



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) vergegenwärtigt, 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 geeigneten Leserin/Leser zum Lernen, Lehren, Nachschlagen sowie zur Materialwahl einmal mehr nützlich sein.

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 Copolymere 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	Bindungskräfte in makromolekularen Systemen	67
2.3.1	Hauptvalenzbindungen	67
2.3.2	Nebervalenzbindungen	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 \bar{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	Kunststoffherzeugung beim Verarbeiter	132
2.9	Wichtige Aspekte 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	Wärmgasschweißen	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 Polyethylens	256
4.1.7.1 Polyethylene mit multimodaler Molmassen- verteilung	258
4.1.7.2 Ethylen-Copolymere mit α -Olefinen	259
4.1.7.3 Metallocen-katalysierte Ethylencopolymere (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 Polyisobutylen (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 Polyisobutylene	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-Polymerisate	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 schlagzähem 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	Polyalkylterephthalate („gesättigte“ Polyester) (PET, PBT) und Polyethylenphthalat (PEN)	340
7.1.1.1	Das Wichtigste in Kürze über Polyalkylterephthalate	340
7.1.1.2	Der Weg zu den Polyalkylterephthalaten	340
7.1.1.3	Polyethylterephthalat (PET)	342
7.1.1.4	Polybutylterephthalat (PBT)	344
7.1.1.5	Modifizierte Polyalkylterephthalate	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 Polyoxymethylen-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-Vinylidenfluorid-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	Hochleistungspolymere	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	Polyphenylsulfid (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 Polyphenylsulfid	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 Hundertschaften von Ingenieuren in Windisch, in späteren Jahren auch am Departement Materialwissenschaft der ETH Zürich. Daneben übernahm er „berufsbegleitend“ den Aufbau und Betrieb des Kunststoff-Ausbildungs- und Technologie-Zentrums (KATZ) in Aarau und war dessen langjähriger erster Geschäftsführer in Personalunion. Er ist Begründer einer systematischen Aus- und Weiterbildung in Kunststofftechnik für Ingenieure in der Schweiz.

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



1.3.1 Kurzer Abriss der Entwicklung der Polymerwissenschaften (ohne Copolymere 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

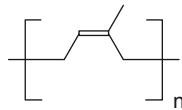
Charles Goodyear (1800–1860)



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



(1.1)

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, Käämme

Viskose 1892

Charles Cross (1855–1935)

Edward Bevan (1856–1921)

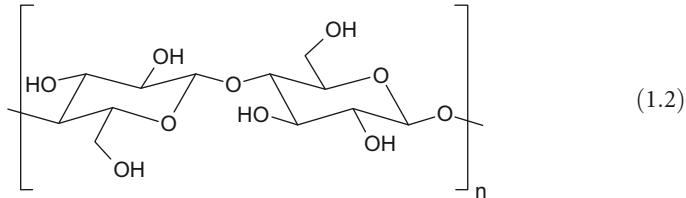
Clayton Beadle (1868–1917)

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)



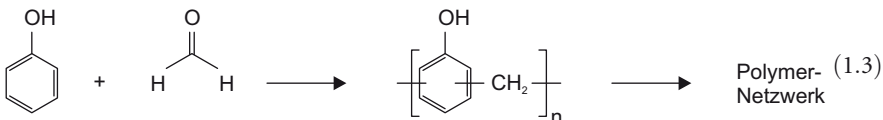
Bakelit (Phenol-Formaldehyd-Harz) 1907

Leo H. Baekeland (1863–1944)

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

Die von ihm gegründete Bakelitgesellschaft 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 Dendrimern 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 Dendrimern 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.

Konstitution

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.

Konfiguration

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.

Konformation

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

vernetzte
Makromolekül-
ketten

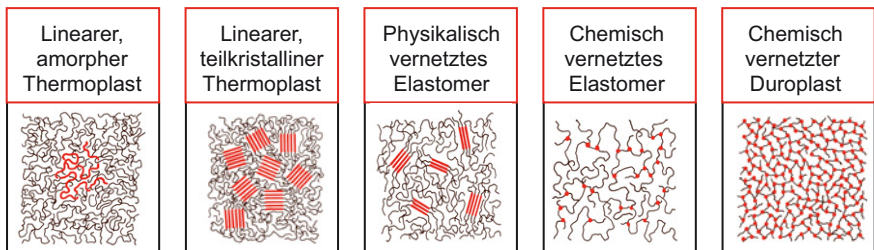


Bild 2.7: Schematische Darstellung der zweidimensionalen Projektionen verschiedenartiger Polymere

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

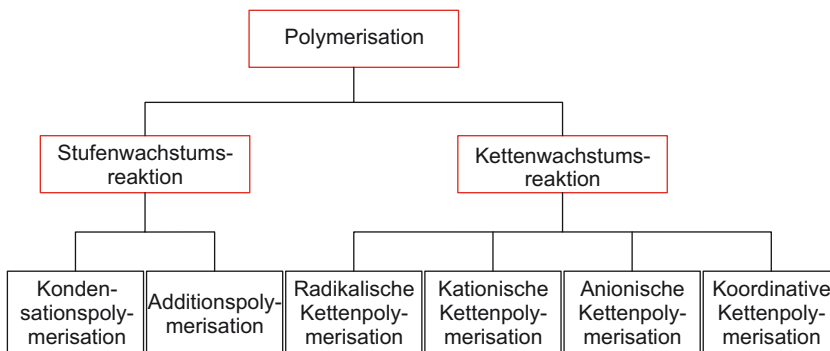


Bild 2.8: Einteilung der Polyreaktionen

enge
Molmassen-
verteilung
breite
Molmassen-
verteilung

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).

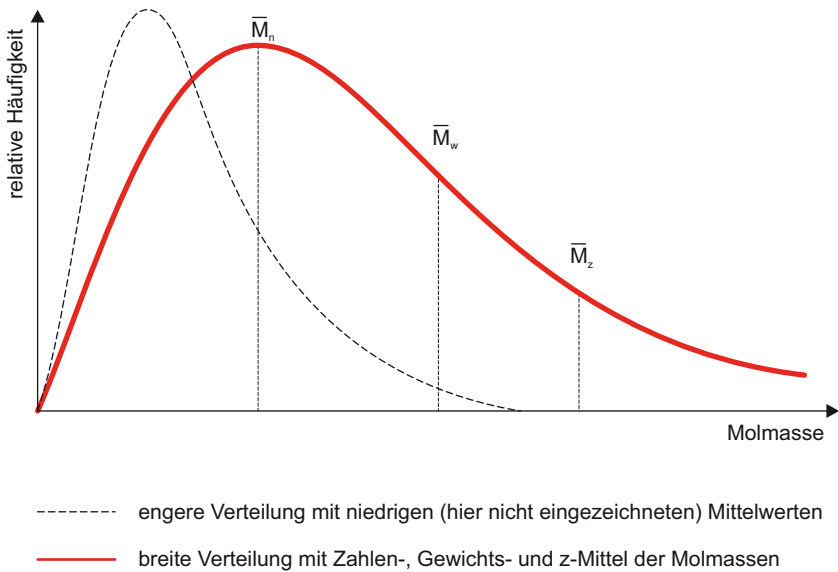


Bild 2.45: Molmassenverteilungen mit Angabe der Lage verschiedener Mittelwerte

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 Kunststoffes 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}_w und \overline{M}_n 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}_η .

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 $\overline{M}_n = 56\,000$ g/mol und $M_0 = 28$ 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 Polyethylens mit einer Molmasse von $M = 3\,000\,000$ g/mol:

absolute Masse eines Makromoleküls

$$m = \frac{\overline{M}}{N_A} = \frac{3\,000\,000 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}}{6,023 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}} = 4,98 \cdot 10^{-18} \text{ g} = 4,98 \text{ ag} \quad (2.49)$$

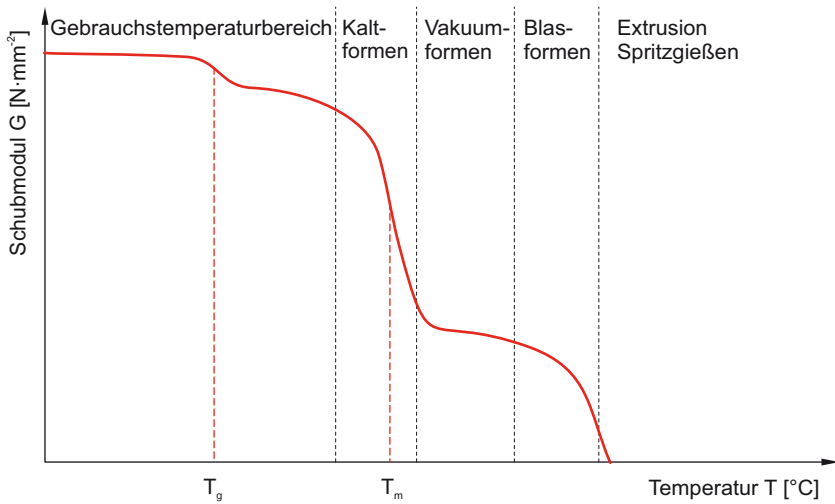


Bild 2.63: Schematische Schubmodul-Temperatur-Kurve eines teilkristallinen Thermoplasten

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), Celluloseacetobutyrat (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 Kristallschmelztemperatur 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 Kristallschmelzbereich. Gleichzeitig zeigen jedoch die wichtigen teilkristallinen Polymere bei

Warmformen
von amorphen
Thermoplasten
oberhalb T_g

Kristallit-
schmelztempe-
ratur T_m bei
teilkristallinen
Thermoplasten

Raumtemperatur und darüber – also im Gebrauchstemperaturbereich – ein hartzähes 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 weichgummiartig-elastischen Zustand. Daher nennt man solche Materialien auch *Thermoelaste*, vgl. Abschnitt 2.3.2.

Thermoelaste

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 Pfropfcopolymerisate – 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.

physikalisch vernetzt thermoelastische Elastomere (TPE)

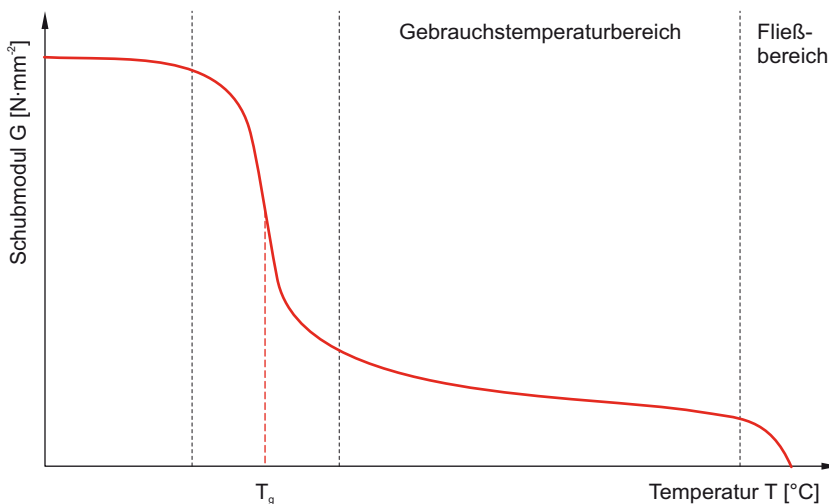


Bild 2.64: Schematische Schubmodul-Temperatur-Kurve eines thermoplastischen Elastomers

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.

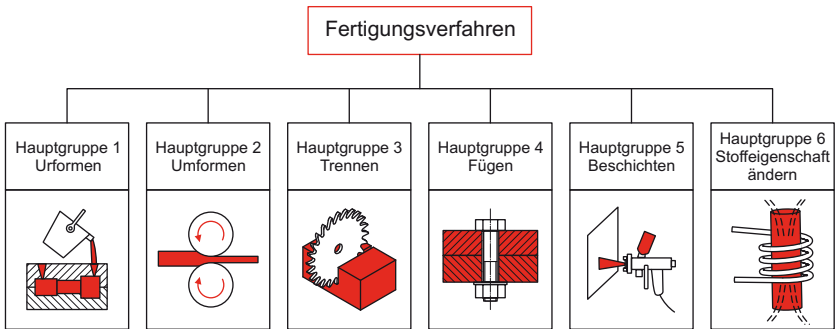


Bild 3.2: Einteilung der Hauptgruppen

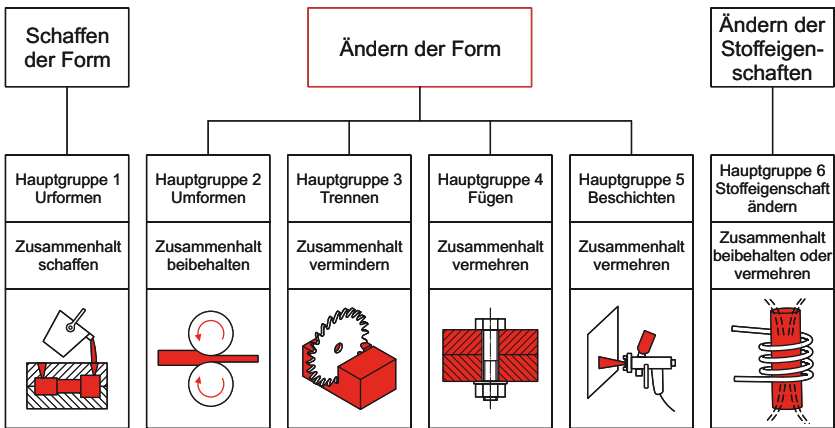


Bild 3.3: Merkmale für die Hauptgruppen der Fertigungsverfahren

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

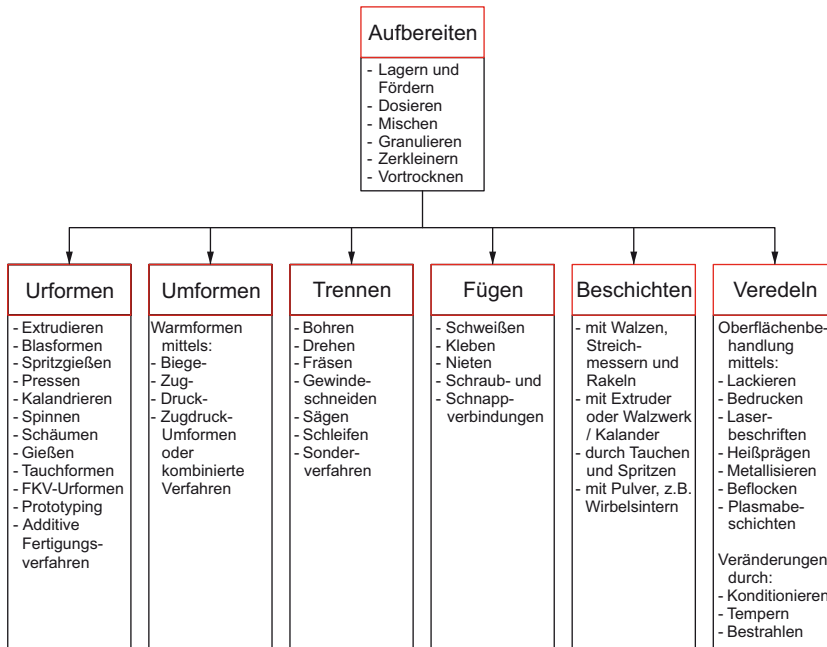


Bild 3.4: Einteilung der Fertigungsverfahren in der Kunststofftechnik

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 Beinamen 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 kurzkettenartige 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).

4.1.3 Eigenschaften

Verschiedenartigkeit im Gefügebau

Unterschiede im Werkstoffverhalten der einzelnen PE-Typen erklären sich primär durch ihre Verschiedenartigkeit im Gefügebau, 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

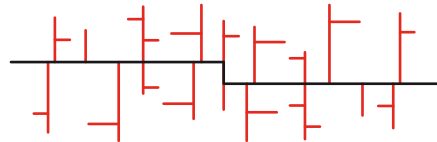


Bild 4.1: Schematische Darstellung der unterschiedlichen Strukturen bei PE (nach LyondellBasell)

Je nach Schichtdicke, die zwischen einer einigen µm dünnen Folie oder einem mehrere Zentimeter dicken Block liegen kann, ist PE fast glasklar bis stark milchiggetrübt („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 wachstartigen Griff und besitzt eine große Wärmedehnung, besonders PE-LD.

hohe Dehnbarkeit und hervorragende Schlagzähigkeit

Tabelle 4.6 Eigenschaftsvergleich der Polyethylene 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
Schmelzetemperatur	°C	105–118	120–125	126–135	130–135	126	126–130
Formbeständigkeits-temperatur HDT/A 1,8 MPa	°C	–	30–37	38–50	42–49	ca. 40	55–60
Längenausdehnungs-koeffizient, (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 ¹⁵	>10 ¹⁵	>10 ¹⁵	>10 ¹⁵	>10 ¹⁴
Spezifischer Oberflächenwiderstand	Ω	>10 ¹³	>10 ¹³	>10 ¹³	>10 ¹³	>10 ¹³	>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

16.2 Umweltschutz beim Umgang mit Kunststoffen

16.2.1 Nachhaltige Entwicklung

qualitatives
Wachstum

Stoffstrom-
management

Die Idee der nachhaltigen Entwicklung (englisch sustainable development) basiert auf der Ausgewogenheit eines globalen Zivilisationsprozesses, der zum einen die Lebenssituation der heutigen Generation verbessert (Entwicklung) ohne gleichzeitig die Lebenschancen künftiger Generationen zu gefährden (Erhaltung der Umwelt). Die Umsetzung dieser Idee gehört zu den zentralen Aufgaben der Entwicklungs- und Umweltpolitik. Von den verschiedenen Denkansätzen zur Lösung der anstehenden Probleme sei an dieser Stelle auf das Leitbild eines qualitativen Wachstums hingewiesen. Darunter versteht man die Vorgabe, das Wirtschaftswachstum vom Ressourcenverbrauch zu entkoppeln. Ansätze in diese Richtung legen den Schwerpunkt auf eine gezielte Wiederverwendung von Rohstoffen sowie auf die Schaffung eines Stoffstrommanagements. Letzteres fordert, dass Materialien, Immissionen und Abfälle ganzheitlich betrachtet und unter ökonomischen, ökologischen und sozialen Zielen eingesetzt und bewertet werden. Bisher aufgestellte Ökobilanzen klammerten ökonomische und soziale Aspekte aus und erfassten nur die umweltrelevanten Daten eines Unternehmens systematisch in Form einer Input-Output-Bilanz.

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 kunststoffherzeugende 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. innerbetriebliches Recycling
- 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 Weiterverwertung als Sekundärwerkstoffe für neue Produkte zuführen. werkstoffliches Recycling
- 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. rohstoffliches Recycling

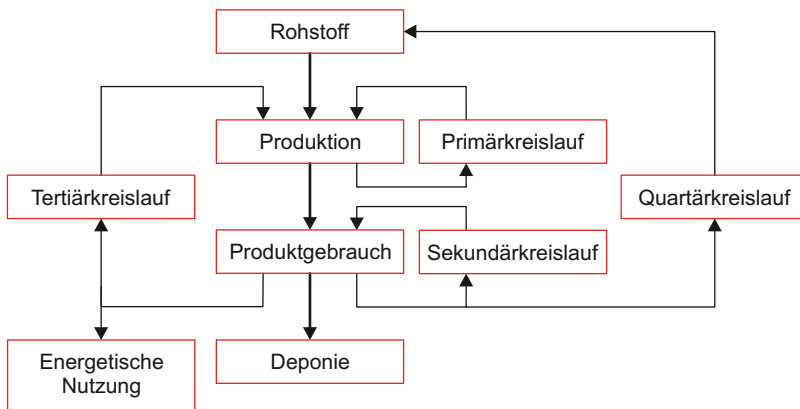


Bild 16.1: Recyclingkreisläufe

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, 67f.
- äußere Alterungsursachen 123
- äußere Weichmachung 102
- äußerer Weichmacher 299
- Aufbau eines Extruders 153
- Aufbereiten (Compoundieren) 99, 143 f.,
 - 293
- Aufbereitungsverfahren 145, 293
- Aufspießen 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
 Chargenkessel 54
 Chemiefasern 7, 182 ff.
 Chemikalienbeständigkeit 121
 chemisch abbindende Klebstoffe (Reaktions-
 kleber) 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
 Chlorsulfoniertes 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
 Cyclohexanonperoxid 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
 Devulkanisationsverfahren 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
 Dibutylzinndilaurat 534
 Dicarbonsäure 374
 Dicyanatester 467
 Diene 509
 Diethylentriamin 463
 Differential Scanning Calorimetry DSC 135
 Differentialthermo-Analyse DTA 134
 Diffusion 122
 Digital Versatile Disc (DVD) 6
 Diglycidether 460
 1,4-Dihydroxybenzol (Hydrochinon) 46, 482
 Diisocyanat 522, 535
 Diisodecylphthalat DIDP 302
 Diisononylphthalat 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 Nebervalenzbindung 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
 Elektrodekantieren 418
 Elektrolumineszenz 551
 Elektronegativität 69
 Elektronenbeschleuniger 246
 Elektronenpaarbindung 68
 Elektrosinnen 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
 Ethylendiamin 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
 Fullurene 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
 Gelieren 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
 Handlaminierten 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 Copolymere 271
 Hexafluorpropylen 423
 Hexahydrophthalsäure 462
 Hexahydrophthalsäure-diglycidester 462
 Hexahydrophthalsäureanhydrid 462
 Hexa-Hydroxymethylmelamin 445
 Hexamethyldiamin 375
 Hexamethylenetetramin 437
 High-Density-Polyethylen PE-HD 257
 Hilfsstoffe 533
 HM-C-Faser 395
 Hochdruckanlage 202
 Hochdruckharze 430
 Hochdruckverfahren 253
 hochfeste Polymerfasern 20
 Hochleistungspolymere 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
 hypervverzweigtes 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, 47 f.
 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 82 f.
- 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, 48 f.
 Kettencopolymerisation 51
 Kettenlänge 90
 Kettenpolymerisation 41–42, 61
 Kettenstabilisierung 407
 Kettenübertragung 44, 47 f.
 Kettenverzweigung 45, 80
 Kettenwachstum 44, 47 f.
 Kettenwachstumsreaktion 41, 65
 Kevlar-Faser 481
 Kicker 524
 Kleben 232 ff.
- Ko-Kneter 148
 Kobaltsalze 453
 Kofler-Heizbank 139
 Kohäsion 232
 Kohlenhydrate 26
 Kohlenstoffasern (C-Fasern) 394
 Kohlenwasserstoffe 34
 kombinierte Verfahren 221
 Kondensation 58
 Kondensationscopolymerisation 59
 Kondensationsharze 430
 Kondensationspolymerisation (Polykondensation) 41, 58 f.
 Kondensationspolymerisation unter Ringchluss 486
 Konditionieren 245
 Konfiguration 40, 76, 82
 Konformation 40, 84
 Konstitution 40, 76 f.
 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 Nachschwindung 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
 Maleinimid-Gruppe 485
 Maleinsäure/cis-Butendisäure 451
 MAP-Verpackungen 570
 Massenfließrate 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 Ethylenopolymere
 PE-MC 260
 Metallocen-katalysiertes Polypropylen
 mPP 274
 Methacryl-imid-Gruppe 485
 Methacrylnitril 393
 Methacrylsäure 456
 Methacrylsäuremethylester 356
 Methanolyse 578
 Methyl-Fluor-Siloxan-Kautschuk MFQ 505
 Methylamin 359
 Methylcellulose 564
 Methylchlorid 525
 Methylenharnstoff-Gruppe 443
 Methylenmelamin-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, 90f.
 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, 90f.
 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, 435 f.
 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 103 f.
 organische Chemie 34
 Organisole 237
 Orientierung 97, 165
 oxidative Kupplung 411

P

p-Dichlorbenzol 496
 p-Methylstyrol 317
 p-Phenylendiamin 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
 Pfcopopolymere 52 f., 520
 Phasengrenzflächen-Verfahren 350
 Phasenvermittler 97
 Phenol 435
 Phenol-Formaldehyd-Harze 13, 431
 Phenol-Formaldehyd-Schaumstoffe 539
 Phenoplaste (Phenol-Formaldehyd-Kondensationsharze) PF 431 f.
 Phosgen 349
 photoabbaubare Polymere 585
 photoadressierbare 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
 plasmainduzierte Polymerisation 58
 Plasmapolymersation 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
 Polychlorotrifluorethylen 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
 Polymethacrylmethylimid 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
 Polyparaphenylene 546
 Polyparaphenylenvinylene, PPV 546
 Polyphenylchinolin 546
 Polyphenylenether PPE 409
 Polyphenylsulfid PPS 495, 546
 Polyphenylsulfon PPSU 491, 494
 Polyphthalamid, PPA 389
 Poly-p-phenylenterephthalamid PPTA 480
 Polypropylen PP 269 ff.
 Polypropylenglykol 536
 Polypropylenoxid 403, 537
 Polypyrrol 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 491 f.
 Polysulfone, modifizierte 494
 Polytetrafluorethylen PTFE 70, 415 f.
 Polytetrafluorthylen-Copolymer 419
 Polytetramethylenterephthalat 344
 Polythiophen PT 546
 Polyurethan 16, 62 f., 373, 535
 Polyurethan-Schaumstoffe 201, 529 ff.
 Polyvinylalkohol PVAL 585
 Polyvinylchlorid PVC 13, 287 ff.
 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 529 ff.
 – Halbhart-(semiflexible) Schaumstoffe 531
 – Hartschaumstoffe 530 f.
 – Integral-Halbhartschaumstoffe 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 52 f.
 Rapid Prototyping (RP) 213
 Raschelware 252
 Rauchgasdichte 471
 Raumgewicht 102, 196, 523
 REACH 573
 Reaction Injection Molding 204
 reactive processing 517
 Reaktionsharz-Duroplaste 446 f.
 Reaktionsharze 430, 453
 Reaktionsharzformstoff 430
 Reaktionsharzmasse 453
 Reaktionsmittel 429
 Reaktionsschaumgießen 201, 525
 Reaktions-spritzgießen 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 36 f.
 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
 Rumpfladung 69
- S**
- Sägen 226
 Sandwich-Bauelement 203
 Schadenverhütung/Schadensanalyse 133
 Schaum 102, 196, 572
 Schaumbildung 198
 Schäumen 196
 Schaumstabilisator 534
 Schaumstoffe 523 ff.
 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
 Schmelzefließrate 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 167 ff.
 – von vernetzenden Polymeren 177
 Spritzgießmaschine 168
 Spritzgießwerkzeug 170–171
 Spritzprägen 175
 Spritzpressen 177 f.
 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
 Strangaufweitung 107
 Strecken 99

- Streichen und Gelieren von PVC-Weich-Pasten 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 319 f.
 Styrol-Butadien SB 321
 Styrol-Butadien-Blockcopolymer SBS 325
 Styrol-Butadien-Kautschuk 505
 Styrolpolymere 313 ff.
 – 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, 504 ff.
- 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-Copolymer FEP 422
 Tetrafluorethylen-Hexafluorpropylen-Vinylidenfluorid-Terpolymer THV 422
 Tetrahydrophthalsäure 452
 2,2,4,4-Tetramethyl-1,3-cyclobutandiol
 CBDO 345
 Tetramethyldiamin 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, 112 f., 150
 thermoplastisch verarbeitbare Fluor-Kunststoffe 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, 115 f.,
 504, 511 ff.
 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, 225 ff.

Trennmittel 105
 Tri-Hydroxymethylmelamin 445
 2,4,6-Triamino-1,3,5-triazin 444
 Triazinharze 467
 Triblockcopolymerere 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 Waalsche Kräfte 71
 Vanadiumbasis 274
 Verarbeitung 141
 Verarbeitungsadditive 99
 Verarbeitungsschwindigkeit 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-Cyclohexylmaleinimid 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
Zusatzstoffe 36, 99 f., 145
zwischenmolekulare Kräfte 70