

# HANSER



## Leseprobe

zu

## Saechtling Kunststoff-Handbuch

von Erwin Baur, Dietmar Drummer, Tim A. Osswald und  
Natalie Rudolph

Print-ISBN: 978-3-446-46514-5

E-Book-ISBN: 978-3-446-47361-4

Weitere Informationen und Bestellungen unter

<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446465145>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

# Vorwort zur 32. Auflage

Kunststoffe sind bei der für Ingenieure wichtigen, volumetrischen Betrachtung weiterhin die bedeutendste Werkstoffgruppe weltweit. Dies reflektiert ihre herausragenden Eigenschaften: die exzellente Verarbeitbarkeit zu komplexen Produkten in sehr wirtschaftlichen Verfahren und die Möglichkeit, die Eigenschaften des Werkstoffs auf Anwendung und Verarbeitungstechnik optimal auf Anwendung und Verarbeitungstechnik abzustimmen. So sind Kunststoffe in vielen Anwendungsfeldern zu einem für die Funktion unersetzlichen Werkstoff geworden: in der Elektronik als Gehäuse- und Isolationswerkstoff (z.B. bei Handys), aber auch bei jeglichen Kabeln und Leiterplatten, in der Verpackungstechnologie und in der Medizintechnik sowie natürlich in der Fahrzeugtechnik. In anderen Branchen wie im Bauwesen eröffnen sich durch den Einsatz von Kunststoffen oder deren Kombination mit anderen Materialien neue Gestaltungsmöglichkeiten sowie Nachhaltigkeitskonzepte, wie unter anderem am Beispiel moderner Sportstadien im großen Maßstab sichtbar wird. So finden sich zahlreiche Bereiche, in denen sich unsere Welt in den letzten vierzig Jahren durch den Werkstoff Kunststoff nachhaltig verändert hat.

Die Kunststoffindustrie wird sich auch in Zukunft positiv entwickeln. Die Werkstoffeigenschaften der Kunststoffe lassen sich weiterhin gezielt verbessern, und es werden neue Anwendungsbereiche erobert, so wie es im Solarbereich, der Brennstoffzelle, in der Elektromobilität oder in den medizinischen Anwendungen heute bereits der Fall ist. Der Einsatz von Füllstoffen zur Funktionalisierung und Verstärkung wird weiter zunehmen. Den Forderungen nach nachhaltigen Werkstoffen kommt die Kunststoffindustrie durch den Einsatz neuer Bio-Kunststoffe und Kreislaufstrategien entgegen.

Immer mehr Ingenieure müssen sich bei ihrer täglichen Arbeit mit dem Material Kunststoff und seinen speziellen Eigenschaften beschäftigen und sind auf Informationen darüber angewiesen. Die besondere Herausforderung in der Kunststofftechnik liegt in den sehr ausgeprägten Wechselwirkungen von Konstruktion, Kunststoff und Verarbeitungsprozess auf resultierende Bauteileigenschaften. Die Fachkenntnis in all diesen Disziplinen und in deren Abhängigkeiten ist daher wichtig für den Entwicklungserfolg.

Das nun in der 32. Auflage vorliegende Kunststoffaschenbuch hat den Anspruch, ein kompaktes und aktuelles Nachschlagewerk für das ganze Kunststoffgebiet zu sein und Fachleute wie auch interessierte Laien bei täglichen Fragestellungen zu unterstützen. Ein besonderer Schwerpunkt bei der Überarbeitung waren die Verarbeitungsprozesse sowie die Themenbereiche Simulation und Prüfverfahren.

In einem solch umfassenden Taschenbuch gilt es, den richtigen Kompromiss zwischen Aktualität und Seriosität zu finden. Einerseits soll dem Nutzer, der heutzutage im Internet jederzeit und schnell Informationen zu beliebigen Themen beschaffen kann, die aber leider unstrukturiert sind und deren Richtigkeit kaum beurteilt werden kann, ganz bewusst ein konservatives, beständiges und zuverlässiges „gedrucktes Wissensportal“ zur Verfügung gestellt werden. Hierbei wird auch in der gedruckten Form Wert daraufgelegt, möglichst schnell und einfach zu der gesuchten Information zu navigieren. Andererseits sollen die Leser natürlich auch von den neuen Informationstechniken profitieren können, weswegen diese 32. Auflage ebenfalls wieder in elektronischer Form zur Verfügung steht. Mithilfe des im Buch eingedruckten persönlichen Codeworts können sich die Leser das E-Book kostenlos und exklusiv auf die Festplatte laden (Zugang über [www.hanser-fachbuch.de/ebookinside](http://www.hanser-fachbuch.de/ebookinside)). Die vollfarbige Darstellung soll es dem Leser zudem erlauben, die dargestellten Prozesse und Zusammenhänge einfacher und schneller zu erfassen.

Wir fühlen uns der Tradition des Buches, ein kompaktes, aktuelles Nachschlagewerk zu schreiben, verpflichtet, damit aufkommende Fragen schnell beantwortet und viele Anknüpfungspunkte geboten werden. Unser Ziel ist es, den Lesern stets einen Ausgangspunkt zu bieten, um mit dem Werkstoff Kunststoff technische Herausforderungen zu meistern und somit die Zukunft zu gestalten. Hierbei wünschen wir uns allen viel Erfolg!

Im August 2022

*Die Herausgeber*

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	<b>V</b>
<b>1 Kurzzeichen der Kunststoff-Technik</b> .....	<b>1</b>
1.1 Alphabetische Gliederung verwendeter Kurzzeichen für Kunststoffe, chemische Bezeichnung .....	2
1.2 Grundeinheiten, ISO- und US-Einheiten .....	10
<b>2 Einleitung</b> .....	<b>13</b>
2.1 Wirtschaftliche Bedeutung der Kunststoffe .....	13
2.2 Einordnung der Kunststoffe in das Gebiet der Werkstoffe .....	15
2.3 Aufbau der Kunststoffe .....	19
2.3.1 Chemische Struktur (Konstitution und Konfiguration der Makromoleküle) .....	19
2.3.1.1 Konformation .....	20
2.3.1.2 Konfiguration .....	20
2.3.1.3 Konstitution .....	22
2.3.1.4 Kunststoff-Hauptgruppen .....	27
2.3.2 Morphologische Struktur (Konformation und Aggregation der Makromoleküle) .....	28
2.3.3 Kunststoffklassen .....	35
2.4 Einfluss der Fertigung auf die inneren Eigenschaften .....	37
2.4.1 Eigenspannungen .....	38
2.4.2 Molekül-Orientierung .....	39
2.4.3 Kristallisationsverhalten .....	41
2.5 Stoffliche Modifizierung von Kunststoffen .....	42
2.5.1 Copolymere und Polymermischungen (Blends) .....	42
2.5.2 Kunststoffverbunde .....	44

<b>3</b>	<b>Eigenschaften und Prüfverfahren</b>	<b>47</b>
3.1	Aussagekraft der Kennwerte	48
3.2	Verarbeitungstechnische Kennwerte	54
3.2.1	Rheologisches Verhalten	54
3.2.1.1	Fließverhalten, Viskosität	54
3.2.1.2	Viskositätsmodelle	60
3.2.1.3	Schmelze-Volumenfließrate MVR und Schmelze-Massenfließrate MFR	62
3.2.2	Erstarrungsverhalten	63
3.2.2.1	Siegelzeit	63
3.2.2.2	Schwindung	63
3.2.2.3	Verzug	69
3.2.2.4	Toleranzen	71
3.2.2.5	Füllstoff-Orientierung	71
3.2.3	Prüfung partikelförmiger Feststoffe	72
3.2.3.1	Bestimmung der Partikelgrößenverteilung	73
3.2.3.2	Mechanik partikelförmiger Feststoffe	73
3.2.3.3	Adhäsionskräfte und Fließfähigkeit	74
3.2.3.4	Fließfähigkeit und der Fließort	77
3.3	Mechanisches Verhalten	79
3.3.1	Kurzzeitverhalten	79
3.3.1.1	Kurzzeit-Zugversuch	79
3.3.1.2	Kurzzeit-Biegeversuch	82
3.3.1.3	Druckversuch	84
3.3.1.4	Eindruckversuch, Härtemessung	84
3.3.2	Verhalten bei Stoß	85
3.3.2.1	Berechnungs-Kennwerte	85
3.3.2.2	Schlag-, Biege- und Zugversuche nach CAMPUS	87
3.3.3	Statisches Langzeitverhalten	89
3.3.3.1	Zeitstand-Zugversuch	89
3.3.3.2	Zeitstand-Innendruckversuch an Rohren	93
3.3.4	Dynamisches Langzeitverhalten	94
3.3.5	Moduln und Querszahl	97
3.3.6	Dichte	99
3.4	Thermisches Verhalten	101
3.4.1	Zulässige Gebrauchstemperatur	101
3.4.1.1	Kurzzeitige Temperatureinwirkung	101
3.4.1.2	Langzeitige Temperatureinwirkung	108
3.4.2	Spezifische Wärmekapazität, Spezifische Enthalpie, Verbrennungswärme	110

3.4.3	Wärmeleitfähigkeit .....	112
3.4.4	Wärmeeindringzahl .....	115
3.4.5	Temperaturleitfähigkeit .....	115
3.4.6	Wärme-Ausdehnungskoeffizient .....	116
3.5	Elektrisches Verhalten .....	123
3.5.1	Isolationsverhalten .....	125
3.5.1.1	Durchgangs-Widerstand/Leitfähigkeit .....	125
3.5.1.2	Oberflächen-Widerstand .....	128
3.5.1.3	Elektromagnetische Abschirmung (Verträglichkeit EMV, Compatibility EMC) .....	128
3.5.2	Festigkeitsverhalten .....	129
3.5.2.1	Elektrische Durchschlagfestigkeit .....	129
3.5.2.2	Elektrische Zeitstandfestigkeit .....	132
3.5.2.3	Kriechstromfestigkeit .....	133
3.5.2.4	Lichtbogen-Festigkeit .....	134
3.5.2.5	Elektrolytische Korrosion .....	134
3.5.3	Dielektrisches Verhalten .....	134
3.5.4	Elektrostatistisches Verhalten .....	136
3.5.5	Elektrisch leitfähige Kunststoffe .....	137
3.6	Optisches Verhalten .....	138
3.6.1	Lichtdurchlässigkeit .....	139
3.6.2	Glanz und Reflexion, Trübung .....	140
3.6.3	Farbe .....	141
3.6.3.1	Grundlagen .....	141
3.6.3.2	Farbmessung .....	141
3.6.4	Brechungsindex, Doppelbrechung .....	142
3.6.5	Oberflächenstruktur .....	146
3.7	Verhalten gegen Umwelteinflüsse .....	147
3.7.1	Wasser, Feuchtigkeit .....	148
3.7.2	Chemikalien .....	152
3.7.3	Spannungsrisssbeständigkeit .....	153
3.7.4	Atmosphärische Einflüsse .....	156
3.7.5	Energiereiche Strahlung .....	157
3.7.6	Beständigkeit gegen Organismen .....	157
3.7.7	Migration und Permeation .....	158
3.7.7.1	Wasserdampf-Durchlässigkeit .....	159
3.7.7.2	Gas-Durchlässigkeit .....	161
3.7.7.3	Wasserdampf-Diffusions-Widerstandszahl .....	165
3.7.8	Brandverhalten .....	165
3.8	Reibungs- und Verschleißverhalten .....	168

3.8.1	Reibung .....	168
3.8.1.1	Reibungsmechanismen .....	168
3.8.1.2	Ruckgleiten, Reibungsschwingung oder Stick-Slip-Effekt .....	169
3.8.2	Verschleiß .....	170
3.8.3	Probekörper und Prüfsysteme .....	171
3.8.4	Tribologische Eigenschaften von Thermoplasten .....	173
3.9	Analytische Untersuchungen .....	180
3.9.1	Infrarot (IR)- und Raman-Spektroskopie .....	180
3.9.2	Kernresonanz-Spektroskopie (Nuclear Magnetic Resonance: NMR) .....	181
3.9.3	Dynamisch-mechanische Spektroskopie (DMA) .....	181
3.9.4	Dielektrische Spektroskopie (DEA) .....	183
3.9.5	Differential-Thermoanalyse (DTA) und Differential- Kalorimetrie (DSC) .....	184
3.9.6	Thermogravimetrische Analyse (TGA) .....	186
3.9.7	Dilatometrie, Thermomechanische Analyse (TMA), spezifisches Volumen ( $pVT$ ) .....	187
3.9.8	Thermische Leitfähigkeit, Wärmeleitfähigkeit .....	189
3.9.9	Lösungs-Viskosimetrie .....	191
3.9.10	Chromatographie .....	192
<b>4</b>	<b>Kunststoffverarbeitung .....</b>	<b>195</b>
4.1	Aufbereiten .....	197
4.1.1	Mischen .....	197
4.1.1.1	Mischer .....	200
4.1.1.2	Schneckenknetter für viskose Stoffe .....	201
4.1.1.3	Sonstige Mischer für viskose Stoffe .....	208
4.1.2	Granuliertvorrichtungen .....	211
4.1.3	Mühlen .....	213
4.1.4	Trockner .....	215
4.1.5	Aufbereiten härtpbarer Formmassen .....	217
4.1.6	Aufbereitung von Recyclingmaterial .....	218
4.2	Extrudieren .....	218
4.2.1	Extruderbauformen .....	219
4.2.1.1	Einschneckenextruder .....	220
4.2.1.2	Zylinderbauarten: Glattrohr und Nutbuchse .....	221
4.2.1.3	Schneckenkonzepte: Dreizonen-, Barriereschnecke .....	223
4.2.1.4	Entgasungs-Extruder .....	223
4.2.1.5	Kaskaden- oder Tandem-Extruder .....	224

4.2.1.6	Schnellläufer-Extruder (adiabatischer Extruder) ..	225
4.2.1.7	Planetwalzen-Extruder .....	225
4.2.1.8	Doppelschneckenextruder .....	226
4.2.2	Zusatzeinrichtungen für Extruder .....	232
4.2.3	Extrusions-Werkzeuge und Nachfolgeeinrichtungen .....	233
4.2.3.1	Rohre und symmetrische Hohlprofile .....	233
4.2.3.2	Vollprofile .....	234
4.2.3.3	Hohlkammer-Profile .....	234
4.2.3.4	Ummantelungen .....	235
4.2.3.5	Platten und Flachfolien .....	236
4.2.3.6	Schlauchfolien .....	238
4.2.3.7	Geschäumte Halbzeuge und Profile .....	239
4.2.3.8	Monofilament, Bändchen, Fasern .....	241
4.2.3.9	Co- oder Mehrschichtextrudate .....	242
4.2.3.10	Mehrschichtige Bahnen .....	243
4.2.4	Kalanderte Folien .....	246
4.2.5	Hohlkörper mit variablem Querschnitt durch Extrusionsblasformen .....	248
4.3	Spritzgießen .....	250
4.3.1	Das Spritzgießverfahren .....	250
4.3.2	Bauformen von Spritzgießmaschinen .....	256
4.3.2.1	Schließeinheiten .....	256
4.3.2.2	Vollelektrische Spritzgießmaschine .....	256
4.3.2.3	Plastifizieraggregat .....	257
4.3.3	Allgemeine Hinweise zum Spritzgießen .....	259
4.3.4	Reinigen von Schnecken und Zylindern .....	263
4.3.5	Spritzgießsondervverfahren .....	263
4.3.5.1	Spritzprägen .....	264
4.3.5.2	Pulverspritzgießen .....	264
4.3.5.3	Mikrospritzgießen .....	265
4.3.5.4	Spritzgießen mit mehreren Einspritzeinheiten ....	265
4.3.5.5	Fluidinjektionstechnik .....	269
4.3.5.6	Schaumspritzgießen .....	271
4.3.5.7	(Flüssig)Silikonspritzgießen (LSR) .....	272
4.3.5.8	Spritzgießen mit Einlegeteilen .....	273
4.3.6	Spritzgießblasformen .....	275
4.4	Formwerkzeuge .....	276
4.4.1	Allgemeines zum Formenbau .....	276
4.4.2	Spritzgießwerkzeuge und Angussarten .....	278
4.4.3	Normalien für Werkzeuge .....	284
4.5	Schäumen .....	285



4.5.1	Schäumprinzipien .....	285
4.5.2	Herstellung von Partikelschaum .....	287
4.6	Gießen .....	288
4.7	Polyurethan(PUR)-Verarbeitungstechnik .....	289
4.7.1	Allgemeine Grundlagen .....	289
4.7.2	Die Verfahrensschritte .....	291
4.7.2.1	Nieder- und Hochdruckmaschinen .....	292
4.7.2.2	Spritz- oder Sprühmaschinen .....	296
4.7.2.3	Anlagen .....	297
4.7.2.4	Kontinuierliche Fertigung .....	297
4.7.2.5	Diskontinuierliche Fertigung .....	298
4.7.2.6	Herstellung faserverstärkter Teile .....	300
4.7.2.7	Reinigung .....	301
4.8	Herstellung von Hochleistungs-Faserverbundkunststoffen .....	301
4.8.1	Kurzfaserverstärkte Verbundkunststoffe .....	303
4.8.1.1	Spritzgießen .....	303
4.8.1.2	Bulk Molding Compounds .....	303
4.8.2	Langfaserverstärkte Verbundkunststoffe .....	305
4.8.2.1	Sheet Molding Compound .....	305
4.8.2.2	Glassmattenverstärkte Thermoplaste .....	306
4.8.2.3	Langfaserverstärkte Thermoplaste .....	307
4.8.3	Fertigungsprozesse mit moderatem Faseranteil .....	309
4.8.3.1	Manuelle Verfahren .....	309
4.8.3.2	Vakuumunterstützte Harzinfusion .....	309
4.8.4	Fertigungsprozesse mit hohem Faseranteil .....	310
4.8.4.1	Resin Transfer Molding .....	311
4.8.4.2	Vakuumunterstütztes Resin Transfer Molding ....	311
4.8.4.3	Compression Resin Transfer Molding .....	312
4.8.4.4	Structural Reaction Injection Molding .....	312
4.8.5	Wickeln .....	313
4.8.6	Pultrusion .....	316
4.8.7	Ablegeverfahren .....	317
4.8.7.1	Prepreg-Herstellung .....	317
4.8.7.2	Automated Tape Layup .....	318
4.9	Pressen .....	319
4.9.1	Schichtpressen .....	319
4.9.2	Strangpressen .....	321
4.9.3	Spritzpressen (Transferpressen) .....	321
4.10	Additive Fertigungsverfahren .....	322
4.10.1	Flüssige Werkstoffe .....	327

4.10.1.1	Stereolithografie (SLA) .....	327
4.10.1.2	Digital Light Processing (DLP) .....	328
4.10.1.3	UV-Assisted Direct Ink Writing (DIW) .....	329
4.10.1.4	Material Jetting (MJ) .....	330
4.10.2	Pulverbasierte Verfahren .....	330
4.10.2.1	Lasersintern (LS) .....	330
4.10.2.2	Hochgeschwindigkeitssintern (HSS) .....	332
4.10.2.3	3D-Druck (3DP) .....	332
4.10.2.4	In Entwicklung befindliche Verfahren .....	332
4.10.3	Filament-/Granulatbasierte Verfahren .....	333
4.10.3.1	Fused Filament Fabrication (FFF) .....	335
4.10.3.2	Granulatbasierte Strangablegeverfahren .....	336
4.10.3.3	Varianten .....	336
4.11	Faserherstellung .....	337
4.11.1	Textile Definitionen .....	337
4.11.2	Faserspinnen aus der Schmelze .....	338
4.11.2.1	Klassisches Faserspinnen .....	339
4.11.2.2	Meltblown-Verfahren .....	341
4.11.2.3	Vliesstoffherstellung .....	342
4.11.2.4	SMS-Vliesstoffe .....	344
4.11.2.5	Spezielle Düsengeometrien und deren Anwendung .....	348
4.11.3	Spezielle Faserherstellungsverfahren .....	349
4.11.3.1	Melt-Elektrospinning .....	351
4.11.3.2	Solution-Elektrospinning .....	352
4.11.4	Additive für das Faserspinnen .....	352
4.11.5	Relevante Polymerkenngrößen für das Faserspinnen .....	353
4.11.6	Prozessinstabilitäten .....	355
4.11.7	Einfache Korrelationen im Faserspinnprozess für den Praktiker .....	357
4.12	Rotationsformen .....	358
4.13	Umformen .....	361
4.13.1	Biegeformen .....	362
4.13.2	Ziehformen .....	363
4.13.3	Streckformen .....	364
4.14	Fügen .....	367
4.14.1	Einteilung der Fertigungsverfahren und Eingliederung Fügen .....	367
4.14.2	Einteilung der Kunststoffschweißverfahren .....	368
4.14.3	Schweißen .....	369

4.14.4	Serienschweißverfahren .....	370
4.14.4.1	Sequenzielle Stumpfschweißverfahren .....	371
4.14.4.2	Reibschweißverfahren .....	377
4.14.4.3	Ultraschallschweißen (US) .....	382
4.14.4.4	Laserdurchstrahlschweißen (LB) .....	384
4.14.5	Schweißen von Halbzeugen .....	387
4.14.5.1	Direktes Heizelementschweißen .....	387
4.14.5.2	Indirektes Heizelementschweißen .....	390
4.14.5.3	Konvektive Schweißverfahren .....	391
4.14.6	Schweißen durch elektromagnetisches Wechselfeld .....	395
4.14.6.1	Hochfrequenzschweißen (HF) .....	395
4.14.6.2	Induktionsschweißen (IND) .....	395
4.14.6.3	Mikrowellenschweißen (MW) .....	396
4.14.7	Kleben .....	397
4.14.8	Schrauben, Nieten, Schnappen .....	399
4.15	Oberflächenbehandlungen .....	399
4.15.1	Vorbehandlung der Oberflächen .....	400
4.15.1.1	Nasschemische Verfahren .....	400
4.15.1.2	Gasphasenbehandlung .....	400
4.15.1.3	Flammoxidieren .....	400
4.15.1.4	Strahlenbehandlung .....	401
4.15.1.5	Coronabehandlung .....	401
4.15.1.6	Plasmabehandlung .....	401
4.15.1.7	Mechanische Vorbehandlung .....	402
4.15.2	Polieren .....	403
4.15.3	Lackieren .....	403
4.15.4	Beschichten .....	404
4.15.5	Bedrucken, Beschriften und Dekorieren .....	405
4.15.6	Prägen, Heißprägen .....	407
4.15.7	Beflocken .....	407
4.15.8	Metallisieren von Folien .....	408
4.15.9	SiO <sub>x</sub> -Beschichtung von Folien .....	409
4.15.10	Metallisieren .....	409
4.15.11	Einreiben .....	410
4.15.12	Fluorierung, Gasphasenfluorierung .....	410
4.15.13	Plasmaverfahren (Chemical Vapor Deposition, CVD) .....	411
4.15.14	Thermisches Spritzen .....	411
4.16	Sonstige Bearbeitungsverfahren .....	412
4.16.1	Spanabhebende Bearbeitung .....	412
4.16.2	Trennen, Abtragen .....	414
4.16.3	Strahlenvernetzung .....	415

4.16.4	Wärmebehandlung .....	416
4.16.5	Abbau elektrostatischer Aufladungen .....	416
4.17	Kreislaufwirtschaft – Recycling .....	417
4.17.1	Werkstoffliche Verwertung .....	418
4.17.2	Rohstoffliche Verwertung .....	421
<b>5</b>	<b>Werkstoff- und verarbeitungsgerechte Konstruktion und Simulation .....</b>	<b>423</b>
5.1	Systematisches Konstruieren von Produkten aus Kunststoff .....	424
5.1.1	Anforderungslisten, Pflichtenheft und Lastenheft .....	425
5.1.2	Konstruktionskataloge .....	426
5.2	Werkstoffauswahl .....	427
5.3	Fertigungsgerechtes Konstruieren .....	430
5.3.1	Auswahl des Fertigungsverfahrens .....	430
5.3.2	Fertigungsgerechtes Gestalten .....	430
5.4	Konstruktion mit faserverstärkten Kunststoffen .....	432
5.4.1	Faserlängenverteilung .....	433
5.4.2	Faserorientierungsverteilungen .....	435
5.4.3	Faserdichteverteilung .....	442
5.4.4	Faser-Matrix-Haftung .....	445
5.4.5	Mikrostruktur-Eigenschafts-Beziehung .....	446
5.5	Rechnerunterstützte Konstruktion .....	450
5.5.1	Struktursimulation mit der Methode der Finiten Elemente ..	450
5.5.2	Prozesssimulation .....	453
5.5.2.1	Werkzeugfüllsimulation .....	455
5.5.2.2	Vorhersage von Schwindung und Verzug .....	456
5.5.2.3	Orientierungsvorhersagen .....	457
5.5.3	Modellierung diskontinuierlicher faserverstärkter Materialien für die FEM-Implementierung .....	459
5.6	Werkstoffgerechtes Konstruieren .....	468
5.6.1	Dimensionierungsrechnung .....	468
5.6.2	Dimensionierungskennwerte .....	469
5.6.3	Konventionelle Dimensionierungsrechnung .....	473
5.6.4	Empirisch gestützte Dimensionierungsrechnung .....	473
5.6.5	Bauteilversuche an Prototypen und Modellen .....	473
5.7	Funktionselemente .....	474
5.7.1	Filmscharniere .....	474
5.7.2	Schnappverbindungen .....	475
5.7.3	Schraubverbindungen .....	476

5.7.4	Nieten .....	480
5.7.5	Schweißverbindungen .....	480
5.7.6	Pressverbindungen .....	481
<b>6</b>	<b>Beschreibung der Kunststoffe .....</b>	<b>483</b>
6.1	Allgemeine Hinweise .....	483
6.2	Polyolefine (PO), Polyolefinderivate und -copolymerisate .....	483
6.2.1	Polyethylen-Standard-Homo- und Copolymere (PE-LD, PE-HD, PE-HD-HMW, PE-HD-UHMW und PE-LLD) ...	484
6.2.1.1	Polymerisation, chemischer Aufbau .....	484
6.2.1.2	Verarbeitung .....	486
6.2.1.3	Nachbehandlung .....	488
6.2.1.4	Eigenschaften .....	488
6.2.1.5	Einsatzgebiete .....	492
6.2.2	Polyethylen-Derivate (PE-X) .....	493
6.2.3	Chloriertes und chloresulfoniertes PE (PE-C) .....	495
6.2.4	Ethylen-Copolymere (PE-ULD, EVAC, EVAL, EEAK, EB, EBA, EMA, EAA, E/P, EIM, COC, ECB, ETFE) .....	495
6.2.4.1	Ultraleichtes Polyethylen (PE-ULD, PE-VLD) .....	502
6.2.4.2	Ethylen-Vinylacetat-Copolymere (EVAC) .....	502
6.2.4.3	Ethylen/Vinylalkohol-Copolymere (EVAL) .....	504
6.2.4.4	Ethylen-Acryl-Copolymerisate (EEAK, EBA, EAA, EAMA, EMA) .....	505
6.2.4.5	PE- $\alpha$ -Olefin-Copolymere (PE $\alpha$ -PO-(M)) .....	505
6.2.4.6	Cycloolefin-Copolymere (COC, COP) .....	505
6.2.4.7	Ionomere (EIM) .....	506
6.2.4.8	Ethylen-Copolymer-Bitumen-Blend (ECB, ECB/TPO) .....	508
6.2.5	Polypropylen-Homopolymerisate (PP, PP-H) .....	508
6.2.5.1	Chemischer Aufbau, Polymerisation .....	511
6.2.5.2	Verarbeitung .....	512
6.2.5.3	PP-Schaumstoffe (PP-E) .....	512
6.2.5.4	Nachbehandlung .....	512
6.2.5.5	Eigenschaften .....	513
6.2.5.6	Einsatzgebiete .....	514
6.2.6	Polypropylen-Copolymerisate und -Derivate, Blends (PP-C, PP-B, EPDM, PP+EPDM) .....	515
6.2.6.1	Chloriertes PP (PP-C) .....	515
6.2.6.2	PP-Copolymere (PP-B) .....	515
6.2.6.3	Ethylen-Propylen-(Dien)-Copolymer (EPDM) .....	516
6.2.6.4	PP+EPDM-Elastomer-Blends .....	516
6.2.6.5	Polypropylen-Blends .....	517

6.2.7	Polypropylen, Sondertypen .....	517
6.2.8	Polybutene (PB, PIB) .....	519
6.2.8.1	Polybuten-1 (PB) .....	520
6.2.8.2	Polyisobuten (PIB) .....	521
6.2.9	Höhere Poly-( $\alpha$ -Olefine) (PMP, PDCPD) .....	523
6.2.9.1	Poly-4-Methylpenten-1 (PMP) .....	523
6.2.9.2	Polydicyclopentadien (PDCPD) .....	524
6.3	Styrolpolymere .....	524
6.3.1	Polystyrol, Homopolymerisate (PS, PMS) .....	524
6.3.2	Polystyrol, Copolymerisate, Blends .....	525
6.3.2.1	Chemischer Aufbau .....	525
6.3.2.2	Verarbeitung .....	527
6.3.2.3	Eigenschaften .....	527
6.3.3	Polystyrol-Schaumstoff (PS-E, XPS) .....	534
6.4	Vinylpolymere .....	535
6.4.1	Polyvinylchlorid hart, Homopolymerisate (PVC-U) .....	535
6.4.1.1	Chemischer Aufbau .....	535
6.4.1.2	Lieferformen, Verarbeitung .....	536
6.4.1.3	Kennzeichnung .....	538
6.4.1.4	Eigenschaften und Einsatzgebiete .....	539
6.4.2	Polyvinylchlorid weich (PVC-P) .....	543
6.4.2.1	Aufbau .....	543
6.4.2.2	Lieferform, Verarbeitung .....	543
6.4.2.3	Weichmacher .....	544
6.4.2.4	Eigenschaften und Einsatzgebiete .....	547
6.4.3	Polyvinylchlorid: Copolymerisate und Blends .....	548
6.4.4	Polyvinylchlorid: Pasten, Plastisole, Organosole, Schäume ...	549
6.4.4.1	Pasten, Plastisole, Organosole .....	549
6.4.4.2	Schäume .....	550
6.4.5	Vinylpolymere, weitere Homo- und Copolymerisate (PVDC, PVAC, PVAL, PVME, PVFM, PVB, PVK, PVP) .....	551
6.4.5.1	Polyvinylidenchlorid (PVDC) .....	551
6.4.5.2	Polyvinylacetat (PVAC) .....	551
6.4.5.3	Polyvinylalkohol (PVAL) .....	551
6.4.5.4	Polyvinylmethylether (PVME) .....	552
6.4.5.5	Polyvinylbutyral, Polyvinylformal (PVB, PVFM) ...	552
6.4.5.6	Polyvinylcarbazol (PVK) .....	552
6.4.5.7	Polyvinylpyrrolidon und Copolymere (PVP) .....	553
6.5	Fluorpolymere .....	553
6.5.1	Fluor-Homopolymere (PTFE, PVDF, PVF, PCTFE) .....	553
6.5.1.1	Polytetrafluorethylen (PTFE) .....	556

6.5.1.2	Polyvinylidenfluorid (PVDF) .....	558
6.5.1.3	Polyvinylfluorid (PVF) .....	558
6.5.1.4	Polychlortrifluorethylen (PCTFE) .....	559
6.5.2	Fluor-Copolymerisate und -Elastomere (ECTFE, ETFE, FEP, TFEP, PFA, AF, PTFEAF, TFEHFPVDF (THV bzw. TFB), [FKM, FPM, FFKM]) .....	560
6.5.2.1	Ethylen-Chlortrifluorethylen-Copolymer (ECTFE) ..	560
6.5.2.2	Ethylen-Tetrafluorethylen-Copolymer (ETFE) .....	560
6.5.2.3	Polyfluorethylenpropylen (FEP); Tetrafluorethylen-Hexafluorpropylen-Copolymer (TFEP) .....	561
6.5.2.4	Perfluorpropylvinylether-Copolymer, Perfluoralkoxy (PFA) .....	561
6.5.2.5	PTFE-Copolymer mit AF (PTFEAF) .....	562
6.5.2.6	Tetrafluorethylen-Hexafluorpropylen-Vinylidenfluorid-Terpolymer (TFEHFPVDF (THV bzw. TFB)) .....	562
6.5.2.7	Weitere Fluor-Copolymere .....	562
6.6	Polyacryl- und Methacrylpolymere .....	563
6.6.1	Polyacrylate, Homo- und Copolymerisate (PAA, PAN, PMA, PBA) .....	563
6.6.1.1	Polyacrylnitril (PAN) .....	563
6.6.1.2	Polyacrylate, Spezialprodukte .....	563
6.6.2	Polymethacrylate, Homo- und Copolymerisate (PMMA, AMMA, MABS, MBS) .....	564
6.6.2.1	Polymethylmethacrylat (PMMA) .....	564
6.6.2.2	Methylmethacrylat-Copolymerisate (AMMA) .....	567
6.6.2.3	Methylmethacrylat-Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymere (MABS); Methacrylat-Butadien-Styrol-Copolymere (MBS) .....	568
6.6.3	Polymethacrylate, Modifizierungen und Blends (PMMI, PMMA-HI, MMA-EML-Copolymer, PMMA+ABS) .....	569
6.6.3.1	Polymethacrylmethylimid (PMMI) .....	569
6.6.3.2	Schlagzähes PMMA (PMMA-HI) .....	569
6.6.3.3	Methylmethacrylat-exo-Methylenlacton-Copolymerisat (MMA-EML-Copol., MMAEML) .....	570
6.6.3.4	PMMA+ABS .....	570
6.7	Polyoxymethylen (Polyacetal, Polyformaldehyd) (POM) .....	571
6.7.1	Polyoxymethylen-Homo- und Copolymerisate (POM-H, POM-Cop.) .....	571
6.7.2	Polyoxymethylen, Modifizierungen und Blends (POM+PUR) .....	581

6.8	Polyamide (PA) .....	584
6.8.1	Polyamide, Homopolymere (AB- und AA/BB-Polymere); (PA 6, 11, 12, 46, 66, 69, 610, 612 (PA 7, 8, 9, 1313, 613)) ...	584
6.8.1.1	Chemische Zusammensetzung .....	585
6.8.1.2	Eigenschaften .....	592
6.8.1.3	Verarbeitung .....	595
6.8.1.4	Einsatzgebiete .....	598
6.8.2	Modifikationen .....	600
6.8.3	Copolyamide .....	605
6.8.3.1	Teilaromatische, teilkristalline Copolyamide (Polyphthalamide, PPA) .....	607
6.8.3.2	Teilaromatische, amorphe Copolyamide .....	607
6.8.3.3	Elastomere Blockcopolyamide (Polyetherblockamide, PEBA) .....	608
6.8.4	Gusspolyamide (PA6-G, PA12-G) .....	609
6.8.5	Polyamid für das Reaktionsgießen (PA-RIM) .....	609
6.8.6	Aromatische Polyamide, Aramide .....	610
6.9	Aromatische (gesättigte) Polyester .....	610
6.9.1	Polycarbonat (PC) .....	611
6.9.1.1	Polycarbonat auf Basis Bisphenol A (PC) .....	611
6.9.1.2	Polycarbonat-Copolymere .....	616
6.9.1.3	Blends (Polymermischungen) .....	617
6.9.2	Polyester der Terephthalsäure, Blends, Blockcopolymere ...	619
6.9.2.1	Polyethylenterephthalat (PET) .....	619
6.9.2.2	Polybutylenterephthalat (PBT) .....	625
6.9.2.3	Zyklisches Polybutylenterephthalat (CBT) .....	626
6.9.2.4	Polytrimethylenterephthalat (PTT) .....	627
6.9.2.5	Thermoplastische Polyester-Elastomere (TPC) ....	627
6.9.2.6	Polyterephthalat-Blends (PET+: PBT, MBS, PMMA, PSU, Elastomer) .....	627
6.9.3	Polyester aromatischer Diole und Carbonsäuren (PAR, PBN, PEN) .....	628
6.9.3.1	Polyarylate (PAR) .....	628
6.9.3.2	Polybutylennaphthalat (PBN) .....	629
6.9.3.3	Polyethylennaphthalat (PEN) .....	629
6.10	Aromatische Polysulfide und Polysulfone (PPS, PSU, PES, PPSU) ....	630
6.10.1	Polyphenylensulfid (PPS) .....	630
6.10.2	Polyarylethersulfone (PAES, PSU, PSU+ABS, PES, PPSU) ....	633
6.11	Aromatische Polyether, Polyphenylenether und Blends (PPE) .....	636
6.12	Aliphatische Polyester (Polyglykole)(PEOX, PPOX, PTHF) .....	638



6.13 Poly(aryl)etherketone (aromatische Polyetherketone) (PAEK: PEK, PEEK, PEKEKK, PEKK) .....	639
6.14 Aromatische Polyimide (PI) .....	644
6.14.1 Duroplastische Polyimide (PI, PBMI, PBI, PBO und weitere) ..	649
6.14.1.1 Polyimid (PI) .....	649
6.14.1.2 Polybismaleinimid (PBMI) .....	649
6.14.1.3 Polybenzimidazol (PBI) .....	649
6.14.1.4 Polytriazine .....	650
6.14.2 Thermoplastische Polyimide (PAI, PEI, PISO, PMI, PMMI, PESI, PARI) .....	650
6.14.2.1 Polyamidimid (PAI) .....	650
6.14.2.2 Polyetherimid (PEI) .....	651
6.14.2.3 Polyimidsulfon (PISO) .....	652
6.14.2.4 Polymethacrylimid (PMI (Hartschaumstoff)) .....	652
6.14.2.5 Polymethacrylatmethyylimid (PMMI) .....	653
6.14.2.6 Polyesterimid (PESI) .....	654
6.15 Selbstverstärkende teilkristalline Polymere (LCP, flüssigkristalline Polymere, Liquid Crystal Polymers) .....	654
6.15.1 Chemischer Aufbau .....	654
6.15.2 Verarbeitung .....	655
6.15.3 Eigenschaften .....	655
6.15.4 Einsatzgebiete .....	657
6.16 Leiterpolymere: Zweidimensionale Polyaromaten und -heterocyclen ..	657
6.17 Polyurethane (PUR) .....	660
6.17.1 Allgemeine Grundlagen .....	660
6.17.1.1 Chemischer Aufbau .....	660
6.17.1.2 Herstellung der Polymeren .....	662
6.17.1.3 Brandverhalten .....	664
6.17.1.4 Handhabung der Rohstoffe, Arbeitssicherheit .....	664
6.17.1.5 Umweltschutz, Sicherheit und Abfallverwertung ..	665
6.17.2 Rohstoffe, Hilfsstoffe .....	665
6.17.2.1 Di- und Polyisocyanate .....	666
6.17.2.2 Polyole, Polyamine .....	667
6.17.2.3 Vernetzer bzw. Kettenverlängerer .....	667
6.17.2.4 Hilfsstoffe .....	668
6.17.3 PUR-Kunststoffe .....	670
6.17.3.1 Weichschaumstoffe (PUR-W) .....	671
6.17.3.2 Hartschaumstoffe (PUR-H) .....	673
6.17.3.3 Integralschaumstoffe (PUR-I) .....	674
6.17.3.4 Massive PUR-Kunststoffe, PUR-M .....	677

6.18	Natürlich vorkommende Polymere und Derivate .....	678
6.18.1	Cellulose- und Stärke-Derivate; CA, CTA, CP, CAP, CAB, CN, EC, MC, CMC, CH, VF, PSAC .....	680
6.18.1.1	Chemischer Aufbau .....	680
6.18.1.2	Verarbeitung .....	681
6.18.1.3	Eigenschaften, Einsatzgebiete .....	682
6.18.2	Polyhydroxyfettsäuren/Polyhydroxyalkanoate (PHA) .....	686
6.18.3	Casein-Kunststoffe, Casein-Formaldehyd, Kunsthorn (CS, CSF) .....	686
6.18.4	Polylactid, Polymilchsäure (PLA) .....	686
6.18.5	Elektrisch leitfähige/luminiszierende Polymere .....	687
6.18.6	Aliphatisches Polyketon (PK) .....	690
6.19	Thermoplastische Elastomere (TPE) .....	692
6.19.1	Physikalischer Aufbau .....	693
6.19.2	Chemischer Aufbau, Eigenschaften, Einsatzgebiete .....	693
6.19.2.1	Copolyamide (TPA) .....	695
6.19.2.2	Copolyester (TPC) .....	695
6.19.2.3	Polyolefin-Elastomere (TPO) .....	696
6.19.2.4	Polystyrol-Elastomere (TPS) .....	696
6.19.2.5	Polyurethan-Elastomere (TPU) .....	697
6.19.2.6	Polyolefin-Blends mit vernetztem Kautschuk (TPV) .....	697
6.19.2.7	Weitere TPE, TPZ .....	698
6.20	Duroplaste, härtbare Formmassen, Formaldehyd-Pressmassen (PF, RF, CF, XF, FF, MF, UF, MUF, MUPF) und weitere Massen (UP, VE (PHA), EP, PDAP, SI) .....	698
6.20.1	Formaldehyd-Formmassen (PF, RF, CF, XF, FF, MF, UF, MUF, MUPF) .....	699
6.20.1.1	Chemischer Aufbau .....	699
6.20.1.2	Eigenschaften .....	702
6.20.1.3	Einsatzgebiete .....	703
6.20.2	Ungesättigte Polyester-Harze (UP) .....	704
6.20.2.1	Chemischer Aufbau .....	704
6.20.2.2	Eigenschaften .....	706
6.20.2.3	Einsatzgebiete .....	706
6.20.3	Vinylester-Harze (VE), Phenacrylat-Harze; Vinylesterurethane (VU) .....	708
6.20.3.1	Chemischer Aufbau .....	708
6.20.3.2	Eigenschaften .....	708
6.20.4	Epoxid-Harze (EP) .....	708
6.20.4.1	Chemischer Aufbau .....	708

6.20.4.2	Eigenschaften	710
6.20.4.3	Einsatzgebiete	710
6.20.5	Diallylphthalat-Harze, Allylester (PDAP)	711
6.20.5.1	Chemischer Aufbau	711
6.20.5.2	Eigenschaften	711
6.20.5.3	Einsatzgebiete	711
6.20.6	Verarbeitung, Lieferformen	717
6.21	Härtbare Gieß- und Laminierharze	719
6.21.1	Phenoplaste (PF, CF, RF, XF)	719
6.21.2	Aminoplaste (UF, MF)	720
6.21.3	Furanharz (FF)	721
6.21.4	Ungesättigte Polyester-Harze (UP)	721
6.21.5	Vinylester-Harze (VE) Phenacrylat-Harze	725
6.21.6	Epoxid-Harze (EP)	725
6.21.7	Dicyclopentadien-Harz (DCPD)	726
6.21.8	Diallylphthalat-Harze (PDAP)	727
6.21.9	Kohlenwasserstoff-Harze (KWH)	727
6.22	Kautschuke	727
6.22.1	Generelle Beschreibung	727
6.22.2	Allgemeine Eigenschaften	729
6.22.3	R-Kautschuke (NR, IR, BR, CR, SBR, NBR, NCR, IIR, PNR, SIR, TOR, HNBR)	731
6.22.4	M-Kautschuke (EPM, EPDM, AEEM, EAM, CSM, CM, ACM, ABR, ANM, FKM, FPM, FFKM)	735
6.22.5	O-Kautschuke (CO, ECO, ETER, PO)	738
6.22.6	Silikonelastomere	738
6.22.6.1	Chemischer Aufbau und Vernetzungssysteme	740
6.22.6.2	Eigenschaften	743
6.22.6.3	Herstellungstechnologien	744
6.22.6.4	Verarbeitung	746
6.22.6.5	Einsatzgebiete	748
6.22.7	T-Kautschuke (TM, ET, TCF)	749
6.22.8	U-Kautschuke (AFMU, EU, AU)	750
6.22.9	Polyphosphazene (PNF, FZ, PZ)	751
6.22.10	Weitere Kautschuke	751
<b>7</b>	<b>Additive, Füllstoffe und Fasern</b>	<b>753</b>
7.1	Additive	753
7.1.1	Gleitmittel, Antiblockmittel, Trennmittel	753
7.1.2	Stabilisatoren	755
7.1.2.1	Antioxidantien	755

7.1.2.2	Lichtschutzmittel .....	756
7.1.2.3	Wärmestabilisatoren .....	757
7.1.2.4	Schaumstabilisatoren .....	757
7.1.3	Antistatika .....	757
7.1.4	Flammschutzmittel .....	758
7.1.5	Farbmittel .....	761
7.1.5.1	Effektpigmente .....	763
7.1.5.2	Fluoreszenz-Farbmittel (Tagesleucht-Farbmittel) ..	764
7.1.6	Additive für die Laserbeschriftung .....	765
7.1.7	Flexibilisatoren und Weichmacher .....	765
7.1.8	Haftvermittler .....	765
7.1.9	Treibmittel und Kicker .....	766
7.1.10	Nukleierungsmittel .....	768
7.1.11	Antibakterielle Mittel, Fungizide .....	769
7.2	Füllstoffe .....	769
7.2.1	Anorganische Füllstoffe .....	773
7.2.1.1	Ruß .....	773
7.2.1.2	Calciumcarbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) .....	773
7.2.1.3	Talk/Talkum .....	774
7.2.1.4	Kieselsäuren .....	775
7.2.1.5	Aluminiumtrihydrat .....	775
7.2.1.6	Kaolin .....	775
7.2.1.7	Glimmer .....	776
7.2.1.8	Wollastonit .....	776
7.2.1.9	Massive und hohle Mikrokugeln .....	777
7.2.2	Nanofüllstoffe .....	777
7.3	Fasern .....	781
7.3.1	Verstärkungsfasern .....	782
7.3.1.1	Synthetische, anorganische Fasern, Glasfasern (GF)	784
7.3.1.2	Natürliche organische Verstärkungsfasern, Naturfasern .....	788
7.3.1.3	Synthetische, organische Verstärkungsfasern, Kohlenstofffasern (CF), Aramidfasern (AF) u. a. ...	790
7.3.2	Fasern, Fäden, Borsten, Bänder .....	798
7.3.2.1	Polyesterfasern .....	799
7.3.2.2	Polyamidfasern .....	799
7.3.2.3	Polyacrylnitrilfasern .....	799
7.3.2.4	Polyolefinfasern .....	800
7.3.2.5	Polyvinylalkoholfasern .....	800
7.3.2.6	Polytetrafluorethylenfasern .....	800
7.3.2.7	Polyurethanfasern .....	801

**8 Kunststoffe im Vergleich ..... 803**

8.1 Verarbeitungstechnische Kennwerte und Toleranzen ..... 804

8.2 Übersicht über mechanische, thermische und allgemeine elektrische Eigenschaften ..... 815

8.3 Elektrisches Verhalten ..... 827

8.4 Optisches Verhalten ..... 828

8.5 Verhalten gegen Umwelteinflüsse ..... 830

8.5.1 Wasser, Feuchtigkeit ..... 830

8.5.2 Chemikalienbeständigkeit ..... 832

8.5.3 Spannungsrissbeständigkeit ..... 835

8.5.4 Atmosphärische Einflüsse ..... 836

8.5.5 Migration und Permeation ..... 838

8.5.6 Brandverhalten ..... 842

8.6 Erkennen von Kunststoffen ..... 843

**Index ..... 851**

In der Kunststoffindustrie ist es allgemein üblich, Kunststoffe einer chemischen Familie zuzuordnen und über das Kurzzeichen dieser Familie zu identifizieren. Diese Praxis ist allgemein verbreitet, obwohl sie streng genommen nicht den Realitäten der Kunststoffbranche entspricht, weil letztendlich die Produkte als Handelsprodukte mit jeweils sehr spezifischem Eigenschaftsspektrum verkauft werden. Dabei ist der Handelsname (fast im Sinne einer Bestellnummer) das einzige identifizierende Kriterium. Normen, die die Eigenschaften von bestimmten Werkstoffklassen festlegen, wie sie im Metallsektor weit verbreitet sind, sind nur bei härtbaren Kunststoffen eingeführt. In der Regel streuen die Eigenschaften der Werkstoffe innerhalb einer Familie erheblich.

Trotzdem ist es unumgänglich im Sinne einer Strukturierung des Fachwissens, dass die Werkstoffe in einer logischen und nachvollziehbaren Weise kategorisiert werden.

In diesem Buch soll daher die verbreitete Methode der Kurzzeichen aufgegriffen werden. Dabei muss ein Kompromiss gefunden werden zwischen einer eindeutigen und starren Regeln folgenden Systematik und im Markt eingeführten und weit verbreiteten Bezeichnungen. Es gibt verschiedene Normen, welche die Kennzeichnung der Kunststoffe zum Inhalt haben. Sie sind aber leider nicht nur untereinander, sondern teilweise sogar in sich inkonsequent und widersprüchlich.

In Abschnitt 1.1 sind die Kurzzeichen der in diesem Buch behandelten Kunststoffe zusammengefasst. Dabei wird vorzugsweise nur der chemische Aufbau der Polymere berücksichtigt und Zusätze, die sich auf physikalische Eigenschaften oder Verarbeitungsverfahren beziehen, werden möglichst vermieden. Da aber in der Fachliteratur häufig derartige Benennungen (z.B. „A“ für amorph oder „B“ für Block-Copolymere) verwendet werden, kann hier nicht ganz darauf verzichtet werden. Wegen der fehlenden Allgemeingültigkeit und vieler Widersprüche ist aber davon abzuraten, diese zu verwenden.

Die Liste der in Tabelle 1.1 fett gedruckten und somit als Norm definierten Familienbezeichnungen greift auf einen Vorschlag zurück, der im Zusammenhang mit der Kunststoffdatenbank CAMPUS gemacht wurde. Dieser berücksichtigt die

vorliegenden ISO-Normen so weit wie möglich, akzeptiert aber auch Ausnahmen, wenn sie allgemein verbreitet sind. Für CAMPUS wurde auf diese Weise eine Liste von so genannten Basispolymeren definiert, mit der fast der gesamte Kunststoffmarkt abgedeckt werden kann. Diese Liste wird regelmäßig überprüft und gegebenenfalls erweitert.

Tabelle 1.1 enthält Kurzzeichen für Kunststoffe und Kautschuke, Tabelle 1.2 Kurzzeichen für *Weichmacher*.

## ■ 1.1 Alphabetische Gliederung verwendeter Kurzzeichen für Kunststoffe, chemische Bezeichnung

**Tabelle 1.1** Kunststoffe und Kautschuke

Kurzzeichen	Chemische Bezeichnung	Abschnitt
*	Pyrrone	6.16
*	Polycyclone	6.16
*	Polyphenylene (Polyarylen)	6.16
*	Polytriazine	6.14.1.4
<b>ABS</b>	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer	6.3.2
ACM	Acrylat-Kautschuk, (AEM, ANM)	6.22.4
ACS	Acrylnitril-chloriertes Polyethylen-Styrol	6.3.2
AECM	Acrylester-Ethylen-Kautschuk	6.22.4
AEM	Acrylat-Ethylen-Polymethylen-Kautschuk	6.22.4
AES	Acrylnitril-Ethylen-Propylen-Dien-Styrol-Copolymer	6.3.2
AFMU	Nitroso-Kautschuk	6.22.8
AMMA	Acrylnitril-Methylmethacrylat	6.6.2.2
APE-CS	siehe ACS	
<b>ASA</b>	<b>Acrylnitril-Styrol-Acrylester-Copolymer</b>	6.3.2
AU	Polyesterurethan-Kautschuk	6.22.8
BIIR	Brombutyl-Kautschuk	6.22.3
BR	Butadien-Kautschuk	6.22.3
CA	Celluloseacetat	6.18.1
CAB	Celluloseacetobutyrat	6.18.1
CAP	Celluloseacetopropionat	6.18.1
CF	Kresol-Formaldehyd-Harz	6.20
CH	hydratisierte Cellulose, Zellglas	6.18.1
CIIR	Chlorbutyl-Kautschuk	6.22.3
CM	chlorierter Polyethylen-Kautschuk	6.22.4

Kurzzeichen	Chemische Bezeichnung	Abschnitt
CMC	Carboxymethylcellulose	6.18.1
CN	Cellulosenitrat, Celluloid	6.18.1
CO	Epichlorhydrin-Kautschuk	6.22.5
<b>COC</b>	<b>Cyclopolyolefin-Copolymere</b>	6.2.4
COP	COC-Copolymerisat	6.2.4.6
CP	Cellulosepropionat	6.18.1
CR	Chloropren-Kautschuk	6.22.3
CSF	Casein-Formaldehyd-Harz, Kunsthorn	6.18.3
CSM	chlorsulfonierter Polyethylen-Kautschuk	6.22.4
CTA	Cellulosetriacetat	6.18.1
<b>E/P</b>	<b>Ethylen-Propylen-Copolymer</b>	6.2.4
EAM	Ethylen-Vinylacetat-Kautschuk	6.22.4
EAMA	Ethylen-Acrylsäureester-Maleinsäureanhydrid-Copolymer	6.2.4
EB	Ethylen-Buten-Copolymer	6.2.4
EBA	Ethylen-Butylacrylat-Copolymer	6.2.4
EC	Ethylcellulose	6.18.1
ECB	Ethylencopolymer-Bitumen-Blend	6.2.4
ECO	Epichlorhydrin-Kautschuk	6.22.5
ECTFE	Ethylen-Chlortrifluorethylen-Copolymer	6.2.4
EEAK	Ethylen-Ethylacrylat-Copolymer	6.2.4
EIM	Ionomer-Copolymer	6.2.4
EMA	Ethylen-Methacrylsäureester-Copolymer	6.2.4
<b>EP</b>	<b>Epoxid-Harze</b>	6.20
EP(D)M	siehe EPDM	
EPDM	Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk	6.22.4
EPM	Ethylen-Propylen-Kautschuk	6.22.4
ET	Poly-ethylenoxid-tetrasulfid-Kautschuk	6.22.7
ETER	Epichlorhydrin-Ethylenoxid-Kautschuk (Terpolymer)	6.22.5
ETFE	Ethylen-Tetrafluorethylen-Copolymer	6.5.2
EU	Polyetherurethan-Kautschuk	6.22.8
<b>EVAC</b>	<b>Ethylen-Vinylacetat-Copolymer</b>	6.2.4
EVAL	Ethylen-Vinylalkohol-Copolymer, alte Bezeichnung EVOH	6.2.4
FEP	Polyfluorethylenpropylen	6.5.2
FF	Furan-Formaldehyd-Harz	6.20
FFKM	Perfluor-Kautschuk	6.22.4
FKM	Fluor-Kautschuk	6.22.4
FPM	Propylen-Tetrafluorethylen-Kautschuk	6.22.4
FVMQ	Fluor-Silikon-Kautschuk	6.22.6
HCR	Hochtemperatur-vernetzender Silikonkautschuk	6.22.6
HNBR	hydrierter NBR-Kautschuk	6.22.3





**Tabelle 1.1** Kunststoffe und Kautschuke (Fortsetzung)

Kurzzeichen	Chemische Bezeichnung	Abschnitt
HTV	siehe HCR	
ICP	intrinsisch leitfähige Polymere	6.18.5
IIR	Butyl-Kautschuk (CIIR, BIIR)	6.22.3
IR	Isopren-Kautschuk	6.22.3
KWH	Kohlenwasserstoffharz	6.21.9
<b>LCP</b>	<b>Liquid Crystal Polymer</b>	6.15
LSR	Flüssigsilikonkautschuk	6.22.6
<b>MABS</b>	<b>Methylmethacrylat-Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer</b>	6.6.2
<b>MBS</b>	<b>Methacrylat-Butadien-Styrol-Copolymer</b>	6.6.2
MC	Methylcellulose (Cellulosederivat)	6.18.1
<b>MF</b>	<b>Melamin-Formaldehyd-Harz</b>	6.20
MFA	Tetrafluorethylen-Perfluormethyl-Vinylether-Copolymer	6.5.2.7
MMA-EML	Methylmethacrylat-exo-Methylenlacton-Copolymer	6.6.3.3
<b>MPF</b>	<b>Melamin-Phenol-Formaldehyd-Harz</b>	6.20
MQ	Polydimethylsilikon-Kautschuk	6.22.6
MS	siehe PMS	
MUF	Melamin-Harnstoff-Formaldehyd-Harz	6.20
MUPF	Melamin-Harnstoff-Phenol-Formaldehyd-Harz	6.20
NBR	Acrylnitril-Butadien-Kautschuk	6.22.3
NCR	Acrylnitril-Chloropren-Kautschuk	6.22.3
NR	Naturkautschuk	6.22.3
PA	Polyamid (weitere Bezeichnungen siehe Abschnitt 6.7)	6.8
<b>PA 11</b>	<b>Polyamid aus Aminoundecansäure</b>	6.8.1
<b>PA 12</b>	<b>Polyamid aus Dodekansäure</b>	6.8.1
<b>PA 46</b>	<b>Polyamid aus Polytetramethylen-Adipinsäure</b>	6.8.1
<b>PA 6</b>	<b>Polyamid aus <math>\epsilon</math>-Caprolactam</b>	6.8.1
<b>PA 610</b>	<b>Polyamid aus Hexamethylendiamin-Sebazinsäure</b>	6.8.1
<b>PA 612</b>	<b>Polyamid aus Hexamethylendiamin-Dodekansäure</b>	6.8.1
<b>PA 66</b>	<b>Polyamid aus Hexamethylendiamin-Adipinsäure</b>	6.8.1
<b>PA 69</b>	<b>Polyamid aus Hexamethylendiamin-Azelainsäure</b>	6.8.1
PAA	Polyacrylsäureester	6.6.1
PAC	Polyacetylen	6.18.5
<b>PAEK</b>	<b>Polyaryletherketon</b>	6.13
PAI	Polyamidimid	6.14.2
<b>PAN</b>	<b>Polyacrylnitril</b>	6.6.1
PANI	Polyanilin, Polyphenylenamin	6.18.5
PAR	Polyarylate	6.9.3.1
PARI	Polyarylimid	6.14.2

Kurzzeichen	Chemische Bezeichnung	Abschnitt
PB	Polybuten	6.2.8
PBA	Polybutylacrylat	6.6.1
PBI	Polybenzimidazol	6.14.1.3
PBMI	Polybismaleinimid	6.14.1.2
PBN	Polybutylennaphthalat	6.9.3.2
PBO	Polyoxadiabenzimidazol	6.14
<b>PBT</b>	<b>Polybutylenterephthalat</b>	6.9.2.2
<b>PC</b>	<b>Polycarbonat (aus Bisphenol-A)</b>	6.9.1.1
PCTFE	Polychlortrifluorethylen	6.5.1
PDAP	Polydiallylphthalat-Harz	6.20.4.5
PDCPD	Polydicyclopentadien	6.2.9.2
<b>PE</b>	<b>Polyethylen</b>	6.2.1
PE-HD	Polyethylen-High Density	6.2.1
PE-HMW	Polyethylen-High Molecular Weight	6.2.1
PE-LD	Polyethylen-Low Density	6.2.1
PE-LLD	Polyethylen-Linear Low Density	6.2.1
PE-MD	Polyethylen-Medium Density	6.2.1
PE-UHMW	Polyethylen-Ultra High Molecular Weight	6.2.1
PE-ULD	Polyethylen-Ultra Low Density	6.2.1
PE-VLD	Polyethylen-Very Low Density	6.2.1
PE-X	Polyethylen, vernetzt	6.2.2
PEA	Polyesteramid	6.15
PEDT	Polyethylendioxythiophen	6.18.5
PEEEK	Polyetheretheretherketon	6.13
PEEK	Polyetheretherketon	6.13
PEEKEK	Polyetheretherketonetherketon	6.13
PEEKK	Polyetheretherketonketon	6.13
<b>PEI</b>	<b>Polyetherimid</b>	6.14.2.2
PEK	Polyetherketon	6.13
PEKEKK	Polyetherketonetherketonketon	6.13
PEKK	Polyetherketonketon	6.13
<b>PEN</b>	<b>Polyethylennaphthalat</b>	6.9.3
PEOX	Polyethylenoxid	6.12
PESI	Polyesterimid	6.15
<b>PES</b>	<b>Polyethersulfon</b>	6.10.2
PESU	siehe PES	
<b>PET</b>	<b>Polyethylenterephthalat</b>	6.9.2.1
<b>PET-G</b>	<b>Polyethylenterephthalat, glykolmodifiziert</b>	6.9.2.1
<b>PF</b>	<b>Phenol-Formaldehyd-Harz</b>	6.20.3.2
PFA	Perfluoralkoxy	6.5.2.4



**Tabelle 1.1** Kunststoffe und Kautschuke (Fortsetzung)

Kurzzeichen	Chemische Bezeichnung	Abschnitt
PFMT	Polyperfluortrimethyltriazin-Kautschuk	6.22.10
PFU	Polyfuran	6.18.5
PHA	Polyhydroxyalkanoate	6.18.2
PHB	Polyhydroxybutyrat	6.18.2
PHV	Polyhydroxyvaleriansäure	6.18.2
<b>PI</b>	<b>Polyimid</b>	6.14
PIB	Polyisobutylen	6.2.8
PISO	Polyimidsulfon	6.14.2.3
<b>PK</b>	<b>Polyketon</b>	6.18.6
PLA	Polylactid	6.18.4
PMA	Polymethylacrylat	6.6.1
PMI	Polymethacrylimid	6.14.2
<b>PMMA</b>	<b>Polymethylmethacrylat</b>	6.6.2
PMMI	Polymethacrylmethylimid	6.6.3.1, 6.14.2
PMP	Poly-4-Methylpenten-1	6.2.9.1
PMS	Poly- $\alpha$ -Methylstyrol	6.3.1.1
PNF	Fluor-Phosphazen-Kautschuk	6.22.9
PNR	Polynorbornen-Kautschuk	6.22.3
PO	Polypropylenoxid-Kautschuk	6.22.5
PO	Allgemeine Bezeichnung für die Gruppe der Polyolefine, Polyolefin-Derivate und -Copolymeriste	6.2
<b>POM</b>	<b>Polyoxymethylen (Polyacetalharz, Polyformaldehyd)</b>	6.7
<b>PP</b>	<b>Polypropylen</b>	6.2.5
PPA	Polyphthalamid	6.8.3.1
PPB	Polyphenylenbutadien	6.18.5
<b>PPE</b>	<b>Polyphenylenether, alte Bezeichnung PPO</b>	6.11
PPMS	Poly-para-Methylstyrol	6.3.1.1
PPOX	Polypropylenoxid	6.12
PPP	Poly-para-Phenylene	6.18.5
<b>PPS</b>	<b>Polyphenylensulfid</b>	6.10.1
<b>PPSU</b>	<b>Polyphenylensulfon</b>	6.10.2
PPTA	Poly-p-Phenylenterephthalamid	6.8
PPV	Polyphenylenvinylene	6.18.5
PPY	Polypyrrol	6.18.5
PPYR	Polyparapyridin	6.18.5
PPYV	Polyparapyridinvinylene	6.18.5
<b>PS</b>	<b>Polystyrol</b>	6.3.1.1
PSAC	Polysaccharid, Stärke	6.18.1

Kurzzeichen	Chemische Bezeichnung	Abschnitt
<b>PSU</b>	<b>Polysulfon</b>	6.10.2
PT	Polythiophen	6.18.5
<b>PTFE</b>	<b>Polytetrafluorethylen</b>	6.5.1
PTHF	Polytetrahydrofuran	6.12
PTT	Polytrimethylenterephthalat	6.9.2.4
<b>PUR</b>	<b>Polyurethan</b>	6.17
PVAC	Polyvinylacetat	6.4.5
PVAL	Polyvinylalkohol	6.4.5
PVB	Polyvinylbutyral	6.4.5
<b>PVC</b>	<b>Polyvinylchlorid</b>	6.4.1, 6.4.2
PVDC	Polyvinylidenchlorid	6.4.5
<b>PVDF</b>	<b>Polyvinylidenfluorid</b>	6.5.1
PVF	Polyvinylfluorid	6.5.1
PVFM	Polyvinylformal	6.4.5
PVK	Polyvinylcarbazol	6.4.5
PVME	Polyvinylmethylether	6.4.5
PVMQ	Polymethylsiloxan-Phenyl-Vinyl-Kautschuk	6.22.6
PVP	Polyvinylpyrrolidon	6.4.5
PZ	Phosphazene-Kautschuk mit Phenoxygruppen	6.22.9
RF	Resorcin-Formaldehyd-Harz	6.20, 6.21.1
RTV	raumtemperatur-vernetzender Silikonkautschuk	6.22.6
<b>SAN</b>	<b>Styrol-Acrylnitril-Copolymer</b>	6.3.2
<b>SB</b>	<b>Styrol-Butadien-Copolymer</b>	6.3.2
SBMMA	Styrol-Butadien-Methylmethacrylat-Copolymer	6.3.2
SBR	Styrol-Butadien-Kautschuk	6.22.3
SBS	Styrol-Butadien-Styrol-Copolymer	6.3.2
SCR	Styrol-Chloropren-Kautschuk	6.22.3
SEBS	Styrol-Ethenbuten-Styrol-Copolymer	6.3.2
SEPS	Styrol-Ethenpropen-Styrol-Copolymer	6.3.2
SI	Silikone, Silikonharze	6.20
SIMA	Styrol-Isopren-Maleinsäureanhydrid-Copolymer	6.3.2
SIR	Styrol-Isopren-Kautschuk	6.20
SIS	Styrol-Isopren-Styrol-Block-Copolymer	6.3.2.1
SMAB	Styrol-Maleinsäureanhydrid-Butadien-Copolymer	6.3.2
<b>SMAH</b>	<b>Styrol-Maleinsäureanhydrid-Copolymer</b>	6.3.2
TCF	Thiocarbonyldifluorid-Copolymer-Kautschuk	6.22.7
TFEHFPVDF	Tetrafluorethylen-Hexafluorpropylen-Vinylidenfluorid-Copolymer (THV)	6.5.2
TFEP	Tetrafluorethylen-Hexafluorpropylen-Copolymer	6.5.2
TOR	Polyoctenamer	6.22.3

**Tabelle 1.1** Kunststoffe und Kautschuke (Fortsetzung)

Kurzzeichen	Chemische Bezeichnung	Abschnitt
<b>TPA</b>	<b>thermoplastische Elastomere auf Basis Polyamid</b>	6.19
<b>TPC</b>	<b>thermoplastische Elastomere auf Basis Copolyester</b>	6.19
TPE	thermoplastische Elastomere	6.19
TPE-A	siehe TPA	6.19
TPE-C	siehe TPC	6.19
TPE-O	siehe TPO	6.19
TPE-S	siehe TPS	6.19
TPE-U	siehe TPU	6.19
TPE-V	siehe TPV	6.19
<b>TPO</b>	<b>thermoplastische Elastomere auf Basis von Olefinen</b>	6.19
<b>TPS</b>	<b>thermoplastische Elastomere auf Basis Styrol</b>	6.19
<b>TPU</b>	<b>thermoplastische Elastomere auf Basis Polyurethan</b>	6.19
<b>TPV</b>	<b>thermoplastische Elastomere auf Basis von vernetztem Kautschuk</b>	6.19
<b>TPZ</b>	<b>weitere thermoplastische Elastomere</b>	6.19
UF	Harnstoff-Formaldehyd-Harz	6.20
<b>UP</b>	<b>ungesättigtes Polyester-Harz</b>	6.20
VCE	Vinylchlorid-Ethylen-Copolymer	6.4.3
VCMAK	Vinylchlorid-Ethylen-Methylmethacrylat-Copolymer	6.4.3
VCEVAC	Vinylchlorid-Ethylen-Vinylacetat-Copolymer	6.4.3
VCMAAN	Vinylchlorid-Maleinsäureanhydrid-Acrylnitril-Copolymer	6.4.3
VCMAH	Vinylchlorid-Maleinsäureanhydrid-Copolymer	6.4.3
VCMAI	Vinylchlorid-Maleinimid-Copolymer	6.4.3
VCMAK	Vinylchlorid-Methacrylat-Copolymer	6.4.3
VCMMMA	Vinylchlorid-Methylmethacrylat-Copolymer	6.4.3
VCOAK	Vinylchlorid-Octylacrylat-Copolymer	6.4.3
VCPAEAN	Vinylchlorid-Acrylatkautschuk-Acrylnitril-Copolymer	6.4.3
VCPE-C	Vinylchlorid-chloriertes Ethylen-Copolymer	6.4.3
VCVAC	Vinylchlorid-Vinylacetat-Copolymer	6.4.3, 6.4.4
VCVDC	Vinylchlorid-Vinylidenchlorid-Copolymer	6.4.3
VCVDCAN	Vinylchlorid-Vinylidenchlorid-Acrylnitril-Copolymer	6.4.3
VDFHFP	Vinylidenchlorid-Hexafluorpropylen-Copolymer	6.4.3
VE	Vinylester-Harz	6.20
VF	Vulkanfiber	6.18.1
VMQ	Polymethylsiloxan-Vinyl-Kautschuk	6.22.6
VU	Vinylesterurethan-Harz	6.20.1.3
XBR	Butadien-Kautschuk, Carboxylgruppenhaltig	6.22.3
XCR	Chloropren-Kautschuk, Carboxylgruppenhaltig	6.22.3
XF	Xylenol-Formaldehyd-Harz	6.20.1.1

Kurzzeichen	Chemische Bezeichnung	Abschnitt
XNBR	Acrylnitril-Butadien-Kautschuk, Carboxylgruppenhaltig	6.22.3
XSBR	Styrol-Butadien-Kautschuk, Carboxylgruppenhaltig	6.22.3

\* Für diese Polymere sind keine Kurzzeichen bekannt.

**Tabelle 1.2** Weichmacher, gebräuchliche

Kurzzeichen	Chemische Bezeichnung	Kurzzeichen	Chemische Bezeichnung
ASE	Alkylsulfonsäureester	DODP	Diocetyldecylphthalat
BBP	Benzylbutylphthalat	DOP, DEHP	Diocetylphthalat
DBA	Dibutyladipat	DOS	Diocetylsebacat
DBP	Dibutylphthalat	DOZ	Diocetylazelat
DBS	Dibutylsebacat	DPCF	Diphenylkresylphosphat
DCHP	Dicyclohexylphthalat	DPOF	Diphenyloctylphosphat
DEP	Diethylphthalat	DPP	Dipropylphthalat
DHXP	Dihexylphthalat	ELO	Epoxidiertes Leinöl
DIBP	Diisobutylphthalat	ESO	Epoxidiertes Sojabohnenöl
DIDP	Diisodecylphthalat	ODA	Octyldecyladipat
DINA	Diisononyladipat	ODP	Octyldecylphthalat
DMP	Dimethylphthalat	PO	Paraffinöl
DMS	Dimethylsebazat	TBP	Tributylphosphat
DNA	Dinonyladipat	TCEF	Trichlorethylphosphat
DNODP	Di-n-octyl-n-decylphthalat	TCF	Trikresylphosphat
DNOP	Di-n-octylphthalat	TIOTM	Triisooctyltrimellitat
DNP	Dinonylphthalat	TOF	Triocetylphosphat
DOA (DEHA)	Diocetyladipat, auch Diethylhexyladipat, DEHA nicht mehr gebräuchlich	TPP	Triphenylphosphat

## ■ 1.2 Grundeinheiten, ISO- und US-Einheiten

Längen								
		mm	m	km	in	ft	yd	mile
1 mm	=	1	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-6</sup>	0,0394	0,0033	–	–
1 m	=	10 <sup>3</sup>	1	10 <sup>-3</sup>	39,37	3,281	1,094	–
1 km	=	10 <sup>6</sup>	10 <sup>-3</sup>	1	39 370	3281	1094	0,6214
1 inch (Zoll)	=	25,40	0,0254	–	1	0,0833	0,0278	–
1 foot (Fuß)	=	304,8	0,3048	–	12	1	0,3333	–
1 yard	=	914,4	0,9144	–	36	3	1	–
1 statute mile (Landmeile)	=		1609	1,609	–	5280	1760	1

Flächen								
		cm²	m²	a	ha	km²	in²	ft²
1 cm²	=	1	10 <sup>-4</sup>	–	–	–	0,155	–
1 m²	=	10 <sup>4</sup>	1	0,01	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-6</sup>	1550	10,76
1 a	=	–	100	1	0,01	10 <sup>-4</sup>	–	1076
1 ha	=	–	10 <sup>4</sup>	100	1	0,01	–	–
1 km²	=	–	10 <sup>6</sup>	10 <sup>4</sup>	100	1	–	–
1 square inch	=	6,452	–	–	–	–	1	–
1 square foot	=	929	0,0929	–	–	–	144	1
1 square yard								

Volumen								
		cm <sup>3</sup>	dm <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	in <sup>3</sup>	ft <sup>3</sup>	yd <sup>3</sup>	gal (US) <sup>2)</sup>
1 cm <sup>3</sup>	=	1	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-6</sup>	0,061	–	–	–
1 dm <sup>3</sup> <sup>1)</sup>	=	10 <sup>3</sup>	1	10 <sup>-3</sup>	61,02	0,0353	–	0,2642
1 m <sup>3</sup>	=	10 <sup>6</sup>	10 <sup>3</sup>	1	61023	35,31	1,308	264,2
1 cubic inch	=	16,39	0,0164	–	1	–	–	–
1 cubic foot	=	–	28,32	0,0283	1728	1	0,037	7,841
1 cubic yard	=	–	764,6	0,7646	46656	27	1	202
1 gallon (US)	=	3785	3,785	–	281	0,1337	–	1

<sup>1)</sup> 1 Liter (l) = 1,0 dm<sup>3</sup>

Kraft						
			N	dyn <sup>2</sup>	kp	
Newton	1 N	=	1	10 <sup>5</sup>	0,101972	
Kilopond <sup>1)</sup>	1 kp	=	9,80665	980 665	1	
pound-force	1 lbf	=	4,44822		0,4536	kilogramme-force (kgf) = kp

<sup>1)</sup> Einheit nicht mehr zugelassen

Masse						
			g	kg	t	oz
1 g	=	1	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-5</sup>	0,0353	
1 kg	=	10 <sup>3</sup>	1	10 <sup>-3</sup>	35,27	2,205
1 t	=	10 <sup>6</sup>	10 <sup>3</sup>	1	–	2205
1 ounce (oz)	=	28,35	0,0284	–	1	0,0625
1 pound (lb)	=	453,6	0,4536	–	16	1

Metrisches Karat 1 k = 0,200 g bei Edelsteinen. Das Wort „Karat“ bedeutet bei Goldlegierungen

<sup>1</sup>/<sub>24</sub> Masseanteil Gold grain 1 gr = (<sup>1</sup>/<sub>700</sub>) lb = 0,0648 g

Druck							
		Pa = N/m <sup>2</sup>	bar	kp/cm <sup>2</sup> = at	atm	Torr	lbf/in <sup>2</sup>
1 Pa = 1 N/m <sup>2</sup>	=	1	10 <sup>-5</sup>	10,2 · 10 <sup>-6</sup>	9,869 · 10 <sup>-6</sup>	7,5 · 10 <sup>-3</sup>	145,05 · 10 <sup>-6</sup>
1 bar	=	10 <sup>5</sup>	1	1,02	0,987	750	14,505
1 kp/cm <sup>2</sup> = 1 at (techn. Atmosphäre) <sup>1)</sup>	=	98 100	0,981	1	0,968	735,5	14,224
1 atm (phys. Atmosphäre) <sup>1)</sup>	=	101 325*	1,013	1,033	1	760*	14,7
1 Torr <sup>1)</sup>	=	133,32	1,333 · 10 <sup>-3</sup>	1,36 · 10 <sup>-3</sup>	1,316 · 10 <sup>-3</sup>	1	0,01934
1 lbf/in <sup>2</sup>	=	6894,8	0,6895	0,0703	0,06804	51,715	1

<sup>1)</sup> Einheiten nicht mehr zugelassen; Werte gerundet, \* Wert genau, s. DIN 1314. Für den Druck gilt die Einheit Pascal (Pa) (DIN 1301)



**Energie (Arbeit, Wärmemenge)**

		J	kWh	kpm	PS <sup>h</sup>	kcal	Btu	Näheres S. DIN 1301 und DIN 1345
1 J = 1 WS = 1 Nm = 1 kg m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	=	1	277,8 · 10 <sup>-9</sup>	0,101972	377,5 · 10 <sup>-9</sup>	238,8 · 10 <sup>-6</sup>	984 · 10 <sup>-6</sup>	1 J = 1 Nm = 10 <sup>7</sup> erg  1 eV = 1,602 · 10 <sup>-19</sup> J
1 kWh	=	3,6 · 10 <sup>6</sup>	1	367 · 10 <sup>3</sup>	1,360	859,8	3412	
1 kpm <sup>1</sup>	=	9,80665	2,724 · 10 <sup>-6</sup>	1	3,704 · 10 <sup>-3</sup>	2,342 · 10 <sup>-3</sup>	9,294 · 10 <sup>-3</sup>	
1 PS <sup>h</sup> <sup>1)</sup>	=	2,648 · 10 <sup>6</sup>	0,7355	270 · 10 <sup>3</sup>	1	632,4	2509	
1 kcal <sup>1)</sup>	=	4186,8	1,163 · 10 <sup>-3</sup>	426,9	1,581 · 10 <sup>-3</sup>	1	3,968	
1 Btu (British Thermal Unit)	=	1055	293 · 10 <sup>-6</sup>	107,6	398,5 · 10 <sup>-6</sup>	0,252	1	

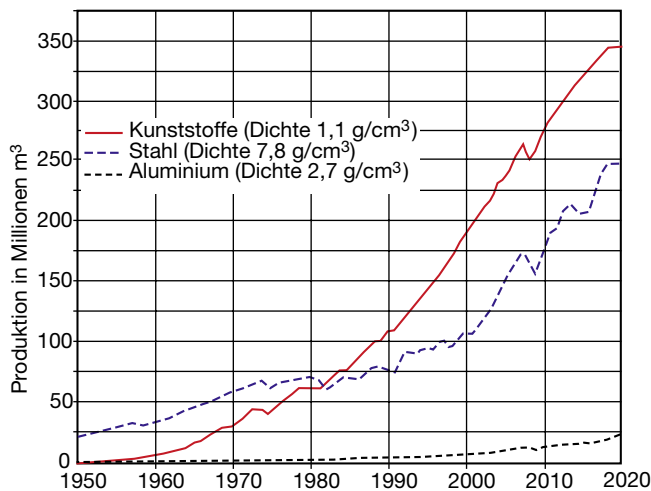
<sup>1)</sup> Einheiten nicht mehr zugelassen

**Leistung**

		W	kW	kpm/s	PS	hp	
1 W	=	1	10 <sup>-3</sup>	0,101972	1,36 · 10 <sup>-3</sup>	1,341 · 10 <sup>-3</sup>	1 W = 1 J/s = 10 <sup>7</sup> erg/s
1 kW	=	10 <sup>3</sup>	1	101,975	1,36	1,341	
1 kpm/s <sup>1)</sup>	=	9,80665	9,80665 · 10 <sup>-3</sup>	1	0,0133	0,0131	
1 PS <sup>1)</sup>	=	735,5	0,7355	75	1	0,986	
1 hp (horsepower)	=	745,7	0,746	76,04	1,014	1	1 hp = 550 ft lbf/s

## ■ 2.1 Wirtschaftliche Bedeutung der Kunststoffe

Kunststoffe haben als eigenständige Werkstoffgruppe neben Metallen und keramischen Werkstoffen eine sehr hohe technologische wie wirtschaftliche Bedeutung erlangt. Das beachtliche Wachstum dieser Werkstoffgruppe hat dazu geführt, dass Kunststoffe heute weltweit ein größeres Produktionsvolumen aufweisen als etwa Rohstahl und Aluminium (Bild 2.1).

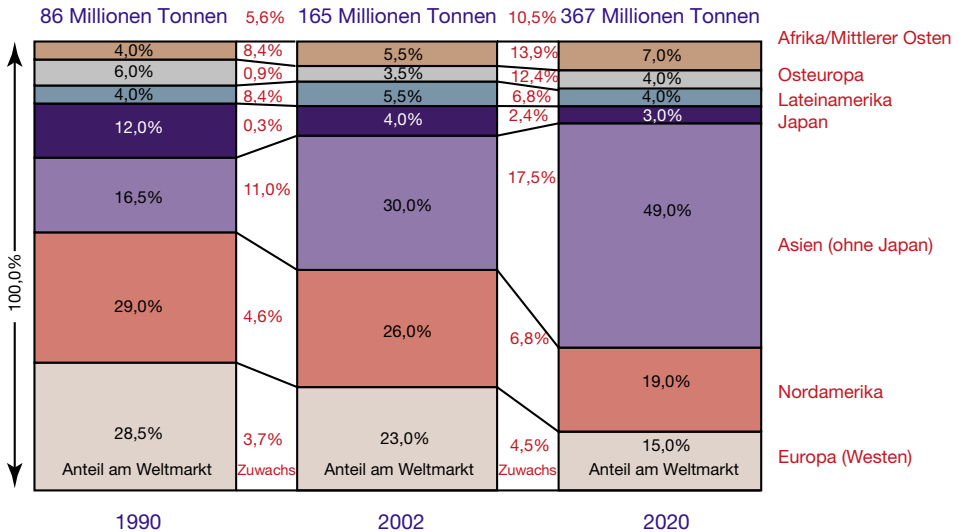


**Bild 2.1** Produktionsvolumen verschiedener Werkstoffe

Quelle: Plastics Europe, World Steel Association, The International Aluminium Association

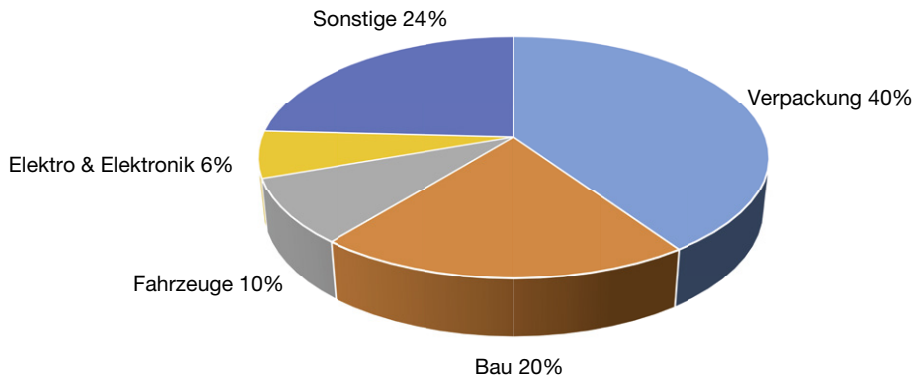
Bild 2.2 zeigt das rasante Wachstum der Kunststoffproduktion in den verschiedenen Regionen der Welt zwischen 1990 und 2020. Wir sind im 21. Jahrhundert unstrittig in der „Kunststoffzeit“ angekommen. Diese Werkstoffgruppe ist eine we-

sentliche Grundlage für die technologische Entwicklung und ein Indikator für das wirtschaftliche Wachstum einer Industriegesellschaft. Eine eindeutige Korrelation zwischen der Produktion dieses Werkstoffs und der wirtschaftlich-technologischen Leistungsfähigkeit einer Region lässt sich belegen.



**Bild 2.2** Welt-Kunststoffproduktion seit 1990  
Quelle: Plastics Europe

Eine Analyse der Haupteinsatzgebiete dieser Werkstoffgruppe am Beispiel Europa im Jahr 2020 (Bild 2.3) verdeutlicht die Vielfältigkeit der Anwendungen. Der Anteil Sonstiges mit 24,2% in Bild 2.3 umfasst Anwendungen in Landwirtschaft, Möbel, Haushalt, Freizeit, Sport, Medizin und Maschinenbau. Obwohl medizinische Anwendungen stark zunehmen, ist ihr Anteil weiterhin nur etwa 1 % der insgesamt verwendeten Menge an Kunststoffen. Kunststoffe haben in allen Bereichen der industriellen Produktion Einzug gefunden. Dabei sind es nicht immer die besonderen Gebrauchseigenschaften dieser Werkstoffgruppe, wie etwa das Leichtbaupotential oder die guten Isolationseigenschaften, die den Einsatz lohnenswert machen. Die wohl wichtigste Eigenschaft dieser Werkstoffgruppe sind die hierfür verfügbaren wirtschaftlichen Verarbeitungsverfahren. So erlaubt etwa das Spritzgießen die Fertigung höchst komplex geformter Bauteile mit einer Taktzeit von wenigen Sekunden bis zu einigen Minuten. Die wesentlichen Kosten für eine solche Fertigung entstehen aus den Abschreibungen der Fertigungseinrichtungen (Maschine und Werkzeuge) sowie aus den Kosten für Rohstoff und Energie. Mit steigender Stückzahl werden deshalb auch selbst aufwendige Produktionseinrichtungen höchst profitabel.



**Bild 2.3** Haupteinsatzgebiete für Kunststoffe in Europa (2020)  
Quelle: Plastics Europe

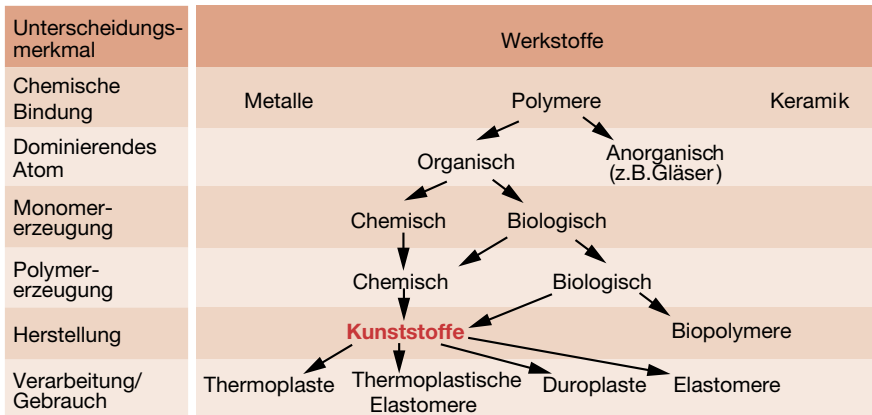
Betrachtet man die mit der Werkstoffgruppe Kunststoff arbeitende Industrie, so unterscheidet man sie in folgende drei Bereiche

- Kunststoff-Erzeugung,
- Kunststoff-Verarbeitung und
- Kunststoff-Maschinenbau.

Die Kunststoffindustrie trägt wesentlich zum Wohlergehen der europäischen Wirtschaft bei. Mehr als 1,6 Millionen Menschen arbeiten in fast 60 000 Unternehmen, die einen geschätzten Jahresumsatz von 360 Milliarden Euro in den 27 EU-Ländern erwirtschaften.

## ■ 2.2 Einordnung der Kunststoffe in das Gebiet der Werkstoffe

Kunststoffe sind organische oder halborganische Werkstoffe mit hoher Molmasse (Molekulargewicht), d. h. mit sehr großen Molekülen (Makromolekülen), die das spezifische Eigenschaftsbild dieser Werkstoffe wesentlich bestimmen. Bild 2.4 gibt die Einordnung der Kunststoffe in das Gesamtwerkstoffgebiet wieder, wobei als wichtige Unterscheidungsmerkmale die chemische Struktur, die Erzeugung und die Verarbeitungs- und Gebrauchseigenschaften verwendet werden.



**Bild 2.4** Einordnung der Kunststoffe in das Werkstoffgebiet

Im „Kunststoff-Taschenbuch“ werden die thermoplastischen Kunststoffe entsprechend ihrer Bedeutung im Schwerpunkt behandelt. Viele Ausführungen zur Werkstoffkunde der Kunststoffe gelten letztlich für alle polymeren Werkstoffe. Die begriffliche Einordnung ist in vielen Texten nicht einheitlich, so wird der Begriff Kunststoff und Polymer oftmals in gleicher Bedeutung verwendet. Nach unserem Verständnis benennt der Begriff Polymer die Gruppe aller Stoffe, die aus Makromolekülen bestehen. Der Begriff Kunststoff nimmt aus dieser Gruppe diejenigen Stoffe heraus, die chemisch synthetisiert wurden und als Werkstoffe Verwendung finden. Um einen polymeren Stoff als Werkstoff verwenden zu können, muss das Polymer mit weiteren Zusätzen (z.B. Verarbeitungshilfsmittel, Stabilisatoren, Pigmente, Füllstoffe) versetzt werden. Erst durch diesen Prozess der sog. „Aufbereitung“ entsteht aus dem Polymer ein Werkstoff – also ein Kunststoff.

Trotz dieser eindeutigen Definition gelingt auch in diesem Buch die exakte Begriffsunterscheidung zwischen Polymer und Kunststoff nicht immer. Dies hängt nicht zuletzt damit zusammen, dass selbst in der Sprache der Wissenschaft oder der Wirtschaftsstatistik die Zuordnungen nicht konsequent und eindeutig verwendet werden. So wird selbst in Werkstoffnormen häufig die Bezeichnung Polymer verwendet, obwohl eigentlich Kunststoffe behandelt werden. In solchen Fällen verbietet sich die Abänderung des Begriffs Polymer in Kunststoff, da sonst das Auffinden der Normen unmöglich wird.

Allgemein kann zum Werkstoffgebiet der Kunststoffe festgestellt werden:


- Kunststoffe werden in einer großen Typenvielfalt hergestellt, die von keiner anderen Werkstoffgruppen annähernd erreicht wird. Sie repräsentieren eine extrem große Spannweite an Eigenschaftsprofilen. Der in der Anfangszeit der Kunststoffentwicklung etwas euphorisch geprägte Slogan **„Werkstoffe nach Maß“** ist Realität geworden. In nahezu allen Bereichen des menschlichen Lebens sind Kunststoffe als Werkstoffe oder spezielle Funktionsstoffe etabliert.

- Aufgrund ihrer komplexen chemischen und morphologischen Strukturen sowie ihrer großen Variationsbreite hinsichtlich der Zusammensetzung und stofflichen Modifizierbarkeit ergibt sich ein komplexes **Stoffverhalten**, das beim Einsatz und bei der Verarbeitung der Kunststoffe zu berücksichtigen ist. Beispiele für zu berücksichtigende Eigenschaften sind die Visko- und Entropieelastizität, das nicht-newtonsche Fließen, ein komplexes Alterungsverhalten, die Teil- und Flüssigkristallinität, orientierungs- oder modifizierungsbedingte Anisotropie, Spannungsrissbildung u. a. m. Zur umfassenden Beschreibung der Eigenschaften sind daher vielfältige Prüfverfahren erforderlich, um aussagefähige Eigenschaftswerte (Single-Point-Daten) oder Eigenschaftsfunktionen (Multi-Point-Daten) zu erhalten (s. Kapitel 3).
- Für die Aufbereitung, Ver- und Bearbeitung sowie Nachbehandlung der Kunststoffe kann eine große Anzahl verschiedenartiger **Verfahren** der Kunststofftechnik eingesetzt werden. Es dominieren die Urform- und Umformverfahren, die eine hochproduktive und energiesparende Fertigung mit sehr guter Materialausnutzung sowie geringer Anzahl von Verfahrensschritten ermöglichen. Die Stoffverformung und -umwandlung (z. B. Härten, Vulkanisieren) läuft bei der Verarbeitung u. U. gleichzeitig ab. Die Produkteigenschaften werden erheblich durch die Verfahrensbedingungen beeinflusst. Die Verfahrensoptimierung und Qualitätssicherung sollen daher in der Kunststoffverarbeitung eine angemessene Gewichtung haben (s. Kapitel 4).
- Die effiziente **Gestaltung** von Kunststoffteilen ist ohne Berücksichtigung der stofflichen Realisierbarkeit und Fertigungsverfahren nicht möglich. Dies sowie der hohe Grad der Werkstoff- und Geometriespezialisierung vieler Fertigungsverfahren zwingen dazu, Gestaltungs-, Werkstoff- und Verfahrensentscheidungen in enger Wechselbeziehung zu treffen (s. Kapitel 5).

Die Herstellkosten von Produkten aus Kunststoff werden wesentlich durch die **Werkstoffkosten** bestimmt. Zunehmend müssen neben ökonomischen Zielsetzungen auch ökologische Anforderungen bei der Werkstoffauswahl berücksichtigt werden (s. Kapitel 6). Eine zweckmäßige Werkstoffauswahl und Material sparende Konstruktion sind wirksame Möglichkeiten um eine wirtschaftliche Fertigung und ökologisch sinnvolle Kunststoffanwendung zu erzielen. Die Funktionsintegration hilft ebenfalls, Fertigungsschritte und damit Fertigungskosten einzusparen. Im gleichen Sinne wirkt sich eine recyclinggerechte Erzeugniskonstruktion aus.

In der überwiegenden Zahl finden Kunststoffe Anwendung in Systemen, in denen sie eine lasttragende, schützende oder trennende Funktion übernehmen. Dabei stehen die mechanischen Eigenschaften der Kunststoffe im Vordergrund. Wenn der verwendete Werkstoff die Tragstruktur des Bauteils wesentlich bestimmt, spricht man von einem „Strukturwerkstoff“.





In letzter Zeit sind Kunststoffe auch stärker als „Funktionswerkstoffe“ zum Einsatz gekommen. Sie zeichnen sich z. B. durch optische, elektrische oder besondere mechanische Eigenschaften aus. Zu ihnen zählen u. a. UV-Licht-härtende Harze, photoadressierbare Makromoleküle und elektrisch schaltbare Polymere. Im Allgemeinen spricht man von Funktionspolymeren (besser: Funktionskunststoffen). Im Bauteil werden die Funktionswerkstoffe lokal angeordnet, etwa schicht- oder punktförmig. Sie übernehmen eine spezielle Funktion (etwa die der Datenspeicherung). Dieser Werkstoffgruppe wird eine stark wachsende Zukunft vorhergesagt. Wegen der derzeit jedoch noch sehr speziellen Anwendungen und Eigenschaften wird diese Werkstoffgruppe nicht eingehender in diesem Taschenbuch behandelt.

Historisch bedingt werden Textilien nicht zum Kunststoffgebiet gezählt, da die Erzeugung textiler Produkte früher ausschließlich aus Naturstoffen erfolgte. Später adaptierte die Textiltechnik ihre Produktionsverfahren auch auf solche Produkte, die aus Kunststoffen hergestellt werden.

Ebenso findet sich vielfach eine historisch gewachsene Abgrenzung zwischen den thermo- und duroplastischen Kunststoffen einerseits und den Elastomeren andererseits. Spätestens mit der Entwicklung der thermoplastischen Elastomere wurde deutlich, dass diese Abgrenzung keine technische Begründung hat.

In der Kunststoffverarbeitung lassen sich drei charakteristische Phasen unterscheiden:

- Aufbereitung,
- Verarbeitung und Bearbeitung sowie
- Nachbearbeitung und Nachbehandlung.

In der Aufbereitung werden die Kunststoff-Rohstoffe oder Vorprodukte in verarbeitungsfähige Formmassen überführt, die nach der Verarbeitungsphase als eigentliche Produktwerkstoffe mit *Formstoffe* bezeichnet werden. Erfolgt während der Verarbeitung eine chemische Reaktion zur Stoffumwandlung, so sind Formmassen reaktive *Vorprodukte*, die sich von den angestrebten Werkstoffen völlig unterscheiden. Anderenfalls liegt stoffliche Identität vor. Falls erforderlich, werden in einer zweiten Verarbeitungsstufe Kunststoffhalbzeuge durch Umformen, Spanen, Schweißen u. a. zu Enderzeugnissen verarbeitet bzw. Einzelteile (Formteile, Werkstücke) und/oder Halbzeuge zu kompletten Enderzeugnissen montiert oder konfektioniert. In der Nachbehandlungsphase erfolgen, je nach Erfordernis, die Fertigbearbeitung (z. B. Entgraten), die Oberflächenbehandlung und -veredlung (z. B. Bedrucken, Beflocken, Metallisieren) und Stoffeigenschaftsänderung (z. B. Konditionieren, Tempern). Formmassen werden je nach Art, Zustand und äußerer Darbietungsform als Pulver, Gieß, Dryblend, Agglomerat, Granulat (Pellet), Prepreg, Premix, Paste (Plastisol), Lösung, Suspension, Emulsion, Latex u. a. bezeichnet.

## ■ 2.3 Aufbau der Kunststoffe

Die Eigenschaften von Stoffen lassen sich aus ihrer Struktur erklären. Kunststoffe besitzen die größte Strukturvielfalt aller vom Menschen genutzten Werk- und Funktionsstoffe. Für synthetische oder durch stoffliche Abwandlung hergestellte Kunststoffe gelten die gleichen Strukturierungsprinzipien wie für Biopolymere, wie z.B. Eiweiße oder Kohlenhydrate, die infolge ihrer vielfältigen Strukturvariationen zur Basis des Lebens wurden. Zur fachlichen Orientierung im Kunststoff- und Kautschukgebiet und zur Eigenschaftsbewertung sind Elementarkenntnisse der Polymerstruktur notwendig. Nachfolgend werden diese in möglichst einfacher und kurzgefasster Weise dargestellt, ohne dabei immer Anspruch auf Vollständigkeit und akademische Akkuratessse erheben zu wollen. In den weiteren Kapiteln werden diese Ausführungen durch die Angabe detaillierter Struktur-Eigenschafts-Zusammenhänge ergänzt und angewendet.

### 2.3.1 Chemische Struktur (Konstitution und Konfiguration der Makromoleküle)

Polymere sind organische Makromoleküle, die aus vielen sich wiederholenden Grundbausteinen bestehen. Sie werden durch verschiedene Bildungsreaktionen aus niedermolekularen Ausgangsstoffen (*Monomeren*) synthetisiert. Die überwiegende Art der chemischen Bindung bei Polymeren ist die Atombindung (kovalente Elektronenpaarbindung). Als weitere chemische Bindung kommt auch noch die Ionenbindung vor, allerdings in sehr seltenen Fällen. Die gebundenen, sog. ionischen Polymere, sind *Polyelektrolyte*, falls die Ionenkonzentration wasserlösliche Polymere bedingt. Sie werden Ionomere genannt, wenn die geringen Konzentrationen an ionisch dissoziierten Bindungen zu wasserunlöslichen Polymeren führt.

Am atomaren Aufbau von Polymeren sind hauptsächlich die Nichtmetallelemente Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H) und Sauerstoff (O) beteiligt. Relativ häufig treten auch Stickstoff (N), Chlor (Cl), Fluor (F) und Schwefel (S) auf (*Heteroatome*). Sog. halborganische Polymere enthalten die Halbmetallelemente Silizium (Si), als Silikon oder Polysiloxane bezeichnet, und Bor (B). Andere Elementarzusammensetzungen sollen wegen ihrer sehr speziellen Bedeutung hier nicht betrachtet werden. Bereits die bisher besprochenen Strukturmerkmale erklären das Eigenschaftsbild reiner organischer Polymere:

- geringe elektrische Leitfähigkeit (elektrische Isolatoren),
- geringe Wärmeleitfähigkeit (thermische Isolatoren),
- spezifisch leichte Werkstoffe (Dichte 0,8 bis 2,2 g/cm<sup>3</sup>),
- begrenzte thermische Beständigkeit, da die Aufspaltung der Elektronenpaarbindung irreversibel ist.



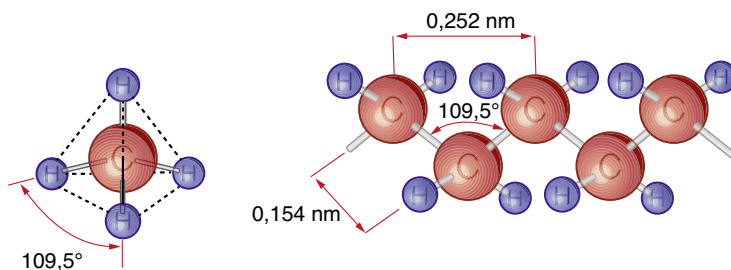


Weiterhin haben die Konformation und Konfiguration der Makromoleküle großen Einfluss auf die Eigenschaften der fertigen Bauteile.

### 2.3.1.1 Konformation

Die Konformation beschreibt die räumliche Anordnung der drehbaren Bindungen an die Molekülkette (meist: Kohlenstoffkette), die durch die Polarität, Beweglichkeit und Regelmäßigkeit der Makromoleküle bestimmt wird. Kohlenstoffatome z. B. sind vierwertig. Das bedeutet, dass sie mit bis zu vier Substituenten verbunden werden können und sich eine tetraedrische Struktur bildet.

Das wohl bekannteste Beispiel für eine Tetraederstruktur ist Methan,  $\text{CH}_4$ , das rechts in Bild 2.5 schematisch dargestellt ist. Es ist zu erkennen, dass die tetraedrische Anordnung der Substituenten, hier Wasserstoff, zu einem Bindungswinkel von  $109,5^\circ$  führt. Dieser Winkel wird auch zwischen den Kohlenstoffatomen im Kettenmolekül beibehalten, wie im selben Bild auf der rechten Seite dargestellt. Ebenfalls zu erkennen ist, dass jede Achse der Kohlenstoffkette frei rotieren kann.



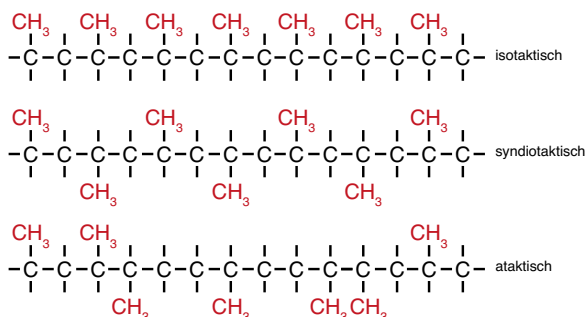
**Bild 2.5** links: Schematische Darstellung von Methan ( $\text{CH}_4$ ), rechts: Ausschnitt aus einem Polyethylenmolekül

### 2.3.1.2 Konfiguration

Die Konfiguration liefert Informationen über die Verteilung und räumliche Anordnung der Atome im Molekül. Bei Polymeren, die aus asymmetrischen Monomeren aufgebaut sind, ist es während der Polymerisierung möglich, die Seitengruppen in unterschiedlichen Richtungen zur Kette anzuordnen. Diese in bestimmten Intervallen wiederkehrende Anordnung bezeichnet man als Taktizität. Die Polymere, bei denen die Seitengruppen alle in eine Richtung zeigen, werden als isotaktisch bezeichnet und am Beispiel Polypropylen (PP) wie folgt gekennzeichnet: PP-I. Zeigen die Seitengruppen alternierend in die eine und andere Richtung, werden sie als syndiotaktisch bezeichnet (z.B. PP-S). Bei regelloser Anordnung wird von einem ataktischen Aufbau gesprochen (z. B. PP-R).

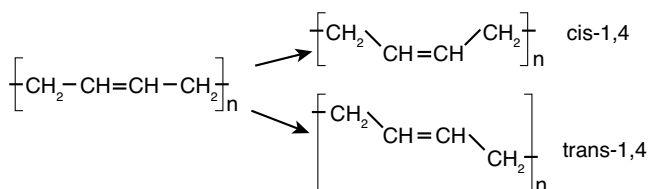
Bild 2.6 stellt die drei unterschiedlichen Taktizitäten am Beispiel von Polypropylen dar. Die Taktizität ist für die erreichbare Kristallinität des Polymers verantwortlich. Ein Polypropylen mit hohem isotaktischem Anteil z. B. kann auch einen hohen

Kristallinitätsgrad erreichen und verfügt dann über eine hohe Steifigkeit, Festigkeit und Härte.



**Bild 2.6** Unterschiedliche Polypropylenkonfigurationen

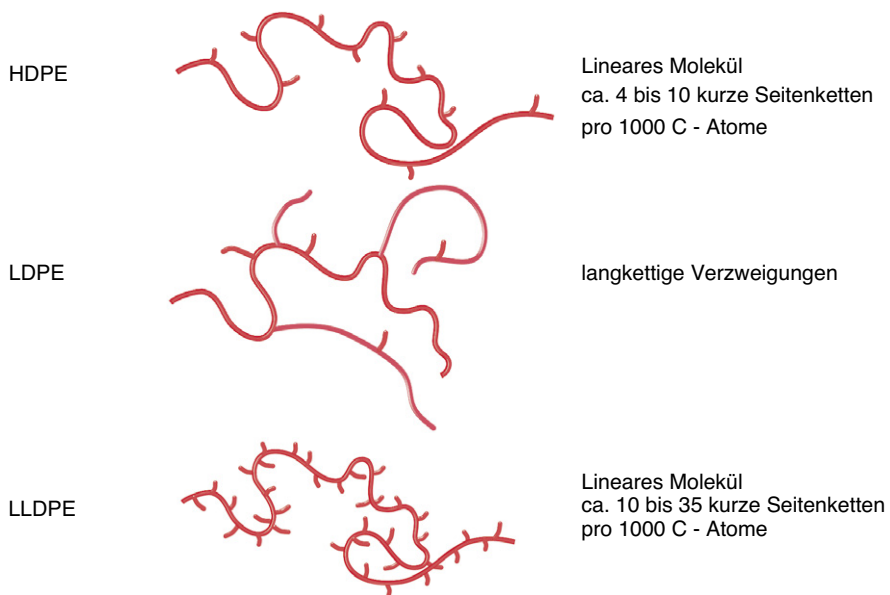
Bei Kunststoffen mit einer Kohlenstoff-Doppelbindung kommt es zu einer anderen geometrischen Anordnung. Die Doppelbindungen schränken die Rotation der Kohlenstoffatome um die Hauptkette ein, wodurch verschiedene, sog. Stereoisomere, entstehen können. Die Seitengruppen können auf der gleichen Seite (cis-) oder auf der gegenüberliegenden Seite (trans-) der Kette angeordnet sein, wie schematisch in Bild 2.7 dargestellt ist. Die Anordnung als cis-1,4-Polybutadien führt zu einem sehr elastischen und gummiartigen Materialverhalten, wohingegen die trans-1,4-Polybutadien-Struktur zu einem ledrigen und zähen Materialverhalten führt. Cis-1,4-Polybutadien kann daher z. B. für die Herstellung der Außenlauffläche von Autoreifen eingesetzt werden. Trans-1,4-Polybutadien wird hingegen für die Außenschale von Golfbällen verwendet. Die gleiche räumliche Anordnung kommt bei Naturkautschuken wie z. B. dem Polyisopren vor. Naturkautschuk (NR) ist chemisch ein cis-1,4-Polyisopren und ein wichtiger Gummiausgangsstoff. Es wird z. B. für den Reifenkörper eingesetzt und für die Herstellung von „Gummi“-Handschuhen oder Kondomen verwendet.



**Bild 2.7** Schematische Darstellung der Strukturformeln von cis-1,4- und trans-1,4-Polybutadien-Molekülen

### 2.3.1.3 Konstitution

Bei chemischen Reaktionen entstehen Verzweigungen. Art und Länge der Verzweigungen werden durch die gewählte Polymeraufbaureaktion (Polymerisation) gesteuert. Die Kettenverzweigungen beeinflussen die finale Struktur, die Kristallinität und damit die Eigenschaften des Kunststoffes. Bild 2.8 stellt schematisch verschiedene molekulare Strukturen von Polyethylen (PE) gegenüber.

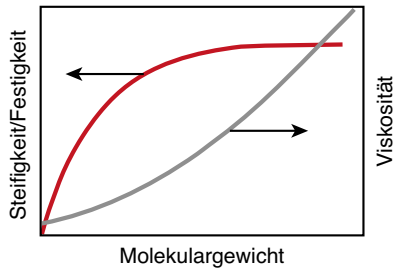


**Bild 2.8** Molekulare Struktur verschiedener Polyethylene (schematisch)

Polyethylen hoher Dichte (PE-HD, high density polyethylene) weist zwischen 5 und 10 kurze Seitenketten pro 1.000 Kohlenstoffatomen auf. Polyethylen niedriger Dichte (PE-LD, low density polyethylene) besitzt die gleiche Anzahl an Seitenketten. Diese sind allerdings deutlich länger und meist noch weiter verzweigt. Polyethylen niedriger Dichte mit linearem Aufbau (PE-LLD, linear low density polyethylene) hat zwischen 10 und 35 kurze Seitenketten pro 1000 Kohlenstoffatome. Molekülketten mit weniger und auch kürzeren Seitenverzweigungen können leichter kristallisieren und haben daher auch höhere Dichten.

Die Eigenschaften von Kunststoffen sind neben der Struktur auch stark vom Molekulargewicht der Ketten abhängig. Polystyrol (PS) ist z.B. bei einem Polymerisationsgrad (Anzahl der Monomereinheiten in einem Polymer) von 1000 Atomen steif und spröde. Bei einem Polymerisationsgrad von 10 ist PS hingegen weich und klebrig. Bild 2.9 stellt die Abhängigkeit der mechanischen und rheologischen Eigenschaften vom Molekulargewicht dar. Molekülketten solcher Ausdehnung beeinflussen in erheblichem Maße die Fließfähigkeit der Kunststoffe im Schmelzezu-

stand oder in Lösung. Es gibt daher Formmassekennwerte bzw. Kennwertfunktionen, die zur praktischen Beschreibung des Fließverhaltens dienen und in Korrelation zur Molmasse stehen.



**Bild 2.9**

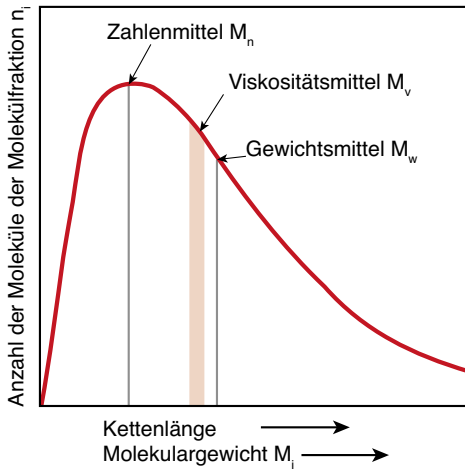
Einfluss des Molekulargewichts auf die mechanischen und rheologischen Eigenschaften

Hohe Molmassen ergeben vor allem bei schlag- oder stoßartiger Belastung größere Zerreißfestigkeiten der Kunststoffe. Dabei weisen sie aber auch eine höhere Viskosität auf, die die Fließfähigkeit verringert. Zwischen der Verarbeitbarkeit (Fließverhalten) und den Anwendungseigenschaften müssen daher häufig Kompromisse getroffen werden. Außerdem kann für bestimmte Verarbeitungsprozesse (z.B. Spritzgießen) eine möglichst enge Molmassenverteilung notwendig werden, damit die Viskosität in kontrollierten Grenzen vorliegt. Dafür sind Spezialformmassen verfügbar.

Die Größe von Makromolekülen ist ein wichtiger Strukturparameter. Bei der Polymerbildungsreaktion entstehen bei den meisten synthetisch hergestellten Linearpolymeren Molekülketten mit unterschiedlicher Länge. Es handelt sich um Gemische unterschiedlich großer Molekülfractionen, d.h. um *polymolekulare* („polydisperse“) *Stoffsysteme*. Eine einheitliche Molekülgröße gibt es nicht. Die Angabe einer Molmasse (hier: relative Molmasse) ist daher immer ein statistischer Mittelwert, dessen Zahlenwert vom Verteilungsspektrum der Einzelmoleküle und der Art der Mittelwertbildung abhängt. Mit Ausnahme von einigen natürlichen Polymeren, weisen die meisten Polymere eine Molekulargewichtsverteilung, wie in Bild 2.10 dargestellt, auf. Für eine solche Verteilungsfunktion kann ein

Zahlen-, Gewichts- und Viskositätsmittelwert definiert werden. Für Eigenschaftskorrelationen ist der Gewichtsmittelwert ( $M_w$ ) in der Praxis von größerer Bedeutung. Zur Beschreibung der Uneinheitlichkeit von Polymeren wird noch der Zahlenmittelwert ( $M_n$ ) benötigt, der definiert ist als

$$\bar{M}_n = \frac{\sum m_i}{\sum n_i} = \frac{\sum n_i \cdot M_i}{\sum n_i}$$

**Bild 2.10**

Molekulargewichtsverteilung eines typischen Thermoplasten

wobei  $m_i$  die Gesamtmasse aller Moleküle,  $M_i$  das Molekulargewicht und  $n_i$  die Anzahl der Moleküle mit  $i$  Wiederholungseinheiten darstellt. Der Gewichtsmittelwert ist definiert als

$$\bar{M}_w = \frac{\sum n_i \cdot M_i^2}{\sum n_i \cdot M_i} = \frac{\sum m_i \cdot M_i}{\sum m_i}$$

Der Viskositätsmittelwert wird berechnet nach

$$\bar{M}_v = \left( \frac{\sum m_i \cdot M_i^{\alpha+1}}{\sum m_i} \right)^{1/\alpha}$$

wobei  $\alpha$  eine Materialkonstante ist, die die *intrinsische Viskosität*  $[\eta]$  mit dem Molekulargewicht korreliert. Dieser Zusammenhang wird manchmal auch als *Mark-Houwink Gleichung* bezeichnet und wie folgt angegeben

$$[\eta] = k \bar{M}_v^\alpha$$

Es besteht eine lineare Abhängigkeit des Molekulargewichts von der Viskosität. Diese ist bei geringem Molekulargewicht bzw. kurzen Ketten  $\alpha = 1$  und folgt bei hohem Molekulargewicht aufgrund der dann vorliegenden Verschlaufungen dem Potenzgesetz (Power Law) ( $\alpha = 3,4$ ). Wie am Beispiel in Bild 2.10 dargestellt, weisen die meisten Kunststoffe Ketten unterschiedlicher Länge auf. Sie sind also polydispers und werden wie folgt charakterisiert

$$\bar{M}_w > \bar{M}_v > \bar{M}_n$$

In wenigen Fällen bestehen Kunststoffe aber auch aus Ketten gleicher Länge (monodisperse Kunststoffe). Diese werden folgendermaßen angegeben

$$\bar{M}_w = \bar{M}_v = \bar{M}_n$$

Ein Maß für die Breite der Molekulargewichtsverteilung bzw. die Einheitlichkeit der Kettenlänge stellt die *molekulare Uneinheitlichkeit*  $U$  dar, für die gilt


$$U = \frac{\bar{M}_w}{\bar{M}_n} - 1$$

Die Breite der Molekulargewichtsverteilung hat einen signifikanten Einfluss auf die mechanischen und rheologischen Eigenschaften der Kunststoffe. Kunststofftypen mit geringer molekularer Uneinheitlichkeit weisen z.B. höhere Festigkeitswerte und bessere Fließfähigkeit auf. Tabelle 2.1 gibt einen Überblick über die molekulare Uneinheitlichkeit verschiedener Kunststoffe.

**Tabelle 2.1** Molekulare Uneinheitlichkeit in Abhängigkeit von der Polymerbildungsreaktion

Polymere	$\frac{\bar{M}_w}{\bar{M}_n}$
Molekulareinheitliche Polymere	1
Polykondensate und Polyaddukte	2
Vinylpolymerisate	2 – 5
Stark verzweigte Polymere	20 – 50

Ab welcher Molmasse spricht man von Polymeren? Geht man von der Molekülgröße aus, ab der sich Molekülverschlaufungen (engl. entanglements) in Schmelzen und Lösungen nachweisen lassen, so kann die untere Grenze der Molmasse etwa mit  $10^4$  g/mol angegeben werden. Molekülverschlaufungen sind als temporäre physikalische Vernetzungsstellen anzusehen, die im Vergleich zu niedermolekularen Stoffen qualitativ neue Stoffeigenschaften (z.B. Entropieelastizität) ergeben. Eine obere Grenze der Polymermolmasse ist nicht festlegbar. Technisch genutzte Kunststoffe liegen zwischen  $10^4$  bis  $10^7$ , meist  $5 \cdot 10^4$  bis  $5 \cdot 10^5$  g/mol. Makromoleküle, die im Übergangsgebiet zwischen niedermolekularen Produkten und Kunststoffen etwa bei  $10^2$  bis  $10^4$  g/mol liegen, werden als Oligomere bezeichnet. Um eine anschauliche Vorstellung von solchen Riesenmolekülen im gestreckten Zustand zu erhalten, sollte man für technisch genutzte Kunststoffe 1 mm dicke Fäden von 2 bis 200 m Länge annehmen. Spezielle Biopolymere können um mehrere Größenordnungen längere Moleküle enthalten.



Zu den Polymerbildungsreaktionen werden nachfolgend nur einige kurzgefasste Hinweise gegeben. Die Bildungsreaktionen für Makromoleküle werden durch geeignete Reaktionsbedingungen (Temperatur, Druck, Monomerkonzentration, mediale Reaktionsumgebung) sowie durch aktivierende bzw. hemmende und strukturregelnde Zusätze (Katalysatoren, Aktivatoren, Beschleuniger, Inhibitoren, Strukturregler) gesteuert. Während der *Polymerisation* verknüpfen sich Monomere durch Aufspaltung von Mehrfachbindungen oder Ringöffnungen über eine Kettenreaktion zu *Polymerisaten*. Polykondensation ist die Reaktion, bei der die Monomere durch Abspaltung von Reaktionsprodukten (z.B. Wasser) über eine Stufenreaktion zu Polykondensaten verbunden werden. In der *Polyaddition* verknüpfen sich die Monomere durch intermolekulare Wanderung eines Wasserstoffatoms ohne Abspaltung von Reaktionsprodukten über eine *Stufenreaktion* zu *Polyaddukten*. Ein Beispiel hierfür ist die Urethanreaktion. Darüber hinaus gibt es eine Reihe anderer Reaktionstypen, auf die nicht eingegangen wird. Eine eindeutige Zuordnung von Polymeren zu den Reaktionstypen ist nicht immer möglich, da die Synthese auf unterschiedliche Weise erfolgen kann. So kann z.B. die Herstellung von Polyoxymethylen (POM) nach allen oben erwähnten Reaktionstypen erfolgen. Bei anderen Polymeren, wie z. B. Polyamiden (PA 6), treten in verschiedenen Synthesestufen verschiedene Reaktionsmechanismen wie Polykondensation und Polymerisation auf.

Technisch unterscheidet man bei der Polymerisation in Abhängigkeit von der medialen Reaktionsumgebung zwischen Masse- bzw. Substanzpolymerisation, Suspensions-, Emulsions- und Lösungspolymerisation. Wenn die Polymerisationsart von Bedeutung für das Eigenschaftsbild der Polymerisate ist, erfolgt eine entsprechende Kennzeichnung. Analoges gilt für die Polykondensation und die Polyaddition.

Durch eine geeignete Reaktionsführung (z.B. Stereokatalyse; Metallocen-Katalysatoren) sind bei technischen Polymeren verschiedene Strukturen realisierbar. Daraus ist leicht ableitbar, welche Eigenschaftsvielfalt bei gleicher Elementarzusammensetzung eines Kunststoffs möglich ist. Während z.B. das weichgummiartige, amorphe, ataktische (Random-) PP-R wenig praktische Bedeutung erlangt hat, ist das härtere teilkristalline, isotaktische PP-I ein Thermoplastkunststoff mit großer Anwendungsbreite. Sog. schlagzähe Polypropylene sind u. U. Mischstrukturen zwischen diesen Extremen.

In der technischen Synthese ist 100%iges PP-I beispielsweise kaum herstellbar. Der ataktische Anteil kann als heptanlösliche Phase bestimmt und in Form des Isotaxie-Index als Formmassekennwert angegeben werden.

### 2.3.1.4 Kunststoff-Hauptgruppen

Im Folgenden werden die Hauptgruppen der Kunststoffe vorgestellt, die heutzutage eingesetzt werden. In Kapitel 6 werden viele dieser Kunststoffe bezüglich ihrer Eigenschaften und Verarbeitungsmöglichkeiten ausführlicher behandelt.

Nennenswert sind auch lineare Homopolymerisate, die entweder aus ungesättigten Monomeren direkt polymerisiert werden bzw. durch polymeranaloge Stoffumwandlung entstehen. Für letztere Polymere stehen Polyvinylalkohol und die Polyvinylacetale, die aus Polyvinylacetat chemisch abgewandelt werden. Kombiniert man die Monomere, so ergeben sich eine entsprechende Vielfalt von Copolymeren.

Im Sprachgebrauch werden diese Kunststoffe auch nach anderen Merkmalen eingeordnet. So werden z.B. alle Kunststoffe mit olefinischen Ausgangsstoffen als Polyolefine (PO) zusammengefasst: PE, PP, PB, PMP und PIB.

Sind Heteroatome (z.B. Sauerstoff) in der Hauptkette enthalten, ergeben sich Polyacetale und Polyether. Werden zusätzlich „sperrige“ Aromatenbausteine eingefügt (Polyarylether, Polyaryletherketone), so wird die Wärmeformbeständigkeit dieser Polymere durch das steifere Makromolekül erheblich erhöht.

In der Anfangszeit der Kunststoffentwicklung wurden durch eine stoffliche Abwandlung von Naturprodukten, wie z.B. Cellulose, technisch interessante Kunststoffe gewonnen, die teilweise noch heute oder wieder eingesetzt werden. Das steife Cellulosemolekül erschwert eine thermoplastische Verarbeitung, sodass diese Produkte mit Weichmachern oder anderen Polymeren abgemischt werden. Die starke Polarität dieser Verbindungen bedingt u. a. eine große Wasseraufnahme, ja sogar Wasserlöslichkeit (z.B. Carboxymethylencellulosen (CMC) als Tapetenkleister).

Polyamide sind lineare Polykondensate, die u. a. als Konstruktionswerkstoffe, Chemiefaser- und Folienstoffe weite Verbreitung finden. Einige dieser Polymere sind infolge Wasserstoffbrückenbindungen und aromatischer Anteile besonders wärmeformbeständig. Sie haben allerdings auch eine vergleichsweise große Wasseraufnahme. Durch Variation der unpolaren Methylenanteile  $[-CH_2-]$  sind nahezu alle Übergangsstufen zwischen Polyolefinen und Polyamiden mit hoher Amidgruppenkonzentration  $[-NHCO-]$  möglich. Eine Vielzahl von Copolyamiden ergänzen die Eigenschaftspalette.

Lineare Polyester sind ebenfalls Polykondensate, die technisch aber nur als aromatenhaltige Polyarylester größere Bedeutung erlangten. Spezielle Copolyester haben so steife Molekülsegmente (Mesogene), dass sie auch im flüssigen Zustand anisotrop geordnet sind und damit sog. flüssigkristalline, eigenverstärkte Polymere (LCP) darstellen.

Die größte Molekülsteifigkeit wird durch die chemische Struktur der Polyimide verwirklicht. Einige Typen (z.B. PPI, PBI, PBMI) sind nicht mehr thermoplastisch verarbeitbar. Sie besitzen sehr hohe Wärmealterungs- und Wärmeformbeständigkeiten und sind meist Leiter- oder Halbleiter-Polymere.





Eine technisch wichtige Gruppe von thermoplastischen Kunststoffen sind die Polyarylethersulfone und Polyarylsulfide. Als Besonderheit der chemischen Struktur ist hierbei die Kombination von aromatischen und schwefelhaltigen Kettenbausteinen zu nennen, die diesen Kunststoffen ausgewogene Eigenschaften als leistungsfähige Konstruktionskunststoffe verleiht.

Alle bisher beschriebenen Kunststoffe sind Linearpolymere, die entweder im plastischen Zustand durch Ur- und Umformverfahren oder im Falle der Unschmelzbarkeit aus Lösungen, Dispersionen, Pulver u. a. durch Beschichtungs- und Sintertechniken verarbeitet werden. Polymere mit Doppelbindungen im Makromolekül können nachträglich zu Elastomeren chemisch vernetzt werden (z. B. durch eine Schwefelvulkanisation). Es sind also typische Vertreter der Kautschuke. Polycycloolefine gewinnen neuerdings als besonders wärmebeständige Thermoplaste an Bedeutung.

Sollen nach der Verarbeitung vernetzte Kunststoffe (Duroplaste) oder Elastomerwerkstoffe (Gummi) vorliegen, müssen lösliche bzw. schmelzbare Ausgangsstoffe als Formmassen verwendet werden, die aus weitgehend linearen bzw. teilvernetzten Makromolekülen oder aus niedermolekularen Verbindungen bestehen. Der eigentliche Werkstoff entsteht erst bei der Verarbeitung durch Vernetzungsreaktionen (*Härtung, Vulkanisation*). In diesen Ausgangsstoffen müssen tri- oder höherfunktionelle Moleküle vorhanden sein, die zu einer Vernetzungsreaktion befähigt sind. Der Kunststoffverarbeiter muss in diesem Fall neben der Formgebung auch die chemische Aufbaureaktion im gewünschten Sinne steuern. Sofern nicht direkt von niedermolekularen, reaktiven Verbindungen ausgegangen werden kann, muss auf „vorgefertigte“ Makromoleküle (*Prepolymere*) zurückgegriffen werden. Diese sind bezüglich der Molmasse meist als Oligomere einzuordnen. Als Vernetzungsreaktionen kommen alle Polymerreaktionstypen in Frage, die bereits genannt wurden. Die wichtigsten vernetzten Kunststoffe sind die Phenoplaste (PF), die Aminoplaste (UF, MF), ungesättigten Polyesterharze (UP), Epoxidharze (EP), Polyurethanduromere und -elastomere (PUR) sowie Silikonharze und -elastomere. Durch chemische Abwandlungen verkörpern sie jeweils eine breite Typenvielfalt. Einzelheiten zu den vernetzten Kunststoffen sind Kapitel 6 zu entnehmen.

### 2.3.2 Morphologische Struktur (Konformation und Aggregation der Makromoleküle)

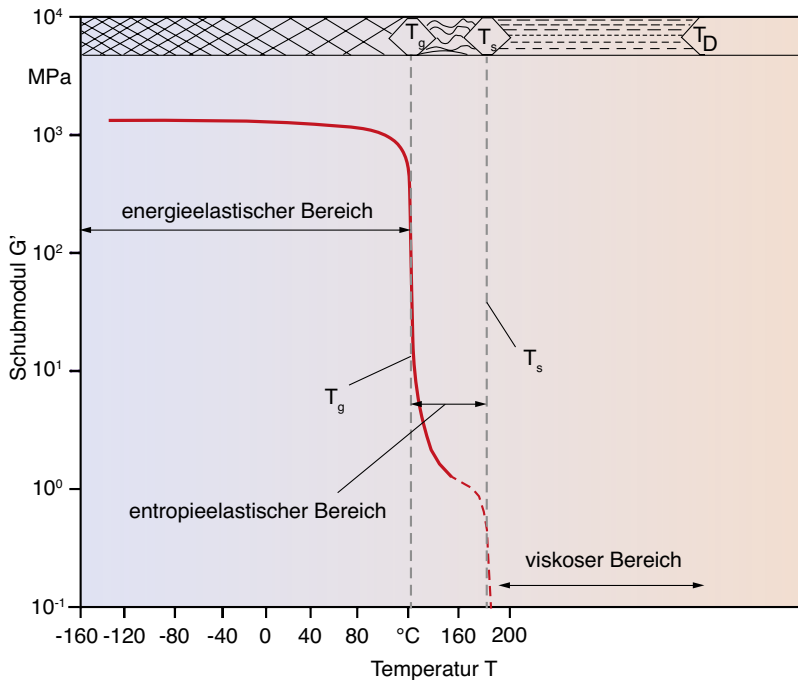
Nachdem die chemische Zusammensetzung und die Molekülarchitektur erklärt wurde, wird im Folgenden die Frage nach dem Bewegungs- und Ordnungszustand der Makromoleküle bei veränderbaren äußeren Bedingungen, wie z. B. Temperaturänderung und Deformation durch Kräfte, beantwortet.

*Amorphen Strukturen* fehlt eine durchgängige Fernordnung der Moleküle. Die Moleküle nehmen darin den energieärmsten Zustand eines statistischen Durchdringungsknäuels an. Dadurch ist nur im Bereich bis ca. 1 nm eine gewisse Nahordnung vorhanden, die von Zwischenmolekülkräften (ZMK) und Molekülgestalt abhängt. Werden bei höheren Temperaturen oder durch Anlagerung von Lösungsmittelmolekülen (Solvatation) die ZMK aufgehoben, d. h. die mikrobrownsche Bewegung freigesetzt, ist dieser amorphe Knäuelzustand für alle Polymere zutreffend, unabhängig von deren spezieller Struktur im Festzustand. In Schmelze und Lösung gilt dieses vorstehend beschriebene Strukturmodell als experimentell gesichert.

Der amorphe Festzustand wird wegen weitgehender Übereinstimmung mit dem Zustand erstarrter Gläser auch als *Glaszustand* bezeichnet. Aufgrund ihrer ungeordneten, manchmal auch als wirr bezeichneten Struktur, ist die Größenordnung der größten geordneten Struktur im Bereich einer Kohlenstoffbindung. Diese Größenordnung ist aber deutlich kleiner als die Wellenlänge des sichtbaren Lichts. Daher sind amorphe Thermoplaste in der Regel transparent. Bild 2.11 stellt den Schubmodul  $G'$  (ein Maß für die lineare elastische Verformung eines Kunststoffes) als Funktion der Temperatur für Polystyrol dar. Polystyrol ist einer der meist verwendeten amorphen Kunststoffe. Es sind zwei große Bereiche zu erkennen: im Bereich niedriger Temperaturen bzw. im Glaszustand ist der Modul relativ konstant, mit steigender Temperatur fällt der Modul signifikant ab. Bei hohen Temperaturen ist der Modul vernachlässigbar klein, das Material ist weich genug, um zu fließen. Obwohl es bei amorphen Thermoplasten keinen schlagartigen Übergang zwischen „fest“ und „flüssig“ gibt, wird die Temperatur, die die beiden Bereiche trennt, als *Glasübergangsbereich* oder *Glasübergangstemperatur*  $T_g$  bezeichnet. Bei dem in Bild 2.11 dargestellten Polystyrol liegt die Glasübergangstemperatur bei ca. 110 °C. Bei Temperaturen unterhalb  $T_g$  verhält sich das Material wie ein viskoelastischer Festkörper. Dieser Bereich ist im Bild als *energieelastischer Bereich* bezeichnet. Sobald das Material über  $T_g$  erwärmt wird, erreicht es den sogenannten *entropieelastischen Bereich*. In diesem Zustand kann das Material bereits gut verformt werden, wie es z. B. beim Thermoformprozess getan wird. Um jedoch fließen zu können, muss die Temperatur über die *Fließtemperatur*  $T_s$  hinaus erhöht werden. Erst in diesem Zustand verhält sich das Material wie eine viskoelastische Flüssigkeit. Man spricht auch davon, dass die Fließtemperatur den Punkt charakterisiert, ab dem die viskosen Anteile der Verformung, der Verlustmodul, die elastischen Anteile, den Speichermodul, überwiegen. Für amorphe Thermoplaste ist dieser Bereich typischerweise 50 K oberhalb der Glasübergangstemperatur. Die genaue Festlegung der *Glas- oder Einfriertemperatur* sowie der *Fließtemperatur* ist Sache der Prüfmethodenkonvention und hängt außerdem stark von der Art und Dauer der Beanspruchung bei der Messung ab. Die „Antwortreaktion“ der Moleküle erfolgt zeitlich verzögert zur „Lasterregung“ der Prüfmethode. So werden bei dynamisch-mechanischen Prüfungen mit hohen Lastwechselfrequenzen deutlich höhere Glastemperaturen (dynamische Glastemperatur  $T_{g \text{ dyn}}$ ) gemessen als bei



kalorimetrischen oder dilatometrischen (also Ausdehnungs-)Prüfungen mit sehr langsamer Temperaturänderung (statische Glastemperatur  $T_{g, stat}$ ). Je nach Kunststoffart und Höhe der Glastemperatur sind Differenzen von bis zu 50 K zu erwarten. Man kann anschaulich auch so argumentieren, dass sich Kunststoffe umso härter bzw. steifer verhalten, je schneller der Beanspruchungszyklus ist.



**Bild 2.11** Abhängigkeit des Schubmoduls von der Temperatur bei PS

Werden Kunststoffe einer mechanischen Belastung ausgesetzt, so ist eine zeitabhängige Verformungszunahme bei vorgegebener Spannung (*Kriechen*, *Retardation*) bzw. ein zeitabhängiger Spannungsabbau nach erfolgter Verformung (*Relaxation*) zu beobachten. Dieses Verhalten, auch als *Viskoelastizität* bezeichnet, lässt sich auf die gleichzeitige Wirkung von drei qualitativ unterschiedlichen Deformationsmechanismen zurückführen:

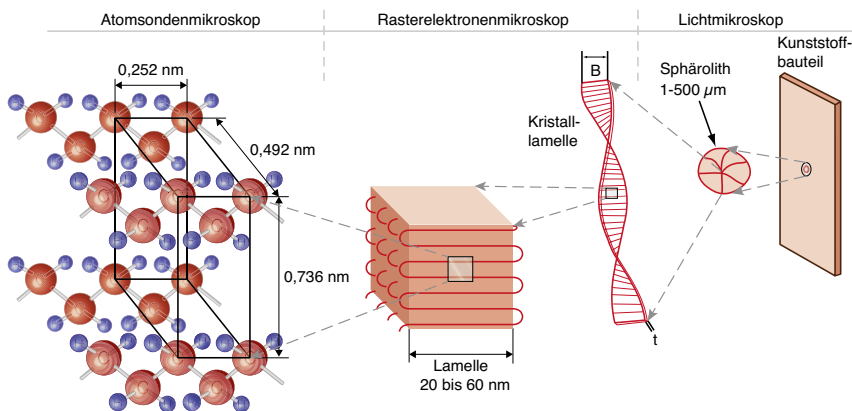
- energieelastische (auch: spontanelastische) Verformung,
- entropieelastische (auch: gummielastische) Verformung und
- plastische (auch: viskose) Verformung.

Das unterschiedliche mechanische Verhalten von Kunststoffen und Gummi wird lediglich durch die graduell verschiedenen Verformungsanteile im jeweiligen thermischen Zustand bestimmt. Die verschiedenen molekularen Bewegungsmechanismen erlauben extrem unterschiedliche Verformungen. Sie reichen von ca. 0,1 % für

energieelastische Verformung über nahezu 100 % für gummielastische Verformung bis zu ca. 10<sup>4</sup> % für plastische Schmelzen. Das *nicht-newtonsche Fließen* (z. B. Strukturviskosität) von Kunststoffschmelzen oder -lösungen ist gleichfalls dieser Deformationsmechanik geschuldet und wird in Kapitel 3 näher beschrieben.

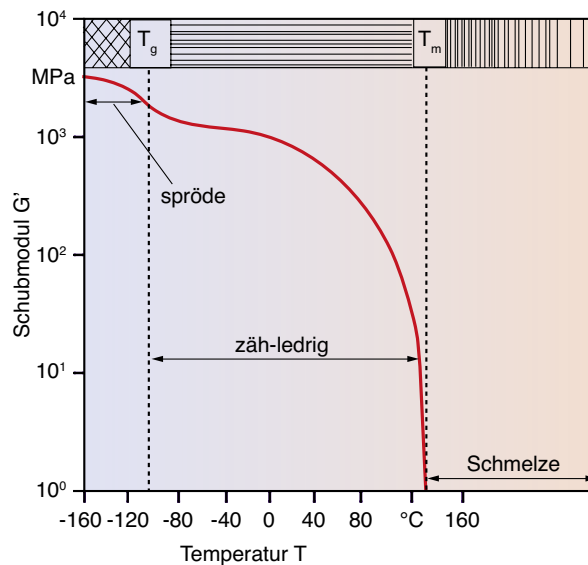
Am Beispiel der amorphen Knäuelstruktur können wesentliche Struktur-Eigenschafts-Beziehungen der Kunststoffe erklärt werden. Sind die Makromoleküle sehr gleichmäßig aufgebaut und unterstützen ihre Konfiguration sowie die Stärke der ZMK eine enge Annäherung der Moleküle, so tritt *Kristallitbildung* ein, da die Ordnungsvergrößerung zumindest partiell zu einem höheren Energiegewinn führt als die Entropievergrößerung.

Die Kristallisation von organischen Polymeren ist ein derart komplexes Strukturbildungsphänomen, dass hier nur eine stark vereinfachte Darstellung möglich ist. Die Kristallbildung wird, wie auch bei niedermolekularen bzw. atomaren Stoffen, durch die Teilschritte der Keimbildung und des Kristallwachstums bestimmt. Die Vielfalt der Makromolekülkonformationen sowie die Tendenz der Entropievergrößerung (Molekülknäuelung) lassen eine vollständige Kristallisation bei technischen Abläufen (Herstellung, Verarbeitung) nicht zu. Kunststoffe sind daher in der Regel *teilkristallin*. Ihre morphologische Struktur ist durch ein Gemenge von amorphen und kristallinen Phasen gekennzeichnet, deren Grenzen auf molekularer Ebene nicht eindeutig bestimmbar sind. Ein und dasselbe Makromolekül kann in einzelnen Abschnitten sowohl der amorphen als auch der kristallinen Phase angehören. Im Regelfall aggregieren die lamellaren oder mizellaren Kristallite zu *kristallinen Überstrukturen* (Bild 2.12), deren wichtigste Vertreter die *Sphärolithe* sind. Der kristalline Anteil wird quantitativ durch den *Kristallisationsgrad* angegeben, der bei besonders leicht kristallisierenden Kunststoffen 60 bis 80 % betragen kann. Unter Laborbedingungen werden auch höhere Werte bis hin zu *polymeren Einkristallen* erreicht.



**Bild 2.12** Morphologie eines teilkristallinen Thermoplasten

Bild 2.13 zeigt den dynamischen Schubmodul als Funktion der Temperatur für ein PE-HD, den meist verwendeten teilkristallinen Kunststoff. Diese Kurve stellt das Ergebnis der Messung bei einer Frequenz dar. Es gibt zwei klare Übergänge: einen bei ca.  $-110\text{ °C}$ , der *Glasübergangstemperatur*, und einen bei  $140\text{ °C}$ , der Schmelztemperatur. Oberhalb der *Schmelztemperatur* ist der Schubmodul vernachlässigbar gering und das Material kann fließen. Sobald die Temperatur wieder abnimmt, beginnen sich kristalline Strukturen auszubilden. Zwischen der Schmelz- und Glasübergangstemperatur verhält sich das Material überwiegend wie ein zäher Festkörper. Wenn die Temperatur bis unter die Glasübergangstemperatur sinkt, erstarren auch die amorphen Bereiche zwischen den kristallinen Strukturen. Resultat ist ein steifes und meist auch sprödes Materialverhalten.



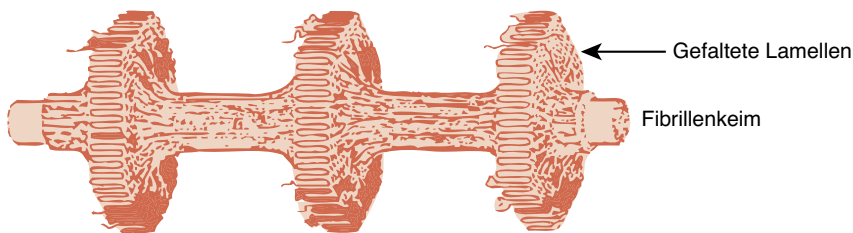
**Bild 2.13** Abhängigkeit des Schubmoduls von der Temperatur bei PE-HD

Bei der Verarbeitung der Kunststoffe entstehen durch inhomogene Kristallkeimbildung oder unterschiedliche Abkühlungsgeschwindigkeiten im Stoff lokal unterschiedliche kristalline Strukturen (wie etwa feinsphärolitische Randschichten bei Spritzgießbauteilen). Eine entsprechende Eigenschaftsanisotropie ist die Folge. Die Besonderheiten der morphologischen Struktur teilkristalliner Kunststoffe waren schon immer Anlass, diese im Sinne gewünschter Eigenschaften zu beeinflussen:

- Durch Reckung bzw. Scherung der Makromoleküle können infolge molekularer Umlagerung bzw. Neubildung orientierte kristalline Strukturen erzeugt werden. Dies bewirkt eine erhebliche Steigerung von Festigkeit, Steifigkeit u.a. in der gewünschten Richtung. Solche kristallinen Überstrukturen sind u.a. Fibrillen-

und Schaschlik/Shish-Kebab-Strukturen, die in Bild 2.14 wiedergegeben sind. In der Chemiefaserindustrie und Kunststofftechnik sind viele solcher Verfahrensvarianten bekannt, so z. B. Fadenreckung, biaxiale Folienverstreckung, Spritzgieß-, Extrusions- und Walzpressrecken. Ergebnisse dieser Manipulationen sind anisotrope Strukturen mit unidirektionaler oder orthogonaler Orientierung.

- Durch bewusste Steuerung der Erstarrungsbedingungen und/oder Zugabe feinverteilter Nukleierungsmittel als Keimbildner wird eine möglichst homogene und feinkörnige Kristallitstruktur angestrebt, die z. B. für verschleißbeanspruchte und maßhaltige Kunststoffprodukte sehr vorteilhaft ist.



**Bild 2.14** Shish-Kebab-Struktur

Einige Polymere sind aufgrund ihrer Molekülkonfiguration bei üblichen Erstarrungsbedingungen nicht zur Kristallisation befähigt. Durch Reckung ist infolge der Parallellagerung und Annäherung der Molekülsegmente aber eine teilweise Kristallisation möglich, die als *Dehnungskristallisation* bezeichnet wird. Diese Art der Strukturbildung setzt ein gewisses Maß an mikrobrownscher Molekülbeweglichkeit voraus, da sich Kristallite nur durch molekulare Umlagerungen während des Dehnungsvorgangs bilden können. Häufig zu beobachten ist die Dehnungskristallisation bei Kautschuken (z. B. NR, IR, IIR, CR). Die damit verbundene Härtezunahme wird in der Elastomertechnik allerdings nicht immer geschätzt.

Kristalline Strukturen verkörpern den höchsten molekularen Ordnungszustand von Polymeren im Sinne dichtester Molekülaggregationen mit entsprechend verstärkten ZMK. Aber auch sie sind unvollkommene Gebilde und Ergebnis eines „eingefrorenen“ Kristallisationsungleichgewichts, so dass sie bei Erwärmung in einem unterschiedlich breiten Temperaturintervall und nicht an einem Schmelzpunkt aufschmelzen. Das Aufschmelzen erfordert zusätzliche, latente Wärmeenergie als *Schmelzwärme*. Beim schnellen Erstarren setzt wegen der *Unterkühlbarkeit* der Schmelzen die Kristallisation bei Erstarrungstemperaturen ein, die 20 bis 40 K unterhalb der Schmelzendtemperaturen liegen können. Nukleierungsmittel als Keimbildner können diese Differenz verringern. Kristalline Phasen erhöhen Härte, Steifigkeit und Verschleißfestigkeit der Kunststoffe und verringern Permeation, Diffusion, Löslichkeit und Quellbarkeit. In vieler Hinsicht ergeben sich ähnliche Einflüsse auf die Kunststoffeigenschaften wie bei einer chemischen Vernetzung. Es

ist daher zulässig, die kristallinen Strukturen als *physikalische Vernetzungsstellen* anzusehen, die thermisch reversibel sind.

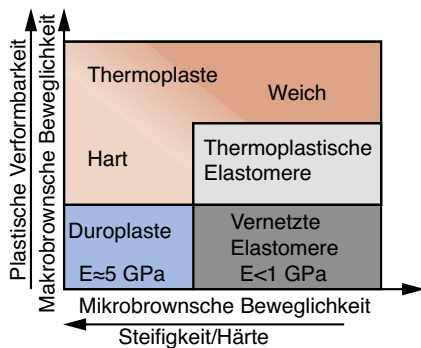
Nach den bisherigen Strukturbetrachtungen ist es vorstellbar, dass extrem steife Makromoleküle, wie z. B. Leiterpolymere (Doppelstrangpolymere mit einer leiterähnlichen Struktur), weder zu einer amorphen Knäuelstruktur, noch zu einer Einordnung im Kristallgitter befähigt sind. Die Moleküle sind vergleichbar mit wenig flexiblen Stäbchen (*Mesogene*), die nur einen geringen Freiheitsgrad der mikrobrownschen Beweglichkeit besitzen. Falls eine makrobrownsche Bewegung möglich ist, ordnen sie sich zu anisotropen Parallelstrukturen (Modell: Baumstämme im Fluss), die als *Mesophasen* bezeichnet werden. Zwischen den Mesogenen herrschen zwar ZMK, deren Stärke aber nicht annähernd mit denen echter Kristallgitterstrukturen vergleichbar ist. Es liegt also ein kristallähnlicher Ordnungsgrad mit geringem Energieniveau vor. Realisiert man einen flüssigkeitsähnlichen Zustand, so bleibt die Mesophasenstruktur meist erhalten. Polymere mit derartigen Strukturen werden als *flüssigkristalline Polymere* (liquid crystal polymers, LCP) bezeichnet. Da jede noch so geringe makrobrownsche Molekülbewegung die Mesogene in Reck- oder Strömungsrichtung unidirektional orientiert und damit hochbelastbare anisotrope Strukturen erzeugt, spricht man auch von *eigenverstärkenden Polymeren*. Die Mesophasenstruktur als Zwischenglied amorpher und kristalliner Struktur wird als *mesomorph* bezeichnet.

Durchgängige Leiterpolymere (z. B. Aramide) sind durch Erwärmung nicht plastifizierbar. Der flüssigkeitsähnliche Zustand ist nur in Lösung (*lyotrope LCP*) erreichbar. Sollen wärmeplastifizierbare (*thermotrope*) LCP erzeugt werden, so kann dies durch Kombination von Leiterstrukturen mit flexiblen Molekülsegmenten, den sogenannten *Spacern*, erreicht werden. Bei diesen Polymeren beschränkt sich die Mesophasenstruktur auf die Mesogene. Die unterschiedliche Anordnung der Mesogene im Festzustand und in der Schmelze führt zu unterschiedlichen Mesophasenstrukturen (z. B. nematisch, smektisch), die sich nach Ausrichtung und Packungssymmetrie unterscheiden. Bei bestimmten Temperaturen erfolgen Mesophasenumwandlungen, ohne die mesomorphe (anisotrope) Grundstruktur der LCP prinzipiell zu verändern. Wenn keine thermische Zersetzung auftritt, wird oberhalb einer bestimmten Temperatur (*Klärtemperatur*) die Mesophasenstruktur in eine ungeordnete isotrope Struktur überführt. Alle diese Umwandlungen erfordern nur geringe Umwandlungswärmen. Für die Spacersegmente der Makromoleküle sind alle für flexible Polymere zutreffenden Morphologien (amorph, kristallin) möglich.



### 2.3.3 Kunststoffklassen

Die Einteilung der Kunststoffe in Thermoplaste, Duroplaste, Elastomere und thermoplastische Elastomere nach Bild 2.4 beruht auf einer qualitativen Unterscheidung der Molekülbeweglichkeit bei Raumtemperatur, wobei in der Namensgebung der *Thermoplaste* die Möglichkeit, nicht aber die zwingende Notwendigkeit eines thermoplastischen Zustands erfasst ist. In Bild 2.15 wird schematisch die Zuordnung der in Bild 2.4 benannten Kunststoffklassen auf Basis ihrer makro- und mikrobrownschen Molekülbeweglichkeit gezeigt.



**Bild 2.15**

Einordnung der Kunststoffe nach der Molekülbeweglichkeit bei Raumtemperatur

Es handelt sich dabei immer um Endprodukt-Werkstoffe, also nicht um Formmassen und Vorprodukte. Duroplaste und vernetzende Elastomere haben aufgrund ihrer kovalenten (chemischen) Vernetzung eine geringere makrobrownsche Beweglichkeit (freie Bewegung ganzer Molekülketten: Abgleiten von Ketten voneinander, Lösen und Bilden von Verschlaufungen) als Thermoplaste oder thermoplastische Elastomere. Duroplaste (Duromere) und Gummi sind mithin nicht oder infolge unvollkommener Netzbildung nur gering plastisch verformbar.

Die Abgrenzung zwischen Duroplasten und Gummi ist eine Frage der praxisüblichen Konvention, die sich in unterschiedlicher Härte bzw. Steifigkeit ausdrückt und dadurch unmittelbar mit der mikrobrownschen Molekülbeweglichkeit (Rotation und Translationsbewegungen um die Bindungsachse von einzelnen Atomen oder kleinen Kettenabschnitten) zusammenhängt. Es ist der Bereich, in dem Hartgummi, flexible EP-, UP-, PUR-X-, SI-X-Harze u. a. liegen.

Nach diesem Einteilungsprinzip sind Thermoplaste (Plastomere) und thermoplastische Elastomere unvernetzte Kunststoffe, d. h., sie bestehen aus linearen oder verzweigten Makromolekülen. Nur mit dieser Struktur ist die Option eines thermoplastischen Zustands höchster makrobrownscher Molekülbeweglichkeit gegeben. Seit etwa 1990 haben Kunststoffe zunehmend an Bedeutung gewonnen, die gummiähnliche Eigenschaften mit rationeller thermoplastischer Verarbeitbarkeit verknüpfen. Für diese Kunststoffklasse wurde u. a. der Begriff *thermoplastische Elasto-*



mere geprägt. Die derzeitigen Bemühungen zur Nomenklatur dieser Kunststoffe sind zum einen ein erneuter Beweis, wie schwer man sich in der Kunststofftechnik schon immer mit Bezeichnungssystemen getan hat, zum anderen dafür, dass es aus strukturphysikalischer Sicht ein sehr komplexes Problem ist. Im Grunde soll mit diesen Kunststoffen ein thermoplastisch verarbeitbarer, idealer Gummiwerkstoff geschaffen werden. Diese Forderung ist gleichbedeutend damit, dass möglichst große mikrobrownsche Molekülbeweglichkeit mit ausreichend gummielastischer (entropieelastischer) Verformbarkeit und geringer makrobrownscher Beweglichkeit (geringer plastischer Verformung) zu kombinieren sind. Man benötigt also ein weitmaschig vernetztes Polymer mit geringen ZMK, dessen Vernetzungsstellen thermisch reversibel sind. Solche *physikalischen Vernetzungsstellen* können auf verschiedenste Weise verwirklicht werden.

Durch Molekülverschlaufungen trägt jeder Thermoplast ein gewisses „Gummipotential“ in sich. In der Praxis wurden weiches Polyvinylchlorid (PVC-P, PVC plastized), Polyisobutylen (PIB) und andere weichelastische Thermoplaste als gummiähnliche Ersatzstoffe in vielen Bereichen eingesetzt, bevor sie durch moderne Typen thermoplastischer Elastomere substituiert wurden.

Aus Bild 2.15 wird aber auch klar, dass der ideale Gummi erst erreicht ist, wenn die physikalischen Vernetzungen annähernd die Bindungsstärke kovalenter Vernetzung erreichen. Vielleicht bietet die Vervollkommenung ionischer Strukturen einen aussichtsreichen Ansatzpunkt.

Zu den Strukturbetrachtungen sollen abschließend die wichtigsten Kunststoffklassen (außer LCP) nochmals im Zusammenhang kurz charakterisiert werden:

- **Amorphe Thermoplaste.** Lineare und verzweigte Makromoleküle mit amorpher Struktur. Thermoplastisch erweichend (z.B. PMMA-Spritzgießmassen) bzw. bei sehr großer Molmasse nur thermoelastisch erweichend (z.B. PMMA-Gusshalbzeug). Prinzipiell löslich in geeigneten Lösungsmitteln. Bei geringen ZMK (z.B. unpolares PIB) oder deren Verminderung durch Solvation (z.B. Weichmacherzusatz, PVC-P) und flexiblen Makromolekülen ist  $T_g < RT$ . Diese Kunststoffe sind weichelastisch bei RT und zunehmend gummiähnlich bei größerer Molmasse. Stärkere ZMK und steifere Moleküle ergeben  $T_g > RT$ , d.h. bei RT hartelastische Kunststoffe. In extremen Fällen (z.B. Leiterpolymere) ist Erweichung vor der thermischen Zersetzung nicht möglich.
- **Teilkristalline Thermoplaste.** Grundmerkmale der Moleküle wie bei amorphen Thermoplasten. Zusätzliche Teilkristallinität bewirkt größere Härte und verringerte Löslichkeit. Für den Fall  $T_g < RT$  bewirkt die kristalline Phase hornähnliches, zähhartes Verhalten bei RT. Thermoplastischer Zustand nur bei Überschreitung von  $T_m$  möglich. Liegt  $T_m$  sehr viel über  $T_g$ , so ist nach dem Aufschmelzen der Kristallite sofort ein thermoplastischer Zustand erreicht (z.B. Polyamide). Ist dies nicht der Fall bzw. liegt eine sehr große Molmasse vor (z.B. hochmolekulare Polyamide), so tritt ein thermoelastischer Zustand auf. Extreme Verringerung

der Molekülbeweglichkeit kann sowohl das thermoelastische Erweichen (z.B. wasserfreie Cellulose mit  $T_g = 225\text{ °C}$ ) als auch den thermoplastischen Zustand (z.B. PE-UHMW, ultra high molecular weight PE) vor der Zersetzung völlig verhindern. Die Löslichkeit solcher Stoffe bei RT ist u. U. erheblich eingeschränkt, bzw. für sie ist noch kein Lösungsmittel bekannt (z.B. Polytetrafluorethylen, PTFE).

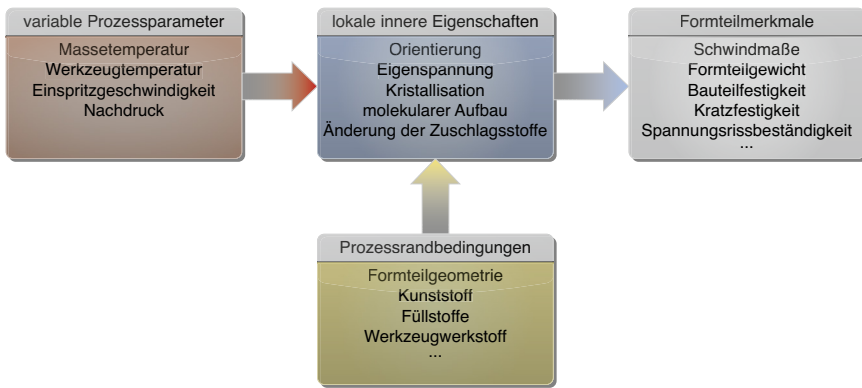
- *Thermoplastische Elastomere*. Durch amorphe oder teilkristalline Hartsegmente (Domänen) bzw. durch Ionencluster thermisch reversibel vernetzte Makromoleküle mit geringer Vernetzungsdichte sowie Blends aus Thermoplasten mit hohen Anteilen vernetzter bzw. unvernetzter Elastomerphase. Thermoplastisch erweichende und lösliche, elastomerähnliche Kunststoffe.
- *Vernetzte Elastomere (Gummi)*. Thermisch irreversibel (kovalent) vernetzte Makromoleküle mit überwiegend amorpher Struktur und meist geringer Vernetzungsdichte (geringe Härte). Thermoplastische Erweichung nicht möglich. Prinzipiell unlöslich, aber in geeigneten Medien u. U. stark quellbar. Ausgeprägte Gummielastizität (Entropieelastizität) ohne plastische Verformung im Temperatureinsatzbereich. Dehnungskristallisation relativ häufig.
- *Duroplaste*. Thermisch irreversibel (kovalent) vernetzte Makromoleküle mit amorpher Struktur und großer Vernetzungsdichte. Thermoelastische Erweichung je nach Höhe der zwischenmolekularen Kräfte und Vernetzungsdichte unterschiedlich ausgeprägt. Bei sehr enger Vernetzung ohne praktische Bedeutung. Prinzipiell unlöslich, aber je nach Vernetzung mehr oder weniger quellbar in geeigneten Medien.

## ■ 2.4 Einfluss der Fertigung auf die inneren Eigenschaften

Die Fertigung beeinflusst durch variable Prozessparameter und die weiteren Randbedingungen wie Bauteilgeometrie, Werkstoffeigenschaften, etc. die Eigenschaften des Kunststoffs im Formteil (Bild 2.16). Da hier vielfältige Wirkungen oft sehr komplexer Art beobachtet werden können, hat es sich in der Kunststofftechnik eingebürgert, die „inneren Eigenschaften“ zu definieren. Die inneren Eigenschaften sind Merkmale zur Beschreibung des Zustands eines Kunststoffs, wie z.B. seiner Morphologie. Die wichtigsten inneren Eigenschaften sind:

- Orientierungen,
- Eigenspannungen,
- Kristallisation (Kristallisationsparameter),
- molekularer Aufbau (mittlere Molmasse, Molmassenverteilung),
- Änderung der Zuschlagsstoffe (z.B. Stabilisatoranteil, Faserlänge).





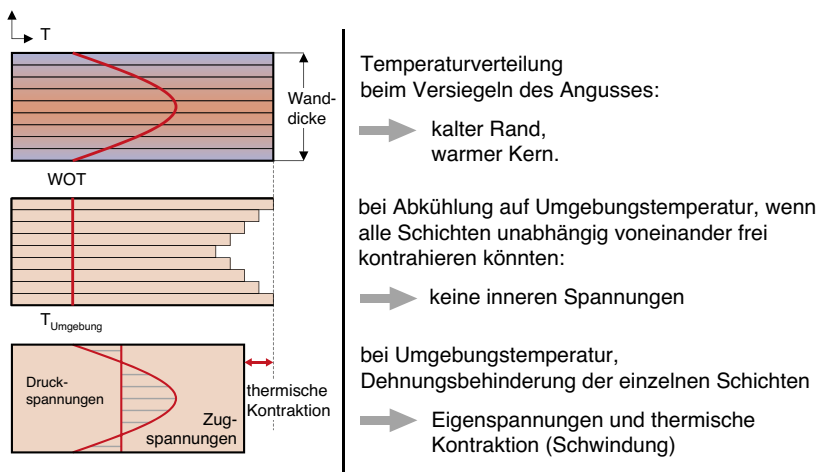
**Bild 2.16** Einflussfaktoren auf die inneren Eigenschaften

Die inneren Eigenschaften beschreiben den Zustand des Kunststoffs im Bauteil. Sie bestimmen die Änderungen der Gebrauchseigenschaften. Durch ihre Kenntnis kann der Einfluss der Verarbeitung auf die Bauteileigenschaften bewertet werden.

### 2.4.1 Eigenspannungen

Eigenspannungen resultieren unmittelbar aus der Druck- und Temperaturführung beim Erstarrungsprozess (Bild 2.17). Eigenspannungen wachsen an bei:

- heterogener Temperaturverteilung im Bauteil,
- schnellen Abkühlgeschwindigkeiten,
- hohen Wärmeausdehnungskoeffizienten,
- hohem E-Modul des Werkstoffs.



**Bild 2.17** Schichtmodell: Entstehung von Abkühleigenspannungen

Eigenspannungen stellen eine mechanische Beanspruchung dar, die wie äußere Spannungen auf das Bauteil wirken und bei der Festigkeitsanalyse berücksichtigt werden müssen (in erster Näherung durch Abminderung des Festigkeitskennwertes).

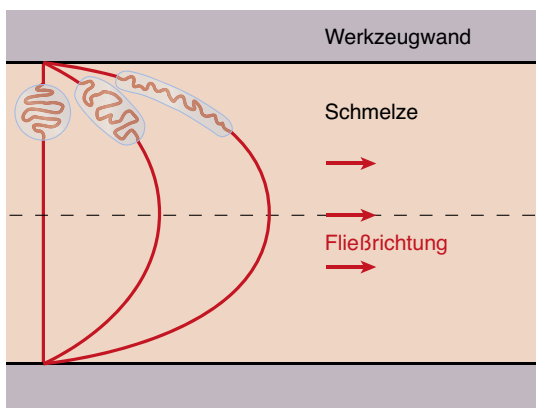
Bei Werkstoffverbunden bewirken unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten ebenfalls Eigenspannungen in Abhängigkeit vom durchlaufenen Temperaturintervall (Bimetalleffekt). Durch Tempern (Erhitzen über einen längeren Zeitraum) kurz unterhalb der Schmelztemperatur und anschließendes langsames Abkühlen können Eigenspannungen abgebaut werden. Bei spannungsrissempfindlichen Werkstoffen können Eigenspannungen schon bei geringen äußeren Lasten oder bei Einwirkung rissauslösender Medien Risse im Bauteil erzeugen.

Der Einfluss der Fertigung und insbesondere der Eigenspannungen auf die Bauteileigenschaften zeigt sich insbesondere in den Merkmalen Schwindung und Verzug, die im Detail in Abschnitt 3.2.2.2 und 3.2.2.3 erläutert werden.

### 2.4.2 Molekül-Orientierung


In einer nicht bewegten Kunststoffschmelze liegen die Molekülketten in einem regellosen, verknäuelten Zustand vor (Ausnahme: LCP). Bei bewegten Schmelzen können sich die Moleküle in einer Vorzugsrichtung ausrichten und es findet eine Molekülorientierung statt. Schematisch ist dies in Bild 2.18 dargestellt. Aus einem kreisförmigen Schmelzelement wird im Fließprozess ein orientiertes Element. Der Orientierung liegen zwei unterschiedliche Prozesse zugrunde:

- Lokale Dehnung eines Schmelzelements, z. B. wenn sich ein Fließkanal verengt oder eine Fließfront ähnlich der Aufweitung der Hülle eines Luftballons beim Aufblasen dehnt. Ebenso beim Blasformen oder Warmformen (Tiefziehen).
- Scherung benachbarter Schmelzeschichten bei Strömungen mit einem Geschwindigkeitsprofil beim Spritzgießen oder Extrudieren, wenn die Schmelze an der Werkzeugwand haftet.



**Bild 2.18**

Entstehung der Molekülorientierung



Der beim Spritzgießen erzeugte Orientierungszustand ist besonders bei komplex gestalteten Formteilen nur mit einiger Erfahrung und Hilfe von Rechenprogrammen abzuschätzen. Infolge der Dehnung der Fließfront und deren schneller Erhaltung beim Anlegen an die Werkzeugwand, liegt in der Formteiloberfläche in der Regel eine dünne, sehr hoch biaxial orientierte Schicht vor. Unterhalb der Oberfläche wird durch das dort vorliegende hohe Schergefälle bei der Werkzeugfüllung eine im Wesentlichen in Fließrichtung orientierte Schicht entstehen. In der Mitte der Wanddicke ist das Schergefälle und damit die Orientierung gering.

Infolge der Brownschen Bewegung der Moleküle bilden sich Orientierungen in der Schmelze sehr schnell zurück, sie relaxieren. Bei den Bedingungen des Spritzgießens werden hierzu nur wenige Sekunden benötigt. Da der Abkühlvorgang im Werkzeug jedoch auch sehr schnell erfolgt, wird ein Teil der Orientierung eingefroren. Das Maß der eingefrorenen Orientierungen hängt demnach von der Masstemperatur, der Größe der Dehn- und Scherströmung, dem Erstarrungsverhalten der Schmelze, der Werkzeugwand-Temperatur und der Wanddicke des Formteils ab. Hohe Einspritzgeschwindigkeiten beim Spritzgießen bedeuten zwar eine hohe Orientierung der Schmelze, aber auch eine längere Verweilzeit der Schmelze bei höheren Temperaturen und damit eine stärkere Relaxation, so dass die eingefrorene Orientierung geringer sein kann als bei langsamer Einspritzgeschwindigkeit. Niedrige Masstemperaturen, kalte Werkzeuge und geringe Wanddicken führen zu hohen Orientierungen.

Im Bereich der Raumtemperatur relaxieren die eingefrorenen Orientierungen praktisch nicht mehr. Wird das Formteil jedoch bei erhöhten Temperaturen und längerfristig eingesetzt, kann es zur Relaxation und der damit immer verbundenen Schrumpfung oder Verwerfung kommen, falls die Verformung nicht wie im Spritzgießwerkzeug durch Formzwang verhindert wird, s. Abschnitt 3.2.2.2 und 3.2.2.3.

Eine Orientierung bedeutet Anisotropie der Eigenschaften: In Orientierungsrichtung liegt eine höhere Steifigkeit und Festigkeit, Wärmedehnung und Verarbeitungsschwindigkeit vor.

Bei transparenten Werkstoffen kann man Orientierungen mit Hilfe der Polarisationsoptik qualitativ nachweisen, da orientierte Bereiche doppelbrechend sind, s. Abschnitt 3.6. Die röntgenographische Methode eignet sich besonders zur quantitativen Untersuchung von teilkristallinen Kunststoffen. Eine weitere quantitative Bestimmung kann über die Messung des Schrumpfes erfolgen. Hierbei werden die ganzen Formteile, Ausschnitte oder Dünnschnitte bei erhöhter Temperatur gelagert, so dass die Orientierungen relaxieren und zu Deformationen führen. Die Verformung ist ein Maß für die eingefrorenen Orientierungen.

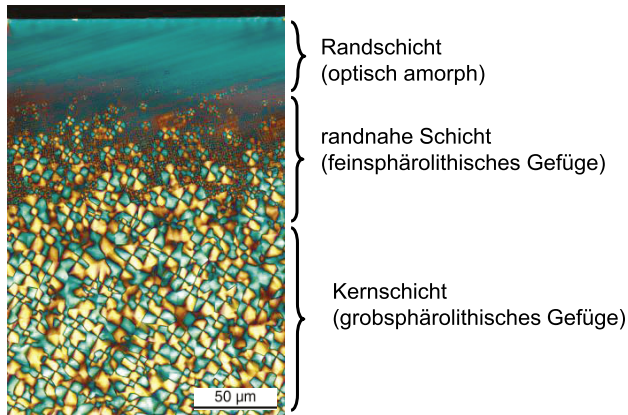
### 2.4.3 Kristallisationsverhalten

Bei teilkristallinen Thermoplasten werden die inneren Eigenschaften zusätzlich durch die Kristallinität bestimmt. Neben dem Kristallisationsgrad ist auch die Überstruktur (z.B. Sphärolithdurchmesser) ein Merkmal für die Kristallinität.

- Je höher dieser Kristallisationsgrad ist, umso steifer und fester, aber auch spröder ist das Formteil. Die Dichte des Kunststoffs korreliert unmittelbar mit dem Kristallisationsgrad. Geringe Kristallisation oder sehr feinkristalline Strukturen ergeben opake bis transparente Teile. Die Kristallinität wird außer durch die chemische Struktur des Kunststoffs durch die Art der Nukleierung, den Verarbeitungsprozess und eine eventuelle Wärme-Nachbehandlung festgelegt. Kalte Werkzeuge und hohe Abkühlgeschwindigkeiten führen zu einem geringen Kristallisationsgrad und feinkristallinen Strukturen. Ein Beispiel hierfür sind Getränkeflaschen aus PET. Sie werden so schnell abgekühlt, dass das ansonsten weiße Material transparent erstarrt. Außerdem trifft dies vor allem für geringe Wanddicken und die Oberflächen von Formteilen zu. Lange Verweilzeiten der Schmelze bei hohen Temperaturen ergeben hohe Kristallisationsgrade und grobere Strukturen. Diese treten vor allem im Inneren von dickwandigen Formteilen auf. Werden Bauteile im Spritzgießprozess gefertigt, wird die Wärme über die Bauteiloberfläche an das Werkzeug abgeführt. Aufgrund der niedrigen Wärmeleitfähigkeit des Kunststoffs entsteht im Bauteil ein Temperaturgradient, der in einem schichttiefenabhängigen Kristallisationsgrad resultiert, Bild 2.19.
- Bei längerem Einsatz der Formteile, besonders bei höheren Temperaturen, tritt eine Nachkristallisation ein. Hiermit ist eine Volumenabnahme verbunden, die zum Verzug oder zu Passungsschwierigkeiten führen kann. Durch eine Wärmenachbehandlung, also eine Lagerung über längere Zeit bei erhöhten Temperaturen, kann die Nachschwindung vorweggenommen werden. Die Sphärolithe können beim Verarbeitungsprozess – ähnlich wie die Makromoleküle – durch Scherung ausgerichtet werden und sind dann die Ursache für ein anisotropes Verhalten der Formteile. Je geordneter die Makromoleküle in der Schmelze liegen (Orientierung), umso besser können die Makromoleküle kristallisieren (scherungsinduzierte Kristallisation).

Der Prozentsatz des kristallinen Anteils an der Gesamtmasse kann röntgenographisch, thermoanalytisch mittels dynamischer Differenzkalorimetrie (DSC) oder mit Hilfe der Kernresonanzspektroskopie bestimmt werden. Da zwischen dem Kristallisationsgrad und der Dichte ein direkter Zusammenhang besteht, kann beim Vorliegen einer Eichkurve aus der Dichte auf die Kristallinität geschlossen werden.





**Bild 2.19** Gefüge in einem Spritzgießformteil aus PA 66<sup>1</sup>

## ■ 2.5 Stoffliche Modifizierung von Kunststoffen

Unter stofflicher Modifizierung wird im Folgenden die Blendherstellung aus Homopolymeren sowie die Zugabe von Füll- und Zusatzstoffen (Additive) für unterschiedlichste Zweckbestimmungen verstanden. Dieses Gebiet ist vielschichtig und hier nur eine kurze Übersichtsdarstellung möglich. Weitere Einzelheiten zu diesem Problemkreis finden sich in den folgenden Kapiteln.

### 2.5.1 Copolymere und Polymermischungen (Blends)

**Copolymere** sind Kunststoffe mit zwei oder mehr Monomertypen innerhalb einer Kette. Ein Copolymer mit zwei unterschiedlichen Monomertypen wird als *Bipolymer bezeichnet*. Besteht es aus drei unterschiedlichen Monomereinheiten spricht man von einem *Terpolymer*. Abhängig von der Anordnung der unterschiedlichen Monomere in der Kette kann nach vier Anordnungen unterschieden werden in *statistische*, alternierende, *Block-* und *Pfropf-Copolymere*. Ein typisches Beispiel für ein Copolymer ist Ethylen-Propylen. Obwohl beide Monomere für sich den teilkristallinen Thermoplasten zugeordnet werden können, zeigt der Blend bei Mischungsverhältnissen zwischen 35/65 und 65/35 keine Schmelztemperatur. Das Material ist ein Elastomer. Diese sog. EPDM-Materialien (Ethylen-Propylen-Dien-

<sup>1</sup> C. M. Dallner, M. O. Kobes, R. W. Feulner, E. Schmachtenberg: Influence of the morphology on the tribological behaviour of assembly injection moulded Microdrives, PPS-23, 27 – 31 Mai 2007, Salvador, Brazil (2007)

Kautschuke) finden aufgrund ihrer guten Witterungsbeständigkeit immer mehr Verwendung in der Industrie. Im Gegensatz dazu weisen alle Ethlen-Propylen-Blockcopolymere unabhängig vom Mischungsverhältnis eine Schmelztemperatur auf.

**Polymermischungen** (*Polymerblends*, *Polymerlegierungen*, *Blends*) werden durch Mischen oder Blenden von zwei oder mehr Kunststoffen hergestellt mit dem Ziel, ein Material mit verbesserten Eigenschaften gegenüber den einzelnen Komponenten zu erhalten. Zu den gängigen Polymerblends gehören PP-PC (Polycarbonat), PVC-ABS (Acrylnitril-Butadien-Styrol), und PE-PTFE. Aus energetischen Gründen ist die Mischbarkeit von Polymeren im Regelfall sehr eingeschränkt und homogene Mischungen auf molekularer Ebene (homogene Blends) die Ausnahme.

Die Bildung eines morphologischen Mehrphasensystems (heterogene Blends) ist nicht von vornherein ungünstig, da viele nützliche Eigenschaften der Ausgangskomponenten erhalten bleiben können. Voraussetzung für qualitativ hochwertige Blends ist eine stabile Blendmorphologie. Dispergierte Phase und Matrix müssen in gleichmäßiger Verteilung bei guter Phasenhäsion vorliegen. Nach dem Stand der Misch- und Zerteiltechnik sind u.U. „Phasentröpfchen“ unterhalb der Wellenlänge des sichtbaren Lichts erreichbar (transparente Blends). Zur Verbesserung der Mischbarkeit und Adhäsion werden verschiedene Methoden und Techniken praktiziert:

- Abstimmung von Ausgangsverträglichkeiten,
- Abstimmung der quantitativen Zusammensetzung und der Aufbereitungstemperaturführung,
- Chemische Modifizierung durch Ionenbindungen, dynamische Phasenvernetzung, partielle Pfropfcopolymerisation u. a., wobei die Reaktionen bei der Blendherstellung ablaufen können,
- Zugabe von Verträglichkeitsmachern (Kompatibilizer) und
- Bildung von Durchdringungsnetzwerken (interpenetrating Networks, IPN) bei vernetzten Polymerstrukturen, die besonders günstige mechanische Eigenschaften ergeben.

Anfangs war die Blendherstellung überwiegend auf Verbesserung der Verarbeitbarkeit und Schlagzähmodifizierung, insbesondere für das Tieftemperaturgebiet, ausgerichtet. Dafür wurden vorzugsweise Kautschuke als Blendkomponente eingesetzt (elastomermodifizierte Kunststoffe). Heute werden Polymerblends für das ganze Feld der Eigenschaftverbesserung genutzt, wie z.B. die Erhöhung der Wärmeformbeständigkeit, die Verringerung der Spannungsrissbildung, die Lackierbarkeit, die Galvanisierbarkeit und die Brennbarkeitsverminderung. Die Nutzung der Blendtechnologie für thermoplastische Elastomere sei besonders betont. Durch verstärktes Stoffrecycling hat die Blendtechnik einen weiteren Impuls erfahren.





# Index

## Symbole

3D-Druck (3DP) 332

## A

AA/BB-Polymere 584

Abbau

- Kinetik 420
- mechanisch 420
- photochemisch 420
- thermisch 420
- thermisch-oxidativ 420

Abbrandgeschwindigkeit 167

Abkanten 362

Abkantschweißen 362

Abkühlgeschwindigkeit 121

Abkühlzeit 115, 259

Ablegeverfahren 317

Abminderungsbeiwerte 96

Abminderungsfaktoren 471

AB-Polymere 584

Absorption 139

ABS-Polymerisate 529

Abtragen 414

Acetatseide 682

Acrylamid 505

Acrylat-Elastomere 569

Acrylat-Kautschuk 736

Acrylnitril 563

Acrylsäure 506, 708

- Ester 495, 563

Adapterwerkzeug 243

Additionsvernetzung 741

Additive 753

Additive Fertigungsverfahren 322

Adhesive Forces 74

Adiabatischer Extruder 225

Adipinsäure 585, 605, 695, 724

Advani-Tucker-Orientierungstensor 436

Aktivkohle-Adsorptions-Verfahren 158

Aldehyde 721

Algen 157

Aliphatische Polyester 638

Aliphatisches Polyketon 690

Alkydharze 722

Alkylsulfonsäureester des Phenols 544

Allylderivate 721

Allylester 711

Alterungsschutzmittel 669

Alterungsverhalten 108

Aluminiumhydroxid 669, 758, 771, 775

Aluminiumnitrit 771

Aluminiumoxidhydrat 669

Aluminiumsilikat 771

Aluminiumtrihydrat 775

Amine 667, 710

Aminocaprinsäure 585

Aminoplaste 720

- Formstoffe 702ff.

Ammoniumpolyphosphate 669

Amorph 29

- Struktur 29

- Thermoplaste 36

Amorphe Polyamide 589

Anbacken 76

Anforderungsliste 425f.

Anguss

- Art 252

- Buchse 253

- Markierung 280

Anionische Polymerisation 288

- Anisotropie 40, 446  
 Anschnitt 278  
 Antibakterielle Mittel 769  
 Antibeschlag-Schichten 411  
 Antiblockmittel 753  
 Antihalt-Schichten 411  
 Antioxidantien 755  
 Antistatika 410, 669, 757  
 Aramid  
   – Faser 794  
 Aramide 610, 658  
 Arbeitsablauf 452  
 Arbeitsaufnahme-Vermögen 87  
 Aromatische Polyether 636  
 Aromatische Polyimide 644  
 Aromatische Polysulfide 630  
 Aromatische Polysulfone 630  
 Asbest 783  
 Aspektverhältnis 302, 770  
 Ataktisch 511  
 Atmosphären-Plasmabehandlung 402  
 Atmosphärische Einflüsse 156  
 Atombindung 19  
 Aufbereiten 197  
   – härtpbarer Formmassen 217  
 Aufbereitung 16 ff.  
 Auftriebsverfahren 100  
 Ausdehnungskoeffizient 116, 187  
 Aushärteverlauf 183  
 Ausschwitzen 158  
 Automated Fiber Placement (AFP) 318  
 Automated Tape Layup 318  
 Azelainsäure 724  
 Azodicarbonsäurediamid 767  
 Azopigmente 762  
 Azovernetzung 494
- B**
- Backing-Folie 274  
 Bakterien 157  
 Bändchen 241  
 Bänder 798  
 Barfilex-Verfahren 241  
 Barriere  
   – Schnecke 223  
 Barriereigenschaften 642  
 Batch-Verfahren 291  
 Baudichtungsbahnen 244  
 Baumwolle 680, 789  
 Bauteilversuch 474  
 Baymetec-Verfahren 274  
 Beanspruchungsgrenzwert 471  
 Bedrucken 405  
 Beflocken 407  
 Belichtung 156  
 Beschichten 244, 404  
 Beschleuniger 766  
 Beschriften 405  
 Beständigkeit gegen Organismen 157  
 Beton 794  
 Bewitterung 156  
 Bewitterungsbeständigkeit 156  
 Biaxiale Verstreckung 237  
 Biegefestigkeit 83  
 Biegeformen 362  
 Biegeschwingsversuch 182  
 Biegespannung 82  
 Biegeversuche 87  
 Bi-Komponentenfaser 348  
 Bindegarn 798  
 Bindenaht 96, 238, 269, 282  
 Bioabbaubare Kunststoffe 678  
 Biopolymere 25, 678  
 Biozide 669  
 Bisdien-Harze 727  
 Bis(hydroxymethyl)cyclohexan 695  
 Bis(isocyanatomethyl)norbornan 666  
 Bisphenol A 611, 616 f., 650, 720  
   – Glycidylether 708  
 Blähgraphit 779  
 Blasfolienwerkzeug 242  
 Blenden 197  
 Blends 42 f.  
 Blister-Verfahren 366  
 Blockcopolyamide 608  
 Block-Copolymere 695  
 Blockschaumstoffe 671 ff.  
 Blow Molding Foam Technologie 250  
 Borsten 798  
 Brandgase 166  
 Brandverhalten 165  
 Brechungsindex 142, 411  
 Breitschlitzwerkzeug 236  
 Brennbarkeit 166  
 Brennier-Verfahren 405  
 Brombutylkautschuk 733  
 Bromverbindungen 669

Bruchdehnung 80  
Bruchspannung 80  
Bubble-Verfahren 366  
Bulk Molding Compounds 303, 717  
Butadien-Kautschuk 732  
Butandiol 697, 705  
Buten-1 495, 502  
Buton-Harze 727  
Butylacrylat 505  
Butyl-Kautschuk 733

## C

Calciniertes Kaolin 776  
Calciumcarbonat 771 ff.  
– präzipitiert 773  
Calciumsulfat 771  
CAMPUS 47 f.  
Caprolactam 585  
Carbon Black 773  
Carbonfaser 794  
Carbon Nanotubes 779  
Carbonsäuredianhydride 649  
Carbonsäuren 628  
Carboxylgruppe 660  
Carboxymethylcellulose 685  
Carreau-Modell 61  
Casein-Formaldehyd 686  
Casein-Kunststoffe 686  
Catalloy-Katalysator 511  
Celluloid 684  
Cellulose 680  
– Acetobutyrat 684  
– Derivate 680  
– Hydrat 685  
– Nitrat 684  
– Propionat 683  
Celuka-Verfahren 240  
Cenospheres 777  
Ceramics Injection Molding 264  
Charpy-Kerbschlagzähigkeit 88  
Chemical Vapor Deposition (CVD) 411  
Chemiefaser 781  
Chemische Beständigkeit 153  
Chemisches Schäumen 285  
Chemische Struktur 19  
Chillroll-Verfahren 237  
Chlorbutylkautschuk 733  
Chlorierter PE-Kautschuk 736  
Chloropren-Kautschuk 732  
Chlorsulfonierter PE-Kautschuk 736  
Chromatographie 192  
Chromophore 762  
CIE-Lab-Normfarbtafel 141  
CIE-Lab-System 141  
Clarifier 768  
Coating 765  
Coextrusion 242  
Coextrusionsblasformen 249  
Color-variable Pigmente 764  
Comparative Tracking Index 133  
Compoundieren 201  
Compression Resin Transfer Molding 312  
Computersimulation 450  
Continuous Pressure Laminates 320  
COP 506  
Copolyamide 592, 605, 695  
Copolyester 695  
Copolyester-TPE 692  
Copolymere 505  
Copolymerisate 525  
Coronabehandlung 401  
Coronaentladungen 401  
Couette Rheometer 57  
Coulomb'sche Reibungszahlenmodell 169  
Counter-Valve-Verfahren 280  
Crash-Simulation 85  
Crazes 154  
Cross-Modell 61  
Cycloolefin-Copolymere 505  
Cyclopentan 768

## D

Dachbahnen 244  
Dampfbremsen 165  
Dämpfungswerte 101  
Daopex-Verfahren 494  
Datenbank 48  
Datenblocksystem 484, 538  
Dauerschwingversuch 94, 97  
Deformationsmechanismen 30  
Dehnungskristallisation 33  
Dehnaviskosität 60  
Dehydrokondensation 742  
Dekorative Schichtpressplatten 319  
Dekorieren 405  
Depolymerisation 421

- Di-2-ethylhexyl-Adipinat 683
- Di-2-ethylhexyl-Phthalat 682f.
- Diallylphthalat-Harze 711, 727
- Diamine 592, 644
- Dianhydride 644
- Dibutyl 683
  - Acetat 683
  - Phthalat 682f.
- Dicarbonsäure 592, 610, 617, 695, 724
  - Ester 695
- Dichte 99
  - Gradientensäule 100
  - Profil 100
  - Verlauf 286
- Dichteprofil 100
- Dichteverteilung 76
- Dicyclopentadien 506, 517, 705, 726
- Dielektrischer Verlustfaktor 134, 183
- Dielektrische Spektroskopie 183
- Dielektrisches Verhalten 134
- Dielektrizitätskonstante 183
- Dielektrizitätszahl 134
- Diethyl-Phthalat 682
- Differential-Kalorimetrie 184
- Differential-Thermoanalyse 184
- Diffusion
  - Koeffizienten 148
  - Sperrschichten 411
- Digital Light Processing (DLP) 328
- Diglycidylether 725
- Dihydroxydiphenylsulfid 617
- Dihydroxypolytetrahydrofuran 695
- Diisocyanate 649, 666, 697
- Diisopropyl-Phthalat 682
- Dilatometrie 187
- Dimensionierungskennwerte 468f.
- Dimensionierungsrechnung 468, 473
- Dimethyl-2,6-Naphthalendicarboxylat 629
- Dimethylglykol-Phthalat 682
- Dimethyl-Phthalat 682
- Dioctylacetat 683
- Dioctylsebazat 683
- Diolen 610
- Diphenol-Terephthalat 658
- Diphenylcarbonat 611
- Direct Ink Writing (DIW) 329
- Direktcompoundierung 257
- Dispensen 746
- Dispergieren 198
- Dispergierung 225
- Dispersionsgebiete 89
- Dispersionsknetter 205
- DMA 181
- Doppelbandpressen 320
- Doppelbrechung 142
- Doppelkonusmischer 200
- Doppelschneckenextruder 226
- Doppelschnecken-Knetmischer 205
- Doppeltransportbänder 298
- Dosiervolumen 257
- Dosisleistung 157
- Dough Molding Compounds 717
- Drähte 798
- Dreiplattenmaschine 256
- Dreiplatten-Werkzeug 283
- Dreizonenschnecke 221
- Druckbehälter 794
- Drucksintern 556
- Druckspannung 84
- Druckversuch 84
- DSC 184
- DTA 184
- Dünnwandtechnik 515
- Durchgangswiderstand 125
- Durchlässigkeit 158
- Durchschlagfestigkeit 129
- Durchstoßversuch 87
- Duroplaste 37, 698
- Duroplastische Polyimide 649
- Duroplastspritzgießen 260
- Düse 253
- Düsenziehverfahren 784
- Dynamisches Langzeitverhalten 94
- Dynamisch-mechanische Analyse 101
- Dynamisch-mechanische Spektroskopie 181

## E

- ECTFE 560
- Effektpigment 763
- Eigenschaftsanisotropie 32
- Eigenspannung 37ff., 412, 416
- Eigenverstärkende Polymeren 34
- Eindruckversuch 84
- Einfallstellen 69, 252
- Einlegeteile 273
- Einreiben 410
- Einschnecken-Extruder 220

- Einschnürverhalten 86  
Einspritzgeschwindigkeit 438  
Elastizitätsmodul 79, 97, 181  
Elastomere 727  
Elastomerspritzgießen 262  
Electro-Magnetic-Interference 758  
Electrostatic Discharge 136  
Elektrische Durchschlagfestigkeit 129  
Elektrische Füllstoffe 780  
Elektrische Kennwerte 51  
Elektrisches Verhalten 123  
Elektrische Zeitstandfestigkeit 132  
Elektrolumineszenz 689  
Elektrolytische Korrosion 134  
Elektromagnetische Abschirmung 128, 781  
Elektromagnetische Compatibility 128  
Elektromagnetische Interferenz 128  
Elektromagnetische Verträglichkeit 128  
Elektronenstrahlvernetzung 494  
Elektrospinnprozess 349  
Elektrostatische Aufladung 123, 402, 416  
Elektrostatisches Pulver-Sprühen 405  
Elektrostatisches Verhalten 136  
Elektrostatisches Wirbelsintern 405  
Elektrotechnik 123  
Emulgatoren 668  
Emulsions-Polymerisation 535  
Energieabsorption 95  
Energieelastischer Bereich 29  
Energereiche Strahlung 157  
Engel-Verfahren 494  
Entanglements 25  
Entformung 431  
Entformungsschrägen 146  
Entgasung 225  
– Extruder 223  
Entgraten 412  
Enthalpie 110  
Entropieelastischer Bereich 29  
Entropieelastizität 25  
Entspannungsversuch 89  
Entzündbarkeit 165  
Entzündungstemperatur 166  
Environmental Stress Cracking 153  
Epichlorhydrin 720  
Epichlorhydrin-Kautschuk 738  
Epoxid-Harze 708, 720, 725  
Epoxidierte Produkte 544  
Erodieren 146  
Erosionsdurchschlag 132  
Ersatz-E-Modul 469  
Erstarrungsverhalten 63  
Erweichungsverhalten 106  
Ester aliphatischer Dicarbonsäuren 544  
Etagenpresse 320  
ETFE 560  
Ethylacrylat 505  
Ethylcellulose 685  
Ethylen-Acryl-Copolymerisate 505  
Ethylen-Acrylester-Kautschuk 735  
Ethylen/Acrylsäure-Acrylat 502  
Ethylen-Bitumen-Blend 508  
Ethylen-Chlortrifluorethylen 560  
Ethylen-Copolymere 495  
Ethylenglykol 619, 629  
Ethylen-(Meth)acrylsäure-Copolymere 505  
Ethylen-Propylen-(Dien)-Copolymer 516  
Ethylen-Propylen-(Dien)-Kautschuke 696, 735  
Ethylen-Tetrafluorethylen 560  
Ethylen-Vinylacetat-Copolymere 502, 523  
Ethylen-Vinylacetat-Kautschuk 736  
Ethylen/Vinylalkohol-Copolymer 504  
Exo-Methylenlacton 570  
Expandierbarer Graphit 760  
Expandierter Graphit 779  
Extender 539, 543  
Extruderbauformen 219  
Extrusion 218  
– Blasformen 248  
– Schnecke 221  
– Systeme 219f.  
– Werkzeuge 233
- F**
- Fäden 798  
FAR 168  
Farbe 141  
Farbmessung 141  
Farbmittel 669, 768  
Farbprägungen 407  
Farbspritzen 406  
Farbstoffe 761  
Farbton 761  
Faser 781, 798  
Faserabrieb 433  
Faseraspektverhältnis 448  
Faserausrichtung 438

- Faserherstellung 337
- Faserkonzentration 442
- Faserlänge 433, 448
- Faserlängenverteilung 433
- Faser-Matrix-Haftung 445
- Fasermatten 305
- Fasern 241
  - Harzspritzen 724
- Faserorientierung 435
- Faserpopulation 438
- Faserspinnen 339
- Faserverbundkunststoffe 301
- Federal Aviation Regulations 168
- Federal Motor Vehicle Safety Standard 302
  - 167
- FEM 451
- FEP 560
- Fertigungsgerechtes Konstruieren 430, 435, 442
- Feststoffmischer 200
- Feuchtigkeitsaufnahme 149
- Feuchtigkeitsgehalt 186
- Fibride 487, 512
- Fibrillieren 241
- Ficksches Gesetz 148
- Filmanschnitt 282
- Filmscharniere 362, 474
- Filtereffizienz 347
- Finite-Elemente-Analyse 452
- Flachfäden 798
- Flachs 675, 679, 789
- Flammoxidieren 400
- Flammschutzmittel 669, 758
- Flammspritzen 405
- Flexibilisatoren 765
- Flexo-Druck 405
- Fließfähigkeit 77
- Fließfähigkeitslinien 77
- Fließfront 436
- Fließfunktion 77
- Fließkurven 58f., 78
- Fließort 77
- Fließortkurve 78
- Fließtemperatur 29
- Fließverhalten 23, 54, 420
- Flowability 74
- Fluidinjektionstechnik 269
- Fluor-Copolymerisate 560
- Fluor-Elastomere 560
- Fluoreszenz 764
  - Farbmittel 764
- Fluorierung 410
- Fluor-Kautschuk 737
- Fluor-Phosphazene-Kautschuk 751
- Fluorpolymere 553
- Fluorsilikone 746
- Flüssigkristalline Polymere 34, 654
- Folien 236
  - Bändchen 798
  - Verbunde 243
- Formaldehyd 571
- Formaldehyd-Formmassen 699
- Formbeständigkeit
  - Temperatur HDT 105
  - Wärme 105
- Formen 276
- Formenbau 276
- Formfrei-Sintern 556
- Formfüllungsanalyse 455
- Formmasse-Spezifische Kennwerte 52
- Formprint-Verfahren 406
- Formschaumstoffe 671
- Formschlüssige Verbindung 428
- Formverschäumung 674
- Formwerkzeuge 276
- Formzwang 65
- Fotoätzen 146
- Fotoinitiatoren 327
- Fotolumineszenz 689
- Freistrahlbildung 260
- Friktionsmischer 294
- Fügen 195, 367
- Füllschaumstoffe 671, 674
- Füllstoffe 669, 769, 773
- Füllstoff-Orientierung 71
- Fungizide 769
- Funkenüberschläge 136
- Funktions
  - Elemente 474
  - Polymere 655
  - Werkstoff 18
- Furanharz 721
- Furfurylalkohol 721
- Furnaceverfahren 773
- Fused Filament Fabrication (FFF) 335
- Fused Layer Modeling (FLM) 333
- Fußbodenbeläge 243

**G**

Galvanisieren 409  
Gas-Durchlässigkeit 161  
Gasgegendruckverfahren 271  
Gashinterdruckverfahren 270  
Gasinjektionstechnik (GIT) 300  
Gasphasenfluorierung 410  
Gasphasen-Polymerisationsverfahren 511  
Gebäudebewehrung 794  
Gebrauchstemperatur 106  
Gefügeeigenschaften 464  
Gegentaktspritzgießen 269  
Geschäumte Profile 239  
Gewebe-Prepregs 717  
Gießen 288  
Glanz 140  
– Grad 140, 146  
Glas 771  
– Einfriertemperatur 29  
– Faser 784  
– Faserorientierung 269  
– Übergänge 101, 182  
– Zustand 29  
Glasmatteverstärkte Thermoplaste (GMT) 306  
Glasübergangsbereich 29  
Glasübergangstemperatur 102  
Gleichgewichts-Wasseraufnahme 147  
Gleiteigenschaften 583  
Gleitmittel 753  
Gleitreibung 168  
Glimmentladungen 132  
Glimmer 771, 776  
Glühdrahtprüfung 167  
Glühdrahtschneiden 414  
Glukoserest 680  
Glykoldmethacrylate 550  
Granulated Molding Compounds 717  
Granulator 202  
Granulierer 206  
Granuliertvorrichtungen 211  
Grenzfläche 445  
Grenzflächenpolarisation 124  
Grünlingherstellung 265  
Gummiaufbereitung 209  
Gusspolyamide 609

**H**

Haarrisse 154  
Haftreibung 168  
Haftschichten 411  
Haftvermittler 218, 765  
Halogene 759  
HALS 756  
Hanf 669, 679, 789  
Harnstoff-Harze 720  
Härtbare Formmassen 698  
Härtemessung 84  
Härteprüfverfahren 85  
Hartgummi 727  
Hartschaumstoffe 673  
– Platten 298  
Harzinfusionstechnik 309  
Harzmatten 717  
Haupteinfriertemperatur 29  
Haupteinsatzgebiete 15  
Heavy-Tow-Fasern 790  
Heißabschlag 212  
Heißgießverfahren 677  
Heißkanal 255  
Heißmischen 201  
Heißprägefolien 407  
Heißschaum 671  
Heißschmelz-Verfahren 245  
Heizdrahtmethode 190  
Heizelement-Muffenschweißen 388  
Heizelement-Stumpfschweißen 371, 387  
Heizkeilschweißen 389  
Heizwendelschweißen 388  
Heizwert 112, 165f.  
Herstellungskosten 427  
Hetsäureanhydrid 710  
Hexa-Härter 719  
Hexamethyldisiloxan 411  
Hexamethyldiamin 585  
Hexamethylentetramin 719  
Hexandiol 697  
Hexen 502  
Hilfsstoffe 753  
Hinterschnitt 68, 431  
Hinterspritztechnik 300  
Hitzebeständigkeit von Elastomeren 729  
Hochdruck 405  
Hochdruckmaschinen 291  
Hochdruck-RTM (HP-RTM) 312

Hochdruckverfahren 484  
 Hochfrequenzschweißen 395  
 Hochgeschwindigkeitssintern (HSS) 332  
 Hochleistungsreifen 795  
 Hohlkammer-Profile 234  
 Hohlkörper 248  
 Homogenisierung 225  
 Hosenmischer 200  
 Hot Melt 245  
 Hybridbauweise 273  
 Hybridtechnik 256  
 Hydantoin 659  
 Hydratcellulose 681  
 Hydrierter NBR-Kautschuk 734  
 Hydrocracking 421  
 Hydro-Cure-Verfahren 494  
 Hydrolyse 421  
 Hydrophile Schichten 411  
 Hydrophobe Schichten 411

## I

Imidazolderivate 668  
 Imprägnierung 314  
 Impulsmethode 190  
 Induktionsschweißen 395  
 Industrieruß 773  
 Infrarotschweißen 374  
 Infrarot-Spektroskopie 180  
 Injektionsmischkopf 296  
 Ink-Jet-Technik 406  
 Inline-Dosierung 291  
 In-Mold Labelling 274  
 In-Mold-Surfacing Film 274  
 Innere Eigenschaften 38  
 Insert-Molding-Verfahren 274  
 Inserts 478  
 Integralschaumprozess 240  
 Integralschaumstoff 286, 674  
 Integralstrukturen 271  
 Intervall-Spritzgießen 269  
 Intrinsisch 687  
 – leitfähige Kunststoffe 138  
 Intrudieren 259  
 Intrusionsverfahren 259  
 Intumescenz 758  
 Ionenbindung 19  
 Ionenviskosität 183  
 Ionisierenden Strahlen 157  
 Ionomere 19, 505f.  
 Isochrones Spannungs-Dehnungs-Diagramm 89, 469  
 Isocyanat 660, 666, 724  
 Isocyanat-Kennzahl 662  
 Isocyanurat 660  
 Isolationsverhalten 125  
 Isolierstoffe 123  
 Isopren-Kautschuk 731  
 Isopren-Styrol-Kautschuk 734  
 isotaktisch 20, 511  
 Isotaxie-Index 26

## J

Jetten 746  
 Jute 669, 789

## K

Kalanderbeschickung 202  
 Kalandrieren 246  
 Kalibrator 240  
 Kaltes Plasma 402  
 Kaltgießsysteme 677  
 Kaltgranulieren 213  
 Kalthärtung 710  
 Kaltschaum 671  
 Kalttiefziehen 363  
 Kampfer 684  
 Kanteneinreißfestigkeit 81  
 Kaolin 771, 775  
 Kapillarrheometer 57  
 Kapillarviskosimeter 191  
 Karl-Fischer-Verfahren 152  
 Karussellmaschine 360  
 Kaschieren 244  
 Kaskaden-Extruder 224  
 Kaskadenspritzgießen 269, 274, 281  
 Katalysatoren 668  
 Kautschuke 727, 731  
 Kegelanguss 279  
 Kegel-Platte-Rheometer 57  
 Kegel-Schnecken-Mischer 201  
 Keimbildner 768  
 Kennwertfunktionen 53  
 Keramik 264, 771  
 Kerben 468  
 Kernprägen 262



- Kernresonanz-Spektroskopie 181  
Kern-Schale-Rand-Struktur 435  
Kernschicht 439  
Ketone 721  
Ketongruppe 639  
Kicker 766  
Kieselsäure 550, 775 ff.  
Kleben 397  
Kleiderbügelverteiler 236  
Knäuelstruktur 31  
Kneter 202 ff., 207 f.  
Knetschneckenextruder 205  
Koaleszenz 199  
Kohlenstoffaser 790  
Kohlenstoffpartikel 779  
Kohlenwasserstoff-Harze 727  
Ko-Kneter 202  
Kokos 675  
Kolben-Spritzgießmaschine 258  
Komplementärfarben 141  
Kompressibilität 75, 119, 188  
Kompressions-Modul 99  
Kondensationsreaktion 585  
Kondensationsvernetzung 741  
Konfiguration 19 f.  
Konformation 20  
Konische Schnecken 230  
Konstitution 19, 22  
Konstruktion 423  
Konstruktionskatalog 426 ff.  
Kontakttemperatur 115  
Kontilaminat-Pressen 320  
Kopfgranulierung 212  
Korrosion 134  
Korrosivität 166  
Kraftstoff-Behälter 168  
Kraftstofftanks 249  
Kratzbeständigkeit 403  
Kratzfestbeschichtung 411  
Kratzfestigkeit 410 f.  
Kreide 771  
Kreislaufwirtschaft 417  
Kriechen 30, 469  
Kriechmodul 90 f.  
Kriechstrom 133  
Kriechversuche 89  
Kriechwegbildung 133  
Kristallbildung 31  
Kristalline Überstrukturen 31  
Kristallisation 37  
– Grad 31  
– Verhalten 41  
Kristallisationsgrad 41  
Kristallisationstemperatur 120  
Kristallitbildung 31  
Kritische Dehnung 93, 472  
Kugeleindruckverfahren 154  
Kunstfaser 798  
Kunstleder 244  
Kunststoffabbau 420  
Kunststoffe 15  
Kunststoff-Hauptgruppen 27  
Kunststoffklassen 35  
Kunststoffverbunde 44  
Kurzfaserverstärkte Verbundkunststoffe 303  
Kurzzeit-Biegeversuch 82  
Kurzzeit-Zugversuch 79  
K-Werte 191, 538
- L**
- Labelling 250  
Lacke 677  
Lackieren 403  
Lactam 695  
Lactone 669  
Lamcoat-Verfahren 277  
Laminate 319  
Laminieren 244  
Langfaserverstärkte Thermoplaste 307  
Langglasfasern 786  
Laser  
– Beschriftung 406, 765  
– Schneiden 415  
– Strahlen 406  
– Strahltrennen 415  
Laserdurchstrahlschweißen 384  
Lasersintern (LS) 330  
Lastangriff 451  
Lastenheft 425  
Latente Katalysatoren 668  
Laurinlactam 585, 695  
Lebensdauer-FEM 453  
Leichtbeton 724  
Leiterpolymere 27, 657  
Leitfähige  
– Polymerbeschichtungen 403  
– Polymere 687

– Thermoplast-Compounds 687  
 Leitfähige Füllstoffe 138  
 Leitfähigkeit 125, 128  
 Leitfähigkeitsruß 758  
 Leitlacke 403  
 Leitpfade 780  
 LFI-Verfahren (Lang-Faser-Injektion) 300  
 Lichtbögen 133  
 Lichtbogen-Festigkeit 134  
 Lichtbogenverdampfen 277  
 Lichtdurchlässigkeit 139  
 Lichtechtheit 156  
 Lichtschutzmittel 756  
 Lignin 680  
 Lineare Polyester 27  
 Liquid Crystal Polymers 34  
 LOI (Limiting Oxygen Index) 167  
 Longitudinalwellen-Modul 99  
 Lost-Foam-Verfahren 535  
 Lösungs-Viskosimetrie 191  
 Low Density R-RIM 300  
 Lubonyl-Verfahren 494  
 Luftfeuchte 148  
 Luftstromprallmühlen 214  
 Lunker 69  
 Luvitherm-Verfahren 537  
 Lyocell 789  
 Lyotrope LCP 34

## M

Magnesiumhydroxid 669  
 Magnetische Füllstoffe 780  
 Maillefer  
 – Zonen 202  
 Maleinsäureanhydrid 488  
 Manuelle Sortierung 419  
 Mark-Houwink Gleichung 24  
 Martensgrad 105  
 Maßänderungen 66  
 Masse-Polymerisation 535  
 Masterbatch 764  
 Material Jetting (MJ) 330  
 Materialmodell 462  
 Matrix 433  
 Matrixversteifung 45  
 Matten 785  
 Maxwell-Gleichung 124  
 Mechanische Dämpfung 95, 181  
 Mechanischer Verlustfaktor 95  
 Mechanische Spektroskopie 181  
 Mechanisches Verhalten 79  
 Mehretagen-Werkzeuge 283  
 Mehrfachanspritzung 281  
 Mehrfarben-Spritzgießen 265  
 Mehrkomponentenspritzgießen 265, 300  
 Mehrschicht-Extrusion 242  
 Mehrschichtige Bahnen 243  
 Melamin 759  
 Melamin-Formaldehyd 720  
 Melaminharz-Schaumstoffe 721  
 Melamin-Phenolharz-Formstoffe 702  
 Melamin-Polyesterharz-Formstoffe 703  
 Meltblown-Verfahren 341  
 Melt-Elektrospinning 351  
 Melt Extrusion Manufacturing (MEM) 333  
 Melt Flow Index 62  
 Mesogene 34, 654  
 Mesomorph 34  
 Mesomorpher Zustand 654  
 Mesophasen 34  
 Metal Injection Molding 264  
 Metallbedampfung 409  
 Metalleffektpigment 763  
 Metallhydroxide 760  
 Metallisieren 408f.  
 Metallkomplekxkatalysator 485  
 Metallocen-Katalysatoren 484f., 505, 511, 525, 735  
 Metallsalze 760  
 Metallschrauben 478  
 Metallseifen 550  
 Methacrylat 505  
 Methacrylnitril 652  
 Methacrylsäure 564, 652, 708  
 Methode der Finiten Elemente 450, 469  
 Methylamin 569  
 Methylcellulose 684  
 Methylen-Methyl-Butyrolacton 570  
 Methylmethacrylat 653, 721, 724  
 Methylmethacrylat-Copolymerisate 567  
 Michel-Levy-Farbtafel 144  
 Microballons 777  
 Microspheres 724, 777  
 MID 267  
 Migration 158  
 – Neigung 543  
 Mikroben 157

Mikrokugeln 777  
 Mikropräzisionsspritzgießen 258  
 Mikro-S-Polymerisate 536  
 Mikrospritzgießen 265  
 Mikrostruktur 446, 464  
 Mikrowellenschweißen 396  
 Mikrozellular-Schaumspritzgießen 272  
 Mischen 197  
 Mischer 200  
 Mischteile 202f.  
 Mischungsregel 114  
 Mischwerkstoffverbunde 44  
 Mitteldruckverfahren 485  
 Mittelebenenmodell 453  
 Mittenrauwert 146  
 M-Kautschuke 735  
 Modellierung 459  
 Modifizierung 42  
 Moduln 97  
 Mohs-Härte 773  
 Molded Interconnect Device 267  
 Molekulare Uneinheitlichkeit 25  
 Molekulargewicht 421  
 Molekulargewichtsverteilung 24  
 Molekülbeweglichkeit 35  
 Molekülorientierungen 39, 361  
 Molekülverschlaufungen 25  
 Molmasse 23, 191  
 Monofilament 241  
 Monomere 19  
 Monomerweichmacher 547  
 Monosandwich-Verfahren 268  
 Monosil-Verfahren 494  
 Montagespritzgießen 196, 265  
 Montmorillonit 778  
 Morphologische Struktur 28  
 Mühlen 213  
 Multi-Live-Feed-Injection-Molding 269  
 Multipoint Data 48  
 Multiskalenmodellierung 462  
 Muttern 477  
 MVR 62

## N

Nachdruck 255, 269, 438  
 Nachhärtung 416  
 Nachkristallisation 41, 66, 187  
 Nachschwindung 41, 66

Nachwachsende Füllstoffe 679  
 Nadelverschlussdüsen 254, 280  
 Nagetiere 158  
 Nanocomposite 760, 777  
 Nanofüllstoff 777f.  
 Nanomerlacke 403  
 Nanoröhrchen 779  
 Nanotalkum 775  
 Nanotubes 779  
 Nanowhisker 771  
 Narben 146  
 Natta 511  
 Natta-Katalysatoren 525  
 Natural Fibre Injection (NFI) 300  
 Naturfasern 679, 788  
 Naturkautschuk 21, 728, 731  
 Naturstoffe 679  
 Nebendispersionsgebiete 101, 182  
 Neopentylglykol 723  
 Neopolen-Verfahren 487  
 Netzgeometrie 452  
 Nichtlinearitäten 452  
 Nichtnewtonsche Fließen 31  
 Niederdruck-Hochfrequenzmischer 294  
 Niederdruckmaschine 291  
 Niederdruckverfahren 296, 485  
 Nieten 480  
 Nitril-Butadien-Kautschuk 733  
 Nitril-Chloropren-Kautschuk 733  
 Nitrose-Kautschuk 750  
 NMR 181  
 Nominelle Bruchdehnung 80  
 Non-Crimp-Fabrics 791  
 Norbornen 505, 516, 524  
 Normalien für Werkzeuge 284  
 Novolake 719  
 Nukleierungsmittel 33, 768  
 Nullviskosität 61  
 Nutbuchsensextruder 221

## O

Oberflächenbehandlungen 399  
 Oberflächenrauheit 169  
 Oberflächenstruktur 146  
 Oberflächenwiderstand 125, 128, 136  
 Oil Extended Rubber 730  
 Ölbeständigkeit von Elastomeren 729  
 OLED 689

Olefin-TPE 692  
 Oligomere 25  
 One-Shot-Verfahren 663  
 Optische Aufheller 764  
 Optisches Verhalten 138  
 Organische Gläser 138  
 Organismen 157  
 Organosole 549  
 Orientierung 71, 144, 457  
 Orientierungsmuster 435  
 Orientierungspolarisation 124  
 Ormocere 403  
 Ornat-Verfahren 406  
 Ornatherm-Verfahren 406  
 Ortschaum 674  
 Oszillierende Schmelze 269  
 Outsert-Technik 273  
 Overmolding 265  
 Oxethylcellulose 685  
 Oxidations-Induktions-Zeit OIT 185  
 Oxidativer Abbau 755  
 Oxo-Abbaubarkeit 679

## P

PAI-Faser 795  
 Palmitinsäureester 683  
 PAM-Verfahren 494  
 Paraban-Säure 649  
 Para-Phenylendiisocyanat 666  
 Partikelförmige Feststoffe 72  
 Partikelgrößenverteilung 73  
 Partikelschaum 287  
 Partikel-Schäumverfahren 487  
 Parylene 658  
 Pasten 549  
 – Extrusionsverfahren 556  
 PBI-Faser 795  
 PBO-Faser 796  
 PC 611  
 PC-TMC 616  
 PE-C 495  
 PE-E 487  
 Pektin 680  
 Pelletized Molding Compounds 717  
 PE-(M) 485  
 Perfluoralkoxy-Polymere 561  
 Perfluor-Kautschuk 737  
 Perfluorvinylether 561  
 Perkulationskurven 137  
 Perkulationsschwelle 780  
 Perlglanzpigment 763  
 Permeabilität 642  
 Permeation 158  
 Permeationskoeffizient 159  
 Permittivität 183  
 Peroxidvernetzung 494  
 PET-Faser 797  
 PFA 560  
 Pflichtenheft 425  
 Phenacrylat-Harze 708, 725  
 Phenole 669  
 Phenolharz-Schaumstoffe 720  
 Phenoplaste 719  
 – Formstoffe 702f.  
 Phenylsilikone 746  
 Phillips-Methode 485  
 Phosphor 759  
 Phosphorsäureester 544  
 Phthalat-Weichmacher 544  
 Physical Vapor Deposition 277  
 Physikalisches Schäumen 285  
 physikalische Vernetzungsstellen 36  
 Pigmente 761, 768  
 Pinolenwerkzeug 235  
 Planetenschnecken 225  
 Planetwalzen-Extruder 225  
 Plasma  
 – Behandlung 401  
 – Polymerisation 411  
 – Verfahren 411  
 Plastette 407  
 Plastifikator 202  
 Plastifizieraggregat 252  
 Plastifizierung 223  
 Platisole 549  
 Plate-Out-Effekt 539  
 Poissonzahl 97  
 Polarisationsoptik 40  
 Polarwickelmaschine 315  
 Polieren 146, 403  
 Poly-2,6-Diphenyl-Phenylenoxid 659  
 Poly-4-Methylpenten-1 523  
 Polyacen 688  
 Polyacetal 571  
 Polyacetylen 688  
 Polyacrylate 563  
 Polyacrylnitril 563

- Polyacrylnitrilfaser 799
- Polyacrylnitril-Precursor 790
- Polyalkylenetherdiolen 695
- Poly- $\alpha$ -Methylstyrol 524
- Polyamide 27, 584
- Polyamid-Elastomere 695
- Polyamidfaser 799
- Polyamidimid 650
- Polyamidoamine 710
- Polyamid-TPE 692
- Polyamine 667, 710
- Polyanilin 688
- Polyaramide 794
- Polyaromaten 657
- Polyarylate 610, 628, 654
- Polyarylene 658
- Polyarylester 27, 658
- Polyaryletherketon 639
- Polyarylethersulfone 28, 633
- Polyarylsulfide 28
- Polyazomethine 654
- Polybenzimidazol 649
- Polybismaleininimid 649
- Polybromierte Diphenylether 759
- Polybutene 519
- Polybutylennaphthalat 629
- Polybutylenterephthalat 625f.
- Polycarbonat 611
  - Blends 617
  - Copolymere 616
  - Diöle 697
- Polychlortrifluorethylen 559
- Polycyclische Pigmente 762
- Polycycloacrylnitril 659
- Polycyclobutadien 659
- Polycyclon 657ff.
- Polydicyclopentadien 524
- Polydimethylsiloxan 738f.
- Polyelektrolyt 19, 506
- Polyester 704
  - Amide 654
  - aromatischer Diöle 628
  - aromatisch, gesättigt 610
  - Carbonat 628, 652ff.
  - Diöle 697
  - Faser 799
  - Imid 654
  - Polyole 667
  - Terephthalsäure 619
  - Weichmacher 544
- Polyetheramine 667
- Polyetherblockamide 606ff.
- Polyethercarbonat 616
- Polyetherdiöle 697
- Polyetheretherketon 639
- Polyetherimid 651
- Polyetherpolyesterpolyole 667
- Polyetherpolyole 667
- Polyethylen
  - Chloriert 495
  - Copolymere 484
  - Dioxythiophen 688
  - Faser 796
  - Homopolymere 484
  - Naphthalat 629
  - Oxide 638
  - Terephthalat 619
  - Ultraleicht 502
  - Vernetzt 493
- Polyfluorethylenpropylen 561
- Polyformaldehyd 571
- Polyfuran 688
- Polyglykole 638
- Polyheterocyclus 657
- Polyhydantoin 659
- Polyhydroxyalkanoate 686
- Polyhydroxybuttersäure 686
- Polyhydroxyethylmethacrylat 563
- Polyhydroxyfettsäure 686
- Polyhydroxyvaleriansäure 686
- Polyimid 27, 644, 649
- Polyimidazopyrrolon 659
- Polyimidsulfon 652
- Polyisobuten 519ff.
- Polyisocyanat 289, 660
- Poly-Isophthalat 654
- Polyketon 691
- Polylactid 686
- Polymer 16
- Polymerbildungsreaktionen 26
- Polymerblends 43, 197
- Polymerlegierungen 43
- Polymermischungen 42
- Polymethacrylate 564
- Polymethacrylatmethylimid 653
- Polymethacrylimid 652
- Polymethacrylmethylimid 569
- Polymethylmethacrylat 564

- Polymilchsäure 686  
 Polymonochlorparaxylylen 658  
 Poly-m-Phenylenisophthalamid 654  
 Polynorbornen-Kautschuk 734  
 Polyol 289, 662, 667  
 Polyolefine 483  
 Polyolefin-Elastomere 490, 696  
 Polyolefinfaser 800  
 Polyoxipropylendiamin 667  
 Polyoxymethylen 571  
 Polyparaphenylen 688  
 Polyparaphenylvinylen 688  
 Polyparapyridin 688  
 Polyperfluorotrimethyltriazin-Kautschuk 751  
 Polyphenylenamin 690  
 Polyphenylenbutadien 688  
 Polyphenylene 658  
 Polyphenylenether 636 f.  
 Polyphenylenether-Blends 636  
 Polyphenylensulfid 630, 688  
 Polyphenylenterephthalamid 794  
 Polyphosphazene 751  
 Polyphthalamide 607  
 Poly-p-Hydroxybenzoat 658  
 Poly-p-Methylstyrol 524  
 Poly-p-Phenylenterephthalamid 654  
 Polypropylen  
   – Copolymerisate 515  
   – Homopolymerisate 508  
 Polypropylenoxid 638  
 Poly-p-Xylylene 658  
 Polypyrone 659  
 Polypyrrol 688  
 Polysaccharide 685  
 Polysiloxane 19  
 Polystyrole 525  
   – Block-Copolymere 696  
   – Elastomere 696  
   – Expandiert 534  
   – Hartschaumstoff 534  
   – Metallocenkatalysator 525  
   – Schaumstoff 534  
   – Schlagzäh 529  
   – Sulfonat 690  
 Polysulfid-Kautschuk 749  
 Polyterephthalat-Blends 627  
 Polyterephthalate 654  
 Polytetrafluorethylen 556  
   – Fasern 800  
 Polytetrahydrofuran 639  
 Polythioester 654  
 Polythiophen 688  
 Polytriazine 650  
 Polytrimethylenterephthalat 627  
 Polyurethan 660  
   – Abfallverwertung 665  
   – Acrylatharze 564  
   – Arbeitssicherheit 664  
   – Aufbau 660  
   – Brandverhalten 664  
   – Elastomere 697  
   – Faser 677, 801  
   – Kautschuk 677  
   – Kettenverlängerer 668  
   – Klebstoffe 677  
   – Lacke 677  
   – Mikroapseln 677  
   – Rohstoffe 665  
   – Verfahrenstechnik 289  
   – Vernetzer 668  
 Polyvinylacetat 551  
 Polyvinylalkohol 504, 551  
 Polyvinylalkoholfaser 800  
 Polyvinylbenzole 524  
 Polyvinylbutyral 552  
 Polyvinylcarbazol 529, 552  
 Polyvinylchlorid 549  
 Polyvinylchlorid-hart 535  
 Polyvinylchlorid-weich 543  
 Polyvinylfluorid 558  
 Polyvinylformal 552  
 Polyvinylidenchlorid 551  
 Polyvinylidenfluorid 558  
 Polyvinylmethylether 552  
 Polyvinylpyrrolidon 553  
 Post-Consumer-Abfälle 418  
 Postprocessing 452  
 Potenzgesetz 24, 60  
 Powder Injection Molding 264  
 PP+EPDM-Elastomer-Blends 516  
 PP chloriert 515  
 PP-Copolymere 515  
 PP-CR 511  
 PP galvanisierbar 518  
 PP glasfaserverstärkt 518  
 PP-R 511  
 PP-Schaumstoffe 512  
 Prägekalander 243

Prägen 407  
Pre-Consumer-Abfälle 417  
Prepolymer 663  
Prepolymer-Verfahren 289, 663  
Prepregbänder 717  
Prepreg-Herstellung 317  
Prepregs 698  
Preprocessing 452  
Pressen von Duroplasten 319  
Pressmassen 698  
Pressverbindung 481  
Primärweichmacher 543  
Probekörper 52  
Produktentwicklung 424  
Produktionsvolumen 13  
Propylenglykol 705  
Propylenoxid-Kautschuk 738  
Propylen-Tetrafluorethylen-Kautschuk 737  
Prototyp 473  
Prozesssimulation 450  
PS-E 534  
PS-HI 529  
PS-Leichtschaum 534  
PS-(M) 525  
PS-Partikelschaum 534  
PS-S-(M) 525  
PTFEAF 560  
Pultrusion 316  
Pulver-Beschichtung 404  
Pulverextrusion 556  
Pulverlackieren 404  
Pulver-Slash-Verfahren 405  
Pulverspritzgießen 264  
Punktanguss 278  
PUR-Elastomere 750  
PUR-H 673  
PUR-I 674  
PUR-M 677  
PUR-Spritzmaschinen 296  
PUR-Sprühmaschinen 296  
PUR-Systeme 291  
PUR-W 671  
PVC-C 536  
PVC-(E) 535  
PVC-E 550  
PVC-HI 540  
PVC-(M) 535  
PVC-P 535, 543  
PVC-P-Organosole 549

PVC-P-Pasten 549  
PVC-P-Plastisole 549  
PVC-P-Schäume 550  
PVC-(S) 535  
PVC-U 535  
pvT-Diagramm 64, 119  
Pyknometer 100  
Pyrolyse 758  
Pyrrone 657

## Q

Quasielastischer Ersatzkennwert 469  
Quelldehnung 152  
Quellströmungseffekt 435  
Quellung 152  
Querkontraktion 97  
Querkontraktionszahl 470  
Querkürzung 97  
Querszahl 97

## R

Radikalische Vernetzung 741  
Raman-Spektroskopie 180  
Ram-Extruder 487, 556  
Ramie 789  
Randfaserdehnung 82  
Rapid Manufacturing 324  
Rapid Prototyping 323  
Rapid Tooling 324  
Rapsöl 667  
Rauchentwicklung 166  
Rauigkeit 146  
Reaction Injection Molding (RIM) 674  
Reaktionsharze 698  
Reaktionsschaumgießen 674  
Recycling 417  
– gemischter Kunststoff 418  
Recyclingmaterial 218  
Reflexion 140  
– Verluste 139  
Reibpartner 176  
Reibschlüssige Verbindung 428  
Reibung 168  
Reibungskoeffizient 177  
Reibungsschwingung 169  
Reihenpunktanschnitt 282

Reinforced Reaction Injection Molding (R-RIM) 300  
 Reinigungsgranulat 263  
 Relaxation 30, 187  
 – Modul 90  
 – Versuch 89  
 Remissionskurven 141  
 Repräsentatives Volumenelement 462  
 Resin Transfer Molding 311  
 Resistenzfaktoren 94  
 Retardation 30  
 – Versuch 89  
 Reverse-Roll-Coater 244  
 Rheologisches Verhalten 54  
 Rheometer 56  
 RIM (Reaction Injection Molding) 299  
 Rissbildung 153  
 Rizinusöl 667  
 Rohdichte 99f., 288  
 Röhrenradmischer 200  
 Rohre 233  
 Rohstoffliche Verwertung 421  
 Rollfässer 200  
 Rotationsformen 358  
 Rotationsgießen 289  
 Rotationsreibschweißen 379  
 Rotationsschmelzen 487  
 Rotierende Feststoff-Mischbehälter 200  
 Roving 785  
 Ruckgleiten 169  
 Rückstromsperre 252  
 Rührwerksmischer 211  
 Ruß 669, 773, 777

## S

Sandwich-Spritzgießen 267ff.  
 Sättigungswerte 148  
 Sauerstoffindex 167  
 Schalenschicht 439  
 Schalentechnik 275  
 Schäume 549  
 Schäumen 239ff., 285  
 Schaumspritzgießen 271  
 Schaumstabilisator 668, 757  
 Schaumstoff 100, 286  
 Schergeschwindigkeit 54  
 Scherteil 202  
 Scherviskosität 54

Scherwalzen-Extruder 205f.  
 Scherwinkel 98  
 Scherzelle 79  
 Schichtmodell 38f.  
 Schichtpressen 319  
 Schichtpressstoffe 218, 319  
 Schichtsilikat 778  
 Schiebung 98  
 Schießbaumwolle 684  
 Schimmelpilze 157  
 Schlagarbeit 88  
 Schlagversuche 87  
 Schlagzähigkeit 88f.  
 Schlagzähmacher 765  
 Schlauch-Folien 238  
 Schlichte 445  
 Schmelze  
 – Filter 218, 233  
 – Massenfließrate MFR 62  
 – Pumpen 233  
 – Spinnverfahren 512  
 – Volumenfließrate 62  
 – Walzenverfahren 245  
 – Wärme 33  
 Schmelzeviskosität 55, 420  
 Schmelzspinnen 338  
 Schmelztemperatur 32  
 Schnappverbindung 475  
 Schneckenknetter 201, 204  
 Schnellläufer-Extruder 225  
 Schnitzmassen 218  
 Schrauben  
 – Verbindungen 478  
 Schraubverbindung 477  
 Schrumpffolien 361  
 Schrumpfschläuche 361  
 Schrumpfung 40  
 Schubmodul 30ff., 98, 101, 181  
 Schubspannung 54, 98  
 Schuhoberstoffe 244  
 Schüttdichte 75  
 Schüttwinkel 74  
 Schutzkleidung 795  
 Schutzplanen 244  
 Schwebeverfahren 100  
 Schweißen 369  
 Schweißverbindung 480  
 Schwerspat 669  
 Schwindung 39, 63ff., 234, 456



- Differenz 68
- Schwindungsverhalten 67
- Sekantenmodul 81
- Sekundärweichmacher 543
- Selbstentzündungs-Temperatur 166
- Selbstformende Schrauben 478
- Selbstschneidende Schrauben 480
- Selbstverstärkende Polymere 654
- Sequenzielle Coextrusion 250
- Sequenzielle Copolymere 516
- Sequenzielles Spritzgießen 269
- Sequenzverfahren 268
- Sheet Molding Compounds 305, 717
- Shish-kebab-Strukturen 33
- Shore-Härte 84
- Sicherheitsdatenblatt 664
- Siebdorn 233
- Siebdruck 406
- Siebkorb 233
- Siegelpunkt 67
- Siegelzeit 63
- Silanvernetzung 494
- Silikate 669
- Silikone 19, 738
- Silikonfestkautschuk 739
- Silikonflüssigkautschuk 739
- Silikonspritzgießen (LSR) 272
- Silo-Senkrechtmischer 201
- Simulation 450
- Single Point Data 48
- Sintertechnik 213
- Sioplas-Verfahren 494
- SiO<sub>x</sub>-Beschichtung 409
- Sisal 675, 789
- Skinpack-Verfahren 366
- Slicen 323
- Small-Tow-Fasern 790
- SMS-Vliesstoffe 344
- Software 466
- Sol-Gel-Prozess 403
- Solid Phase Pressure Forming 512
- Solution-Elektrospinning 352
- Solvatation 29
- Spacer 34, 655
- Spanabhebende Bearbeitung 412
- Spannung
  - Durchschlag 129
  - Korrosion 153
  - Rissbeständigkeit 153
  - Rissbildung 93, 153
- Spannungs-Dehnungs-Diagramm 91
- Spannungs-Dehnungs-Linien 81
- Spannungstensor 75
- Spannungsübertragung 74
- Spannungsverhältnis 73
- Spezifische Enthalpie 110
- Spezifischer Durchgangswiderstand 125
- Spezifisches Volumen 119
- Spezifische Wärmekapazität 110
- Sphärolithe 31
- Spheripol-Verfahren 511
- Spherisil-Verfahren 494
- Spinn
  - Fäden 785
  - Fasern 487
- Spleißfasern 241
- Spleißfolien 798
- Splittfasern 798
- Spring-In-Effekt 70
- Spritzgieß
  - Sonderverfahren 430
- Spritzgießen
  - Pressen 321
- Stabilisatoren 755
- Standversuche 89
- Stangenanguss 278
- Stapelfasern 785
- Starter 766
- Statische Mischer 207
- Statisches Langzeitverhalten 89
- Statistische Copolymere 516
- Staubanziehung 136
- Staubuchsen 233
- Stegplatten 235
- Stempelknetzer 209
- Stereoisomere 21
- Stereolithografie (SLA) 327
- Sterisch gehinderte Amine 756
- Stick-Slip-Effekt 169
- Stifteindrückverfahren 154
- Stift-Scheibe-Prüfstand 172
- STL 323
- Stoffschlüssige Verbindung 428
- Stop-and-go-Prinzip 299
- Stoß 85
- Strahlenvernetzung 176, 415, 743
- Strainer 247
- Strangablegeverfahren 336

Strangaufweitung 234  
 Strangpressen 321  
 Streckdehnung 80  
 Streckformen 364  
 Streckspannung 80  
 Streichen 244  
 Streuung 139  
 Structural Reaction Injection Molding (SRIM) 301  
 Strukturelemente 452  
 Strukturgeschäumte Mattenlamine 724  
 Strukturviskosität 31  
 Strukturwerkstoff 17  
 Styrol 721  
 – Butadien-Kautschuk 732  
 – Polymere 524  
 – TPE 692  
 Styromull 535  
 Sulfohydrazide 766  
 Suspensions-Polymerisation 535  
 Syndiotaktisch 20, 511  
 Synthesefaser 798  
 Synthesekautschuke 728  
 Systematisches Konstruieren 424

## T

Tackifier 521  
 Tagesleucht-Farbmittel 764  
 Taktizität 20  
 Talk/Talkum 771, 774  
 Talkum 518  
 Tandem-Extruder 224  
 Tandemaschinen 256  
 Tapes 717  
 Tauchbaddekoriieren 406  
 Tauchverfahren 404  
 Tauglichkeit 153  
 Taumelmischer 200  
 Tauwasserbildung 165  
 Teerpeche 790  
 Teilaromatische Polyamide 606  
 Teilkristallin 31, 36  
 Temperatur  
 – Index 108  
 – Leitfähigkeit 115  
 – Zeit-Grenzen 108  
 Temperatureinwirkung 108  
 Tempenn 416  
 Tenside 668  
 Tensile Impact Strength 88  
 Terephthalsäure 605, 619  
 Termiten 158  
 Terpolymere 526  
 Tetrabrombenzoesäureester 669  
 Tetrabrombisphenol 759  
 Tetraederstruktur 20  
 Tetrafluorethylen-Hexafluorpropylen-Copolymer 561  
 Tetramethyldiamin 585  
 Textilglasfasern 785  
 Textiltapeten 244  
 TFEHFPVDF 560  
 TFEP 560  
 TGA 186  
 Therimageverfahren 406  
 Thermische Leitfähigkeit 189  
 Thermisches Spritzen 411  
 Thermisches Verhalten 101  
 Thermoeffusionsdruck 406  
 Thermofixierung 237  
 Thermogravimetrische Analyse 186  
 Thermomechanische Analyse 187  
 Thermoplastische Elastomere 36f., 627, 692  
 Thermoplastische Polyimide 650  
 Thermoplastische Schaum-Extrusion (TSE) 239  
 Thermoplastisches Olefin-Elastomer 696  
 Thermoplastische Stärke 685  
 Thermoplast-Schaum-Gießen 271  
 Thermoplast-Schaum-Spritzgießen 534  
 Thermotrope LCP 34  
 Thiocarbonyldifluorid-Kautschuk 750  
 Tiefdruck 405  
 Tiefeneffekt 763  
 Tiefziehen 364  
 Titandioxid 777  
 T-Kautschuke 749  
 TMA 187  
 Toleranzen 71  
 Torsionspendel 101, 182  
 Torsionsschwingungsversuch 182  
 Toxizität 166  
 Transferpressen 321  
 Transmissionsgrad 139  
 Transparenz 139  
 Trans-Polyoctenamer-Kautschuk 734  
 Treibmittel 197, 668, 766  
 Trennen 414

Trennmittel 669, 753  
Trennschweißen 414  
Tribologische Eigenschaften 173  
Tribologisches System 168  
Trichlorethylphosphat 682  
Triglyzeride 722  
Triisocyanate 666  
Trimellitate 544  
Trimethylcyclohexan 616  
Trimethylcyclohexan-Bisphenol 616  
Trioxan 571  
Trockenlufttrockner 217  
Trockner 215  
Trocknungsparameter 216  
Trogknetter 209  
Trommelziehverfahren 785  
Trübung 140  
Trübungszahl 140  
Tunnelanschnitt 283  
TVI-Test 152  
Twin-Sheet-Verfahren 366  
Typisierte Duroplast-Formmassen 699

## U

Überlegformung 362  
UL 94 166  
Ultraschall-Reinigung 402  
Ultraschallschweißen 382  
Umformen 195, 361  
Ummantelungen 235  
Umwelteinflüsse 147  
Underwriters' Laboratories 166  
Ungesättigte Polyester 704, 721  
Universalstab 79  
Urethan-Kautschuk 750  
Urethan-TPE 692  
Urformen 195  
UV-Absorber 756  
UV-Schutzschichten 411

## V

VAC 502  
Vakuumentziehen 365  
VARI 309  
Verarbeitungsschwindigkeit 64, 67  
Verarbeitungstechnische Kennwerte 54, 804  
Verbrennungswärme 110, 165

Verbundbauteile 432  
Verdichtung 64, 72, 75 ff.  
Verdichtungsspannung 75  
Verlustfaktor 101, 183  
Verlustzahl 183  
Vernetzte Elastomere 37  
Vernetzte Polymere 421  
Vernetzung 136, 176  
Vernetzungssysteme 740  
Verrippung 468  
Versagenskriterien 472  
Verschleiß 170  
Verschleißbetrag 170  
Verschleißkoeffizient 177  
Verschleißrate 170  
Verschlussdüsen 254  
Verstärkungsfasern 301, 782  
Verstreckung 118, 237  
Verzug 39 ff., 69, 456  
Verzweigungen 22  
Vibrationsschweißen 377  
Vicat-Erweichungstemperatur 105  
Vielfach-Werkzeug 282  
Vinylacetat 495, 721  
Vinylchlorid-Copolymeren 548  
Vinylester-Harze 708, 725  
Vinylpolymere 535  
Viskoelastizität 30  
Viskosität 54, 191  
Viskositätskurve 56  
Viskositätsmittelwert 24  
Viskositätsmodelle 60  
Viskositätsverhältnis 191  
Viskositätszahl 191, 538  
Vliese 785  
Vliesstoffherstellung 342  
Vollelektrische Spritzgießmaschine 256  
Vollprofile 234  
Volumenelemente 464  
Volumenmodell 453  
Volumenschwindung 65  
Vorbehandlung von Oberflächen 400  
Vulkanfiber 685

## W

Wabenkerne 795  
Wahre Dehnung 86  
Wahre Spannung 86

Wanddicke 115  
 Wärme  
   – Ausdehnungskoeffizient 116  
   – Behandlung 416  
   – Durchschlag 132  
   – Eindringzahl 115  
   – Leitfähigkeit 112  
   – Stabilisator 757  
 Wärmekapazität 110  
 Wärmeleitende Füllstoffe 781  
 Wärmeleitfähigkeit 189  
 Warmgas-Extrusionsschweißen 393  
 Warmgas-Fächelschweißen 391  
 Warmgas-Stumpfschweißen 375  
 Warmgas-Ziehschweißen 392  
 Warmhärtung 710  
 Warmlufttrockner 216  
 Wasser  
   – Aufnahme 148  
   – Dampf-Diffusions-Widerstandszahl 165  
   – Dampf-Durchlässigkeit 159  
   – Gehalt 152  
   – Lacke 720  
   – Leitungsrohre 93  
   – Strahlschneiden 415  
 Wasseraufnahme 593  
 Wasserstoffbrückenbindungen 592  
 Wasserstrahlverfestigung 344  
 Weeping 158  
 Weich  
   – Gummi 727  
   – Macher 543, 765  
   – Schaumblöcke 297  
   – Schaumstoffe 671  
 Weiterreißfestigkeit 81  
 Welt-Kunststoffproduktion 14  
 Wendelverteiler 233, 242  
 Wendelverteilerwerkzeug 239  
 Werkstoffauswahl 427, 432  
 Werkstoffgerechtes Konstruieren 468  
 Werkstoffkennwerte 48  
 Werkstoffliche Verwertung 418  
   – Primär 419  
   – Sekundär 419

Werkzeug 195, 276  
 Werkzeugfüllsimulation 455  
 Whiskers 777  
 Wickelverfahren 313  
 Wiederverarbeitung 417  
 Williams-Landel-Ferry-Beziehung 62  
 Windkraftanlagen 793  
 Wirbelsintern 404, 487  
 Wöhler-Kurve 95  
 Wollastonit 669, 675, 771, 776  
 Wood Plastics Compounds 790

## X

Xanthene 764  
 XPS 534

## Z

Zähigkeit 87  
 Zeitbruchlinien 93  
 Zeit-Dehn-Linien 89  
 Zeitstand-Festigkeitsverhalten 93  
 Zeitstand-Innendruckversuch 93  
 Zeitstandversuch 89  
 Zellglas 685  
 Zellregler 668  
 Zersetzungsverhalten 186  
 Ziegler-Katalysatoren 511  
 Ziegler-Natta-Katalysatoren 520  
 Ziegler-Verfahren 485  
 Ziehformen 363  
 Zitronensäureester 544, 683  
 Zugfestigkeit 83  
 Zugversuch 79, 87  
 Zulässige Gebrauchstemperatur 101  
 Zweikomponentenspritzguss 266  
 Zweiplattenmaschine 256  
 Zwischenschicht-Spritz-Technik 300  
 Zykluszeit 250