeichnet, erfolgt entweder eine erneute Benutzung eines gebrauchten Produkts für den gleichen oder einen anderen Verwendungszweck.
- Im Tertiärkreislauf, auch als werkstoffliches Recycling bezeichnet, lassen sich Kunststoffabfälle durch Aufbereitungsprozesse einer Wieder- und Weiterverwendung als Sekundärwerkstoffe für neue Produkte zuführen.
- Im Quartärkreislauf, auch als rohstoffliches Recycling bezeichnet, entstehen aus qualitativ minderwertigen Altkunststoffen chemische Sekundärrohstoffe, die je nach Ausgangsmaterial zur Herstellung neuer Kunststoffe oder für andere chemische Prozesse Verwendung finden.

innerbetriebliches Recycling

werkstoffliches Recycling

rohstoffliches Recycling

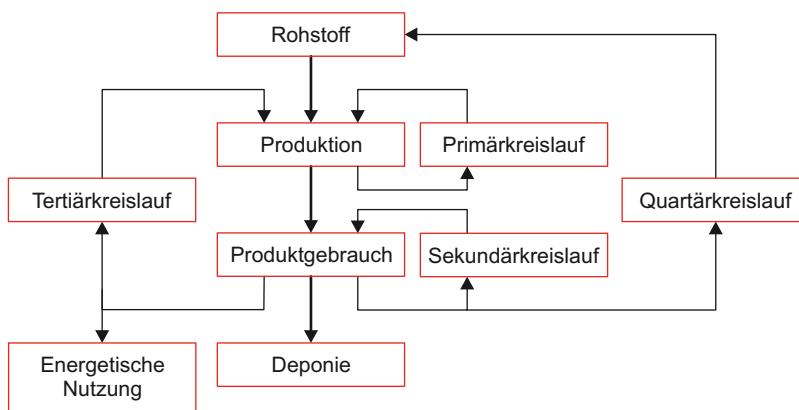


Bild 16.1: Recyclingkreisläufe

Sachwortverzeichnis

A

Abbau von Polymeren 66
 abbaufähige Kunststoffe 584
 Abbaureaktion 123
 Abbindemechanismus der Klebung 233
 Abfallwirtschaft 576
 abgewandelte Naturstoffe 10
 ABS + PA Blends 332
 ABS + PC Blends 331
 Abwandlung durch Vernetzen 260
 Acetal 406
 Acetal-Thermoplaste 403
 Acetat-Reyon 364
 Acetylen 290, 545
 Acrylfaser 18
 Acrylglas 357
 Acrylkunststoff 14
 Acrylnitril 320, 393
 Acrylnitril-Butadien-Kautschuke NBR 505
 Acrylnitril-Butadien-Styrol ABS 325, 327
 Acrylnitril-Methylmethacrylat AMMA 358
 Acrylnitril-Styrol-Acrylat ASA 329
 Acrylsäuremethylester 356
 ACS 329
 Additionspolymerisation (Polyaddition) 41, 62
 Additive 36, 99, 145, 506
 Adhäsion 232
 AES 329
 Agro-Plastik 26
 AHA-Schutz 572
 Aktivator 511
 akzessorische Verunreinigungen 124
 Alkoholyse 578
 Allophanat-Gruppe 538
 Allophansäure 538
 Allylgruppe 465
 alternierendes Copolymer 52
 Alterung 123
 Alterungsschutz 123
 Alterungsschutzmittel 511
 Alterungsvorgänge
 – chemische 123
 – physikalische 126
 Amid-imid-Gruppe 485
 Amidgruppe 373, 382
 Amin 535
 ω -Aminocarbonsäuren 374, 379
 Aminogruppe 59

Aminoplaste 439
 11-Aminoundecausäure 375
 amorph 37, 40, 86, 113, 389, 477, 491
 amorphes Polyamid 388
 amorphes Polyethylenterephthalat PET-A 343
 Amylopektin 565
 Amylose 565
 Anion 46
 anionische Kettenpolymerisation 48
 Anisotropie 97, 102, 477
 antiadhäsiv 415, 418
 Antioxidantien 103, 124
 Antiquietscheffekt 321
 Antistatika 104
 Aramid 447, 480
 Arbeitssicherheit 571
 aromatische Dicarbonsäure 473
 aromatische Hydroxycarbonsäure 473
 aromatische Polyamide 480
 aromatischer Polyester 339, 473
 Arylimid-Gruppe 485
 ASA + PC Blends 331
 ataktisch 83
 ataktisches Polystyrol 314
 Atom 34
 Atombindung 35, 67 f.
 äußere Alterungsursachen 123
 äußere Weichmachung 102
 äußerer Weichmacher 299
 Aufbau eines Extruders 153
 Aufbereiten (Compoundieren) 99, 143 f., 293
 Aufbereitungsverfahren 145, 293
 Aufspleißen 478
 Aushärten 53 f.
 Autoxidation 124
 Autoxidationszyklus 125
 Avogadro-Konstante 36
 Azeotropkondensation 64
 Azo-Verbindung 524
 Azodicarbonamid 524

B

Barriere-Kunststoffe 122, 308, 388, 392
 Batch-Reaktor 58
 Bauarten des Kalanders 180
 Baumwolle 362
 Bedampfen 242

- Bedeutung der Kunststoffe 3
 Bedrucken 239
 Beflocken 243
 Begasung 523
 Beibehaltung des Polymerisationsgrads 65
 Benzidin 486
 Benzolring 316
 Benzoylperoxid 453
 Beschichten 143, 235 f.
 Beschleuniger 53, 429, 453, 511, 572
 besonders schlagfestes Polyvinylchlorid
 PVC-HI 297
 Bestrahlen 245
 Biegeumformen 218
 Bigbags 144
 Bi-Katalysatoren 259
 bimodale Molmassenverteilung 94
 Bindungen, physikalische 70
 Bindungsabstände 68
 Bindungsenergie 68 f., 71
 Bindungskräfte 67
 Biocide 519
 Biocomposites 563, 568
 Biokompatibilität 560
 Biokunststoffe 562
 biologisch abbaubare Polymere 584
 Biomaterialien 560
 Bionik 559
 Bioplastics 562
 Biopolymere 27, 562
 Bioreaktor 566
 1,1-Bis(4-hydroxyphenyl)-3,3,5-trimethyl-cyclohexan BPTMC 351
 Bisphenol A (BPA) 347, 349, 456, 460
 Bisphenol S 351
 Bisphenol TMC 351
 Biuret-Gruppe 537
 Blasfolienanlage 160
 Blasformen 162
 Blend 331 f.
 Blister-Verfahren 223
 Blockcopolymer 49, 52, 512
 Blockschaumstoffe 534
 BMC 179, 450
 Bohren 226
 Brandschutzmittel 104
 breite Molmassenverteilung 92
 Brennstoffzellen 555
 Butadien 509
 Butadien-1,3 322
 Butadien-Styrol-Kautschuk 322, 505
 Butan 525
 Butanol 525
 Butylacrylat 295
 Butylenglykol 451
 Butylhydroxytoluol BHT 127
 Butylkautschuk 505
- C
 C-Faser 447
 C=C-Doppelbindung 43
 ε-Caprolactam 375, 389, 569
 ε-Caprolacton 569, 584
 Carbamid 441
 Carbamidsäure 524
 Carbanion 48
 Carbeniumion 47
 Carbonsäureamidgruppe 373
 Carbonylgruppe 470
 Carboxylgruppe 59
 Celluloseacetobutyrat CAB 360
 Cellophan 565
 Cellulosewerkstoff 564
 Celluloid 12, 363
 Cellulose 66, 361
 Celluloseacetat CA 360
 Celluloseester CA, CP, CAB 360 ff.
 Celluloseether 564
 Cellulosepropionat CP 360
 Chargekessel 54
 Chemiefasern 7, 182 ff.
 Chemikalienbeständigkeit 121
 chemisch abbindende Klebstoffe (Reaktionskleber) 234
 chemische Beständigkeit 120
 chemische Bindung 67
 chemische Elemente 4, 34
 chemische Struktur 76
 chemische Verbindungen 34
 chemische Vernetzung 40, 53, 81, 116, 503
 chemischer Alterungsvorgang 123
 chemisches Modifizieren 95
 chemisches Treibverfahren 198
 1-Chlor-2,3-epoxypropan 459
 Chlor-Kunststoffe 287
 Chlorieren 299
 chloriertes Polyethylen PE-C 306 f.
 chloriertes Polyvinylchlorid PVC-C 298
 Chlorierung 66
 Chloropren-Kautschuk 505
 Chlorsulfonierte Polyethylen CSM 262
 Chlortrifluorethylen 425
 Chromophore 125
 chronische Toxizität 571
 chrono-mechanisches Verhalten 117
 cis-Butendisäure 451
 Citronensäure 524
 Clarifier 105
 CNT, Nanoröhren 557
 Coextrusion 161, 164
 Comonomere 51
 Compact Disc (CD) 6
 Compatibilizer 97
 Composites 101
 Compoundieren 143, 293

- Compression-RTM-Verfahren 194
Copolymere 51
Copolymerisat 51
Copolymerisation 96
Cossee-Arlman-Mechanismus 50
Crazes 288
Crazing 288
CR-Typ 277
Cyanatester-Harz 467
cycloaliphatische Polyamide 384
Cycloaliphatisches Epoxidharz 461
Cycloalkan 525
Cyclohexan-1,4-dimethylol (CHDM) 345
1,4-Cyclohexandimethanol 345
Cyclohexanoperoxid 453
Cyclopentan 525
- D**
- Datenspeicher 550
Degradation 584
Dehnung 117
Dehnviskosität 258
Dehydrierung 322
Dendrimere 105
Dendrimermolekül 39
dendronisierte Polymere 40
Denisov-Zyklus 128
Depolymerisation 80, 406, 416
Deponie 582
Deponieverbot 583
Devulkansationsverfahren 508
Di-Hydroxymethylharnstoff 441
Diallylphthalat 452
Diamin 374, 380 ff., 488
3,3'-Diaminobenzidin 487
4,4'-Diaminodicyclohexylmethan PACM 386
4,4'-Diamino-diphenylether 486
Diblockcopolymer 52
Dibutylzinnidaurat 534
Dicarbonsäure 374
Dicyanatester 467
Diene 509
Diethylentriamin 463
Differential Scanning Calorimetry DSC 135
Differentialthermo-Analyse DTA 134
Diffusion 122
Digital Versitale Disc (DVD) 6
Diglycidether 460
1,4-Dihydroxybenzol (Hydrochinon) 46, 482
Diisocyanat 522, 535
Diisodecylphthalat DIDP 302
Diisoononylphthalat DINP 302
Dilatanz 107
Dimeres 60
- Dimethylanilin 454
Dimethylether 525
2,6-Dimethylphenol 411
3,3 Dimethyl-p-diaminodicyclohexylmethan MACM 386
Diol 341
Dioxin 580
Dioxolan 407
Diphenole 473
Diphenylcarbonat 349
Diphenylether-Gruppe 470
Diphenylketon-Gruppe 470
Diphenylmethan-4,4'-diisocyanat, MDI 486, 537
Diphenylsulfid-Gruppe 470, 495
Diphenylsulfon-Gruppe 470, 492
Dipol 69
Dipol-Dipol-Kraft 72
Direkt-Veresterung 341
Disaccharid 563
dispergiert 323
Dispersionskräfte 72
dispersives Mischen 146
Disproportionierung 46
distributives Mischen 146
DMC 179, 450
DNA-Struktur 19
Dodecandisäure 375
Doppelbindung 42, 53
Doppelschneckenextruder 155
Dotierung 545
Downcycling 577
Drahtummantelungsanlage 161
Drehen 226
Dreiblockcopolymer 520
Druckumformen 220
Druckverformungsrest 508
Drug-Delivery-System 7
Dry-Blends 147, 304
Dry-Jet-Wet-Spinnen 187
Dryblend-Verfahren 304
Dünnschichtkondensation 64
Dünnschliff 138
Dünnschnitt 138
Durchflusskessel 54
Durchflussrohr 54
Duroplaste 37, 40, 116, 151, 429
Dynamisch-Mechanische Analyse DMA 135
- E**
- E-PVC 291
ECHA 573
Einbetten 212
Einfrieren 98
Einfriertemperatur 116, 303
Einschneckenextruder 153

- Einteilung der Nebenvalenzbindung 71
 Elastizitätsmodul 117
 Elastomere/Gummi 37, 116, 151, 503–504
 – permanent vernetzte 504f.
 – reversibel vernetzte 511f.
 Elastomerlegierung 512
 Elektrete, Polymere 547
 elektrisch leitfähige Compounds 544
 elektrisch leitfähige Polymere 21
 Elektroaktive Kunststoffe 543
 Elektrodekanter 418
 Elektroluminesenz 551
 Elektronegativität 69
 Elektronenbeschleuniger 246
 Elektronenpaarbindung 68
 Elektrospinnen 188
 Emission 572
 Emulgator 55, 533
 Emulsion 55
 Emulsionspolymerisation 55
 Emulsions-Polyvinylchlorid E-PVC 291
 Endgruppe 78
 Endgruppen-Stabilisierung 407
 energetische Nutzung 576, 580
 Energiebedarf 4
 enge Molmassenverteilung 92
 engmaschige Vernetzung 40
 Entformungsmittel 105
 Entropie 84
 entropie-elastisch 107
 EPDM 276, 505
 Epichlorhydrin 456, 459
 Epoxid 18, 63
 Epoxidharz EP 457ff.
 Erdöl 4, 25
 Ermüdungsschutzmittel 511
 Erweichungstemperatur T_g 113
 Essigsäure 363, 482
 Essigsäureanhydrid 482
 Ester 339
 Ester-imid-Gruppe 485
 Estergruppe 339
 Ether-imid-Gruppe 485
 Ether-Thermoplast 403
 Ethylen 253
 Ethylen-Chlortrifluorethylen-Copolymer ECTFE 423, 425
 Ethylen-Copolymere 263
 Ethylen-Copolymere mit α -Olefinen 259
 Ethylen diamin 537
 Ethylenglykol 341, 451
 Ethylenoxid 340, 407
 Ethylen-Polymerisate, modifizierte 260
 Ethylen-Propylen-Kautschuk EPM 276
 Ethylen-Tetrafluorethylen-Copolymere
 – ETFE 422
 Ethyl-Ethylacrylat-Copolymere EEA 265
 Extender 102
 externe Gleitmittel 293
 Extruder 152
 Extruder-Schaumstoff 527
 Extrudieren (Strangpressen) 152ff.
 Extrudierwerkzeug 157
 Extrusions-Streckblasformen 165
 Extrusionsanlage 152
 Extrusionsblasformen 162
- F**
- Fällungspolymerisation 55
 Farbmittel 102, 145, 572
 Farbpigment 103
 Farbstoff 103
 Faserorientierungswinkel 193
 Faserspritzen 192
 Faserverstärkte Kunststoffe, FVK 191
 Faserwickeln 193
 FCKW/Fluorchloralkane 533
 FDA-Richtlinie 573
 Ferroelektrische Polymere 548
 Fertigungsverfahren 142
 Festkörperstruktur 84
 Festphasenkondensation 342
 FFS-lines 225
 Fibrille 480
 Filmgießen (Foliengießen) 211
 flammhemmende Zusätze 104
 Flammenschutzmittel 104
 flammwidrig 289
 Fließhilfe 105
 Fließtemperaturbereich 114
 Fließverhalten 90, 106
 Fluidinjektionstechnik 174
 Fluor-Elastomere 426
 Fluor-Kunststoffe 415
 Fluor-Thermoplaste 421, 426
 Fluorchlorkohlenwasserstoff, FCKW 525
 Flüssigkristalline Polymere LCP 476
 Form-/Werkstoff 37
 Formaldehyd 406, 436, 441
 Formgießen 380
 Formmasse 37, 145
 Formschaumstoffe 534
 Formstoffe 145
 Formteil 151
 Fräsen 226
 Fügen 143, 227
 Füllstoffe 100, 145, 511
 Fullrene 559
 Fungistatika 100, 519
 funktionalisierte Polymere 550
 funktionelle Gruppe 59
 Funktionskunststoffe 550
 Funktionswerkstoffe 5
 FVK-Urformen 191

G

- Galvanisierbarkeit 326
 Galvanisieren 242
 Gebrauchsadditive 99
 Gelcoat 195
 Gelcoat-Harze 452
 Gelfieren 302
 Gelierprozess 237
 gemischtzellig 196
 gesättigte Polyester 60, 340
 Geschichte der Kunststoffe 8
 geschlossenzellig 196
 Gesundheitsschutz 571
 gewerbetoxikologische Begriffe 571
 Gewichtsmittel 93
 Gewindeschneiden 226
 Gießen 207
 Gießharz 430
 Glas 447
 Glasfaser 101
 Glastemperatur T_g 113, 303
 Glasübergangstemperatur T_g 116
 Gleitmittel 105, 145
 Glucose 362
 Glycidester 461
 Glycidether 460
 Glykolyse 578
 GMC 450
 GMT 179
 Granulieren 148
 Graphen 558
 Grenzflächenkondensation 63, 350
 Grundlagen des Spinnprozesses 183
 Gummi 116, 504 ff.
 Gummi-Schaumstoffe 540
 Guss-Polyamid 380

H

- H-Brücken 382
 Haftvermittler 165
 Halbacetal 406
 Halbzeug 151
 HALS, HAS 128
 Handlaminieren 195
 Harnstoff 441
 Harnstoff-Formaldehyd-Schaumstoffe 539
 Harnstoffharz UF 439
 Hart-Polyvinylchlorid PVC-U 287
 Hart-Weich-Kombination 515
 Härter 429
 Härtezeit 112
 Hartsegment 512, 521
 Härtung 429
 Harzblase 435
 Harze 429
 Harzformstoff 430

Harzmasse 430

- Harzmatte 431
 Harzträger 430
 HAS 128
 Hauptsatz der Kunststofftechnik 99
 Hauptvalenzbindungen 67 ff.
 HBHV-Copolymer 567
 Heißabschlag 148
 Heißmischung 304
 Heißprägen 241
 Heizelementschweißen 229
 Helix 85
 Herstellung von Chemiefasern 184
 heterophasische Copolymer 271
 Hexafluorpropylen 423
 Hexahydrophthalsäure 462
 Hexahydrophthalsäure-diglycidester 462
 Hexahydrophthalsäureanhydrid 462
 Hexa-Hydroxymethylmelamin 445
 Hexamethylendiamin 375
 Hexamethylentetramin 437
 High-Density-Polyethylen PE-HD 257
 Hilfsstoffe 533
 HM-C-Faser 395
 Hochdruckanlage 202
 Hochdruckharze 430
 Hochdruckverfahren 253
 hochfeste Polymerfasern 20
 Hochleistungspolymer 469
 hochmolekulare Stoffe 36
 Hochofenprozess 580
 homöopolare Bindung 68
 Homopolymerisate 51
 Hookesches Gesetz 117
 HT-Faser 395
 Hybride Polymersysteme 556
 Hydrierung 578
 Hydrocellulose 564
 Hydrofluor-Kohlenwasserstoffe 525
 Hydrolyse 363, 578
 hydrolytischer Abbau 343
 Hydroperoxid 124
 2-Hydroxybenzophenon 129
 Hydroxylgruppe 59
 Hydroxymethylgruppe 436
 α -Hydroxypropionsäure 561
 β -Hydroxyvaleriansäure, HV 567
 hygroskopisch 266
 hyperverzweigtes Makromolekül 39

I

- Imidgruppe 373, 483
 Implantat 7
 Imprägnieren 212
 in situ-Polymerisation 55, 380
 In-Mold Coating, IMC 240
 In-Mold Decoration, IMD 240

- In-Mold Labeling, IML 164, 240
 Induktionskräfte 73
 Induktionsschweißen 232
 inert 573
 Inertgas 64
 Inhibitor 46
 Initiator 43, 47
 Initiatoraddition 46
 Initiierung/Startreaktion 43, 47f.
 innere Alterungsursachen 123
 innere Weichmachung 102, 363
 Insertion 254
 Integral-Schaumstoffe 102
 interne Gleitmittel 293
 intrinsisch elektrisch leitfähige Polymere 545
 Ionenbindungen 74
 Ionomere 74
 irreversibel 504
 Isobuten-Isopren-Kautschuk 505
 Isobutylen 249
 Isocyanat 524, 572
 Isophthalsäure 345, 387, 452
 Isophthalsäuredichlorid 481
 Isopren-Kautschuke IR 505
 isotaktisch 83
 isotaktisches Polypropylen PP-it 82f.
- K**
- K-Wert 289
 Kalandrieren 180
 Kaltabschlag 148
 kalte Verbrennung 555
 Kaltformen 217
 Kalthärtung 453
 Kanzerogenität 571
 Kasein 12
 Katalysator 53
 Kation 46
 kationische Kettenpolymerisation 46
 Kautschuk 116
 Kautschuktyp 504
 Kehrichtheizkraftwerk 581
 Kerbschlagzähigkeit 408
 Keto-Enol-Tautomerie 129
 Kettenabbruch 45, 48f.
 Kettencopolymerisation 51
 Kettenlänge 90
 Kettenpolymerisation 41–42, 61
 Kettenstabilisierung 407
 Kettenübertragung 44, 47f.
 Kettenverzweigung 45, 80
 Kettenwachstum 44, 47f.
 Kettenwachstumsreaktion 41, 65
 Kevlar-Faser 481
 Kicker 524
 Kleben 232 ff.
- Ko-Kneter 148
 Kobaltsalze 453
 Kofler-Heizbank 139
 Kohäsion 232
 Kohlenhydrate 26
 Kohlenstofffasern (C-Fasern) 394
 Kohlenwasserstoffe 34
 kombinierte Verfahren 221
 Kondensation 58
 Kondensationscopolymerisation 59
 Kondensationsharze 430
 Kondensationspolymerisation (Polykondensation) 41, 58f.
 Kondensationspolymerisation unter Ringschluss 486
 Konditionieren 245
 Konfiguration 40, 76, 82
 Konformation 40, 84
 Konstitution 40, 76f.
 koordinative Kettenpolymerisation 50
 koordinative Polyinsertion 50
 Kopf-Kopf-Anordnung 81
 Kopf-Schwanz-Anordnung 81
 Kopf-Schwanz-Polymerisation 44
 kovalente Bindungen 68
 Kristallinität 88
 Kristallisationsgrad 88
 Kristallitschmelztemperatur 114
 Kristallkeimbildner 88
 Kristalllamellen 87
 Kunststoffe 1, 33, 37, 99, 141
 Kunststoff-Flaschen 308
 Kupplungsschicht 195
 Kurzkettenverzweigung 249
 Kurzzeichen für Kunststoffe X
- L**
- Lackieren 239
 Lactam 374, 378
 Lactone 569
 Laminat 448, 450, 458
 Laminierharze 431
 Laminierverfahren 450
 Länge eines Makromoleküls 38
 Langkettenverzweigung 249
 Laserbeschriften 241
 Lasersintern 214
 latent 462
 Latex 511
 ω -Laurinlactam 375
 LC₅₀-Wert 571
 LD₅₀-Wert 571
 lebende Polymere (living polymers) 49
 Lebensdauer 123
 Leiterpolymere 40, 488
 Leitfähigkeit 22
 Leitfähigkeitszusätze 104, 544

- Lichtemittierende Polymere 22, 551
Lichtinduzierte Alterung 125
Lichtschutzmittel 124, 511
Lichtstabilisatoren 289
lineare Polyolefine 20, 249
lineare Verarbeitungs- und Nachschwundung 89
linksdrehende PLLA 561
Linters 362
Littering 583
Lösekerntechnik 176
Lösemittel 145
Lösungs-Additionspolymerisation 63
Lösungs-Kondensationspolymerisation 63
Lösungsverfahren 53, 255
low profile (LP) 453
low shrink (LS) 453
lyotrop 476
- M**
- M-Kautschuke 504
m-Phenylendiamin 481
M-PVC 293
m-Xylylendiamin 387
Mahlgut 577
MAK-Wert 572
Makrokonformation 84
Makromoleküle 14, 36 ff., 59, 95
Maleimid-Gruppe 485
Maleinsäure/cis-Butendisäure 451
MAP-Verpackungen 570
Masenfließrate 90
Massepolymerisation-Polyvinylchlorid
 M-PVC 292
Masterbatch 103
Mastikation 66, 509
MC 449
mechanische Bindungen 67, 74
mechanische Treibverfahren 198
Mehrkomponenten-Spritzgießen 173
mehrschichtige Flasche 165
Melamin 444
Melamin-Phenol-Formaldehyd 444
Melamin-Polyester 444
Melaminharz MF 443
Melaminharze, modifizierte 444
Memory-Effekt 166
mesogen 476
mesomorph 477
meta-Kresol 435
meta-Phenylendiamin 463
Metallisieren 241
Metallocen-Katalysatoren 51
Metallocen-katalysierte Ethylenkopolymerne
 PE-MC 260
Metallocen-katalysiertes Polypropylen
 mPP 274
Methacryl-imid-Gruppe 485
Methacrylnitril 393
Methacrylsäure 456
Methacrylsäuremethylester 356
Methanolysen 578
Methyl-Fluor-Siloxan-Kautschuk MFQ 505
Methylamin 359
Methylcellulose 564
Methylchlorid 525
Methylenharnstoff-Gruppe 443
Methylemelamin-Gruppe 446
Methylenphenol-Gruppe 438
Methylethylketonperoxid 453
Methylmethacrylat 356
Methylmethacrylat-Acrylnitril-Butadien-Styrol MABS 358
Methylmethacrylat-Polymerisate, modifizierte 357
4-Methylpenten-1 281
α-Methylstyrol 317
MFR-Wert 90
Micellen 55
migrieren 303
Mikro-Suspensionspolymerisation 291
mikrobieller Angriff 300
Mikrofibrillen 88
Mikropräzisions-Spritzgießen 405
Milchsäure 525, 560
Milieu-Harz 453
Mischen 146
mittlere Molmasse 46, 90 f.
mittlerer Polymerisationsgrad 93
Modifizierung 95
– physikalische 96
– von teilaromatischen Polyamiden 390
Molding Compounds 179, 449
Molekulare Nanotechnologie 559
Molekulargewicht 36
Moleküle 34, 36
Molmasse 36, 80, 91
Molmassenregler 351
Molmassenverteilung 37, 90 f.
Mono-Hydroxymethylharnstoff 441
Monomer 41
Monomer casting 380
Morphologie 88
MuCell-Verfahren 174
Mulchware 252
Multiblockcopolymer 520
Multifunktionalität, smart Polymers 557
multimodale Molmassenverteilung 258
Mutagenität 571
MVR-Wert 91

N

Nachfolgevorrichtung 157
 nachhaltige Entwicklung 574
 Nachschwindung 89
 Nanocomposites 558
 Nanoröhren CNT 557
 Nanotechnologie 559
 Nassspinnen 186
 Natriumhydrogencarbonat 524
 Natriumsulfid 496
 Naturkautschuk NR 27, 505, 509, 511
 Nebenvalenzbindungen 67, 70, 382
 Nebenvalenzkräfte 70, 113
 Newtonsches Fließgesetz 106
 Niederdruckanlage 202
 Niederdruckharze 430
 Niederdruckverfahren 254
 Nitril-Kautschuk 505
 Nitrilgruppe 373, 392
 nitrose Gase 573
 Nomex-Faser 481
 Norbornen 263
 Norrish-Reaktionen 125
 Novolake 432, 435f.
 Nukleierungsmittel 88, 104, 342
 Nylon 15, 391
 Nylon-Rope-Trick 64

O

O-Kautschuke 504
 Oberflächenharze 452
 Oberflächenspannung/Oberflächenenergie 233
 Oberflächenvorbehandlung 239
 Octabins 144
 offenzellig 196
 OLEDs 551
 α -Olefin 259
 Olefine 249, 282
 On-line-Lackierbarkeit 412
 One-shot-Verfahren 533
 opak 250
 optische Aufheller 103f.
 organische Chemie 34
 Organisole 237
 Orientierung 97, 165
 oxidative Kupplung 411

P

p-Dichlorbenzol 496
 p-Methylstyrol 317
 p-Phenyldiamin 480
 p.h.r. 302
 Paraffine 256
 Partikel-Schaumstoffe 526

Pasten-Extrusion 416
 Pastenverarbeitung 301
 PC+ASA-Blends 352
 PC+LCP-Blends 353
 PC+PBT-Blends 352
 PE-HD (PE hoher Dichte) 249
 PE-LD (PE niedriger Dichte) 249, 257
 PE-LLD/PE-VLD (lineares PE niedriger/sehr niedriger Dichte) 257
 PE-MD (PE mittlerer Dichte) 249
 Pentan 525
 Perfluoralkoxy-Copolymer PFA 422
 Perfluorpropylvinylether 423
 Perkolationsgrenze 545
 Permeation 121–122
 Peroxid 43, 572
 Petrochemie 4
 petrochemische Verfahren 578
 PE-UHMW 258
 Pfpfropfcopolymere 52f., 520
 Phasengrenzflächen-Verfahren 350
 Phasenvermittler 97
 Phenol 435
 Phenol-Formaldehyd-Harze 13, 431
 Phenol-Formaldehyd-Schaumstoffe 539
 Phenoplaste (Phenol-Formaldehyd-Kondensationsharze) PF 431f.
 Phosgen 349
 photoabbaubare Polymere 585
 photoaddressierbare Polymere 551
 Photolacke 554
 Photolithographie 554
 Photooxidation 585
 Photoresists 554
 photosensitiv 585
 Photosynthese 26
 Phthalsäure 452
 physikalisch abbindende Klebstoffe 234
 physiologische Unbedenklichkeit 289
 PICVD-Technologie 243
 Piezo- und Pyroelektrizität 548
 piezoelektrische Polymere 548
 PIR 538
 Planetenwalzenextruder 156
 Plasmabeschichten 243
 plasmadurchsetzte Polymerisation 58
 Plasmapolymerisation 58
 plastics 1
 plastischer Zustand 1
 Plastisole 237
 PMDI 537
 PMMA+ABS-Blends 359
 PO-Schaumstoffe 528
 Polarität 69, 72, 121
 Polieren 226
 Poly-2-methylpentensulfon 555
 Poly-Ether-Block-Amide PEBA 522
 Polyacetale 404

- Polyacetylen PAC 545
Polyacrylester 357
Polyacrylnitril PAN 392 f.
Polyaddition 41
Polyaddukte 62
Polyalkylenterephthalate 340
– modifizierte 345
Polyamid PA 59, 373
Polyamid-imid 484, 488
Polyanilin PANI 546
Polyarylamid PARA 390, 485
Polyarylate PAR 339, 473, 476
Polyaryletherketone PAEK 470
Polyarylsulfone PSU, PES, PPSU 491
Polybenzimidazol 484, 487
Polybismaleinimid 484, 489
Polybutadien 322, 509
Polybutylen-Adipat-Terephthalat PBAT 568
Polybutylenoxid 521
Polybutylenterephthalat PBT 341 ff.
Polycaprolactone PCL 569
Polycarbonat PC 19, 347 ff.
Polycarbonat-Cokondensate 351
Polycarbonate, modifizierte 351
Polychlortrifluorethylen PCTFE 423, 425
Polydiallylphthalatharz PDAP, PDAIP 465
Polyelektrolytmembran PEM 555
Polyester 17, 339 ff.
Polyester-Polyole 536
Polyestercarbonat PEC 353, 474
Polyesterimid 484, 489
Polyesterurethan-Kautschuke 506, 513
Polyether-Polyole 536
Polyetheramid-Block-Copolymere 513, 522
Polyetheretherketon PEEK 471 ff.
Polyetherimid 484, 489
Polyetherketon PEK 471 f.
Polyetherketonetherketonketon 472
Polyethersulfon PES 491, 494
Polyetherurethan-Kautschuk 506
Polyethylen PE 15, 42, 249 ff.
Polyethylendioxythiophen PEDOT 553
Polyethylennaphthalat PEN 346
Polyethylenterephthalat PET 342 ff.
Polyformaldehyd 403
Polyharnstoff 525, 535
Polyhydroxyalkanoate PHA 567
Polyhydroxybutyrat PHB 26
Polyimid PI 482 ff.
Polyimidazole 484
Polyisobuten PIB 515
Polyisocyanat 533 ff.
Polyisocyanurat PIR 538
Polyisopren 509
Polyketon PK 268
Polykondensate 59
Polykondensation 41
Polylactid PLA 7, 560
Polymer 37 f.
Polymer-LED 551
Polymer-Rohstoff 99
Polymerblends (Polyblends) 96, 346, 352
polymere Leuchtdioden PLEDs 551
Polymere Photovoltaik PPV 552
Polymergemische 96
Polymerisate 42
Polymerisation 41
– in Emulsion 53, 55
– in Lösung 53 f.
– in Masse 54
– in Substanz 53 f.
– in Suspension (Perlpolymerisation) 53, 57
– unter Fällung 53 f.
Polymerisationsgrad n 42, 65, 93
– mittlerer \bar{P} 93
Polymerlegierung 96–97
Polymermatrix 101, 322
Polymermolekül 37
Polymethacrylimid-Schaumstoffe 540
Polymethacrylmethyimid PMMI 359, 490
Polymethylmethacrylat PMMA 355
Polymilchsäure 7, 560
Polymorphismus 270
Poly-m-phenylenisophthalamid PMPI 481
Polyol 533, 535
Polyol-Prepolymer 533
Polyolefine 249 ff.
Polyolefin-Schaumstoffe 528
Polyoxymethylen (Poyacetal) POM 18, 404 ff.
Polyoxymethylen-Polymerisate, modifizierte 408
Polyparaphenylen 546
Polyparaphenylenvinylen, PPV 546
Polyphenylchinolin 546
Polyphenylenether PPE 409
Polyphenylensulfid PPS 495, 546
Polyphenylensulfon PPSU 491, 494
Polyphthalimid, PPA 389
Poly-p-phenylenterephthalamid PPTA 480
Polypropylen PP 269 ff.
Polypropylenglykol 536
Polypropylenoxid 403, 537
Polypyrrrol PPY 546
Polyreaktionen 41
Polysaccharide PSAC 362, 563
Polysiloxane 465
Polystyrol, Integralschaumstoffe 200
Polystyrol PS 16, 313 ff.
Polystyrol-Schaumstoffe PS-E 199, 526 ff.
– Hartschaumstoffe 526 f.
– Integralschaumstoffe 527
– Strukturschaumstoffe 528

- Polystyrolsulfonat PSS 553
 Polysulfid-Kautschuk 506
 Polysulfon PSU 491f.
 Polysulfone, modifizierte 494
 Polytetrafluorethylen PTFE 70, 415f.
 Polytetrafluorathylen-Copolymer 419
 Polytetramethylenterephthalat 344
 Polythiophen PT 546
 Polyurethan 16, 62f., 373, 535
 Polyurethan-Schaumstoffe 201, 529 ff.
 Polyvinylalkohol PVAL 585
 Polyvinylchlorid PVC 13, 287ff.
 Polyvinylchlorid-Schaumstoffe 539
 Polyvinylfluorid PVF 422, 425
 Polyvinylidenchlorid PVDC 307
 Polyvinylidenfluorid PVDF 422, 424, 548
 POM-Copolymerisate 407
 POM-Homopolymerisat POM-H 406
 Porenstruktur 196
 Powder Injection Molding PIM 176
 PPE+PA-Blends 412
 PPE+PS-Blends 411
 Prepolymer 354, 486
 Prepolymerverfahren 533
 Prepregs 431
 Prepregverarbeitung 192
 Pressen 177
 Pressen von Thermoplasten 179
 Primäracetat 362
 Primärkreislauf 575
 Primärstruktur 76
 1,2,3-Propantriol (Glycerin) 537
 Propylen 249
 Protein-Struktur 13
 Proton 34
 PS-I 321
 PS-I + PPE Blends 331
 Pultrusion 193, 450
 Pulverbeschichten 237
 Pulverlacke 458
 PUR-Gießharze 466
 PUR-Schaumstoffe 529ff.
 – Halbhart-(semiflexible) Schaumstoffe 531
 – Hartschaumstoffe 530f.
 – Integral-Halbartschaumstoffe 532
 – Integral-Hartschaumstoff PUR-I 531
 – Weichschaumstoffe PUR-W 530
 PVC Hart-Folie 182
 Pyridin-Verfahren 349
 pyroelektrische Polymere 549
 Pyrolyse 435, 578
 Pyromellithsäuredianhydrid 486
- Q**
 Q-Kautschuk 504
 Quartärkreislauf 575
 Quaterpolymer 52
 Quinterpolymer 52
- R**
 R-Kautschuke 504
 Radikal 43
 radikalische Kettenpolymerisation 43
 Radom 458
 Rakel 236
 Ram-Extrusion 416
 Random-Copolymere 52f.
 Rapid Prototyping (RP) 213
 Raschelware 252
 Rauchgasdichte 471
 Raumgewicht 102, 196, 523
 REACH 573
 Reaction Injection Molding 204
 reactive processing 517
 Reaktionsharz-Duroplaste 446f.
 Reaktionsharze 430, 453
 Reaktionsharzformstoff 430
 Reaktionsharzmasse 453
 Reaktionsmittel 429
 Reaktionsschaumgießen 201, 525
 Reaktionsspritzgießen 525
 Reaktionsverlauf 60
 Reaktor 53
 rechtsdrehende PDLA 561
 Recken 99, 356
 Recyclierbarkeit 508
 Recycling 508, 574 ff.
 Recyclinghierarchie 574
 Recyclingkreislauf 575
 Redoxreaktionen 555
 Regenerat 577
 Regler 45
 Regranulat 577
 Reibungsschweißen 231
 Reinforced-Reaction-Injection-Molding 534
 Rekombination 45
 relative Molekülmasse 36f.
 Relaxation 118
 Resit 437
 Resitol 437
 Resole 432 ff.
 Rezyklat 577
 Rheologie 106
 RIM-Technik 534
 RIM-Verfahren 204, 525
 Ringmolekül 40
 Ringspaltung 42
 Rohdichte 102

- Rohrextrusionsanlage 158
Rohrreaktor 253
rohstoffliches Recycling 576f.
Rotationsformen 210
Rotationsgießen 210
Rovings 448
RRIM 205, 534
RSG-Verfahren 201, 525
RTM-Verfahren 193
Rückprallelastizität 508
Rührautoklave 253
Rumpfpladung 69
- S**
- Sägen 226
Sandwich-Bauelement 203
Schadenverhütung/Schadensanalyse 133
Schaum 102, 196, 572
Schaumbildung 198
Schäumen 196
Schaumstabilisator 534
Schaumstoffe 523ff.
Schergeschwindigkeit 106, 110
Schichtpressen 177, 180
Schichtpressstoff 434, 444
Schießbaumwolle 363
Schlagzäh modifiziertes Polystyrol PS-I 321
Schlagzähe Acrylnitril-Styrol-Formmassen ASA, AES, ACS 329
Schlagzähes PMMA-HI 358
schlagzähes PP SHIPP 276
Schlagzähigkeit 95, 102, 297, 321, 408
Schleifen 227
Schleuderverfahren (Schleudergießen) 211
Schmelz-Additionspolymerisation 63
Schmelz-Kondensationspolymerisation 63
Schmelzfließrate 90
Schmelzekerntechnik 176
Schmelzindex 90
Schmelzkondensation 64, 349
Schmelzspinnen 184
Schmelztemperaturbereich 114
Schmiermittel 105
Schnecke 153
Schneckenspritzgießmaschine 167
Schrumpfung 346
Schrumpfung (Memory-Effekt) 99
Schub-/Scherspannung 106
Schubmodul 113
Schutzkolloid 291
Schwanz-Schwanz-Anordnung 81
Schwefelvulkanisation 497
Schweißen 227
schwerentflammbar 289
Schwindung 88
Seitenketten-LCP 550
- Sekundäracetat 363
Sekundärbindungen 70
Sekundärkreislauf 575
Sekundärstruktur 84
Selbstpoliereffekt 360
selbstreparierend 25
selbstverlöschend 289
selbstverstärkend 476
Shore-Härte 506
Shore-Härtebereich 514
Si-Wafer 554
Silanvernetzung 251
Silicone 17, 464
Siliconharze 464
Siliconöl 534
siliertes Polyethylen 261
Skinpack-Verfahren 223
Smart Structures 25
SMC 179, 450
SMS 316
Solarzellen 552
solvolytisches Verfahren 578
Sonderverfahren 172, 227
Sonderwerkstoffe 543
Spacer 477, 481
Spannungs-Dehnungs-Diagramm 119
Spannungsrißbeständigkeit 250
Spannungsrißbildung 121
spezifisches Volumen 89
Sphärolith 87
Spinnprozess 184
Spinnverfahren 182
Spritz-Streckblasformen 166
Spritzblasformen 166
Spritzgießen 167ff.
– von vernetzenden Polymeren 177
Spritzgießmaschine 168
Spritzgießwerkzeug 170–171
Spritzprägen 175
Spritzpressen 177f.
Stabilisatoren 103, 124, 293, 572
Stärkeblends 566
Stärkewerkstoffe 565
statistische Copolymere 52
statistisches Terpolymer 268
Stereo-Kautschuk 509
Stereolithographie (STL) 214
stereospezifischer Katalysator 11
Stereospezifität 50
sterische Konfiguration 82
Sternmolekül 39
Stoßelastizität 508
Stoffumwandlung 563
Strahlenvernetzung 246
Strahlungsschweißen 230
Strangauflistung 107
Strecken 99

Streichen und Gelieren von PVC-Weich-Pas-
 ten 236
 Streichverfahren 236
 Struktur von Gummi 13
 Struktur-Schaumstoffe (Integral-) 102
 Strukturmerkmale 75
 strukturviskos 106
 Stufenwachstumsreaktion 41, 59, 65
 Styrofoam-Verfahren 200
 Styrol 53, 315
 Styrol mit α - bzw. p-Methylstyrol 316
 Styrol-Acrylnitril SAN 319f.
 Styrol-Butadien SB 321
 Styrol-Butadien-Blockcopolymer SBS 325
 Styrol-Butadien-Kautschuk 505
 Styrolpolymere 313ff.
 – modifizierte 318
 Styropor-Verfahren 199, 526
 subchronische Toxizität 571
 Substanz 37
 Substanzmischung 37
 Suspendierhilfsmittel 57
 Suspension 57
 Suspensions-Polyvinylchlorid S-PVC 291
 sustainable development 574
 Switchboard-Modell 86
 syndiotaktisch 83
 syndiotaktisches Polystyrol PS-s 318
 Synergismus 128
 Synthesegas 578
 Synthesekautschuk/Gummi 14, 27, 504ff.

T

T-Kautschuke 504
 Tafelextrusionsanlage 159
 Tampondruck 240
 Tauchformen 212
 TDI 535
 Technoklima 120, 123
 Technologie 141
 Teflon 17
 teilaromatische Polyamide 386
 teilkristallin 37, 40, 86, 113, 389
 teilkristalline aliphatische Polyamide 373
 – modifizierte 383
 teilkristallines Polyethylenterephthalat
 PET-C 342
 Tempern 244
 Terephthalsäure 340, 387, 452
 Terephthalsäuredichlorid 480
 Terpolymere 52, 268
 Terpolymerisate 408
 Tertiärkreislauf 575
 Tertiärstruktur 85
 Tetrabrombisphenol A 461
 Tetrachlorbisphenol A 461
 Tetraedermodell 82

Tetrafluorethylen 417
 Tetrafluorethylen-Hexafluorpropylen-Copo-
 lymer FEP 422
 Tetrafluorethylen-Hexafluorpropylen-Vinyl-
 idenfluorid-Terpolymer THV 422
 Tetrahydrophthalsäure 452
 2,2,4,4-Tetramethyl-1,3-cyclobutandiol
 CBDO 345
 Tetramethylenediamin 375
 Textile Flächengebilde 190
 Texturieren 189
 thermisch-mechanisches Verhalten 112
 thermische Nutzung 580
 Thermoanalyse TA 134
 Thermoelaste 115, 357, 415
 Thermofixieren 189
 Thermoformen 217
 Thermoformmaschine 223
 Thermografie 550
 Thermogravimetrische Analyse TGA 134
 Thermomechanische Analyse TMA 134
 Thermooptische Analyse TOA 135
 thermooxidative Alterung 124
 thermooxidativer Abbau 66
 Thermoplast-Schaum-Blasformen 525
 Thermoplast-Schaum-Extrusion 525
 Thermoplast-Schaum-Spritzgießen 525
 Thermoplaste 37, 112f., 150
 thermoplastisch verarbeitbare Fluor-Kunst-
 stoffe 420, 422, 425
 thermoplastische Elastomere auf Olefinbasis,
 TPE-O/TPE-V TPO/TPV 517
 thermoplastische Elastomere auf Styrolbasis,
 TPE-S TPS 517
 thermoplastische Elastomere TPE 37, 115f.,
 504, 511ff.
 thermoplastische Polyamid-Elastomere,
 TPE-A TPA 518
 thermoplastische Polyester-Elastomere,
 TPE-E TPC 518
 thermoplastische Polyurethan-Elastomere,
 TPE-U TPU 519
 thermotrop 476
 Thiole 45
 tie-Moleküle 87
 Tissue Engineering 560
 Topologie 38
 Toxizität 571
 Tränken 212
 transluzent 250
 transparent 250
 Traubenzucker 362
 Treibmittel 102, 523, 533
 – chemische 523
 – mechanische 523
 – physikalische 523
 Treibverfahren, physikalische 198
 Trennen (Spanen) 143, 225ff.

Trennmittel 105
 Tri-Hydroxymethylmelamin 445
 2,4,6-Triamino-1,3,5-triazin 444
 Triazinharze 467
 Triblockcopolymere 52
 Triboelektrizität 549
 Trimellithsäureanhydrid 488
 2,2,4-Trimethylhexamethylen-1,6-diamin 390
 Trioxan 406
 1,1,1-Tris (4-hydroxyphenyl)-ethan THPE 352
 TRK-Wert 572
 trockene Destillation 8
 Trockenmischungen 304
 Trockenspinnen 185
 TSB-Verfahren 525
 TSE-Verfahren 525 f.
 TSG-Verfahren 174, 525 f.
 Typen von Makromolekülen 39

U

U-Kautschuke 504
 ultrahochfeste Fasern 22
 Umesterung 341, 349
 Umformen 143, 217
 Umwandlung von Naturstoffen 66
 Umwelteinflüsse 120
 Umweltschutz 571, 574
 ungesättigte Polyesterharze UP 53, 446
 UP-Reaktionsharzmasse 450
 Urethangruppe 62, 373, 535
 Urformen 143, 151
 UV-Absorber 103, 289
 UV-Sensibilisatoren 585
 UV-Stabilisatoren 103, 449

V

Vakuumgießen 208
 van der Waals-Bindungen 71
 van der Waalssche Kräfte 71
 Vanadiumbasis 274
 Verarbeitung 141
 Verarbeitungsadditive 99
 Verarbeitungsschwindung 89
 Verbundwerkstoffe 101
 Veredeln 143, 238
 Veresterung 78
 Verfahrenstechnik beim Kalandrieren 181
 Verfahrenstechnik der Kettenpolymerisation 53
 Vergrößerung des Polymerisationsgrads 65
 Vermüllung 583
 vernetztes Polyethylen PE-X 246
 Vernetzung 60 ff., 96, 112, 429, 509
 – physikalische 41, 503

Vernetzungsgrad 80
 Vernetzungsmittel 455, 509
 Verringerung des Polymerisationsgrads 66
 Verseifung 78
 Verstärkungsmittel 511
 Verstärkungsstoffe 101, 145
 Verstrecken 99, 189
 Verteiler 511
 Verweilzeit 111
 Verzweiger-Monomere 351
 Verzweigungsgrad 80, 257
 Vinyl-Elastomere 515
 Vinylchlorid 290
 Vinylchlorid-Copolymerisate 294
 Vinylchlorid-Polymerisate, modifizierte 294 ff.
 Vinylchlorid/Ethylen/Vinylacetat VCEVAC 298
 Vinylchlorid/N-Cyclohexylmaleimid 296
 Vinylesterharz VE 455
 Vinylfluorid 425
 Vinylidenchlorid VDC 308
 Vinylidenchlorid-Copolymerisate 308
 Vinylidenfluorid 424
 Vinylmonomer 43
 viskos-elastisch 107
 Viskose 12
 Viskosität 90, 106, 108–109
 Viskositätsfunktion 108
 Viskositätskurve 108
 Viskositätsskala 108
 Volumenschwindung 89
 Volumen-/Töpfchen-Modell 89
 Vorbehandlungsverfahren 239
 Vorkondensat 442
 Vorstabilisierung 293
 Vortrocknen 150
 Vulkanisation 12, 116, 504, 508

W

Wärmestabilisatoren 104, 293
 Warmformen 217
 Warmgasschweißen 230
 Warmhärtung 453
 Wasseraufnahme 121
 wasserlösliche Polymere 585
 Wasserstoffbrückenbindungen 73, 382
 Weißbruch 288
 Weich-Polyvinylchlorid PVC-P 299, 515
 Weichmacher 102, 145, 300 ff., 363, 383, 411, 511
 Weichschaumstoffe 532
 Weichsegment 512, 521
 weitmaschige Vernetzung 40
 Wendelstruktur (Helix) 85, 418
 Werkstoffklassen 1
 werkstoffliches Recycling 576

- Wiederholungseinheit 76
Wirbelmischer 147, 304
Wirbelsintern 237
Wood Plastics Composites WPC 563
- X**
- 3,5-Xylenol 435
1,3-Xylylendiamin 390
- Z**
- z-Mittel 93
Zahlenmittel 92
Zellstoff 362
- Zellstruktur 196, 523
Zerkleinern 149
Zersetzungstemperatur 68, 116
Ziegler-Natta-Katalysatoren 50, 255
Zirkonocene 274
Zucker 362
Zugdruckumformen 220
Zugspannung 117
Zugumformen 218
Zukunft der Kunststoffe 23
Zusatstoffe 36, 99 f., 145
zwischenmolekulare Kräfte 70