Dietmar Drummer
Tim A. Osswald
Natalie Rudolph

Saechtling
Kunststoff-Handbuch



33., aktualisierte Auflage

HANSER

Disclaimer zur Barrierefreiheit

Der Carl Hanser Verlag unternimmt große Anstrengungen, um seine Produkte barrierefrei zu machen. Dazu gehört auch, dass Bilder oder Tabellen für blinde und sehbehinderte Menschen zugänglich gemacht werden. Dies geschieht durch zusätzliche beschreibende Texte (Alternativtexte), die in den Daten integriert sind. Die Alternativtexte können von assistiven Technologien (z. B. Screenreadern) vorgelesen werden. Bei der Erstellung dieser Texte kommt eine KI zum Einsatz. Die inhaltliche Verantwortung liegt weiterhin bei den Lektor:innen und Autor:innen.

Drummer / Osswald / Rudolph

Saechtling Kunststoff-Handbuch



Bleiben Sie auf dem Laufenden!

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Kunststoff-Taschenbuch/-Handbuch
Begründet von Dr. Franz Pabst
8. bis 17. Ausgabe bearbeitet von Dr. Hansjürgen Saechtling und Dipl.-Ing. Willi Zebrowski
18. bis 24. Ausgabe bearbeitet von Dr. Hansjürgen Saechtling
25. Ausgabe bearbeitet von Prof. Dr.-Ing. Wilbrand Woebcken
26. bis 28. Ausgabe bearbeitet von Dr.-Ing. Karl Oberbach
29. Ausgabe bearbeitet von Dr.-Ing. Karl Oberbach, Dr.-Ing. Erwin Baur, Dr. rer. nat. Sigrid Brinkmann und Prof. Dr.-Ing. Ernst Schmachtenberg
30. Ausgabe bearbeitet von Dr.-Ing. Erwin Baur, Dr. rer. nat. Sigrid Brinkmann, Prof. Dr. Tim A. Osswald und Prof. Dr.-Ing. Ernst Schmachtenberg
31. Ausgabe bearbeitet von Dr.-Ing. Erwin Baur, Dr. rer. nat. Sigrid Brinkmann, Prof. Dr. Tim A. Osswald, Dr.-Ing. Natalie Rudolph und Prof. Dr.-Ing. Ernst Schmachtenberg
32. Auflage bearbeitet von Dr.-Ing. Erwin Baur, Prof. Dr.-Ing. Dietmar Drummer, Prof. Dr. Tim A. Osswald und Dr.-Ing. Natalie Rudolph
33. Auflage bearbeitet von Prof. Dr.-Ing. Dietmar Drummer, Prof. Dr. Tim A. Osswald und Dr.-Ing. Natalie Rudolph

Dietmar Drummer
Tim A. Osswald
Natalie Rudolph

Saechtling Kunststoff-Handbuch

33., aktualisierte Auflage

HANSER

Print-ISBN: 978-3-446-47959-3
E-Book-ISBN: 978-3-446-48713-0

Die allgemein verwendeten Personenbezeichnungen gelten gleichermaßen für alle Geschlechter.

Alle in diesem Werk enthaltenen Informationen, Verfahren und Darstellungen wurden zum Zeitpunkt der Veröffentlichung nach bestem Wissen zusammengestellt. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Werk enthaltenen Informationen für Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht. Ebenso wenig übernehmen Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt also auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benützt werden dürften.

Die endgültige Entscheidung über die Eignung der Informationen für die vorgesehene Verwendung in einer bestimmten Anwendung liegt in der alleinigen Verantwortung des Nutzers.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet unter http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.
Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Werkes, oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 UrhG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.
Wir behalten uns auch eine Nutzung des Werks für Zwecke des Text und Data Mining nach § 44b UrhG ausdrücklich vor.

© 2026 Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München
Vilshofener Straße 10 | 81679 München | info@hanser.de
www.hanser-fachbuch.de
Lektorat: Dr. Mark Smith
Herstellung: Der Buchmacher – Arthur Lenner, München
Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München
Covergestaltung: Thomas West
Titelmotiv: © Tim A. Osswald
Satz: Eberl & Koesel Studio, Kempten
Druck: Elanders Waiblingen GmbH, Waiblingen
Printed in Germany

Vorwort zur 33. Auflage

Kunststoffe bleiben bei der für Ingenieurinnen und Ingenieure maßgeblichen volumetrischen Betrachtung die weltweit bedeutendste Werkstoffgruppe. Dies spiegelt nach wie vor ihre herausragenden Eigenschaften wider: eine exzellente Verarbeitbarkeit zu komplexen Bauteilen in höchst wirtschaftlichen Verfahren sowie die Möglichkeit, Werkstoffprofile gezielt auf spezifische Anwendungen und Verarbeitungstechniken abzustimmen. Ob in der Elektronik als Gehäuse- und Isolationswerkstoff, in der Kabel- und Leiterplattentechnik, in Verpackungen, der Medizintechnik oder der Automobilindustrie – Kunststoffe sind aus der modernen Techniklandschaft nicht mehr wegzudenken. Im Bauwesen eröffnen sie in Kombination mit anderen Materialien innovative Gestaltungsmöglichkeiten und nachhaltige Konzepte.

Seit dem Erscheinen der vorherigen Auflage hat sich die Rahmenbedingungen der Kunststoffwelt nochmals spürbar dynamisiert. Der gesellschaftliche, regulatorische und ökologische Druck bezüglich Nachhaltigkeit, Ressourcenschonung und Dekarbonisierung fordert die gesamte Branche heraus. Themen wie der biologische Abbau, das Vermeiden von Mikroplastik sowie drängende Fragestellungen rund um zirkuläre Wertschöpfungsketten und Rezyklate stehen heute mehr denn je im Fokus von Forschung, Industrie und Gesetzgebung. Den damit verbundenen Anforderungen begegnet die Branche mit innovativen Ansätzen im Bereich der Biokunststoffe, maßgeschneiderten Additiven und Flammschutzmitteln sowie fortschrittlichen Recyclingtechnologien.

Um diese Entwicklungen präzise abzubilden, wurde die **33. Auflage** gezielt überarbeitet und in entscheidenden Themen erweitert:

- Werkstoffliche Neuerungen: Umfassende Ergänzungen bei Biokunststoffen, der biologischen Abbaubarkeit und der Mikroplastik-Thematik tragen der steigenden Bedeutung nachhaltiger Materialien Rechnung. Zudem wurden die Abschnitte zu Flammschutz, Additiven, Füllstoffen, Fasern und modernen Recyclingverfahren auf den neuesten Stand gebracht.

- Verarbeitungstechnische Neuerungen: Im Bereich der Verarbeitungstechnik wurden aktuelle Entwicklungen beim Schäumen, der Additiven Fertigung (3D-Druck), der Extrusion, dem Rotationsformen sowie bei der Faserherstellung und der Auslegung von Spritzgießwerkzeugen konsequent integriert.

Die besondere Herausforderung in der Kunststofftechnik liegt weiterhin in den ausgeprägten Wechselwirkungen zwischen Konstruktion, Werkstoffverhalten und Verarbeitungsprozess. Fundiertes Fachwissen über alle diese Teildisziplinen und deren Interdependenzen ist der Schlüssel für jeden nachhaltigen Entwicklungserfolg.

Der „Saechtling“ verfolgt auch in seiner 33. Auflage den Anspruch, als kompaktes, verlässliches und aktuelles Nachschlagewerk der gesamten Kunststoffbranche zu dienen – für Fachleute in Praxis und Forschung ebenso wie für Studierende und interessierte Einsteiger. In Zeiten unstrukturierter und unübersehbarer Informationsfluten im Internet bietet Ihnen dieses gedruckte Wissensportal fundierte, geprüfte und konservativ aufbereitete Fachdaten.

Wir fühlen uns der jahrzehntelangen Tradition dieses Buches verpflichtet und möchten Ihnen ein Werk an die Hand geben, das schnelle Antworten auf komplexe Fragen bietet, Impulse setzt und als Ausgangspunkt dient, um technische und ökologische Herausforderungen erfolgreich zu meistern.

Wir wünschen allen Leserinnen und Lesern viel Erfolg bei der Gestaltung der Zukunft mit Kunststoffen!

Im September 2026 *Die Herausgeber*

Inhalt

Vorwort zur 33. Auflage ..... **V**

1 Kurzzeichen der Kunststoff-Technik **1**

1.1 Alphabetische Gliederung verwendeter Kurzzeichen für Kunststoffe, chemische Bezeichnung 2

1.2 Grundeinheiten, ISO- und US-Einheiten 12

2 Einleitung **17**

2.1 Wirtschaftliche Bedeutung der Kunststoffe 17

2.2 Einordnung der Kunststoffe in das Gebiet der Werkstoffe 19

2.3 Aufbau der Kunststoffe 22

2.3.1 Chemische Struktur (Konstitution und Konfiguration der Makromoleküle) 23

2.3.1.1 Konformation 24

2.3.1.2 Konfiguration 24

2.3.1.3 Konstitution 25

2.3.1.4 Kunststoff-Hauptgruppen 30

2.3.2 Morphologische Struktur (Konformation und Aggregation der Makromoleküle) 32

2.3.3 Kunststoffklassen 38

2.4 Einfluss der Fertigung auf die inneren Eigenschaften 40

2.4.1 Eigenspannungen 41

2.4.2 Molekül-Orientierung 42

2.4.3 Kristallisationsverhalten 44

2.5 Stoffliche Modifizierung von Kunststoffen ... 45
2.5.1 Copolymere und Polymermischungen (Blends) ... 45
2.5.2 Kunststoffverbunde ... 47

3 Eigenschaften und Prüfverfahren ... 49

3.1 Aussagekraft der Kennwerte ... 50
3.2 Verarbeitungstechnische Kennwerte ... 56
3.2.1 Rheologisches Verhalten ... 56
3.2.1.1 Fließverhalten, Viskosität ... 56
3.2.1.2 Viskositätsmodelle ... 62
3.2.1.3 Schmelze-Volumenfließrate MVR und Schmelze-Massenfließrate MFR ... 64
3.2.2 Erstarrungsverhalten ... 65
3.2.2.1 Siegelzeit ... 65
3.2.2.2 Schwindung ... 65
3.2.2.3 Verzug ... 71
3.2.2.4 Toleranzen ... 72
3.2.2.5 Füllstoff-Orientierung ... 72
3.2.3 Prüfung partikelförmiger Feststoffe ... 74
3.2.3.1 Bestimmung der Partikelgrößenverteilung ... 74
3.2.3.2 Mechanik partikelförmiger Feststoffe ... 74
3.2.3.3 Adhäsionskräfte und Fließfähigkeit ... 75
3.2.3.4 Fließfähigkeit und der Fließort ... 78
3.3 Mechanisches Verhalten ... 80
3.3.1 Kurzzeitverhalten ... 80
3.3.1.1 Kurzzeit-Zugversuch ... 80
3.3.1.2 Kurzzeit-Biegeversuch ... 83
3.3.1.3 Druckversuch ... 84
3.3.1.4 Eindruckversuch, Härtemessung ... 84
3.3.2 Verhalten bei Stoß ... 86
3.3.2.1 Berechnungs-Kennwerte ... 86
3.3.2.2 Schlag-, Biege- und Zugversuche nach CAMPUS ... 88
3.3.3 Statisches Langzeitverhalten ... 90
3.3.3.1 Zeitstand-Zugversuch ... 90
3.3.3.2 Zeitstand-Innendruckversuch an Rohren ... 94

3.3.4 Dynamisches Langzeitverhalten ... 95
3.3.5 Moduln und Querzahl ... 97
3.3.6 Dichte ... 100
3.4 Thermisches Verhalten ... 101
3.4.1 Zulässige Gebrauchstemperatur ... 101
3.4.1.1 Kurzzeitige Temperatureinwirkung ... 101
3.4.1.2 Langzeitige Temperatureinwirkung ... 107
3.4.2 Spezifische Wärmekapazität, Spezifische Enthalpie, Verbrennungswärme ... 109
3.4.3 Wärmeleitfähigkeit ... 111
3.4.4 Wärmeeindringzahl ... 114
3.4.5 Temperaturleitfähigkeit ... 115
3.4.6 Wärme-Ausdehnungskoeffizient ... 115
3.5 Elektrisches Verhalten ... 122
3.5.1 Isolationsverhalten ... 124
3.5.1.1 Durchgangs-Widerstand/Leitfähigkeit ... 124
3.5.1.2 Oberflächen-Widerstand ... 127
3.5.1.3 Elektromagnetische Abschirmung (Verträglichkeit EMV, Compatibility EMC) ... 127
3.5.2 Festigkeitsverhalten ... 128
3.5.2.1 Elektrische Durchschlagfestigkeit ... 128
3.5.2.2 Elektrische Zeitstandfestigkeit ... 131
3.5.2.3 Kriechstromfestigkeit ... 132
3.5.2.4 Lichtbogen-Festigkeit ... 133
3.5.2.5 Elektrolytische Korrosion ... 133
3.5.3 Dielektrisches Verhalten ... 133
3.5.4 Elektrostatisches Verhalten ... 135
3.5.5 Elektrisch leitfähige Kunststoffe ... 136
3.6 Optisches Verhalten ... 137
3.6.1 Lichtdurchlässigkeit ... 138
3.6.2 Glanz und Reflexion, Trübung ... 139
3.6.3 Farbe ... 140
3.6.3.1 Grundlagen ... 140
3.6.3.2 Farbmessung ... 140
3.6.4 Brechungsindex, Doppelbrechung ... 141

3.6.5 Oberflächenstruktur ... 145
3.7 Verhalten gegen Umwelteinflüsse ... 146
3.7.1 Wasser, Feuchtigkeit ... 147
3.7.2 Chemikalien ... 151
3.7.3 Spannungsrissbeständigkeit ... 152
3.7.4 Atmosphärische Einflüsse ... 155
3.7.5 Energiereiche Strahlung ... 155
3.7.6 Beständigkeit gegen Organismen ... 156
3.7.7 Migration und Permeation ... 157
3.7.7.1 Wasserdampf-Durchlässigkeit ... 158
3.7.7.2 Gas-Durchlässigkeit ... 160
3.7.7.3 Wasserdampf-Diffusions-Widerstandszahl ... 164
3.7.8 Brandverhalten ... 164
3.8 Biologischer Abbau ... 167
3.9 Reibungs- und Verschleißverhalten ... 169
3.9.1 Reibung ... 170
3.9.1.1 Reibungsmechanismen ... 170
3.9.1.2 Ruckgleiten, Reibungsschwingung oder Stick-Slip-Effekt ... 171
3.9.2 Verschleiß ... 171
3.9.3 Probekörper und Prüfsysteme ... 172
3.9.4 Tribologische Eigenschaften von Thermoplasten ... 174
3.10 Analytische Untersuchungen ... 183
3.10.1 Infrarot (IR)- und Raman-Spektroskopie ... 183
3.10.2 Kernresonanz-Spektroskopie (Nuclear Magnetic Resonance: NMR) ... 184
3.10.3 Dynamisch-mechanische Spektroskopie (DMA) ... 184
3.10.4 Dielektrische Spektroskopie (DEA) ... 185
3.10.5 Differenzial-Thermoanalyse (DTA) und Differenzial-Kalorimetrie (DSC) ... 187
3.10.6 Thermogravimetrische Analyse (TGA) ... 189
3.10.7 Dilatometrie, Thermomechanische Analyse (TMA), spezifisches Volumen (*pvT*) ... 190
3.10.8 Thermische Leitfähigkeit, Wärmeleitfähigkeit ... 192
3.10.9 Lösungs-Viskosimetrie ... 194

3.10.10 Chromatografie ... 195
3.11 Mikroplastik: Charakterisierungs- und Trennverfahren ... 196
3.11.1 Einleitung ... 196
3.11.2 Charakterisierung von Mikroplastik ... 197
3.11.3 Trennverfahren für Mikroplastik ... 199

4 Kunststoffverarbeitung ... 203
4.1 Aufbereiten ... 205
4.1.1 Mischen ... 205
4.1.1.1 Mischer ... 207
4.1.1.2 Schneckenkneter für viskose Stoffe ... 209
4.1.1.3 Sonstige Mischer für viskose Stoffe ... 216
4.1.2 Granuliervorrichtungen ... 219
4.1.3 Mühlen ... 221
4.1.4 Trockner ... 223
4.1.5 Aufbereiten härtbarer Formmassen ... 226
4.1.6 Aufbereitung von Recyclingmaterial ... 226
4.2 Extrudieren ... 227
4.2.1 Extruderbauformen ... 227
4.2.1.1 Einschneckenextruder ... 230
4.2.1.2 Zylinderbauarten: Glattrohr und Nutbuchse ... 231
4.2.1.3 Schneckenkonzepte: Dreizonen-, Barriereschnecke ... 232
4.2.1.4 Entgasungs-Extruder ... 232
4.2.1.5 Kaskaden- oder Tandem-Extruder ... 233
4.2.1.6 Schnellläufer-Extruder (adiabatischer Extruder) ... 234
4.2.1.7 Planetwalzen-Extruder ... 234
4.2.1.8 Doppelschneckenextruder ... 235
4.2.2 Zusatzeinrichtungen für Extruder ... 241
4.2.3 Extrusions-Werkzeuge und Nachfolgeeinrichtungen ... 242
4.2.3.1 Rohre und symmetrische Hohlprofile ... 242
4.2.3.2 Vollprofile ... 243
4.2.3.3 Hohlkammer-Profile ... 243
4.2.3.4 Ummantelungen ... 244
4.2.3.5 Platten und Flachfolien ... 244
4.2.3.6 Schlauchfolien ... 246

4.2.3.7 Geschäumte Halbzeuge und Profile ... 248
4.2.3.8 Monofilament, Bändchen, Fasern ... 249
4.2.3.9 Co- oder Mehrschichtextrudate ... 250
4.2.3.10 Mehrschichtige Bahnen ... 252
4.2.4 Kalanderte Folien ... 255
4.2.5 Hohlkörper mit variablem Querschnitt durch Extrusionsblasformen ... 257
4.3 Spritzgießen ... 259
4.3.1 Das Spritzgießverfahren ... 259
4.3.2 Bauformen von Spritzgießmaschinen ... 264
4.3.2.1 Schließeinheiten ... 264
4.3.2.2 Vollelektrische Spritzgießmaschine ... 265
4.3.2.3 Plastifizieraggregat ... 265
4.3.3 Allgemeine Hinweise zum Spritzgießen ... 268
4.3.4 Reinigen von Schnecken und Zylindern ... 271
4.3.5 Spritzgießsonderverfahren ... 272
4.3.5.1 Spritzprägen ... 272
4.3.5.2 Pulverspritzgießen ... 273
4.3.5.3 Mikrospritzgießen ... 273
4.3.5.4 Spritzgießen mit mehreren Einspritzeinheiten ... 274
4.3.5.5 Fluidinjektionstechnik ... 278
4.3.5.6 Schaumspritzgießen ... 280
4.3.5.7 (Flüssig)Silikonspritzgießen (LSR) ... 280
4.3.5.8 Spritzgießen mit Einlegeteilen ... 282
4.3.6 Spritzgießblasformen ... 283
4.4 Formwerkzeuge ... 285
4.4.1 Allgemeines zum Formenbau ... 285
4.4.2 Werkzeugstähle und Behandlungsverfahren ... 285
4.4.3 Aufbau von Spritzgießwerkzeugen und Angussarten ... 288
4.4.4 Kühlsysteme ... 294
4.4.5 Entformungssysteme ... 298
4.4.6 Normalien für Werkzeuge ... 300
4.5 Schäumen ... 302
4.5.1 Grundprinzipien des Schäumens ... 302
4.5.2 Partikelschäume ... 304

4.6 Gießen ... 306
4.7 Polyurethan(PUR)-Verarbeitungstechnik ... 307
4.7.1 Allgemeine Grundlagen ... 307
4.7.2 Die Verfahrensschritte ... 309
4.7.2.1 Nieder- und Hochdruckmaschinen ... 310
4.7.2.2 Spritz- oder Sprühmaschinen ... 314
4.7.2.3 Anlagen ... 315
4.7.2.4 Kontinuierliche Fertigung ... 315
4.7.2.5 Diskontinuierliche Fertigung ... 316
4.7.2.6 Herstellung faserverstärkter Teile ... 318
4.7.2.7 Reinigung ... 319
4.8 Herstellung von Hochleistungs-Faserverbundkunststoffen ... 319
4.8.1 Kurzfaserverstärkte Verbundkunststoffe ... 321
4.8.1.1 Spritzgießen ... 321
4.8.1.2 Bulk Molding Compounds ... 321
4.8.2 Langfaserverstärkte Verbundkunststoffe ... 322
4.8.2.1 Sheet Molding Compound ... 323
4.8.2.2 Glasmattenverstärkte Thermoplaste ... 324
4.8.2.3 Langfaserverstärkte Thermoplaste ... 325
4.8.3 Fertigungsprozesse mit moderatem Faseranteil ... 326
4.8.3.1 Manuelle Verfahren ... 326
4.8.3.2 Vakuumunterstützte Harzinfusion ... 327
4.8.4 Fertigungsprozesse mit hohem Faseranteil ... 328
4.8.4.1 Resin Transfer Molding ... 328
4.8.4.2 Vakuumunterstütztes Resin Transfer Molding ... 329
4.8.4.3 Compression Resin Transfer Molding ... 330
4.8.4.4 Structural Reaction Injection Molding ... 330
4.8.5 Wickeln ... 331
4.8.6 Pultrusion ... 333
4.8.7 Ablegeverfahren ... 334
4.8.7.1 Prepreg-Herstellung ... 335
4.8.7.2 Automated Tape Layup ... 335
4.9 Pressen ... 337
4.9.1 Schichtpressen ... 337

4.9.2 Strangpressen ... 338
4.9.3 Spritzpressen (Transferpressen) ... 339
4.10 Additive Fertigungsverfahren ... 340
4.10.1 Flüssige Werkstoffe ... 345
4.10.1.1 Stereolithografie (SLA) ... 345
4.10.1.2 Digital Light Processing (DLP) ... 346
4.10.1.3 UV-Assisted Direct Ink Writing (DIW) ... 347
4.10.1.4 Material Jetting (MJ) ... 348
4.10.2 Pulverbasierte Verfahren ... 348
4.10.2.1 Lasersintern (LS) ... 348
4.10.2.2 Hochgeschwindigkeitssintern (HSS) ... 350
4.10.2.3 3D-Druck (3DP) ... 350
4.10.2.4 In Entwicklung befindliche Verfahren ... 350
4.10.3 Filament-/Granulatbasierte Verfahren ... 351
4.10.3.1 Fused Filament Fabrication (FFF) ... 353
4.10.3.2 Granulatbasierte Strangablegeverfahren ... 354
4.10.3.3 Varianten ... 354
4.11 Faserherstellung ... 355
4.11.1 Textile Definitionen ... 355
4.11.2 Faserspinnen aus der Schmelze ... 356
4.11.2.1 Klassisches Faserspinnen ... 357
4.11.2.2 Meltblown-Verfahren ... 359
4.11.2.3 Vliesstoffherstellung ... 360
4.11.2.4 SMS-Vliesstoffe ... 362
4.11.2.5 Spezielle Düsengeometrien und deren Anwendung ... 366
4.11.3 Spezielle Faserherstellungsverfahren ... 367
4.11.3.1 Melt-Elektrospinning ... 368
4.11.3.2 Solution-Elektrospinning ... 370
4.11.4 Additive für das Faserspinnen ... 370
4.11.5 Relevante Polymerkenngrößen für das Faserspinnen ... 371
4.11.6 Prozessinstabilitäten ... 373
4.11.7 Einfache Korrelationen im Faserspinnprozess für den Praktiker ... 374
4.12 Rotationsformen ... 375

4.13 Umformen ... 378
4.13.1 Biegeformen ... 379
4.13.2 Ziehformen ... 380
4.13.3 Streckformen ... 382
4.14 Fügen ... 384
4.14.1 Einteilung der Fertigungsverfahren und Eingliederung Fügen ... 384
4.14.2 Einteilung der Kunststoffschweißverfahren ... 385
4.14.3 Schweißen ... 386
4.14.4 Serienschweißverfahren ... 387
4.14.4.1 Sequenzielle Stumpfschweißverfahren ... 388
4.14.4.2 Reibschweißverfahren ... 394
4.14.4.3 Ultraschallschweißen (US) ... 399
4.14.4.4 Laserdurchstrahlschweißen (LB) ... 401
4.14.5 Schweißen von Halbzeugen ... 404
4.14.5.1 Direktes Heizelementschweißen ... 404
4.14.5.2 Indirektes Heizelementschweißen ... 407
4.14.5.3 Konvektive Schweißverfahren ... 408
4.14.6 Schweißen durch elektromagnetisches Wechselfeld ... 412
4.14.6.1 Hochfrequenzschweißen (HF) ... 412
4.14.6.2 Induktionsschweißen (IND) ... 412
4.14.6.3 Mikrowellenschweißen (MW) ... 413
4.14.7 Kleben ... 414
4.14.8 Schrauben, Nieten, Schnappen ... 416
4.15 Oberflächenbehandlungen ... 416
4.15.1 Vorbehandlung der Oberflächen ... 417
4.15.1.1 Nasschemische Verfahren ... 417
4.15.1.2 Gasphasenbehandlung ... 417
4.15.1.3 Flammoxidieren ... 417
4.15.1.4 Strahlenbehandlung ... 418
4.15.1.5 Coronabehandlung ... 418
4.15.1.6 Plasmabehandlung ... 418
4.15.1.7 Mechanische Vorbehandlung ... 419
4.15.2 Polieren ... 419
4.15.3 Lackieren ... 420

4.15.4 Beschichten ... 421
4.15.5 Bedrucken, Beschriften und Dekorieren ... 422
4.15.6 Prägen, Heißprägen ... 423
4.15.7 Beflocken ... 424
4.15.8 Metallisieren von Folien ... 424
4.15.9 SiO_x-Beschichtung von Folien ... 425
4.15.10 Metallisieren ... 425
4.15.11 Einreiben ... 426
4.15.12 Fluorierung, Gasphasenfluorierung ... 427
4.15.13 Plasmaverfahren (Chemical Vapor Deposition, CVD) ... 427
4.15.14 Thermisches Spritzen ... 428
4.16 Sonstige Bearbeitungsverfahren ... 428
4.16.1 Spanabhebende Bearbeitung ... 428
4.16.2 Trennen, Abtragen ... 430
4.16.3 Strahlenvernetzung ... 432
4.16.4 Wärmebehandlung ... 433
4.16.5 Abbau elektrostatischer Aufladungen ... 433
4.17 Kreislaufwirtschaft – Recycling ... 433
4.17.1 Mechanisches Recycling ... 435
4.17.2 Chemisches Recycling ... 437

5 Werkstoff- und verarbeitungsgerechte Konstruktion und Simulation ... 439

5.1 Systematisches Konstruieren von Produkten aus Kunststoff ... 440
5.1.1 Anforderungslisten, Pflichtenheft und Lastenheft ... 441
5.1.2 Konstruktionskataloge ... 442
5.2 Werkstoffauswahl ... 443
5.3 Fertigungsgerechtes Konstruieren ... 446
5.3.1 Auswahl des Fertigungsverfahrens ... 446
5.3.2 Fertigungsgerechtes Gestalten ... 446
5.4 Konstruktion mit faserverstärkten Kunststoffen ... 448
5.4.1 Faserlängenverteilung ... 449
5.4.2 Faserorientierungsverteilungen ... 451
5.4.3 Faserdichteverteilung ... 458
5.4.4 Faser-Matrix-Haftung ... 461

5.4.5 Mikrostruktur-Eigenschafts-Beziehung ... 462
5.5 Rechnerunterstützte Konstruktion ... 466
5.5.1 Strukturmodellierung mit der Methode der Finiten Elemente ... 467
5.5.2 Prozesssimulation ... 470
5.5.2.1 Werkzeugfüllsimulation ... 471
5.5.2.2 Vorhersage von Schwindung und Verzug ... 472
5.5.2.3 Orientierungsvorhersagen ... 473
5.5.3 Modellierung diskontinuierlicher faserverstärkter Materialien für die FEM-Implementierung ... 475
5.6 Werkstoffgerechtes Konstruieren ... 484
5.6.1 Dimensionierungsrechnung ... 484
5.6.2 Dimensionierungskennwerte ... 485
5.6.3 Konventionelle Dimensionierungsrechnung ... 489
5.6.4 Empirisch gestützte Dimensionierungsrechnung ... 489
5.6.5 Bauteilversuche an Prototypen und Modellen ... 490
5.7 Funktionselemente ... 490
5.7.1 Filmscharniere ... 490
5.7.2 Schnappverbindungen ... 491
5.7.3 Schraubverbindungen ... 494
5.7.4 Nieten ... 497
5.7.5 Schweißverbindungen ... 497
5.7.6 Pressverbindungen ... 497

6 Beschreibung der Kunststoffe ... 499

6.1 Allgemeine Hinweise ... 499
6.2 Polyolefine (PO), Polyolefinderivate und -copolymerisate ... 499
6.2.1 Polyethylen-Standard-Homo- und Copolymere (PE-LD, PE-HD, PE-HD-HMW, PE-HD-UHMW und PE-LLD) ... 500
6.2.1.1 Polymerisation, chemischer Aufbau ... 500
6.2.1.2 Verarbeitung ... 502
6.2.1.3 Nachbehandlung ... 503
6.2.1.4 Eigenschaften ... 504
6.2.1.5 Einsatzgebiete ... 509
6.2.2 Polyethylen-Derivate (PE-X) ... 511
6.2.3 Chloriertes und chlorsulfoniertes PE (PE-C) ... 512

6.2.4 Ethylen-Copolymere (PE-ULD, EVAC, EVAL, EEAK, EB, EBA, EMA, EAA, E/P, EIM, COC, ECB, ETFE) ... 513
6.2.4.1 Ultraleichtes Polyethylen (PE-ULD, PE-VLD) ... 513
6.2.4.2 Ethylen-Vinylacetat-Copolymere (EVAC) ... 521
6.2.4.3 Ethylen/Vinylalkohol-Copolymere (EVAL) ... 523
6.2.4.4 Ethylen-Acryl-Copolymerisate (EEAK, EBA, EAA, EAMA, EMA) ... 524
6.2.4.5 PE-α-Olefin-Copolymere (PE α-PO-(M)) ... 524
6.2.4.6 Cycloolefin-Copolymere (COC, COP) ... 524
6.2.4.7 Ionomere (EIM) ... 525
6.2.4.8 Ethylen-Copolymer-Bitumen-Blend (ECB, ECB/TPO) ... 526
6.2.5 Polypropylen-Homopolymerisate (PP, PP-H) ... 526
6.2.5.1 Chemischer Aufbau, Polymerisation ... 530
6.2.5.2 Verarbeitung ... 531
6.2.5.3 PP-Schaumstoffe (PP-E) ... 531
6.2.5.4 Nachbehandlung ... 531
6.2.5.5 Eigenschaften ... 532
6.2.5.6 Einsatzgebiete ... 533
6.2.6 Polypropylen-Copolymerisate und -Derivate, Blends (PP-C, PP-B, EPDM, PP+EPDM) ... 534
6.2.6.1 Chloriertes PP (PP-C) ... 534
6.2.6.2 PP-Copolymere (PP-B) ... 534
6.2.6.3 Ethylen-Propylen-(Dien)-Copolymer (EPDM) ... 534
6.2.6.4 PP+EPDM-Elastomer-Blends ... 535
6.2.6.5 Polypropylen-Blends ... 536
6.2.7 Polypropylen, Sondertypen ... 536
6.2.8 Polybutene (PB, PIB) ... 538
6.2.8.1 Polybuten-1 (PB) ... 538
6.2.8.2 Polyisobuten (PIB) ... 539
6.2.9 Höhere Poly-(α-Olefine) (PMP, PDCPD) ... 541
6.2.9.1 Poly-4-Methylpenten-1 (PMP) ... 541
6.2.9.2 Polydicyclopentadien (PDCPD) ... 542
6.3 Styrolpolymere ... 543
6.3.1 Polystyrol, Homopolymerisate (PS, PMS) ... 543

6.3.2 Polystyrol, Copolymerisate, Blends ... 544
6.3.2.1 Chemischer Aufbau ... 544
6.3.2.2 Verarbeitung ... 545
6.3.2.3 Eigenschaften ... 546
6.3.3 Polystyrol-Schaumstoff (PS-E, XPS) ... 554
6.4 Vinylpolymere ... 555
6.4.1 Polyvinylchlorid hart, Homopolymerisate (PVC-U) ... 555
6.4.1.1 Chemischer Aufbau ... 555
6.4.1.2 Lieferformen, Verarbeitung ... 556
6.4.1.3 Kennzeichnung ... 557
6.4.1.4 Eigenschaften und Einsatzgebiete ... 559
6.4.2 Polyvinylchlorid weich (PVC-P) ... 563
6.4.2.1 Aufbau ... 563
6.4.2.2 Lieferform, Verarbeitung ... 563
6.4.2.3 Weichmacher ... 564
6.4.2.4 Eigenschaften und Einsatzgebiete ... 568
6.4.3 Polyvinylchlorid: Copolymerisate und Blends ... 569
6.4.4 Polyvinylchlorid: Pasten, Plastisole, Organosole, Schäume ... 571
6.4.4.1 Pasten, Plastisole, Organosole ... 571
6.4.4.2 Schäume ... 572
6.4.5 Vinylpolymere, weitere Homo- und Copolymerisate (PVDC, PVAC, PVAL, PVME, PVFM, PVB, PVK, PVP) ... 572
6.4.5.1 Polyvinylidenchlorid (PVDC) ... 572
6.4.5.2 Polyvinylacetat (PVAC) ... 572
6.4.5.3 Polyvinylalkohol (PVAL) ... 573
6.4.5.4 Polyvinylmethylether (PVME) ... 573
6.4.5.5 Polyvinylbutyral, Polyvinylformal (PVB, PVFM) ... 573
6.4.5.6 Polyvinylcarbazol (PVK) ... 573
6.4.5.7 Polyvinylpyrrolidon und Copolymere (PVP) ... 574
6.5 Fluorpolymere ... 574
6.5.1 Fluor-Homopolymere (PTFE, PVDF, PVF, PCTFE) ... 574
6.5.1.1 Polytetrafluorethylen (PTFE) ... 578
6.5.1.2 Polyvinylidenfluorid (PVDF) ... 580
6.5.1.3 Polyvinylfluorid (PVF) ... 580
6.5.1.4 Polychlortrifluorethylen (PCTFE) ... 581

6.5.2 Fluor-Copolymerisate und -Elastomere (ECTFE, ETFE, FEP, TFEP, PFA, AF, PTFEAF, TFEHFPVDF (THV bzw. TFB), [FKM, FPM, FFKM]) ... 581
6.5.2.1 Ethylen-Chlortrifluorethylen-Copolymer (ECTFE) ... 582
6.5.2.2 Ethylen-Tetrafluorethylen-Copolymer (ETFE) ... 582
6.5.2.3 Polyfluorethylenpropylen (FEP); Tetrafluorethylen-Hexafluorpropylen-Copolymer (TFEP) ... 582
6.5.2.4 Perfluorpropylvinylether-Copolymer, Perfluoralkoxy (PFA) ... 583
6.5.2.5 PTFE-Copolymer mit AF (PTFEAF) ... 583
6.5.2.6 Tetrafluorethylen-Hexafluorpropylen-Vinylidenfluorid-Terpolymer (TFEHFPVDF (THV bzw. TFB)) ... 584
6.5.2.7 Weitere Fluor-Copolymere ... 584
6.6 Polyacryl- und Methacrylpolymere ... 585
6.6.1 Polyacrylate, Homo- und Copolymerisate (PAA, PAN, PMA, PBA) ... 585
6.6.1.1 Polyacrylnitril (PAN) ... 585
6.6.1.2 Polyacrylate, Spezialprodukte ... 585
6.6.2 Polymethacrylate, Homo- und Copolymerisate (PMMA, AMMA, MABS, MBS) ... 586
6.6.2.1 Polymethylmethacrylat (PMMA) ... 586
6.6.2.2 Methylmethacrylat-Copolymerisate (AMMA) ... 590
6.6.2.3 Methylmethacrylat-Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymere (MABS); Methacrylat-Butadien-Styrol-Copolymere (MBS) ... 591
6.6.3 Polymethacrylate, Modifizierungen und Blends (PMMI, PMMA-HI, MMA-EML-Copolymer, PMMA+ABS) ... 591
6.6.3.1 Polymethacrylmethylimid (PMMI) ... 591
6.6.3.2 Schlagzähes PMMA (PMMA-HI) ... 592
6.6.3.3 Methylmethacrylat-exo-Methylenlacton-Copolymerisat (MMA-EML-Copol., MMAEML) ... 593
6.6.3.4 PMMA+ABS ... 593
6.7 Polyoxymethylen (Polyacetal, Polyformaldehyd) (POM) ... 593
6.7.1 Polyoxymethylen-Homo- und Copolymerisate (POM-H, POM-Cop.) ... 593
6.7.2 Polyoxymethylen, Modifizierungen und Blends (POM+PUR) ... 604
6.8 Polyamide (PA) ... 606

6.8.1 Polyamide, Homopolymere (AB- und AA/BB-Polymere); (PA6, 11, 12, 46, 66, 69, 610, 612 (PA7, 8, 9, 1313, 613)) 606
6.8.1.1 Chemische Zusammensetzung 607
6.8.1.2 Eigenschaften 616
6.8.1.3 Verarbeitung 619
6.8.1.4 Einsatzgebiete 622
6.8.2 Modifikationen 624
6.8.3 Copolyamide 630
6.8.3.1 Teilaromatische, teilkristalline Copolyamide (Polyphthalamide, PPA) 634
6.8.3.2 Teilaromatische, amorphe Copolyamide 634
6.8.3.3 Elastomere Blockcopolyamide (Polyetherblockamide, PEBA) 635
6.8.4 Gusspolyamide (PA6-G, PA12-G) 636
6.8.5 Polyamid für das Reaktionsgießen (PA-RIM) 636
6.8.6 Aromatische Polyamide, Aramide 636
6.9 Aromatische (gesättigte) Polyester 637
6.9.1 Polycarbonat (PC) 637
6.9.1.1 Polycarbonat auf Basis Bisphenol A (PC) 637
6.9.1.2 Polycarbonat-Copolymere 643
6.9.1.3 Blends (Polymermischungen) 644
6.9.2 Polyester der Terephthalsäure, Blends, Blockcopolymere 646
6.9.2.1 Polyethylenterephthalat (PET) 646
6.9.2.2 Polybutylenterephthalat (PBT) 652
6.9.2.3 Zyklisches Polybutylenterephthalat (CBT) 653
6.9.2.4 Polytrimethylenterephthalat (PTT) 654
6.9.2.5 Thermoplastische Polyester-Elastomere (TPC) 654
6.9.2.6 Polyterephthalat-Blends (PET+: PBT, MBS, PMMA, PSU, Elastomer) 654
6.9.3 Polyester aromatischer Diole und Carbonsäuren (PAR, PBN, PEN) 654
6.9.3.1 Polyarylate (PAR) 654
6.9.3.2 Polybutylennaphthalat (PBN) 656
6.9.3.3 Polyethylennaphthalat (PEN) 656
6.10 Aromatische Polysulfide und Polysulfone (PPS, PSU, PESU, PPSU) 657
6.10.1 Polyphenylensulfid (PPS) 657

6.10.2 Polyarylethersulfone (PAES, PSU, PSU+ABS, PESU, PPSU) 661
6.11 Aromatische Polyether, Polyphenylenether und Blends (PPE) 664
6.12 Aliphatische Polyester (Polyglykole) (PEOX, PPOX, PTHF) 667
6.13 Poly(aryl)etherketone und Aliphatisches Polyketon 667
6.13.1 Poly(aryl)etherketone (aromatische Polyetherketone) (PAEK: PEK, PEEK, PEKEKK, PEKK) 667
6.13.2 Aliphatisches Polyketon (PK) 672
6.14 Aromatische Polyimide (PI) 674
6.14.1 Duroplastische Polyimide (PI, PBMI, PBI, PBO und weitere) 680
6.14.1.1 Polyimid (PI) 680
6.14.1.2 Polybismaleinimid (PBMI) 680
6.14.1.3 Polybenzimidazol (PBI) 680
6.14.1.4 Polytriazine 681
6.14.2 Thermoplastische Polyimide (PAI, PEI, PISO, PMI, PMMI, PESI, PARI) 681
6.14.2.1 Polyamidimid (PAI) 681
6.14.2.2 Polyetherimid (PEI) 682
6.14.2.3 Polyimidsulfon (PISO) 683
6.14.2.4 Polymethacrylimid (PMI (Hartschaumstoff)) 683
6.14.2.5 Polymethacrylatmethylimid (PMMI) 684
6.14.2.6 Polyesterimid (PESI) 684
6.15 Selbstverstärkende teilkristalline Polymere (LCP, flüssigkristalline Polymere, Liquid Crystal Polymers) 685
6.15.1 Chemischer Aufbau 685
6.15.2 Verarbeitung 686
6.15.3 Eigenschaften 686
6.15.4 Einsatzgebiete 688
6.16 Leiterpolymere: Zweidimensionale Polyaromaten und -heterocyclen 689
6.17 Polyurethane (PUR) 691
6.17.1 Allgemeine Grundlagen 691
6.17.1.1 Chemischer Aufbau 691
6.17.1.2 Herstellung der Polymeren 693
6.17.1.3 Brandverhalten 695
6.17.1.4 Handhabung der Rohstoffe, Arbeitssicherheit 695
6.17.1.5 Umweltschutz, Sicherheit und Abfallverwertung 695

6.17.2 Rohstoffe, Hilfsstoffe ... 696
6.17.2.1 Di- und Polyisocyanate ... 696
6.17.2.2 Polyole, Polyamine ... 697
6.17.2.3 Vernetzer bzw. Kettenverlängerer ... 698
6.17.2.4 Hilfsstoffe ... 699
6.17.3 PUR-Kunststoffe ... 701
6.17.3.1 Weichschaumstoffe (PUR-W) ... 702
6.17.3.2 Hartschaumstoffe (PUR-H) ... 705
6.17.3.3 Integralschaumstoffe (PUR-I) ... 705
6.17.3.4 Massive PUR-Kunststoffe, PUR-M ... 708
6.18 Biopolymere und Derivate ... 709
6.18.1 Cellulose- und Stärke-Derivative: CA, CTA, CP, CAP, CAB, CN, EC, MC, CMC, CH, VF, PSAC ... 716
6.18.1.1 Chemische Zusammensetzung ... 716
6.18.1.2 Verarbeitung ... 718
6.18.1.3 Eigenschaften und Anwendungen ... 719
6.18.2 Polyhydroxyfettsäuren/Polyhydroxyalkanoate (PHAs) ... 723
6.18.3 Casein-Kunststoffe, Casein-Formaldehyd, Kunsthorn (CS, CSF) ... 724
6.18.4 Polylactide, Polymilchsäuren (PLA) ... 724
6.19 Elektrisch leitfähige/luminiszierende Polymere ... 725
6.20 Thermoplastische Elastomere (TPE) ... 729
6.20.1 Physikalischer Aufbau ... 730
6.20.2 Chemischer Aufbau, Eigenschaften, Einsatzgebiete ... 731
6.20.2.1 Copolyamide (TPA) ... 732
6.20.2.2 Copolyester (TPC) ... 732
6.20.2.3 Polyolefin-Elastomere (TPO) ... 733
6.20.2.4 Polystyrol-Elastomere (TPS) ... 733
6.20.2.5 Polyurethan-Elastomere (TPU) ... 734
6.20.2.6 Polyolefin-Blends mit vernetztem Kautschuk (TPV) ... 734
6.20.2.7 Weitere TPE, TPZ ... 735
6.21 Duroplaste, härtbare Formmassen, Formaldehyd-Pressmassen (PF, RF, CF, XF, FF, MF, UF, MUF, MUPF) und weitere Massen (UP, VE (PHA), EP, PDAP, SI) ... 735
6.21.1 Formaldehyd-Formmassen (PF, RF, CF, XF, FF, MF, UF, MUF, MUPF) 736
6.21.1.1 Chemischer Aufbau ... 736

6.21.1.2 Eigenschaften ... 738
6.21.1.3 Einsatzgebiete ... 740
6.21.2 Ungesättigte Polyester-Harze (UP) ... 741
6.21.2.1 Chemischer Aufbau ... 741
6.21.2.2 Eigenschaften ... 742
6.21.2.3 Einsatzgebiete ... 743
6.21.3 Vinylester-Harze (VE), Phenacrylat-Harze; Vinylesterurethane (VU) ... 744
6.21.3.1 Chemischer Aufbau ... 744
6.21.3.2 Eigenschaften ... 744
6.21.4 Epoxid-Harze (EP) ... 744
6.21.4.1 Chemischer Aufbau ... 744
6.21.4.2 Eigenschaften ... 746
6.21.4.3 Einsatzgebiete ... 747
6.21.5 Diallylphthalat-Harze, Allylester (PDAP) ... 747
6.21.5.1 Chemischer Aufbau ... 747
6.21.5.2 Eigenschaften ... 747
6.21.5.3 Einsatzgebiete ... 747
6.21.6 Verarbeitung, Lieferformen ... 753
6.22 Härtbare Gieß- und Laminierharze ... 756
6.22.1 Phenoplaste (PF, CF, RF, XF) ... 756
6.22.2 Aminoplaste (UF, MF) ... 757
6.22.3 Furanharz (FF) ... 758
6.22.4 Ungesättigte Polyester-Harze (UP) ... 758
6.22.5 Vinylester-Harze (VE) Phenacrylat-Harze ... 762
6.22.6 Epoxid-Harze (EP) ... 762
6.22.7 Dicyclopentadien-Harz (DCPD) ... 763
6.22.8 Diallylphthalat-Harze (PDAP) ... 763
6.22.9 Kohlenwasserstoff-Harze (KWH) ... 764
6.23 Kautschuke ... 764
6.23.1 Generelle Beschreibung ... 764
6.23.2 Allgemeine Eigenschaften ... 765
6.23.3 R-Kautschuke (NR, IR, BR, CR, SBR, NBR, NCR, IIR, PNR, SIR, TOR, HNBR) ... 769

6.23.4 M-Kautschuke (EPM, EPDM, AECM, EAM, CSM, CM, ACM, ABR, ANM, FKM, FPM, FFKM) ... 778
6.23.5 O-Kautschuke (CO, ECO, ETER, PO) ... 785
6.23.6 Silikonelastomere ... 787
6.23.6.1 Chemischer Aufbau und Vernetzungssysteme ... 788
6.23.6.2 Eigenschaften ... 791
6.23.6.3 Herstellungstechnologien ... 792
6.23.6.4 Verarbeitung ... 794
6.23.6.5 Einsatzgebiete ... 796
6.23.7 T-Kautschuke (TM, ET, TCF) ... 797
6.23.8 U-Kautschuke (AFMU, EU, AU) ... 799
6.23.9 Polyphosphazene (PNF, FZ, PZ) ... 800
6.23.10 Weitere Kautschuke ... 801
6.24 Vitrimere ... 802

7 Additive, Füllstoffe und Fasern ... 807

7.1 Additive ... 807
7.1.1 Gleitmittel, Antiblockmittel, Trennmittel ... 808
7.1.2 Stabilisatoren ... 809
7.1.2.1 Antioxidantien ... 809
7.1.2.2 Lichtschutzmittel ... 810
7.1.2.3 Wärmestabilisatoren ... 811
7.1.2.4 Schaumstabilisatoren ... 811
7.1.3 Antistatika ... 811
7.1.4 Flammschutzmittel ... 812
7.1.5 Farbmittel ... 815
7.1.5.1 Effektpigmente ... 818
7.1.5.2 Fluoreszenz-Farbmittel (Tagesleucht-Farbmittel) ... 819
7.1.6 Additive für die Laserbeschriftung ... 819
7.1.7 Flexibilisatoren und Weichmacher ... 820
7.1.8 Haftvermittler ... 820
7.1.9 Treibmittel und Kicker ... 821
7.1.10 Nukleierungsmittel ... 823
7.1.11 Antibakterielle Mittel, Fungizide ... 825
7.2 Füllstoffe ... 825

7.2.1 Anorganische Füllstoffe ... 829
7.2.1.1 Ruß ... 829
7.2.1.2 Calciumcarbonat ($CaCO_3$) ... 830
7.2.1.3 Talk/Talkum ... 831
7.2.1.4 Kieselsäuren ... 832
7.2.1.5 Aluminiumtrihydrat ... 832
7.2.1.6 Kaolin ... 832
7.2.1.7 Glimmer ... 832
7.2.1.8 Wollastonit ... 833
7.2.1.9 Massive und hohle Mikrokugeln ... 833
7.2.2 Nanofüllstoffe ... 834
7.3 Fasern ... 838
7.3.1 Verstärkungsfasern ... 839
7.3.1.1 Synthetische, anorganische Fasern, Glasfasern (GF) ... 841
7.3.1.2 Natürliche organische Verstärkungsfasern, Naturfasern ... 844
7.3.1.3 Synthetische, organische Verstärkungsfasern, Kohlenstofffasern (CF), Aramidfasern (AF) u. a. ... 847
7.3.2 Fasern, Fäden, Borsten, Bänder ... 855
7.3.2.1 Polyesterfasern ... 856
7.3.2.2 Polyamidfasern ... 856
7.3.2.3 Polyacrylnitrilfasern ... 856
7.3.2.4 Polyolefinfasern ... 857
7.3.2.5 Polyvinylalkoholfasern ... 857
7.3.2.6 Polytetrafluorethylenfasern ... 857
7.3.2.7 Polyurethanfasern ... 858

8 Kunststoffe im Vergleich ... 859

8.1 Verarbeitungstechnische Kennwerte und Toleranzen ... 859
8.2 Übersicht über mechanische, thermische und allgemeine elektrische Eigenschaften ... 872
8.3 Elektrisches Verhalten ... 888
8.4 Optisches Verhalten ... 889
8.5 Verhalten gegen Umwelteinflüsse ... 892
8.5.1 Wasser, Feuchtigkeit ... 892

8.5.2 Chemikalienbeständigkeit ... 894
8.5.3 Spannungsrissbeständigkeit ... 898
8.5.4 Atmosphärische Einflüsse ... 900
8.5.5 Migration und Permeation ... 902
8.5.6 Brandverhalten ... 907
8.6 Erkennen von Kunststoffen ... 909

Index ... **917**

1
Kurzzeichen der Kunststoff-Technik

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 weitverbreiteten 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 sogenannten 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
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer	6.3.2
ACM	Acrylat-Kautschuk, (AEM, ANM)	6.23.4
ACS	Acrylnitril-chloriertes Polyethylen-Styrol	6.3.2
AECM	Acrylester-Ethylen-Kautschuk	6.23.4
AEM	Acrylat-Ethylen-Polymethylen-Kautschuk	6.23.4
AES	Acrylnitril-Ethylen-Propylen-Dien-Styrol-Copolymer	6.3.2
AFMU	Nitroso-Kautschuk	6.23.8
AMMA	Acrylnitril-Methylmethacrylat	6.6.2.2
APE-CS	siehe ACS	
ASA	**Acrylnitil-Styrol-Acrylester-Copolymer**	6.3.2
AU	Polyesterurethan-Kautschuk	6.23.8
BIIR	Brombutyl-Kautschuk	6.23.3
BR	Butadien-Kautschuk	6.23.3

Kurzzeichen	Chemische Bezeichnung	Abschnitt
CA	Celluloseacetat	6.18.1
CAB	Celluloseacetobutyrat	6.18.1
CAP	Celluloseacetopropionat	6.18.1
CF	Kresol-Formaldehyd-Harz	6.21
CH	hydratisierte Cellulose, Zellglas	6.18.1
CIIR	Chlorbutyl-Kautschuk	6.23.3
CM	chlorierter Polyethylen-Kautschuk	6.23.4
CMC	Carboxymethylcellulose	6.18.1
CN	Cellulosenitrat, Celluloid	6.18.1
CO	Epichlorhydrin-Kautschuk	6.23.5
COC	**Cyclopolyolefin-Copolymere**	6.2.4
COP	COC-Copolymerisat	6.2.4.6
CP	Cellulosepropionat	6.18.1
CR	Chloropren-Kautschuk	6.23.3
CSF	Casein-Formaldehyd-Harz, Kunsthorn	6.18.3
CSM	chlorsulfonierter Polyethylen-Kautschuk	6.23.4
CTA	Cellulosetriacetat	6.18.1
E/P	**Ethylen-Propylen-Copolymer**	6.2.4
EAM	Ethylen-Vinylacetat-Kautschuk	6.23.4
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	6.23.5
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

Tabelle 1.1 Kunststoffe und Kautschuke *(Fortsetzung)*

Kurzzeichen	Chemische Bezeichnung	Abschnitt
EP	**Epoxid-Harze**	6.21
EP(D)M	siehe EPDM	
EPDM	Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk	6.23.4
EPM	Ethylen-Propylen-Kautschuk	6.23.4
ET	Poly-ethylenoxid-tetrasulfid-Kautschuk	6.23.7
ETER	Epichlorhydrin-Ethylenoxid-Kautschuk (Terpolymer)	6.23.5
ETFE	Ethylen-Tetrafluorethylen-Copolymer	6.5.2
EU	Polyetherurethan-Kautschuk	6.23.8
EVAC	**Ethylen-Vinylacetat-Copolymer**	6.2.4
EVAL	Ethylen-Vinylalkohol-Copolymer, alte Bezeichnung EVOH	6.2.4
FEP	Polyfluorethylenpropylen	6.5.2
FF	Furan-Formaldehyd-Harz	6.21
FFKM	Perfluor-Kautschuk	6.23.4
FKM	Fluor-Kautschuk	6.23.4
FPM	Propylen-Tetrafluorethylen-Kautschuk	6.23.4
FVMQ	Fluor-Silikon-Kautschuk	6.23.6
HCR	Hochtemperatur-vernetzender Silikonkautschuk	6.23.6
HNBR	hydrierter NBR-Kautschuk	6.23.3
HTV	siehe HCR	
ICP	intrinsisch leitfähige Polymere	6.19
IIR	Butyl-Kautschuk (CIIR, BIIR)	6.23.3
IR	Isopren-Kautschuk	6.23.3
KWH	Kohlenwasserstoffharz	6.22.9
LCP	**Liquid Crystal Polymer**	6.15
LSR	Flüssigsilikonkautschuk	6.23.6
MABS	**Methylmethacrylat-Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer**	6.6.2
MBS	**Methacrylat-Butadien-Styrol-Copolymer**	6.6.2

Kurzzeichen	Chemische Bezeichnung	Abschnitt
MC	Methylcellulose (Cellulosederivat)	6.18.1
MF	**Melamin-Formaldehyd-Harz**	6.21
MFA	Tetrafluorethylen-Perfluormethyl-Vinylether-Copolymer	6.5.2.7
MMA-EML	Methylmethacrylat-exo-Methylenlacton-Copolymer	6.6.3.3
MPF	**Melamin-Phenol-Formaldehyd-Harz**	6.21
MQ	Polydimethylsilikon-Kautschuk	6.23.6
MS	siehe PMS	
MUF	Melamin-Harnstoff-Formaldehyd-Harz	6.21
MUPF	Melamin-Harnstoff-Phenol-Formaldehyd-Harz	6.21
NBR	Acrylnitril-Butadien-Kautschuk	6.23.3
NCR	Acrylnitril-Chloropren-Kautschuk	6.23.3
NR	Naturkautschuk	6.23.3
PA	Polyamid (weitere Bezeichnungen siehe Abschnitt 6.7)	6.8
PA 11	**Polyamid aus Aminoundecansäure**	6.8.1
PA 12	**Polyamid aus Dodekansäure**	6.8.1
PA 46	**Polyamid aus Polytetramethylen-Adipinsäure**	6.8.1
PA 6	**Polyamid aus ε-Caprolactam**	6.8.1
PA 610	**Polyamid aus Hexamethylendiamin-Sebazinsäure**	6.8.1
PA 612	**Polyamid aus Hexamethylendiamin-Dodekansäure**	6.8.1
PA 66	**Polyamid aus Hexamethylendiamin-Adipinsäure**	6.8.1
PA 69	**Polyamid aus Hexamethylendiamin-Azelainsäure**	6.8.1
PAA	Polyacrylsäureester	6.6.1
PAC	Polyacetylen	6.19
PAEK	**Polyaryletherketon**	6.13.1
PAI	Polyamidimid	6.14.2
PAN	Polyacrylnitril	6.6.1
PANI	Polyanilin, Polyphenylenamin	6.19
PAR	Polyarylate	6.9.3.1
PARI	Polyarylimid	6.14.2

Tabelle 1.1 Kunststoffe und Kautschuke *(Fortsetzung)*

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
PBT	**Polybutylenterephthalat**	6.9.2.2
PC	**Polycarbonat (aus Bisphenol-A)**	6.9.1.1
PCTFE	Polychlortrifluorethylen	6.5.1
PDAP	Polydiallylphthalat-Harz	6.21.5
PDCPD	Polydicyclopentadien	6.2.9.2
PE	**Polyethylen**	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	6.19
PEEEK	Polyetheretheretherketon	6.13.1
PEEK	Polyetheretherketon	6.13.1
PEEKEK	Polyetheretherketonetherketon	6.13.1
PEEKK	Polyetheretherketonketon	6.13.1
PEI	**Polyetherimid**	6.14.2.2

Kurzzeichen	Chemische Bezeichnung	Abschnitt
PEK	Polyetherketon	6.13.1
PEKEKK	Polyetherketonetherketonketon	6.13.1
PEKK	Polyetherketonketon	6.13.1
PEN	**Polyethylennaphthalat**	6.9.3
PEOX	Polyethylenoxid	6.12
PESI	Polyesterimid	6.15
PES	Polyethersulfon	6.10.2
PESU	siehe PES	
PET	**Polyethylenterephthalat**	6.9.2.1
PET-G	**Polyethylenterephthalat, glykolmodifiziert**	6.9.2.1
PF	**Phenol-Formaldehyd-Harz**	6.21
PFA	Perfluoralkoxy	6.5.2.4
PFMT	Polyperfluortrimethyltriazin-Kautschuk	6.23.10
PFU	Polyfuran	6.19
PHA	Polyhydroxyalkanoate	6.18.2
PHB	Polyhydroxybutyrat	6.18.2
PHV	Polyhydroxyvaleriansäure	6.18.2
PI	**Polyimid**	6.14
PIB	Polyisobutylen	6.2.8
PISO	Polyimidsulfon	6.14.2.3
PK	**Polyketon**	6.13.2
PLA	Polylactid	6.18.4
PMA	Polymethylacrylat	6.6.1
PMI	Polymethacrylimid	6.14.2
PMMA	**Polymethylmethacrylat**	6.6.2
PMMI	Polymethacrylmethylimid	6.6.3.1, 6.14.2
PMP	Poly-4-Methylpenten-1	6.2.9.1
PMS	Poly-α-Methylstyrol	6.3.1.1
PNF	Fluor-Phosphazen-Kautschuk	6.23.9

Tabelle 1.1 Kunststoffe und Kautschuke *(Fortsetzung)*

Kurzzeichen	Chemische Bezeichnung	Abschnitt
PNR	Polynorbornen-Kautschuk	6.23.3
PO	Polypropylenoxid-Kautschuk	6.23.5
PO	Allgemeine Bezeichnung für die Gruppe der Polyolefine, Polyolefin-Derivate und -Copolymeriste	6.2
POM	**Polyoxymethylen (Polyacetalharz, Polyformaldehyd)**	6.7
PP	**Polypropylen**	6.2.5
PPA	Polyphthalamid	6.8.3.1
PPB	Polyphenylenbutadien	6.19
PPE	**Polyphenylenether, alte Bezeichnung PPO**	6.11
PPMS	Poly-para-Methylstyrol	6.3.1.1
PPOX	Polypropylenoxid	6.12
PPP	Poly-para-Phenylen	6.19
PPS	**Polyphenylensulfid**	6.10.1
PPSU	**Polyphenylensulfon**	6.10.2
PPTA	Poly-p-Phenylenterephthalamid	6.8
PPV	Polyphenylenvinylen	6.19
PPY	Polypyrrol	6.19
PPYR	Polyparapyridin	6.19
PPYV	Polyparapyridinvinylen	6.19
PS	**Polystyrol**	6.3.1.1
PSAC	Polysaccharid, Stärke	6.18.1
PSU	**Polysulfon**	6.10.2
PT	Polythiophen	6.19
PTFE	**Polytetrafluorethylen**	6.5.1
PTHF	Polytetrahydrofuran	6.12
PTT	Polytrimethylenterephthalat	6.9.2.4
PUR	**Polyurethan**	6.17
PVAC	Polyvinylacetat	6.4.5

Kurzzeichen	Chemische Bezeichnung	Abschnitt
PVAL	Polyvinylalkohol	6.4.5
PVB	Polyvinylbutyral	6.4.5
PVC	**Polyvinylchlorid**	6.4.1, 6.4.2
PVDC	Polyvinylidenchlorid	6.4.5
PVDF	**Polyvinylidenfluorid**	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	6.23.6
PVP	Polyvinylpyrrolidon	6.4.5
PZ	Phosphazen-Kautschuk mit Phenoxygruppen	6.23.9
RF	Resorcin-Formaldehyd-Harz	6.21, 6.22.1
RTV	raumtemperatur-vernetzender Silikonkautschuk	6.23.6
SAN	**Styrol-Acrylnitril-Copolymer**	6.3.2
SB	**Styrol-Butadien-Copolymer**	6.3.2
SBMMA	Styrol-Butadien-Methylmethacrylat-Copolymer	6.3.2
SBR	Styrol-Butadien-Kautschuk	6.23.3
SBS	Styrol-Butadien-Styrol-Copolymer	6.3.2
SCR	Styrol-Chloropren-Kautschuk	6.23.3
SEBS	Styrol-Ethenbuten-Styrol-Copolymer	6.3.2
SEPS	Styrol-Ethenpropen-Styrol-Copolymer	6.3.2
SI	Silikone, Silikonharze	6.21
SIMA	Styrol-Isopren-Maleinsäureanhydrid-Copolymer	6.3.2
SIR	Styrol-Isopren-Kautschuk	6.23.3
SIS	Styrol-Isopren-Styrol-Block-Copolymer	6.3.2.1
SMAB	Styrol-Maleinsäureanhydrid-Butadien-Copolymer	6.3.2
SMAH	**Styrol-Maleinsäureanhydrid-Copolymer**	6.3.2
TCF	Thiocarbonyldifluorid-Copolymer-Kautschuk	6.23.7

Tabelle 1.1 Kunststoffe und Kautschuke *(Fortsetzung)*

Kurzzeichen	Chemische Bezeichnung	Abschnitt
TFEHFPVDF	Tetrafluorethylen-Hexafluorpropylen-Vinylidenfluorid-Copolymer (THV)	6.5.2
TFEP	Tetrafluorethylen-Hexafluorpropylen-Copolymer	6.5.2
TOR	Polyoctenamer	6.23.3
TPA	**thermoplastische Elastomere auf Basis Polyamid**	6.20
TPC	**thermoplastische Elastomere auf Basis Copolyester**	6.20
TPE	thermoplastische Elastomere	6.20
TPE-A	siehe TPA	6.20
TPE-C	siehe TPC	6.20
TPE-O	siehe TPO	6.20
TPE-S	siehe TPS	6.20
TPE-U	siehe TPU	6.20
TPE-V	siehe TPV	6.20
TPO	**thermoplastische Elastomere auf Basis von Olefinen**	6.20
TPS	**thermoplastische Elastomere auf Basis Styrol**	6.20
TPU	**thermoplastische Elastomere auf Basis Polyurethan**	6.20
TPV	**thermoplastische Elastomere auf Basis von vernetztem Kautschuk**	6.20
TPZ	**weitere thermoplastische Elastomere**	6.20
UF	Harnstoff-Formaldehyd-Harz	6.21
UP	**ungesättigtes Polyester-Harz**	6.21
VCE	Vinylchlorid-Ethylen-Copolymer	6.4.3
VCEMAK	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
VCMMA	Vinylchlorid-Methylmethacrylat-Copolymer	6.4.3

Kurzzeichen	Chemische Bezeichnung	Abschnitt
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	6.21
VF	Vulkanfiber	6.18.1
VMQ	Polymethylsiloxan-Vinyl-Kautschuk	6.23.6
VU	Vinylesterurethan-Harz	6.21.3
XBR	Butadien-Kautschuk, carboxylgruppenhaltig	6.23.3
XCR	Chloropren-Kautschuk, carboxylgruppenhaltig	6.23.3
XF	Xylenol-Formaldehyd-Harz	6.21.1
XNBR	Acrylnitril-Butadien-Kautschuk, carboxylgruppenhaltig	6.23.3
XSBR	Styrol-Butadien-Kautschuk, carboxylgruppenhaltig	6.23.3

* Für diese Polymere sind keine Kurzzeichen bekannt.

Tabelle 1.2 Weichmacher, gebräuchliche

Kurzzeichen	Chemische Bezeichnung		Kurzzeichen	Chemische Bezeichnung
ASE	Alkylsulfonsäureester		DODP	Dioctyldecylphthalat
BBP	Benzylbutylphthalat		DOP, DEHP	Dioctylphthalat
DBA	Dibutyladipat		DOS	Dioctylsebacat
DBP	Dibutylphthalat		DOZ	Dioctylazelat
DBS	Dibutylsebacat		DPCF	Diphenylkresylphosphat
DCHP	Dicyclohexylphthalat		DPOF	Diphenyloctylphosphat
DEP	Diethylphthalat		DPP	Dipropylphthalat
DHXP	Dihexylphthalat		ELO	Epoxidiertes Leinöl

Tabelle 1.2 Weichmacher, gebräuchliche *(Fortsetzung)*

Kurzzeichen	Chemische Bezeichnung		Kurzzeichen	Chemische Bezeichnung
DIBP	Diisobutylphthalat		ESO	Epoxidiertes Soja-bohnenöl
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	Trioctylphosphat
DOA (DEHA)	Dioctyladipat, auch Di-ethylhexyladipat, 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^{-3}	10^{-6}	0,0394	0,0033	–	–
1 m	=	10^{3}	1	10^{-3}	39,37	3,281	1,094	–
1 km	=	10^{6}	10^{-3}	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								
		cm^2	m^2	a	ha	km^2	in^2	ft^2
1 cm^2	=	1	10^{-4}	–	–	–	0,155	–
1 m^2	=	10^4	1	0,01	10^{-4}	10^{-6}	1550	10,76
1 a	=	–	100	1	0,01	10^{-4}	–	1076
1 ha	=	–	10^4	100	1	0,01	–	–
1 km^2	=	–	10^6	10^4	100	1	–	–
1 square inch	=	6,452	–	–	–	–	1	–
1 square foot	=	929	0,0929	–	–	–	144	1
1 square yard								

Volumen								
		cm^3	dm^3	m^3	in^3	ft^3	yd^3	gal (US)[2)]
1 cm^3	=	1	10^{-3}	10^{-6}	0,061	–	–	–
1 dm^3 [1)]	=	10^3	1	10^{-3}	61,02	0,0353	–	0,2642
1 m^3	=	10^6	10^3	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

[1)] 1 Liter (1) = 1,0 dm^3

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

[1)] Einheit nicht mehr zugelassen

Masse						
		g	kg	t	oz	lb
1 g	=	1	10^{-3}	10^{-5}	0,0353	
1 kg	=	10^{3}	1	10^{-3}	35,27	2,205
1 t	=	10^{6}	10^{3}	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 $^{1}/_{24}$ Masseanteil Gold grain 1 gr = ($^{1}/_{700}$) lb = 0,0648 g

Druck								
		Pa = N/m²	bar	kp/cm² = at	atm	Torr	lbf/in²	
1 Pa = 1 N/m²	=	1	10^{-5}	$10,2 \cdot 10^{-6}$	$9,869 \cdot 10^{-6}$	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$145,05 \cdot 10^{-6}$	–
1 bar	=	10^{5}	1	1,02	0,987	750	14,505	1 µbar = 1 dyn/cm² [1)]
1 kp/cm² = 1 at (techn. Atmosphäre)[1)]	=	98100	0,981	1	0,968	735,5	14,224	1 at = 10 m WS (4 °C)
1 atm (phys. Atmosphäre)[1)]	=	101325*	1,013	1,033	1	760*	14,7	1 Torr = 1/760 atm
1 Torr[1)]	=	133,32	$1,333 \cdot 10^{-3}$	$1,36 \cdot 10^{-3}$	$1,316 \cdot 10^{-3}$	1	0,01934	1 Torr = 1 mmHg (0 °C)
1 lbf/in²	=	6894,8	0,6895	0,0703	0,06804	51,715	1	–

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

[1)] Einheiten nicht mehr zugelassen

Leistung							
		W	**kW**	**kpm/s**	**PS**	**hp**	
1 W	=	1	10^{-3}	0,101972	$1{,}36 \cdot 10^{-3}$	$1{,}341 \cdot 10^{-3}$	1 W = 1 J/s = 10^7 erg/s
1 kW	=	10^3	1	101,975	1,36	1,341	
1 kpm/s[1)]	=	9,80665	$9{,}80665 \cdot 10^{-3}$	1	0,0133	0,0131	
1 PS[1)]	=	735,5	0,7355	75	1	0,986	
1 hp (horse-power)	=	745,7	0,746	76,04	1,014	1	1 hp = 550 ft lbf/s

2 Einleitung

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).

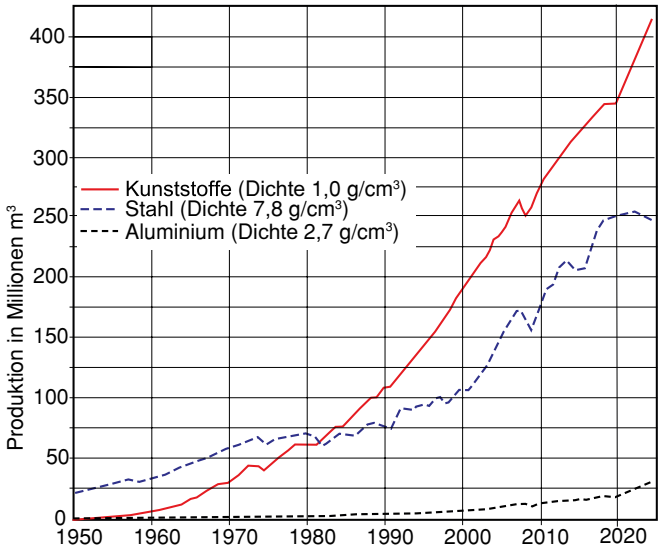


Bild 2.1 Produktionsvolumen verschiedener Werkstoffe
Quelle: Plastics Europe, World Steel Association, The International Aluminium Institute

Bild 2.2 zeigt das rasante Wachstum der Kunststoffproduktion in den verschiedenen Regionen der Welt zwischen 1990 und 2023. Wir sind im 21. Jahrhundert unstrittig in der „Kunststoffzeit“ angekommen. Diese Werkstoffgruppe ist eine wesentliche 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.

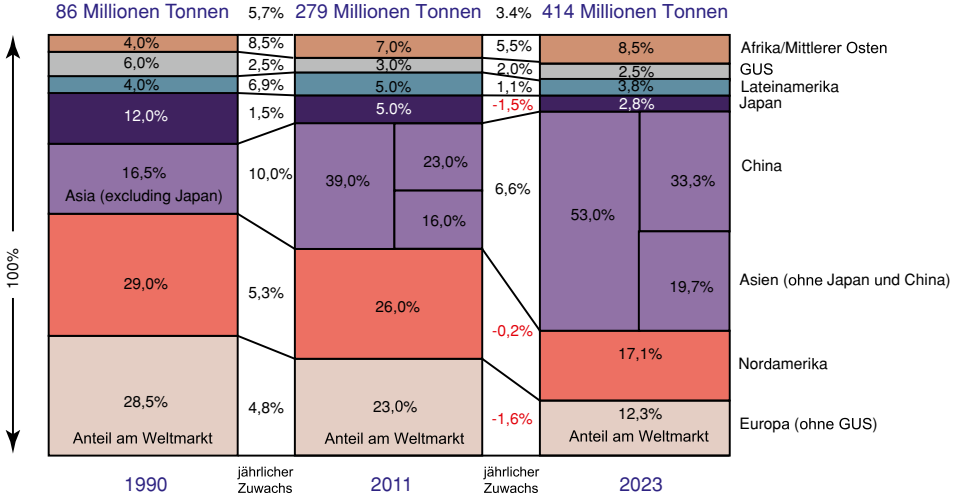


Bild 2.2 Welt-Kunststoffproduktion seit 1990

Quelle: Plastics Europe

Eine Analyse der Haupteinsatzgebiete dieser Werkstoffgruppe am Beispiel Europa im Jahr 2022 (Bild 2.3) verdeutlicht die Vielfältigkeit der Anwendungen. Der Anteil Sonstiges mit 24 % 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 Leichtbaupotenzial 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.

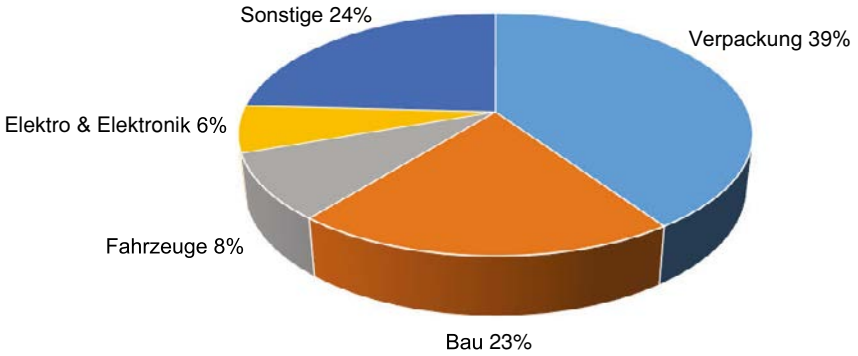


Bild 2.3 Haupteinsatzgebiete für Kunststoffe in Europa (2022)
Quelle: Plastics Europe

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 1,5 Millionen Menschen arbeiten in fast 52 000 Unternehmen, die einen geschätzten Jahresumsatz von 365 Milliarden Euro in den EU-27+3-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.

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.

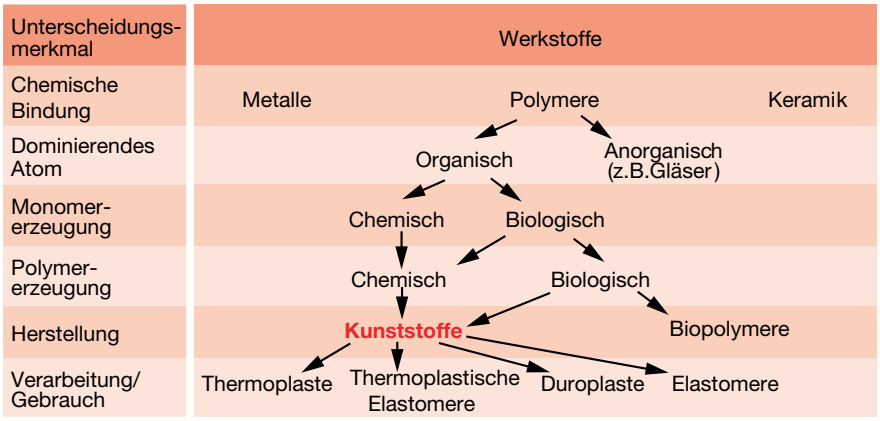


Bild 2.4 Einordnung der Kunststoffe in das Werkstoffgebiet

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, Fotoadressierbare 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 über-

nehmen 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, Grieß, 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 Kunst-

stoffe 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 Akkuratesse 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 Silikone 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^3),
- 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 Tetraederstrukturt ist Methan, 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° 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.

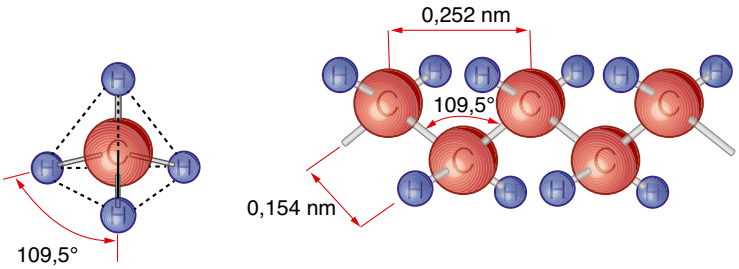


Bild 2.5 links: Schematische Darstellung von Methan (CH_4), rechts: Ausschnitt aus einem Polyethylenmolekül

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.

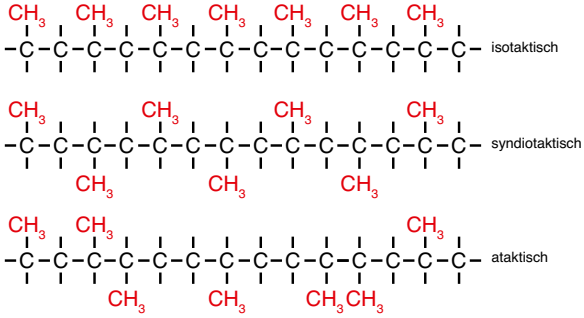


Bild 2.6
Unterschiedliche Polypropylenkonfigurationen

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.

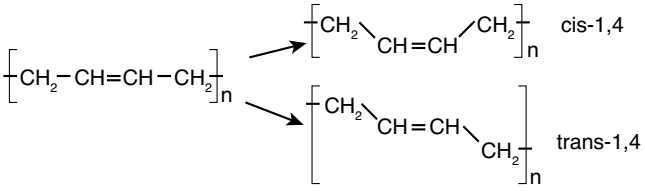


Bild 2.7 Schematische Darstellung der Strukturformeln von cis-1,4- und trans-1,4-Polybutadien-Molekülen

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.

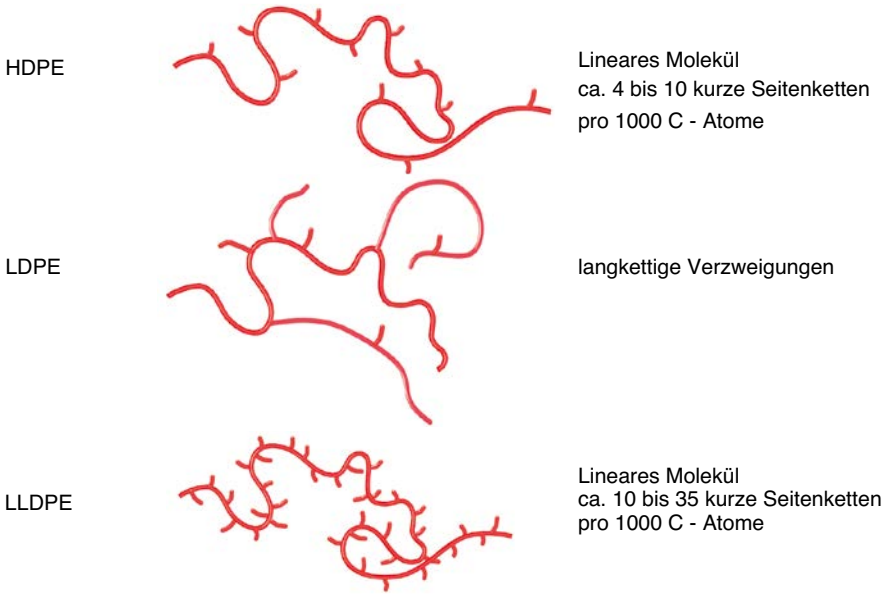


Bild 2.8 Molekulare Struktur verschiedener Polyethylene (schematisch)

Polyethylen hoher Dichte (PE-HD, high density polyethylene) weist zwischen 5 und 10 kurze Seitenketten pro 1000 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 Schmelzezustand oder in Lösung. Es gibt daher Formmassekennwerte bzw. Kennwertfunktionen, die zur praktischen Beschreibung des Fließverhaltens dienen und in Korrelation zur Molmasse stehen.

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.

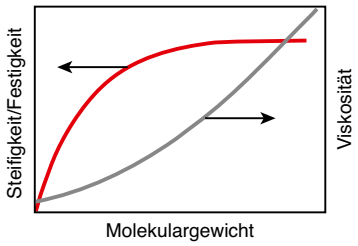


Bild 2.9
Einfluss des Molekulargewichts auf die mechanischen und rheologischen Eigenschaften

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 Molekülfraktionen, 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

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

wobei m_i die Gesamtmasse aller Moleküle, M_i das Molekulargewicht und n_i die Anzahl der Moleküle mit i Wiederholungseinheiten darstellt.

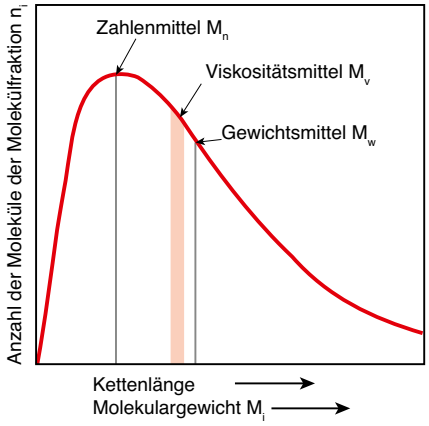


Bild 2.10
Molekulargewichtsverteilung eines typischen Thermoplasten

Der Gewichtsmittelwert ist definiert als

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

Der Viskositätsmittelwert wird berechnet nach

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

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

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

Es besteht eine lineare Abhängigkeit des Molekulargewichts von der Viskosität. Diese ist bei geringem Molekulargewicht bzw. kurzen Ketten $a = 1$ und folgt bei hohem Molekulargewicht aufgrund der dann vorliegenden Verschlaufungen dem Potenzgesetz (Power Law) ($a = 3{,}4$). 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

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

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

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

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

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

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.

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.

Tabelle 2.1 Molekulare Uneinheitlichkeit in Abhängigkeit von der Polymerbildungsreaktion

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

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 (PA6), 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 wärme-

formbeständig. 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 infrage, 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 $T_{g\ dyn}$) 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.

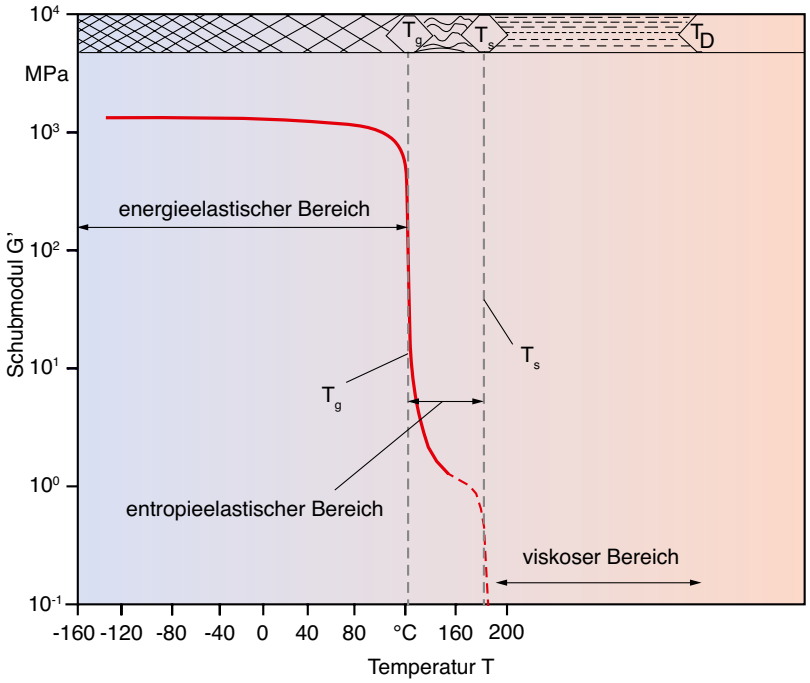


Bild 2.11 Abhängigkeit des Schubmoduls von der Temperatur bei PS

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. 10^4 % 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.

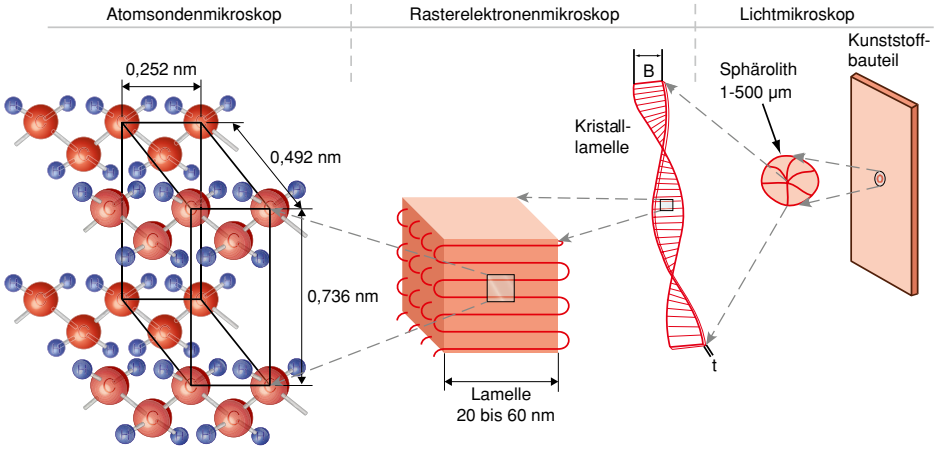


Bild 2.12 Morphologie eines teilkristallinen Thermoplasten

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 °C, der *Glasübergangstemperatur* und einen bei 140 °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.

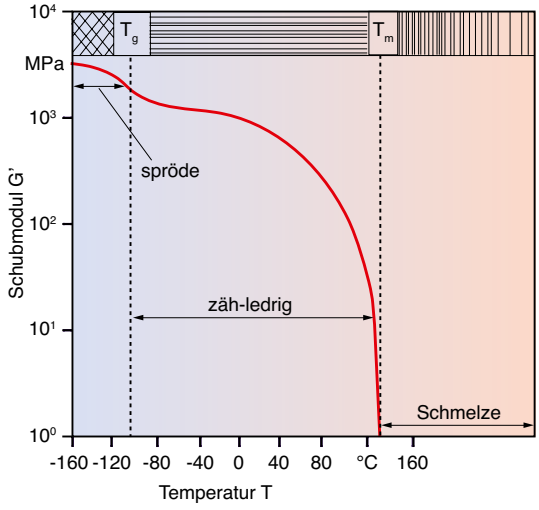


Bild 2.13
Abhängigkeit des Schubmoduls von der Temperatur bei PE-HD

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.

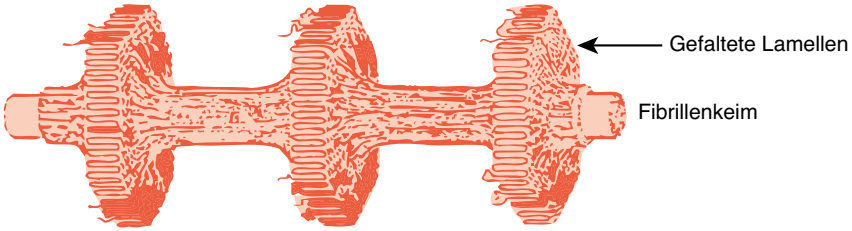


Bild 2.14 Shish-Kebab-Struktur

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

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, sodass 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 Freiheitsgad 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.

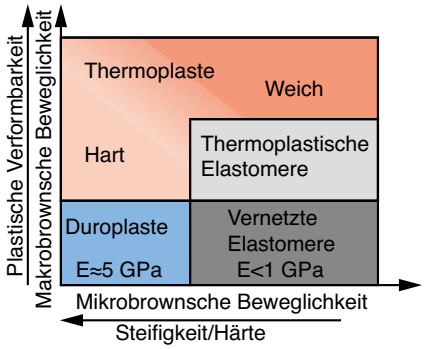


Bild 2.15
Einordnung der Kunststoffe nach der Molekülbeweglichkeit bei Raumtemperatur

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 Netzwerkbildung 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 ver-

zweigten 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 Elastomere* 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 „Gummipotenzial“ in sich. In der Praxis wurden weiches Polyvinylchlorid (PVC-P, PVC plasticized), 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 Vervollkommnung 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 Solvatation (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 $T_g = 225\,°C$) 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.

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.

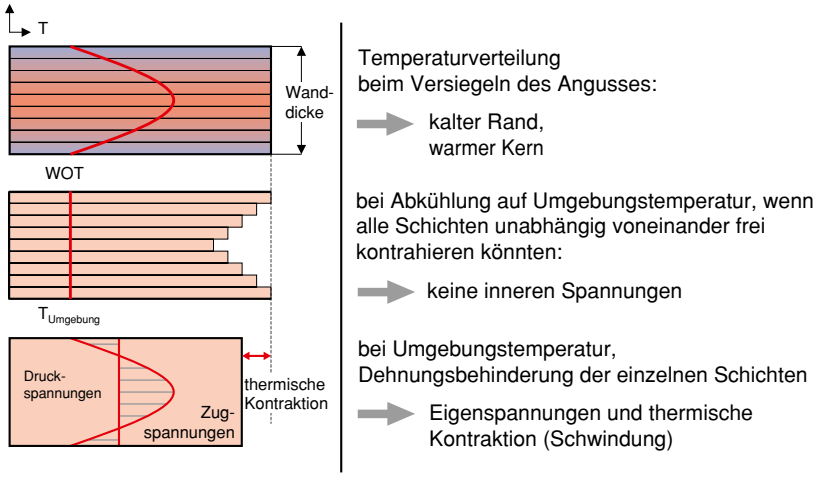


Bild 2.17 Schichtmodell: Entstehung von Abkühleigenspannungen

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 Schmelzeelement wird im Fließprozess ein orientiertes Element. Der Orientierung liegen zwei unterschiedliche Prozesse zugrunde:

- Lokale Dehnung eines Schmelzeelements, 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.

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 Erkaltung

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.

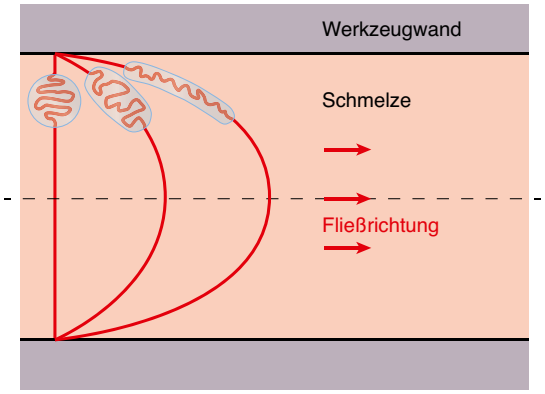


Bild 2.18
Entstehung der Molekülorientierung

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 Massetemperatur, 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, sodass die eingefrorene Orientierung geringer sein kann als bei langsamer Einspritzgeschwindigkeit. Niedrige Massetemperaturen, 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, quer zu dieser höhere Wärmedehnung und Verarbeitungsschwindung vor.

Bei transparenten Werkstoffen kann man Orientierungen mithilfe der Polarisationsoptik qualitativ nachweisen, da orientierte Bereiche doppelbrechend sind, s. Abschnitt 3.6. Die röntgenografische 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, sodass 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 röntgenografisch, thermoanalytisch mittels dynamischer Differenzkalorimetrie (DSC) oder mithilfe 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.

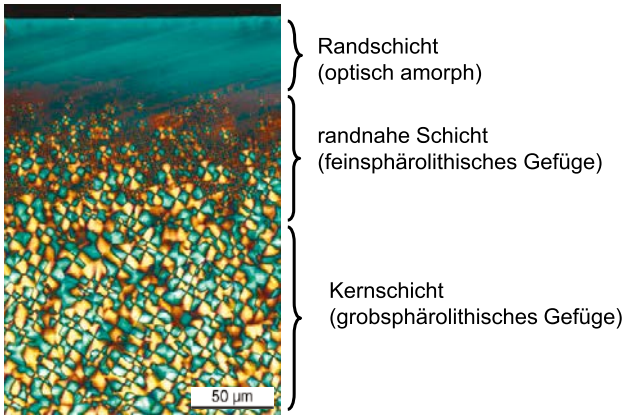


Bild 2.19
Gefüge in einem Spritzgießformteil aus PA66[1)]

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 zwi-

[1] 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).

schen 35/65 und 65/35 keine Schmelztemperatur. Das Material ist ein Elastomer. Diese sog. EPDM-Materialien (Ethylen-Propylen-Dien-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 Phasenadhäsion 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 Eigenschaftsverbesserung 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.

2.5.2 Kunststoffverbunde

Kunststoffverbunde sind eine Form der Eigenschafts- bzw. Stoffmodifizierung, die sich nach der Verbindungsart wie folgt einteilen lässt:

- Mehrschichtenverbunde und
- Faserverbundkunststoffe.

Mehrschichtenverbunde bestehen aus geometrisch abgrenzbaren, aber stofflich verschiedenen Werkstoffschichten. Hierzu gehören *Mehrschichtenfolien, -tafeln, -rohre, -schläuche, Stützkernkonstruktionen (Sandwichkonstruktionen)* aus leichten Schaumstoff-, Waben- oder Homogenkernen mit relativ dünnwandigen Deckschichten, *Mehrkomponentenformteile* aus Mehrkomponenten- und Mehrfarbenspritzgießen, Hinterspritztechniken u. a. sowie alle Produkte der *Insert- und Outserttechniken*. Die Schichtverbundbauweise gestattet die Entwicklung von Verbundfolien mit genau abgestimmtem Permeationsverhalten, die Herstellung leichter und trotzdem sehr biegesteifer Stützkernkonstruktionen, z. B. für den Flugzeug- und Fahrzeugbau, sowie eine Vielzahl anderer Eigenschaftskombinationen bezüglich Festigkeit, Steifigkeit, Gasdurchlässigkeit, Brennbarkeit, dekoratives Aussehen, Wärmeisolierung, Montierbarkeit u. a. Dabei lassen sich sowohl verschiedene Kunststoffe untereinander als auch mit anderen Werkstoffen (Metalle, Hölzer u. a.) kombinieren. Ein technologischer Schwerpunkt dieser Werkstoffmodifizierung ist die Erzielung einer ausreichenden Haftung zwischen den Schichten, wofür eine Reihe stoffschlüssiger und formschlüssiger Verbindungstechniken nach unterschiedlichen Wirkprinzipien verfügbar ist.

Faserverbundkunststoffe bestehen aus einer Polymermatrix, in der verstärkende oder eigenschaftsverbessernde Zusatzstoffe in gewünschter Weise (isotrop, anisotrop) verteilt sind. Typisches Beispiel sind *Hochleistungsfaserverbundkunststoffe (Composite)* aus hochfesten bzw. hochmoduligen Fasern oder textilen Halbzeugen, die durch eine Kunststoffmatrix zu einem Werkstoff verbunden sind. Aber auch Kunststoff-Beton, Schichtpressstoffe (Hartgewebe, Hartpapiere, Hartmatten), langfaserverstärkte Thermoplaste (LFT) sowie die große Palette gefüllter und verstärkter duroplastischer Formstoffe und Laminate gehören zu dieser Werkstoffkategorie. Näheres dazu wird in Kapitel 6 erläutert.

Allerdings werden die überragenden mechanischen Eigenschaften der faserverstärkten Kunststoffe im Bauteil nur dann erreicht, wenn die Fasern in hohen Anteilen und geordnet im Kunststoff eingebracht sind. Dies erfordert spezielle und kostenintensive Verarbeitungsverfahren (s. Kapitel 4).

Ein Großteil der Kunststoffe wird durch Fließvorgänge urgeformt. Damit der Kunststoff fließfähig bleibt, dürfen die Faserlängen der Füllstoffe nicht zu lang werden. Es besteht also ein ursächlicher Zusammenhang zwischen den verwendeten Verstärkungsstoffen und dem anwendbaren Verarbeitungsverfahren (Bild 2.20). Bei großserientauglichen Kunststoffverarbeitungsverfahren betragen die Faserlängen in der

Regel 10 Millimeter. Auch muss bedacht werden, dass die Faserlänge bei der Verarbeitung oft weiter abgebaut wird, also die Länge der Fasern im Bauteil stets kleiner ist als in der Ausgangsformmasse.

Verarbeitungs-verfahren	Spritzgießen	Fließpressen	RI, RTM Autoklavprozess
Ausgangsstoffe	Granulate	SMC, BMC, LFT Langfasergranulate	Textile Halbzeuge, Preforms, Prepregs
charakteristische Merkmale	Kurzfasern: L < 4,5 mm ϕ < 25%	Langfasern: 4,5 < L < 40 mm ϕ < 25%	Endlosfasern: L Bauteilmessung ϕ > 30%
Faserorientierung im Bauteil			

Großserienfähigkeit ← → Mechanische Eigenschaften

Bild 2.20 Zusammenhang zwischen Verarbeitungsprozess und erreichbarer Faserlänge

Letztendlich werden eine große Zahl von Füllstoffen in die Kunststoffe eingearbeitet, um maßgeschneiderte Werkstoffeigenschaften zu erreichen. In Bild 2.21 ist die Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaft „Matrixversteifung“ (also die Veränderung des E-Moduls durch den Füllstoff) von der Art, Form und Ausrichtung der Füllstoffpartikel bei verschiedenen Füllstoffanteilen dargestellt.

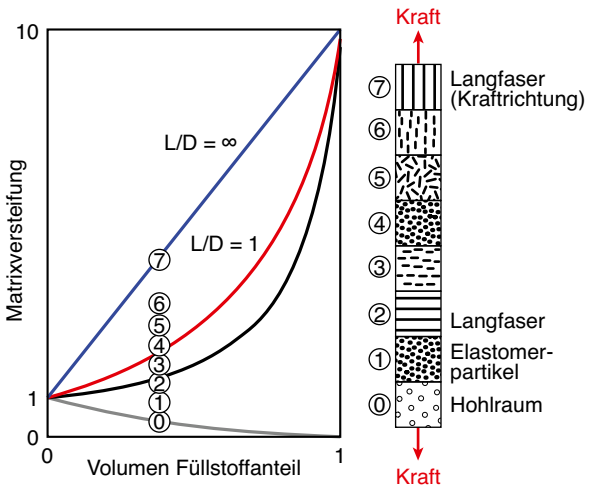


Bild 2.21 Versteifungswirkung in Abhängigkeit von Art, Form und Orientierung des Füllstoffs

3
Eigenschaften und Prüfverfahren

In diesem Kapitel werden die charakteristischen Eigenschaften der Kunststoffe und die zur Ermittlung dieser Eigenschaften erforderlichen Prüfverfahren dargestellt. Ziel ist es, ein Verständnis für diese Gruppe von Werkstoffen zu entwickeln und zu vertiefen. Die Darstellungen bleiben teilweise allgemein und qualitativ. Die im Folgenden gezeigten Diagramme mit Werkstoffeigenschaften sollen lediglich helfen, das Verständnis zu verbessern. Zum Teil werden Kunststoffe in Tabellen und Grafiken im Vergleich dargestellt, aber auch diese Vergleiche dienen nur dem allgemeinen Verständnis.

An dieser Stelle soll noch einmal darauf hingewiesen werden, dass Kunststoffe immer durch den Zuschlag von Funktions- und Hilfsstoffen modifiziert sind. Sie werden i. d. R. als Handelsprodukte eingesetzt, welche sich unter Umständen sehr von den hier dargestellten „Mittelwerten“ unterscheiden können. In jedem Falle ist vor der Entscheidung für ein Produkt eine detaillierte Nachfrage beim Produzenten notwendig. Als sehr empfehlenswerte Quelle kann die Datenbank CAMPUS dienen, die von mehr als 30 Produzenten kostenlos verteilt wird. In dieser Datenbank werden nur Daten für Handelsprodukte abgelegt. Aus Platz- und Aktualitätsgründen ist es nicht möglich, die Vielfalt an Informationen in einem gedruckten Werk zu hinterlegen. Weiterführende Informationen zur CAMPUS-Datenbank selbst und die Möglichkeit zu kostenlosen Downloads stellt die Internetseite *www.CAMPUSplastics.com* zur Verfügung.

Um exemplarisch die starken Streuungen der Eigenschaften von Kunststoffen zu veranschaulichen, sind in Bild 3.1 die Spannungs-Dehnungs-Diagramme verschiedener ungefüllter PBT-Typen laut CAMPUS gegenübergestellt. Selbst innerhalb einer Polymerfamilie gibt es also bereits große Unterschiede im Eigenschaftsprofil.

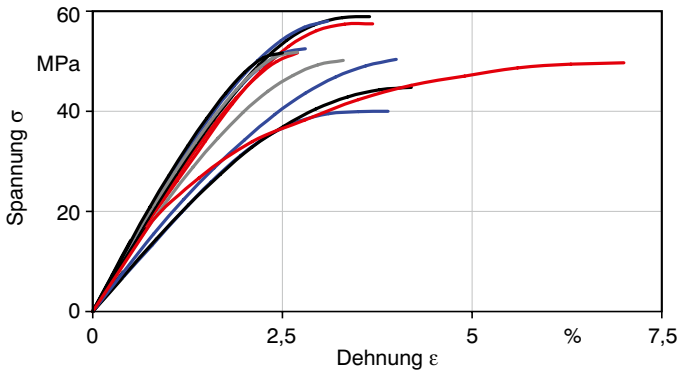


Bild 3.1 Streubreite der Spannungs-Dehnungs-Diagramme für PBT bei 23 °C

3.1 Aussagekraft der Kennwerte

Werkstoffkennwerte sind die wichtigsten Einflussgrößen in allen Phasen der Konstruktion. Sie werden in den ersten konzeptionellen Konstruktionsschritten, bei der Werkstoffauswahl und schließlich bei der konstruktiven Bemessung von Formteilen eingesetzt. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, sind an Kennwerte bestimmte Forderungen zu stellen:

- Sie müssen vergleichbar sein,
- sie müssen aussagekräftig sein,
- sie müssen rationell zu ermitteln sein.

In Datenbanken und anderen Produktbeschreibungen werden bis zu 200 verschiedene Eigenschaften eines Produkts angeführt. Es ist einleuchtend, dass diese Vielzahl von Informationen die Übersicht erschwert oder gar unmöglich macht.

Für ein Taschenbuch muss eine sinnvolle Auswahl an Kennwerten getroffen werden. Eine weltweit anerkannte Grundlage für diese Auswahl ist die DIN EN ISO 10350: Kunststoffe-Ermittlung und Darstellung vergleichbarer Einpunktkennwerte, s. Tabelle 3.1. Hieraus ergibt sich auch die Reihenfolge der Darstellung in diesem Kapitel. Außerdem wichtig ist die DIN EN ISO 11403: Kunststoffe-Ermittlung und Darstellung von vergleichbaren Vielpunkt-Kennwerten, in der wichtige Funktionen beschrieben werden, s. Tabelle 3.2. Auf diesen beiden Standards beruht die internationale Datenbank für Kunststoffkennwerte „CAMPUS“. Sie enthält die Kennwerte für das jeweilige Produktsortiment entsprechend Tabelle 3.1 und Tabelle 3.2.

Tabelle 3.1 CAMPUS-Datenkatalog nach DIN EN ISO 10350

Eigenschaft	Symbol	ISO-(IEC)-Norm	Probekörper (Maße in mm)	Einheit	Bemerkung
Rheologische Eigenschaften					
Schmelzvolumenrate	MVR	1133	Formmasse	cm^3/10 min	
Verarbeitungsschwindung *parallel*	S_{Mp}	294-4 (Thermoplaste) 2577 (Duroplaste)	60 · 60 · 2	%	s. ISO 294-3, Thermoplaste u. ISO 10724-2, Duroplaste
Verarbeitungsschwindung *senkrecht*	S_{Mn}				
Mechanische Kennwerte 23 °C					
Zugmodul	E_t	527-1/2	ISO 3167 (Vielzweck-Probekörper)	MPa	Dehnung 0,05 bis 0,25 %
Streckspannung	σ_y			MPa	
Streckdehnung	ε_y			%	
Nominelle Bruchdehnung	ε_{tB}			%	nur oberhalb der Streckgrenze
Spannung bei 50 % Dehnung	σ_{50}			MPa	bei Probekörpern ohne σ_y bis ε = 50 %
Bruchspannung	σ_B			MPa	bei Probekörpern ohne Streckgrenze
Bruchdehnung	ε_B			%	bei Probekörpern ohne Streckgrenze
Zug-Kriechmodul: für 1 h	E_{tc} 1	899-1		MPa	Dehnung 0,5 %
Zug-Kriechmodul: für 1000 h	E_{tc} 10^3				
Charpy-Schlagzähigkeit:					
bei + 23 °C	a_{cU} + 23	179/1eU	80 · 10 · 4 (Vielzweck-PK)	kJ/m^2	
bei – 30 °C	a_{cU} – 30				

Tabelle 3.1 CAMPUS-Datenkatalog nach DIN EN ISO 10350 *(Fortsetzung)*

Eigenschaft	Symbol	ISO-(IEC)-Norm	Probekörper (Maße in mm)	Einheit	Bemerkung
Charpy-Kerb-schlagzähigkeit:					
bei + 23 °C	a_{cA} + 23	179/1eA			
bei – 30 °C	a_{cA} – 30				
Zug-Kerbschlag-zähigkeit bei + 23 °C	a_t 1	8256/1	80 · 10 · 4 (Vielzweck-Probekörper) mit Doppel-V-Kerbe	kJ/m^2	wenn Charpy-Kerb-schlagzähigkeit nicht zu ermitteln ist
Durchstoß bei + 23 u. – 30 °C	F_M	6603-2	60 · 60 · 2	N	
Maximalkraft + 23 u. – 30 °C Arbeit	W_P			J	
Thermische Kennwerte					
Schmelz-temperatur	T_m	11357-1 u. 3	Material	°C	Temperatursteigerung 10 K/min
Glastemperatur	T_g	11357-1 u. 2			
Formbeständig-keitstemperatur bei 1,8 MPa	T_f 1,8	75-1/2	80 · 10 · 4 (Vielzweck-PK)	°C	wähle 1,8 MPa und eine zweite Laststufe
bei 0,45 MPa	T_f 0,45				
bei 8,0 MPa	T_f 8,0				
Vicat-Erweichungs-temperatur	T_v 50/50	306	≥ 10 · 10 · 4 (Vielzweck-PK)	°C	Temperatursteigerung 10 K/min, Laststufe 50 N
Längen-ausdehnungs-Koeffizient parallel	α_p	11359-1/2	Zentrum von 80 · 10 · 4 (Vielzweck-PK)	10^{-6}/K	Zunahme der Dehnung zwischen 23 und 55 °C
senkrecht	α_n				
Brennverhalten bei 1,5 mm Dicke	B50/1,5 B500/1,5	60695-11-10	125 · 13 · 1,5 ≥ 150 · 150 · 1,5	Klasse	Klassen bei B50: V-0, V-1, V-2, HB Klassen bei B500: 5VA, 5VB, N

Eigenschaft	Symbol	ISO-(IEC)-Norm	Probekörper (Maße in mm)	Einheit	Bemerkung
bei -,- mm Dicke	B50/-,- B500/-,-	60695-11-10/ -20	125 · 13 · 1,5 ≥ 150 · 150 · 1,5		
Sauerstoff-Index	OI23	4589-1/2	80 · 10 · 4 (Vielzweck-PK)	%	Verfahren A: Entzünden der oberen Oberfläche
Elektrische Kennwerte					
Dielektrizitäts-zahl 100 Hz	ε_r100	IEC 60250	60 · 60 · 2	10^{-4}	
1 MHz	ε_r1M		(60 · 60 · 1)		
Dielektrischer Verlustfaktor					
100 Hz	tan δ 100				
1 MHz	tan δ 1M				
Spezifischer Durchgangs-widerstand	ρ_e	IEC 60093	60 · 60 · 2 (60 · 60 · 1)	Ω · m	1-Minuten-Werte
Spezifischer Ober-flächenwiderstand	σ_e			W	1-Minuten-Werte, 500 V
Elektrische Durch-schlagfestigkeit	E_B1	IEC 60243-1	≥ 60 · ≥ 60 · 1	kV/mm	Spannungssteigerung 2 kV/s
Vergleichszahl der Kriechwegbildung	CTI	IEC 60112	≥ 15 · ≥ 15 · 4 (Vielzweck-PK)		Prüfflüssigkeit A
Sonstige Kennwerte 23 °C					
Wasseraufnahme	W_W	62 und 15512	Dicke ≥ 1	%	Sättigungswert in Wasser, 23 °C
Feuchtigkeits-aufnahme	W_H				Sättigungswert in 23 °C/50 % r.F.
Dichte	ρ	ISO 1183	(Vielzweck-PK)	kg/m^3	
Formmassespezifische Kennwerte					
Viskositätszahl	VN		Material	cm^3/g	
Kennzeichnende Dichte	ρ_I	1872-1		kg/m^3	nur für PE
Lichttrans-missionsgrad	τ_t	13468-1/-2	60 · 60 · 2	%	

Tabelle 3.1 CAMPUS-Datenkatalog nach DIN EN ISO 10350 *(Fortsetzung)*

Eigenschaft	Symbol	ISO-(IEC)-Norm	Probekörper (Maße in mm)	Einheit	Bemerkung
Herstellbedingungen für Probekörper					
Spritzgießen von Thermoplasten					**es bedeuten:** P = Thermoplastics S = Thermosets I = Injection Molding C = Compression Molding R = Cooling Rate M = Molding $_C$ = Cure
Massetemperatur	T_M IP	294-1 u. 3		°C	
Werkzeug-temperatur	T_C P				
Spritzgeschwindig-keit	v_I P			mm/s	
Nachdruck	P_H			MPa	
Spritzgießen von Duroplasten					
Temperatur der plastifizierten Masse	T_M IS	10724		°C	
Werkzeug-temperatur	T_C S				
Spritzgeschwindig-keit	v_I S			mm/s	
Härtungszeit	t_C I			min	
Pressen von Thermoplasten					
Werkzeug-temperatur	T_M CP	293		°C	
Abkühl-geschwindigkeit	R_C			K/min	
Presszeit	t_M			min	
Entformungs-temperatur	T_D			°C	
Pressen von Duroplasten					
Werkzeug-temperatur	T_M CS	295		°C	
Härtungszeit	t_C C			min	

Tabelle 3.2 CAMPUS-Kennwertfunktionen nach ISO 11403

Funktionen	Parameter	ISO Prüfnorm
Viskosität-Schergeschwindigkeit	Temperatur	11443
Schubmodul-Temperatur		6721-1,2,7
Spannung-Dehnung	Temperatur	527-1,2
Sekantenmodul-Dehnung	Temperatur	
Spannung-Dehnung (isochron) *T1* bis *T6*	Temperatur, Zeit	899-1
Kriechmodul-Zeit *T1* bis *T6*	Spannung	
Spezifische Volumen-Temperatur (*pvT*)	Druck	17744
Spezifische Enthalpie pro Masse-Temperatur (DSC)		11357-1 u. 4

Alle Werte werden nach einheitlich festgelegten Prüfverfahren ermittelt, die in ISO-Normen definiert sind. Auch die Herstellung der Probekörper erfolgt nach einheitlichen Vorschriften. Dies ist sehr wichtig für die Vergleichbarkeit der Werte, da die am Probekörper ermittelten Kennwerte stark von den Bedingungen bei der Herstellung der Probekörper im Spritzgießverfahren abhängen können. Die Datenbank CAMPUS wurde vorzugsweise für Thermoplaste konzipiert. Die Daten sind aber auch für Elastomere, Thermoelaste sowie Duroplaste anwendbar.

Im Folgenden sollen die wesentlichen in diesem Taschenbuch verwendeten Kennwerte zur Beurteilung des Verhaltens der Kunststoffe bei der Verarbeitung erläutert werden. Unter Verarbeitung wird dabei insbesondere die Herstellung der Formteile, der bestimmungsgemäße Gebrauch und die Überlastung der Formteile verstanden. Generell ist bei der Beurteilung der Kennwerte zu beachten, dass sie keine universellen Materialkonstanten sind. Wie die Kennwerte anderer Werkstoffe können sie in mehr oder weniger starkem Maße von folgenden Einflussfaktoren abhängen:

- der Temperatur,
- der Dauer und Geschwindigkeit einer Belastung,
- der Häufigkeit einer Belastung,
- den Umwelteinflüssen,
- den Materialinhomogenitäten wie Bindenähten, Kerben u. a.,
- den Herstellbedingungen der Formteile und der daraus resultierenden Schwindung und dem Verzug.

Hierzu werden in den folgenden Kapiteln Beispiele erläutert.

3.2 Verarbeitungstechnische Kennwerte

Die Herstellung von Formteilen aus Kunststoffen erfolgt bei Thermoplasten und Duroplast-Formmassen durch Ausformen bei erhöhten Temperaturen, wobei dieser Vorgang bei den Thermoplasten mehrfach wiederholbar ist. Duroplaste dagegen härten bei der Formgebung aus, vernetzen und sind nicht wieder aufschmelzbar. Gießharze, die ebenfalls zu den Duroplasten zählen, werden nach speziellen Verfahren verarbeitet, s. Abschnitt 4.6.

Der Verarbeitungsprozess ist mitbestimmend für die Eigenschaften und die Herstellkosten eines Formteils. Für die Werkstoffauswahl und die Vorbereitung der Produktion ist deshalb die Kenntnis der im folgenden beschriebenen Werte wichtig.

3.2.1 Rheologisches Verhalten

Die Fließfähigkeit einer Kunststoffschmelze bei der Verarbeitungstemperatur ist sowohl für die Anzahl als auch für die Anordnung der Angüsse bei einem Spritzgießwerkzeug maßgebend. Außerdem hängt von ihr in Kombination mit dem Erstarrungsverhalten die erreichbare minimale Wanddicke ab. Die minimale Wanddicke ist zugleich ein Maß für den erforderlichen Materialeinsatz. Das Maß für die Fließfähigkeit ist die Viskosität. Wegen der zahlreichen Einflussgrößen (Kunststoffschmelzen sind strukturviskos, viskoelastisch und die Fließeigenschaften sind temperatur- und druckabhängig) ist die Rheologie der Kunststoffe ein komplexes Gebiet. In der Mehrzahl der Verarbeitungsprozesse steht die Scherviskosität im Vordergrund. Daher werden Viskositäten in aller Regel mit Geräten gemessen, in denen die Schmelze unter Scherbelastung fließt.

3.2.1.1 Fließverhalten, Viskosität

Bei Thermoplasten wird das rheologische Verhalten durch Fließkurven beschrieben, die meist in Kapillar-Rheometern gemessen werden (DIN 54811: Bestimmung des Fließverhaltens mit einem Kapillar-Rheometer). Sie beschreiben den Zusammenhang zwischen der Scherviskosität in $Pa \cdot s$ und der Schergeschwindigkeit in s^{-1}.

Die Scherviskosität ist ein Maß für das Verhältnis der Schubspannung zur Schergeschwindigkeit in einer fließenden Substanz und damit ein Maß für den Widerstand, den die Schmelze der Strömung entgegensetzt. In Bild 3.2 ist die Änderung der Viskosität mit zunehmender Schergeschwindigkeit für unterschiedliche Thermoplaste dargestellt. Bei niedrigen Scherraten zeigen Kunststoffe newtonsches Verhalten, d. h., die Viskosität ist unabhängig von der Schergeschwindigkeit und zeigt ein sogenanntes Newtonsches Plateau. Man spricht auch von der Nullviskosität. Des Weiteren ist der Einfluss abnehmender Temperatur auf die Viskosität dargestellt. Bei Abkühlung steigt

die Viskosität an. Zudem sind die bei verschiedenen Verarbeitungsverfahren auftretenden Schergeschwindigkeitsbereiche eingezeichnet und die zur Bestimmung gebräuchlichen Messverfahren zugeordnet. Bild 3.3 zeigt die Größenordnung der möglichen Schwankungen für die Viskositätskurven bei einer konstanten Temperatur für ABS. Auf Basis dieser Viskositätskurven durchgeführte Fließlängenberechnungen ergeben Abweichungen im Bereich von 30 %. Dieses Beispiel soll zeigen, wie vorsichtig man bei rheologischen Daten im Umgang mit gemittelten Werten sein muss. Sie können nur zum Vergleich zwischen Werkstofffamilien aber niemals als Berechnungswerte in der Konstruktion eingesetzt werden.

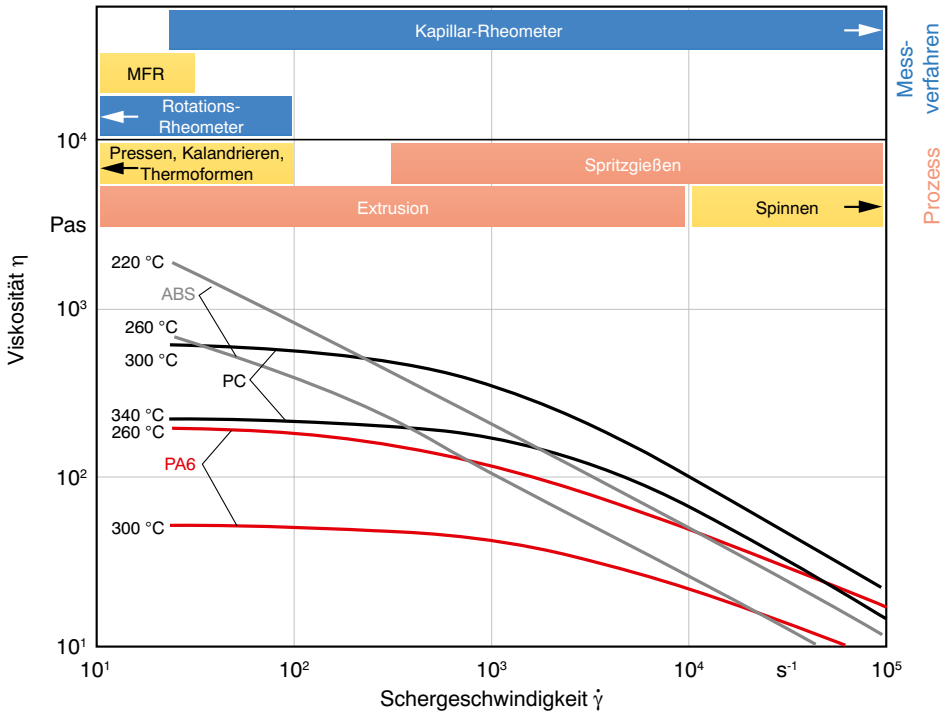


Bild 3.2 Schmelzeviskosität einiger Thermoplaste für die normale obere bzw. untere zulässige Schmelzetemperatur

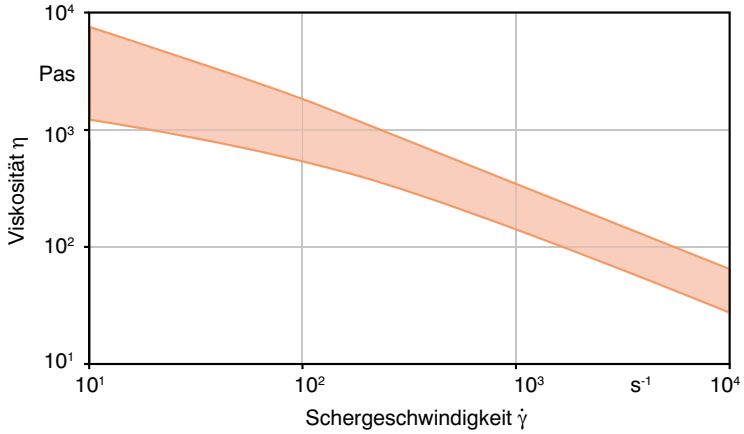


Bild 3.3 Streubreite der Viskositätskurve für ABS bei 240 °C

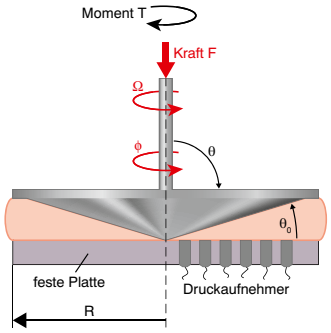
In Bild 3.4 sind Ausführungsformen der beiden gängigsten Rheometer mit Hinweisen auf Anwendungsbereiche zusammengestellt. Mit Rotationsrheometern, wie dem hier dargestellten Kegel-Platte-Messsystem, sind Messungen bei geringen Scherraten möglich. Diese meist komplexen Messungen erlauben die grundlegende Analyse rheologischer Phänomene, wie der Hauptspannungsdifferenzen, oder auch die Ableitung rheologischer Modelle, da sie Veränderungen auf molekularer Ebene detektieren. Die für die Verarbeitung relevante Scherviskosität wird meist in Kapillarviskosimetern bei konstanter Temperatur aus der Materialmenge bestimmt, die unter bestimmtem Druck aus einer Kapillare austritt.

Online- oder Inline-Rheometer gestatten die Überwachung von Spritzgieß- und Extrusionsprozessen. Während früher noch häufig nach dem Bypassprinzip ein Teilstrom aus dem Gesamtvolumenstrom entnommen wurde, wird die Viskosität heute meist direkt im Haupt-Volumenstrom bestimmt. Dies wird über integrierte Druck- und Temperatursensoren entlang der Fließlänge realisiert, die es erlauben, aus dem Zeitpunkt des Kontakts mit der Schmelzefront, dem Druckverlust und den geometrischen Größen der Kavität die Viskosität zu berechnen. Dies ist allerdings nur bei der vom Prozess vorgegebenen Schergeschwindigkeit möglich.

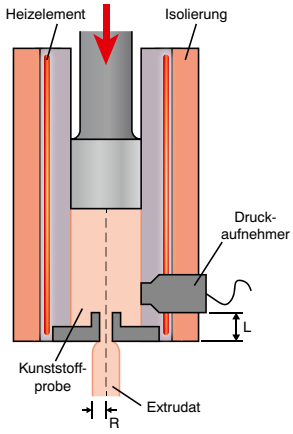
Bild 3.5 zeigt Fließkurven verschiedener Kunststoffe. In Bild 3.5 a) werden Viskositätskurven unterschiedlich eingestellter Polyolefine dargestellt. Die jeweils leichtfließenderen Typen zeigen geringere Viskosität. Viele Kunststoffe enthalten Zuschlagstoffe wie Fließhilfen oder auch Farbpigmente, die zum einen die Verarbeitung, zum anderen aber auch die Produkteigenschaften, wie z. B. die Farbe, beeinflussen. Wie in Bild 3.5 b) zu erkennen ist, wird die Viskosität durch die Zugabe weißen Farbpigments Titandioxid TiO_2 erhöht [1]. Weiterhin ist anhand der beiden unterschiedlichen Partikeldurchmesser zu erkennen, dass der Effekt bei größeren Partikeln höher ausfällt. Die Erhöhung der Viskosität durch Füllstoffzugabe ist außerdem von der Viskosität

des Kunststoffs selbst abhängig: je geringer die Viskosität, desto stärker ist die Viskositätszunahme. Dies wird in Bild 3.5 c) bei einem leichtfließenderen PE-LD deutlich [1]. Werden Kunststoffe vom Hersteller eingefärbt angeboten, so ist die Viskosität i. d. R. so eingestellt, dass die Fließfähigkeit dem Grundtyp entspricht. Bei Masterbatches müssen die Prozesseinstellungen jedoch vom Verarbeiter entsprechend angepasst werden. In Bild 3.5 d) wird der Effekt von Füllstoffen mit noch größeren Partikeln, wie z. B. Fasern oder den hier dargestellten Kupferplättchen, in Abhängigkeit der Temperatur gezeigt [2]. Bei hohen Temperaturen hat der Füllgrad einen geringeren Einfluss als bei niedrigen Temperaturen.

Kegel-Platte-Rheometer



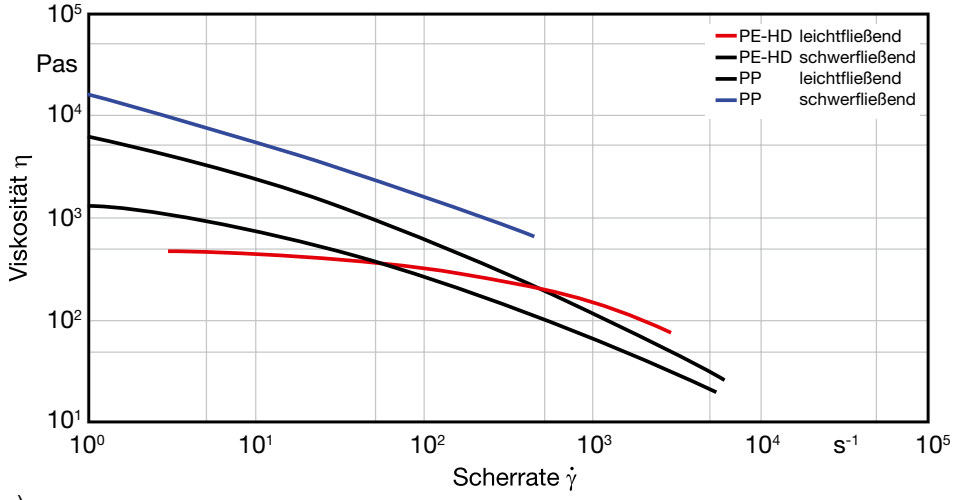
Kapillar-Rheometer



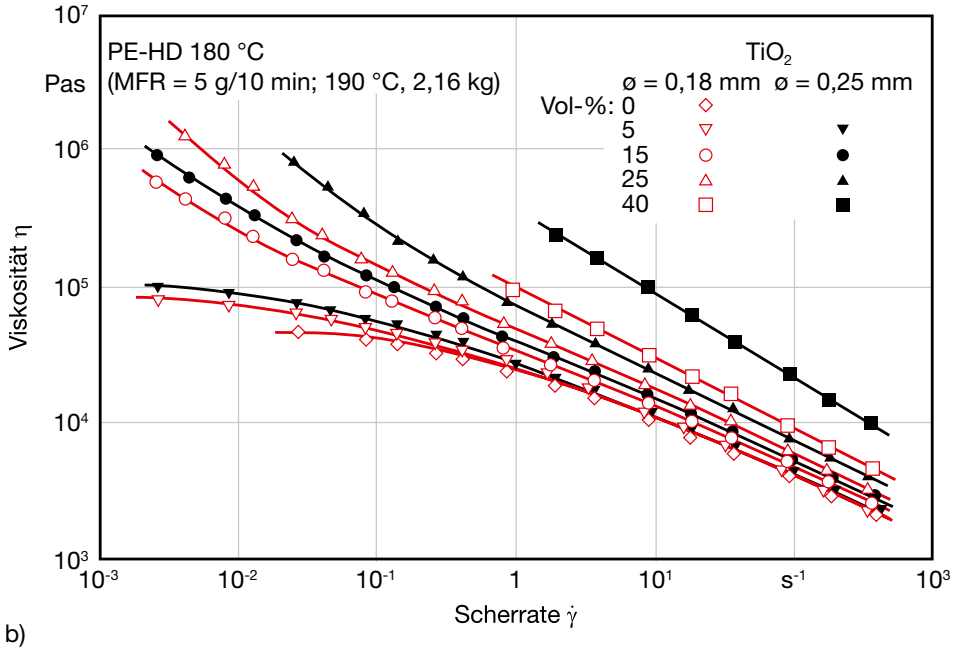
experimentell erfassbarer Schergeschwindigkeitsbereich	zu ermittelnde Materialfunktionen
$(10^{-6}$ bis $10^{2})s^{-1}$	rotierender Betrieb: $\tau, \eta = f(T, p, \dot{\gamma}, t)$ oszillierender Betrieb: $\eta', \eta''; G', G''$
$(10^{1}$ bis $10^{6})s^{-1}$	$\tau, \eta, \sigma = f(p, T, \gamma)$

T	= Temperatur	°C
t	= Zeit	s
p	= Druck	Pa
σ	= Zugspannung	Pa
τ	= Schubspannung	Pa
γ	= Scherung	m
$\dot{\gamma}$	= Schergeschwindigkeit	$m \cdot s^{-1}$
η	= Viskosität	Pa · s
G	= Schubmodul	Pa
η'; G'	= elastischer Anteil	Pa · s
η''; G''	= viskoser Anteil	Pa · s

Bild 3.4 Rheometertypen

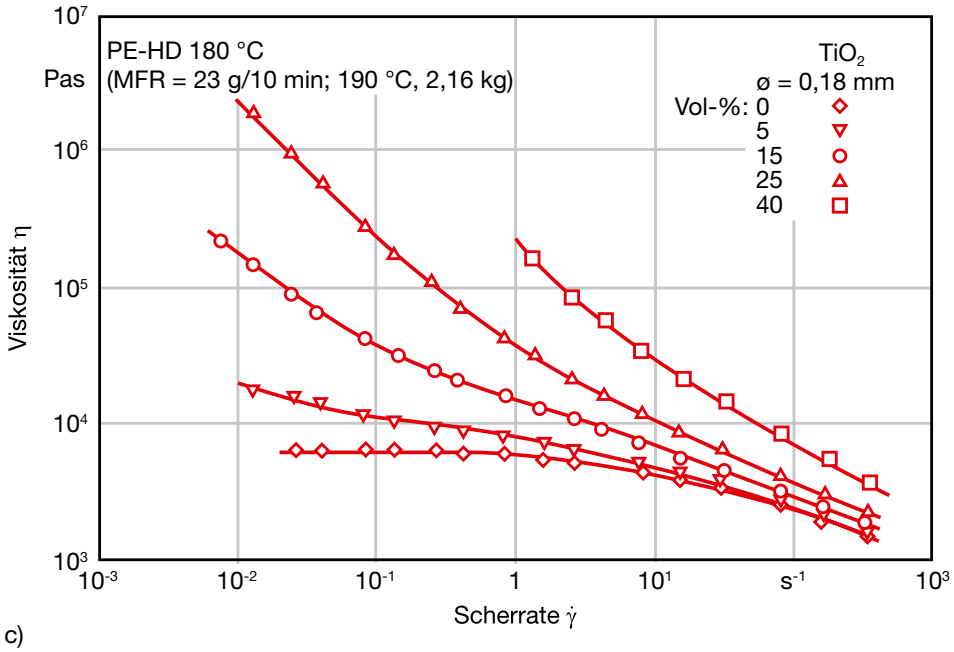


a)

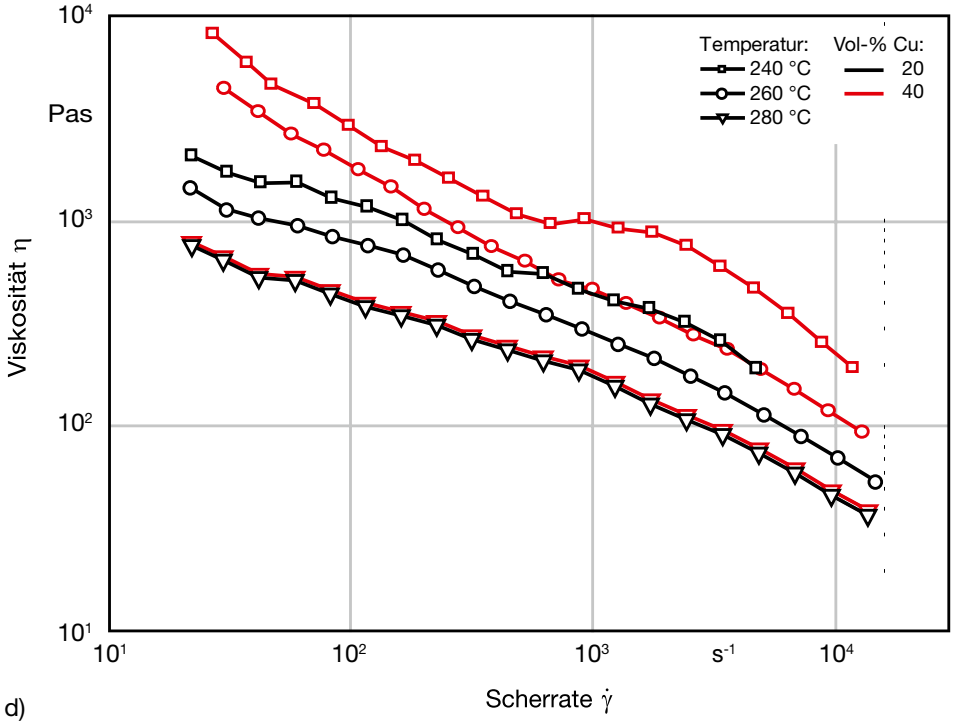


b)

Bild 3.5 Fließkurven verschiedener Kunststoffe



c)



d)

Bild 3.5 Fließkurven verschiedener Kunststoffe *(Fortsetzung)*

Dehnviskosität

In Verarbeitungsprozessen wie dem Blasformen, Faserspinnen, Thermoformen, Schäumen, Fließpressen und in bestimmten Extrusionsdüsen stellt die Dehnung die vorherrschende Form der Verformung dar. Zudem gibt es Prozesse, in denen eine Mischform von Scher- und Dehnströmung auftritt. In Bild 3.6 werden die Unterschiede zwischen Dehn- und Scherviskosität dargestellt. Bei gleicher Spannung ist die Dehnviskosität deutlich höher als die Scherviskosität. In der Nähe des Newtonschen Plateaus erreicht sie einen um den Faktor 3 höheren Wert. Das Verhältnis der beiden Viskositäten wird oft als Faustformel zur Bestimmung der Dehnviskosität herangezogen, da die Messung selbst sehr schwierig ist und daher leider nur sehr wenige Daten zur Verfügung stehen.

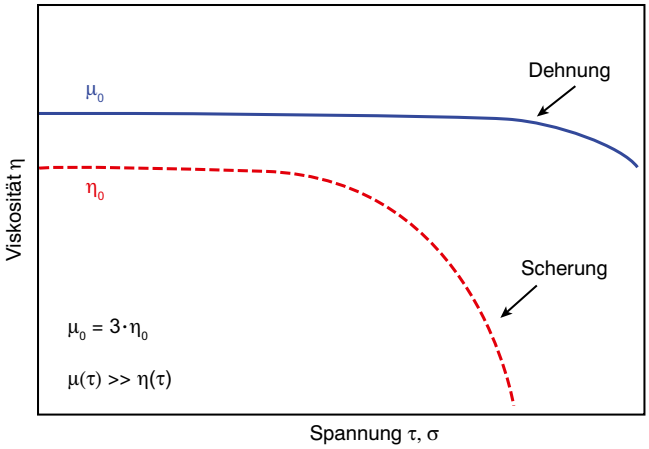


Bild 3.6
Schematische Darstellung des Unterschieds zwischen Scher- und Dehnviskosität

3.2.1.2 Viskositätsmodelle

Um die Fließkurven bei der Auslegung von Spritzgieß- und Extrusionswerkzeugen bzw. Bauteilen mithilfe von Rechenprogrammen verwenden zu können, werden die Abhängigkeiten zwischen Viskosität, Schergeschwindigkeit und Temperatur durch Stoffgesetze beschrieben. Die wichtigsten Modelle werden im Folgenden kurz erläutert.

Potenzgesetz (engl.: power law)

Ostwald und *de Waele* schlugen vor, das Potenzgesetz (allgemein: $y = a \cdot x^b$) zur Beschreibung des Viskositätsabfalls im strukturviskosen Bereich anzuwenden:

$$\eta = m(T)\dot{\gamma}^{n-1} \tag{3.1}$$

Es erfüllt diesen Zweck gut, ignoriert aber das Newtonsche Plateau. Die Parameter m und n beschreiben das jeweilige Materialverhalten. Das Potenzgesetz liefert im Falle von sehr kleinen Schergeschwindigkeiten Instabilitäten, was in der rechnerischen Umsetzung Probleme bereitet und in der Praxis zu einer deutlichen Überschätzung

der Viskosität führt. Dies ist z. B. der Fall bei Einspritzgeschwindigkeitsprofilen mit geringen Geschwindigkeiten und bei Wanddickensprüngen.

Carreau-Modell

Das Carreau-Modell, das auch als Bird-Carreau- oder Bird-Carreau-Yasuda-Modell bezeichnet wird, beschreibt in seiner vereinfachten Form mit drei Parametern den gesamten Schergeschwindigkeitsbereich mit k_1 als Nullviskosität, k_2 als Übergangsschergeschwindigkeit (beim Wechsel vom Newtonschen zum scherratenabhängigen Fließen) und k_3 als Steigung der Fließkurve im scherverdünnenden Bereich:

$$\eta\left(\dot{\gamma}\right) = \frac{k_1}{\left[1 + k_2\dot{\gamma}\right]^{k_3}} \tag{3.2}$$

Damit kann das Modell über einen weiten Scherratenbereich eingesetzt werden, da es auch das scherratenunabhängige Verhalten bei geringen Scherraten berücksichtigt. In seiner komplexen Form ist dieses Modell auch geeignet, das zweite Newtonsche Plateau abzubilden. Bei hohen Scherraten verhalten sich die komplett gestreckten Molekülketten ebenfalls scherratenunabhängig. Da dieser Fall in der Praxis so gut wie nicht vorkommt, wird für die Simulation die Form in Formel 3.2 verwendet.

Cross-Modell

Ein weiteres Modell, das den Wechsel von der Null- zur Strukturviskosität abbilden kann, ist das Cross-Modell:

$$\eta\left(\dot{\gamma}\right) = \frac{\eta_0}{1 + \left[\frac{\eta_0}{\tau}\dot{\gamma}\right]^{1-n}} \tag{3.3}$$

Hier beschreibt η_0 die Nullviskosität, τ den Übergang zum scherverdünnenden Bereich und n den Fließexponenten. Beide Modelle werden gleichberechtigt in gängigen Simulationsprogrammen verwendet.

Temperaturabhängigkeit

Um die Temperaturabhängigkeit der Viskosität zu berücksichtigen, werden zwei Ansätze verwendet. Für teilkristalline Kunststoffe und amorphe Thermoplaste bei hohen Verarbeitungstemperaturen $T > T_g + 100\,°C$ ist i. d. R. der Arrhenius-Ansatz

$$a_T(T) = \exp\left(\frac{E_0}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right) \tag{3.4}$$

geeignet, bei dem E_0 die Aktivierungsenergie, R die universelle Gaskonstante und T_0 die Referenztemperatur ist. Für die niedrigeren Temperaturbereiche zwischen Verarbeitungstemperatur und T_g wird für amorphe Thermoplaste die WLF (Williams-Landel-Ferry)-Beziehung angewendet:

$$a_T(T) = \exp\left(\frac{-C_1(T - T_0)}{C_2 + T - T_0}\right) \tag{3.5}$$

wobei C_1 und C_2 Materialkonstanten und T_0 ebenfalls die Referenztemperatur sind. Die Verschiebungsfaktoren werden jeweils mit den Werten der Nullviskosität in den beiden Modellen multipliziert. Die aktuell besonders im wissenschaftlichen Fokus stehende Druckabhängigkeit der Viskosität kann ebenfalls in beiden Modellen berücksichtigt werden. Da hier bislang aber nur wenige experimentelle Kennwerte zur Verfügung stehen, bleibt der Druckverschiebungsfaktor meist unberücksichtigt.

3.2.1.3 Schmelze-Volumenfließrate MVR und Schmelze-Massenfließrate MFR

Als reine Vergleichszahl für das Fließverhalten einer Schmelze, nicht jedoch für die Berechnung, wird die Schmelze-Volumenfließrate MVR benutzt. Sie ist definiert als das Volumen einer Schmelze, das in 10 Minuten bei vorgegebener Temperatur und vorgegebenem Druck durch eine Kapillare festgelegter Abmessungen (cm^3/10 min) fließt. Ebenfalls gebräuchlich ist die Schmelze-Massenfließrate MFR (auch MFI für „Melt Flow Index“ genannt), die unter gleichen Bedingungen ermittelt, aber in g/10 min angegeben wird. Die Daten können über die Schmelzedichte leicht umgerechnet werden. Beide Methoden werden nach ISO 1133 durchgeführt (Bild 3.7). Beim Vergleich solcher Werte muss darauf geachtet werden, dass sie auch unter gleichen Bedingungen, also bei gleichem Druck und gleicher Temperatur, ermittelt wurden.

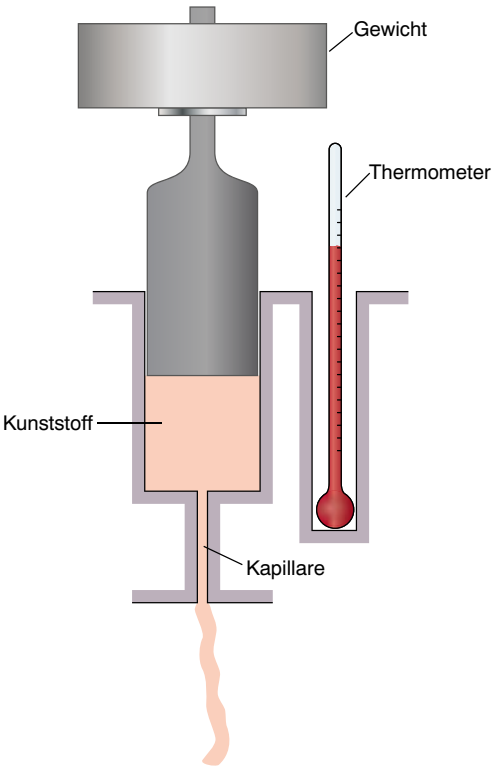


Bild 3.7
Schematische Darstellung der MVR/MFI-Messung

3.2.2 Erstarrungsverhalten

3.2.2.1 Siegelzeit

In der Praxis wird die Zeit bis zum Erstarren der Formteile, die Siegelzeit, mittels Auswiegen der Formteile ermittelt. Dabei wird in einer Testreihe die Nachdruckzeit bestimmt, oberhalb derer das Formteilgewicht nicht mehr zunimmt. Die Siegelzeit ist aus dieser Messung nicht ganz einfach zu erkennen, da das Formteilgewicht nahe der Siegelzeit nur geringen Änderungen in Abhängigkeit von der Nachdruckzeit unterliegt.

3.2.2.2 Schwindung

Von einem Kunststoffformteil erwartet man, dass es nach dem Herstellungsprozess die Abmessungen in einem durch die Funktion geforderten Toleranzbereich aufweist und verzugsfrei vorliegt. Außerdem sollen die Abmessungen der Formteile während der Lebensdauer unter den gegebenen äußeren Einwirkungen in den gegebenen Toleranzen erhalten bleiben. Als Anhaltspunkte bzw. zum Vergleich unterschiedlicher Werkstoffe werden für die Schwindung oft Punktwerte, z. T. aber auch Bereiche angegeben, vgl. Tabelle 8.1.

Die Maße von Formteilen aus Kunststoff sind infolge der Schwindung kleiner als die der Formwerkzeuge. Ursachen hierfür sind das thermische und druckabhängige Ausdehnungs- und Kontraktionsverhalten der Kunststoffe im Vergleich zum Stahlwerkzeug. Dieses Verhalten kann in Form eines Druck-(p)-Volumen-(v)-Temperatur-(T)-Diagramms für Thermoplaste dargestellt werden. Für eine detailliertere Erklärung des pvT-Verhaltens s. Abschnitt 3.4.6. In pvT-Diagrammen kann auch der Einfluss des thermodynamischen Prozessverlaufs auf das Schwindungsverhalten beim Spritzgießprozess verfolgt werden. Bild 3.8 zeigt die Änderung des spezifischen Volumens als Funktion der Temperatur für unterschiedliche Drücke für einen amorphen Thermoplasten. Die eingezeichnete Kurve ist eine mögliche Arbeitslinie für den Spritzgießvorgang an einem Punkt im Bauteil.

Bei „0“ wird die Formmasse eingespritzt, bei „1“ ist die Kavität volumetrisch gefüllt. Durch die Kompressibilität der Schmelze wird eine weitere Verdichtung erreicht, bis bei „2“ der Spritzdruck aufgebaut ist und auf Nachdruck umgeschaltet wird. Je höher der erreichte Druck, desto geringer ist die anschließende Schwindung. Bis „3“ wird isobar abgekühlt, d. h., es wird noch Schmelze aus dem Spritzzylinder nachgedrückt. Bei „3“ ist der Anguss versiegelt, und der Werkzeugdruck fällt infolge der Kontraktion der Schmelze beim weiteren Abkühlen bis auf 1 bar ab, Punkt „4“. Entscheidend für die Volumenschwindung VS_v ist die Temperatur, bei der der Atmosphärendruck erreicht wird. Ab dieser Temperatur beginnt sich das Formteil von der Werkzeugwand zu lösen. Die Volumenschwindung VS_v lässt sich aus dem spezifischen Volumen bei „4“ (= V_4) und bei Raumtemperatur „5“ (= V_5) ermitteln:

$$VS_v = \frac{V_4 - V_5}{V_4}$$

Unter der Annahme isotroper Schwindung folgt für die lineare Schwindung:

$$VS_1 = VS_v/3$$

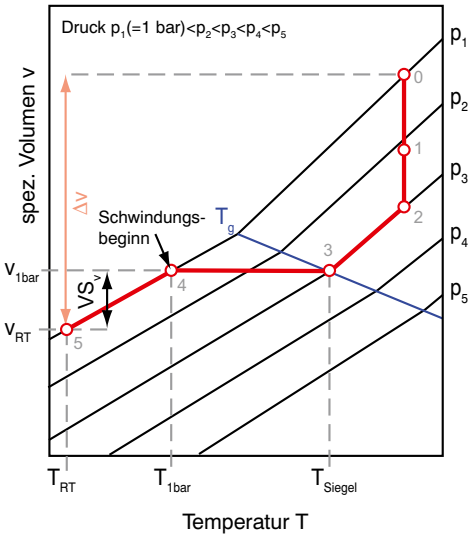


Bild 3.8
Schematische Darstellung des Spritzgießprozesses in einem *pvT*-Diagramm eines amorphen Thermoplasten

Selbst wenn werkzeugbedingt keine Schwindungsbehinderung vorliegt, so ist doch durch den geometrischen Formzwang durch die bereits erstarrte Randschicht die Schwindung in Dickenrichtung d der Formteilwandung immer wesentlich größer (i. d. R. 90 – 95 % der Volumenschwindung) als in Längen- und Breitenrichtung (Bild 3.9).

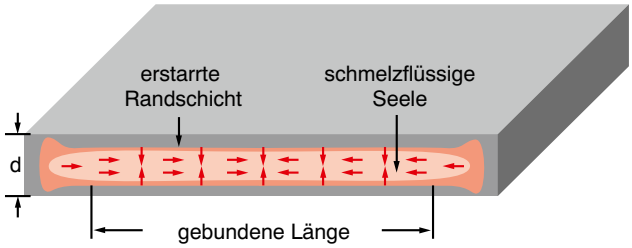


Bild 3.9 Schwindungsbehinderung durch den Formzwang der bereits erstarrten Randschicht während der Abkühlung einer Kunststoffplatte [3]

Um die gewünschten Formteilabmessungen zu erhalten, muss die Kavität um die Schwindung des Kunststoffs vergrößert werden. Dabei ist neben dem Verhalten des Kunststoffs auch die Ausdehnung des Werkzeugs zu berücksichtigen. Die Verarbeitungsschwindung VS ist nach DIN 53464 und DIN 16901 (ISO 2577) der prozentuale

Unterschied zwischen den Maßen des kalten Formwerkzeugs und der darin hergestellten Formteile, gemessen frühestens 24 h und spätestens 168 h nach Herstellung und Lagerung im Normklima. Bild 3.10 zeigt die möglichen Änderungen der Formteilabmessung mit den entsprechenden Definitionen.

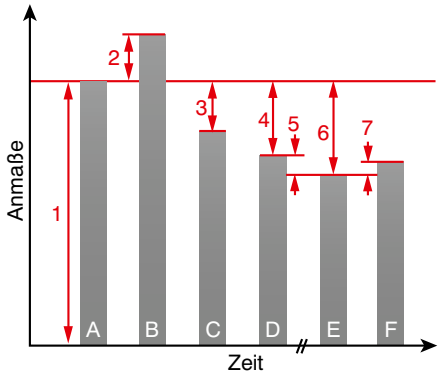


Bild 3.10 Maßänderungen von Werkzeug und Formteilen

1: Werkzeugmaß
2: Wärmeausdehnung des Werkzeugs
3: Entformungsschwindung ES
4: Verarbeitungsschwindung VS
5: Nachschwindung NS
6: Gesamtschwindung GS
7: mögliche Längenänderung durch Konditionierung
A: Maß des kalten Werkzeugs
B: Maß des warmen Werkzeugs unter Druck
C: Bauteil nach Entformung
D: Bauteil nach 24 h in Normklima
E: Formteil nach langer Zeit oder Wärmelagerung
F: Bauteil nach z. B. Wasseraufnahme bei PA

Die Entformungsschwindung ist durch die bereits erwähnte höhere Kontraktion der Kunststoffe bei der Abkühlung und durch die Volumenverringerung beim Vernetzungsvorgang bei Duroplasten bzw. der Kristallisation bei teilkristallinen Thermoplasten bedingt. Die Nachschwindung NS erfolgt durch chemische Reaktionen, Stoffabgabe, Nachkristallisation oder Retardation. Für die Nachschwindung gilt: Bei amorphen Thermoplasten ist sie meist vernachlässigbar klein, bei teilkristallinen beträgt sie 0,2 bis 0,5 %, bei mineralisch gefüllten $\leq 0{,}2$ %. Bei Duroplasten beträgt sie für PF 0,1 bis 0,6 %, für UF 0,6 bis 2,2 % und für UP 0 bis 0,1 %. Die Nachschwindung stellt sich bei Raumtemperatur erst nach einigen Monaten ein. Sie kann durch eine Warmlagerung bei stoffspezifischen Temperaturen vorweggenommen werden.