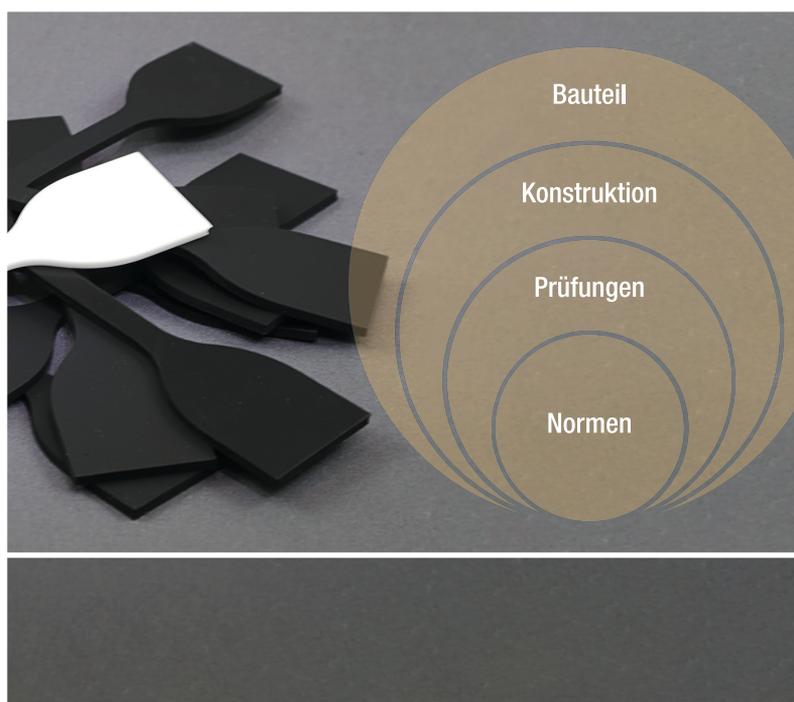


Erwin Baur
Günther Harsch
Martin Moneke

Werkstoff-Führer Kunststoffe

Eigenschaften – Prüfungen – Kennwerte



11., aktualisierte Auflage

HANSER



Blieben 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

Die Internet-Plattform für Entscheider!

Exklusiv: Das Online-Archiv der Zeitschrift Kunststoffe!

Richtungsweisend: Fach- und Brancheninformationen stets top-aktuell!

Informativ: News, wichtige Termine, Bookshop, neue Produkte und der Stellenmarkt der Kunststoffindustrie

Kunststoffe.de

Erwin Baur
Günther Harsch
Martin Moneke

Werkstoff-Führer Kunststoffe

Eigenschaften - Prüfungen - Kennwerte

11., aktualisierte Auflage

HANSER

Die Autoren:

Dr. Erwin Baur, M-Base Engineering + Software GmbH

Prof. Dr.-Ing. Martin Moneke, Hochschule Darmstadt, Institut für Kunststofftechnik

Prof. Dipl. Ing. Günther Harsch, ehemals Hochschule Heilbronn

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutzgesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Alle in diesem Buch enthaltenen Verfahren bzw. Daten wurden nach bestem Wissen dargestellt. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die in diesem Buch enthaltenen Darstellungen und Daten mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autoren und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Art aus der Benutzung dieser Darstellungen oder Daten oder Teilen davon entsteht.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches 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 URG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2019 Carl Hanser Verlag München

www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Ulrike Wittmann

Herstellung: Jörg Strohbach

Coverconcept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München

Coverrealisierung: Max Kostopoulos

Satz: Kösel Media GmbH, Krugzell

Druck und Bindung: Druckerei Hubert & Co GmbH und Co KG BuchPartner, Göttingen

Printed in Germany

ISBN: 978-3-446-45798-0

E-Book-ISBN: 978-3-446-46067-6

Die Autoren der 11. Auflage

■ Dr. Erwin Baur

Erwin Baur studierte Maschinenbau, Fachrichtung Kunststoffverarbeitung an der RWTH Aachen, war anschließend wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV), wo er über Werkstoffinformationssysteme promovierte. Seit 1993 ist er Geschäftsführer der M-Base Engineering + Software GmbH in Aachen, einem weltweit operierenden Anbieter von Werkstoffinformationen und Kunststoffdatenbanken.

■ Prof. Dipl. Ing. Günther Harsch

Günther Harsch war nach Industrietätigkeit von 1963 bis 1996 Professor für Werkstoffkunde und Kunststofftechnik an der Hochschule Heilbronn. In den Vorlesungen der Werkstoffkunde waren die Kunststoffe in den Sechzigerjahren noch kaum vertreten. Beim Studium der damaligen Dozenten an den Universitäten fehlten die Kunststoffe fast vollständig. Die Dozenten waren damals mehr oder weniger Autodidakten. 1967 fand im Rahmen der 12. Deutschen Kunststoff-Tagung das erste „Ingenieurschuldozenten-Kolloquium“ über dieses Thema statt. Daraus entwickelte sich das erste „Fortbildungsseminar für Professoren der Kunststofftechnik“ an der Ingenieurschule Heilbronn in Zusammenarbeit mit dem IKV der RWTH Aachen, den Ingenieurschulen Darmstadt und Esslingen. Es bildete sich ein VDI-Arbeitskreis Professoren der Kunststofftechnik, der regelmäßig Fortbildungsseminare in Zusammenarbeit mit der Arbeitsgemeinschaft Kunststoff-Industrie AKI in Firmen anbot. Herr Joachim Spenker vom Carl Hanser Verlag initiierte 1972 das Erscheinen von „Haenle/Gnauck/Harsch: Praktikum der Kunststofftechnik. 1976 erschien die erste Auflage von „Hellerich/Harsch/Haenle: Werkstoff-Führer Kunststoffe“. Prof. Harsch war mehrere Jahre Obmann dieses VDI-Arbeitskreises und Mitglied in einem Arbeitskreis des Gesamtverbands Kunststoffverarbeitende Industrie GKV, auch noch im Ruhestand.

■ Prof. Dr.-Ing. Martin Moneke

Martin Moneke ist seit 2013 Professor für Werkstofftechnik der Kunststoffe, Kunststoffprüfung und Qualitätsmanagement an der Hochschule Darmstadt, dem deutschlandweit größten Ausbilder von Akademikern für die Kunststoffindustrie. Zuvor hatte er verschiedene Führungspositionen in der Industrie inne – er war Entwicklungsleiter, Quality Manager und Innovation Manager – und war im Deutschen Kunststoff-Institut tätig, zuletzt als Leiter der Abteilung Technologie. Prof. Moneke wurde 2001 zu einem Thema der Werkstoffmodellierung für die Spritzgießsimulation an der TU Darmstadt promoviert.

Prof. Moneke ist Mitglied des Instituts für Kunststofftechnik Darmstadt (ikd) und Sprecher des Forschungszentrums „Material- und Prozesstechnik“ an der Hochschule Darmstadt. Er leitet ein akkreditiertes Prüflabor für die Kunststoff-Werkstoffprüfung, ist Mitglied im Normenausschuss „Mechanische Eigenschaften und Probekörperherstellung“ und von der DGQ zertifizierter Qualitätsmanager und EOQ Quality Manager.

Vorwort zur 11. Auflage

Anlässlich des Generationenwechsels der Autoren dieses Buches, welches sich seit nunmehr über 40 Jahren in der Praxis und in der Lehre bewährt hat, erscheint es angebracht zu sein, einen Blick zurück zu werfen.

In den 60er Jahren des letzten Jahrhunderts wurden Kunststoffe schon in vielen Bereichen eingesetzt, waren aber eigentlich noch ein durch und durch unbekannter Werkstoff. Eine spezialisierte Ausbildung wurde nicht angeboten, hierfür fehlten sowohl das entsprechende Personal als auch die notwendigen Unterlagen.

Zusammen mit der Ingenieurschule Darmstadt und dem Institut für Kunststoffverarbeitung Aachen wurde damals ein erstes Seminar konzipiert mit praktischen Übungen für Professoren der Kunststofftechnik, aus dem dann in mehreren Stufen der Werkstoff-Führer Kunststoffe entstand.

Die damaligen Autoren waren alle keine ausgebildeten Kunststoff-Fachleute, die es damals noch nicht gab, sie mussten sich das Kunststoffwissen als ausgebildete Maschinenbauer oder Chemiker erst einmal selbst erarbeiten.

Die damals entwickelten Strukturen und Inhalte, die noch heute die Basis für das vorliegende Buch bilden, helfen sowohl dem Studierenden als auch dem interessierten Praktiker bei der systematischen Einarbeitung in den Werkstoff Kunststoff.

Die ursprünglichen Autoren dieses Buches (Erstauflage 1975) gehörten zu den Pionieren der 60er Jahre, denen wir heute ein umfangreiches Angebot von Literatur zu allen Aspekten der Kunststofftechnik verdanken und die Möglichkeit, an zahlreichen Hochschulen Kunststofftechnik zu studieren.

Die Autoren der neuen Auflage konnten von dieser Infrastruktur profitieren und haben das Fachwissen im Studium systematisch erworben, haben also einen ganz anderen Ausgangspunkt. Sie würdigen die Grundlagenarbeit der Vorgänger und werden versuchen, das bewährte Format aufrechtzuerhalten und Auflage für Auflage zu aktualisieren. Jetzt besteht die Aufgabe darin, das gesammelte Fachwissen ständig auf den neuesten Stand zu bringen und die nach wie vor gewaltige Innovationskraft der Branche entsprechend abzubilden.

So wurden in der vorliegenden Auflage alle Normbezüge aktualisiert, da viele Normen seit der letzten Auflage zum Teil deutlich überarbeitet oder sogar zurückgezogen wurden. Zudem findet in der Kunststoffbranche mehr noch als im Maschinenbau im Allgemeinen ein Übergang zu (DIN EN) ISO-Normen statt, was die starke internationale Ausrichtung der Kunststofftechnik unterstreicht. In speziellen Gebieten der Messtechnik wie der Wärmeleitfähigkeitsmessung und der Untersuchung der Kratzempfindlichkeit hat es neuere Entwicklungen gegeben, die nun in eigenen Abschnitten behandelt werden.

Die Ehre gebührt den Herren Gnauck, Hellerich, Haenle und Harsch, die vor einem halben Jahrhundert den Anfang gemacht haben. Wir danken aber auch dem Carl Hanser Verlag für die wie immer sehr gute und vertrauensvolle Zusammenarbeit und hier besonders Frau Wittmann für die Unterstützung. Nicht zuletzt gilt der Dank aber allen Lesern, für Ihr Interesse am Werkstoff Kunststoff und diesem Buch und dafür, dass durch ihr Zutun das Gebiet weiter spannend bleibt.

Erwin Baur,

Martin Moneke,

im August 2019

Vorwort zur 1. Auflage

Jeder Ingenieur und Techniker, der Kunststoffe als technische Werkstoffe einsetzen will, braucht einen schnellen Überblick über die Kunststoffarten und eine gute Vergleichsmöglichkeit der wichtigsten Eigenschaften. Diese Forderungen werden in dem vorliegenden Buch erreicht durch

- Angaben über Aufbau und Gefüge der wichtigsten Kunststoffe,
- Hinweise auf Hersteller und Handelsnamen,
- prägnante und übersichtliche Beschreibung der Eigenschaften,
- Erläuterung der Eigenschaften durch typische Anwendungsbeispiele,
- kurze Darstellung der speziellen Verarbeitungsbedingungen,
- Information über das Temperaturverhalten durch Schubmodul-Temperatur-Kurven,
- übersichtliche Darstellung der Kunststoff-Kennwerte in Bereichsdiagrammen,
- eine praxisnahe Methode zur schnellen Erkennung der Kunststoffart.

Da die ermittelten Kennwerte von der Prüfung abhängen, wurde jeweils das Prüfverfahren so umfassend beschrieben, dass die wichtigsten Prüfbedingungen und die Auswirkungen auf die Kennwerte erfasst sind.

Bei der gestrafften Darstellung der Kunststoffeigenschaften und der Prüfverfahren konnten jedoch nicht alle Variationsmöglichkeiten berücksichtigt werden. Zur weiteren Information, insbesondere über Handelsnamen und Hersteller, wird auf *Saechtling/Zebrowski: Kunststoff-Taschenbuch*, Carl Hanser Verlag München verwiesen. Weitere Angaben über die Abhängigkeit der Kunststoffeigenschaften von der Temperatur und von anderen Bedingungen können aus *Oberbach: Kunststoff-Kennwerte für Konstrukteure*, und *Schreyer: Konstruieren mit Kunststoffen*, beide Carl Hanser Verlag München entnommen werden. Außerdem wird auf Firmenveröffentlichungen über die einzelnen Kunststoffe verwiesen, die uns in dankenswerter Weise zur Verfügung gestellt wurden.

Genaue Angaben über die speziellen Prüfverfahren sind aus den jeweils aufgeführten DIN-Blättern ersichtlich. Eine wertvolle Ergänzung bietet *Haenle/Gnauck/Harsch: Praktikum der Kunststofftechnik*, Carl Hanser Verlag München, in dem

Grundlagen und Durchführung der Verarbeitung und Prüfung von Kunststoffen ausführlich dargestellt sind.

Durch die hier verwendete methodische Darstellung der Kunststoffe als technische Werkstoffe hinsichtlich Eigenschaften und Prüfung haben wir in der Ingenieurausbildung seit Jahren erreichen können, dass die Studenten einen schnellen und trotzdem gründlichen Überblick über die Kunststoffe bekommen und dadurch nur eine kurze Einarbeitungszeit in das Gebiet der Kunststofftechnik benötigen.

Nach diesen Erfahrungen erwarten wir, dass dieses Buch auch dem Praktiker seine Arbeit mit den Kunststoffen wesentlich erleichtern wird.

Wegen der schnellen Entwicklung auf dem Kunststoffgebiet wurden besondere Leerräume in den Tabellen und teilweise im Text zur laufenden Ergänzung vorgesehen.

Im August 1975

Die Verfasser

Inhalt

Die Autoren der 11. Auflage	V
Vorwort zur 11. Auflage	VII
Vorwort zur 1. Auflage	IX
TEIL I Aufbau und Verhalten von Kunststoffen	1
1 Grundlagen	3
1.1 Ausgangsstoffe, Kennzeichnung und Einteilung	3
1.2 Besonderheiten des Kohlenstoffatoms	4
1.3 Strukturen von Makromolekülen	6
2 Bildung von Makromolekülen	9
2.1 Bildungsreaktionen	9
2.2 Innere Kräfte in Molekülsystemen	13
2.3 Polymerisationsgrad, Vernetzungsgrad	15
3 Strukturen von thermoplastischen Kunststoffen	17
3.1 Orientierung von Makromolekülen	17
3.2 Kristallinität	18
3.3 Überstrukturen	20
4 Polymerkombinationen	21
4.1 Copolymerisation, Pfropfpolymerisation	21
4.2 Polymerblends, Polymerlegierungen, Kunststoffmischungen	22

5	Zusatzstoffe	25
5.1	Füllstoffe und Verstärkungsstoffe	26
5.2	Stabilisatoren	27
5.3	Farbmittel	28
5.4	Weichmacher und Flexibilisatoren	29
5.5	Flammschutzmittel	30
5.6	Leitfähige Zusatzstoffe	30
5.7	Treibmittel	31
6	Verhalten von Kunststoffen	33
6.1	Mechanisches Verhalten	34
6.2	Thermisches Verhalten	37
6.3	Elektrisches Verhalten	40
6.4	Verhalten gegen Umwelteinflüsse	40
6.5	Wasseraufnahme	41
6.6	Permeation	41
6.7	Reibung und Verschleiß	41
7	Verarbeiten von Kunststoffen	43
7.1	Urformen	43
7.1.1	Urformen von Thermoplasten	43
7.1.2	Urformen von Duroplasten	47
7.1.3	Urformen von Elastomeren	49
7.2	Umformen von Thermoplasten	49
7.3	Nachbehandlungen	51
7.4	Fügen	52
7.5	Oberflächenbehandlungen	53
7.6	Spangebende Bearbeitung	53
7.7	Schäumen	54
8	Kunststoffe – Umwelt und Recycling	55
	<i>Bearbeitet von Professor Dr. Georg Clauss, Hochschule Heilbronn</i>	
8.1	Kunststoffe und Umwelt	57
8.2	Kunststoff-Recycling und -Verwertung	58

8.3	Werkstoffliches Recycling	59
8.3.1	Definitionen beim werkstofflichen Kunststoff-Recycling	60
8.3.2	Voraussetzungen beim werkstofflichen Recycling	62
8.3.3	Notwendigkeiten beim werkstofflichen Recycling	64
8.4	Rohstoffliches Recycling von Kunststoffen	66
8.5	Energetische Verwertung	69

TEIL II Kunststoffe als Werkstoffe 71

9 Kennzeichnung und Normung von Kunststoffen 73

9.1	Allgemeine Kennzeichnung von Kunststoffen	74
9.2	Aufbau einer Normbezeichnung für thermoplastische Formmassen ..	79
9.3	Normung von Duroplasten	84
9.4	Kennzeichnung und Normung von Elastomeren	89
9.4.1	Kennzeichnung von vernetzten Elastomeren	89
9.4.2	Kennzeichnung von thermoplastischen Elastomeren TPE ...	91

10 Thermoplaste 93

10.1	Polyolefine	93
10.1.1	Polyethylen PE	93
10.1.1.1	Polyethylen-Spezialsorten	98
10.1.2	Polypropylen PP	102
10.1.2.1	Polypropylen-Spezialsorten	106
10.1.3	Spezielle Polyolefine	107
10.1.3.1	Polybuten-1 PB-1	108
10.1.3.2	Polymethylpenten PMP	109
10.2	Vinylchlorid-Polymerisate	110
10.2.1	Polyvinylchlorid PVC	110
10.2.2	Weichmacherfreies Polyvinylchlorid PVC-U (Hart-PVC)	112
10.2.3	Polyvinylchlorid mit Weichmacher PVC-P (Weich-PVC)	115
10.3	Styrol-Polymerisate	118
10.3.1	Polystyrol PS	119
10.3.2	Schlagzäh modifiziertes Polystyrol PS-I (Styrol-Butadien SB)	122
10.3.3	Styrol-Acrylnitril-Copolymerisat SAN	125
10.3.4	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Polymerisate ABS	127
10.3.5	Schlagzähe Acrylnitril-Styrol-Formmassen ASA, AEPDS, ACS	130

10.4	Celluloseester CA, CP, CAB	133
10.5	Polymethylmethacrylat PMMA	136
10.6	Polyamide PA	141
10.7	Polyoxymethylene (Polyacetale) POM	151
10.8	Thermoplastische Polyester TP (Polyalkylenterephthalate) PET, PBT	155
10.9	Polycarbonat PC	160
10.10	Modifizierte Polyphenylether PPE	165
10.11	Aliphatische Polyketone(PK)	169
11	Spezielle Kunststoffe zum Einsatz bei höheren Temperaturen (Hochleistungskunststoffe)	171
11.1	Polyarylsulfone PSU, PES	172
11.2	Polyphenylsulfid PPS	175
11.3	PI, PEI, PAI	178
11.4	Polyaryletherketone PAEK (PEK, PEEK)	181
11.5	Polyphthalamid (PPA)	183
11.6	Fluorhaltige Polymerisate	185
11.6.1	Polytetrafluorethylen PTFE	185
11.6.2	Fluorhaltige Thermoplaste	189
12	Duroplaste	193
12.1	Phenoplaste PF	194
12.2	Aminoplaste MF, MP, UF	200
12.3	Ungesättigte Polyesterharze UP	205
12.4	Epoxidharze EP	210
12.5	Sonderharze	215
12.5.1	Siliconharzmassen SI	215
12.5.2	Diallylphthalat DAP/Polydiallylphthalat PDAP	215
12.5.3	Poly-DCPD-Harze	216
12.5.4	Vinylesterharze (VE-Harze)	216
12.5.5	PUR-Gießharze	216
13	Verbundsysteme	219
13.1	Faser-Kunststoff-Verbunde	219
13.1.1	Faserwerkstoffe, Faserprodukte	220
13.1.2	Besonderheiten bei Faser-Verbundsystemen	222

13.1.3	Verarbeitungstechniken für Reaktionsharzmassen mit Faserverstärkungen	224
13.1.4	Thermoplast-Faserverbundsysteme	225
13.2	Polymerblends (siehe auch Abschn. 4.2)	227
14	Elastomere	229
14.1	Vernetzte Elastomere (Gummiwerkstoffe)	229
14.2	Thermoplastische Elastomere TPE	234
14.2.1	Polyurethan-Elastomere PUR, TPU	236
14.2.2	Polyetheramide TPA	240
14.2.3	Polyesterelastomere TPC	241
14.2.4	Elastomere auf Polyolefinbasis (siehe auch Abschnitt 10.1) ..	243
14.2.4.1	Ethylen-Vinylacetat-Copolymere EVAC	243
14.2.4.2	Olefin-Elastomere TPO, TPV	244
14.2.5	Styrolcopolymeren TPS	245
15	Schaumstoffe, geschäumte Kunststoffe	247
15.1	Harte Schaumstoffe; harte Struktur- bzw. Integral-Schaumstoffe	251
15.2	Weichelastische Schaumstoffe; weichelastische Struktur- bzw. Integral-Schaumstoffe	254
16	Sonderpolymere	257
16.1	LC-Polymere	257
16.2	Elektrisch leitfähige Polymere	259
16.3	Biopolymere – Kunststoffe aus nachwachsenden Rohstoffen	260
16.4	Anmerkung	264
TEIL III	Prüfung von Kunststoffen, Kennwerte	265
17	Auswertung von Prüfergebnissen	267
18	Einfache Methoden zur Erkennung der Kunststoffart	271
19	Physikalische Untersuchungsmethoden zum Erkennen der Kunststoffart	275
19.1	Dichtebestimmung	275
19.1.1	Bestimmung der Dichte nach der Auftriebsmethode (Verfahren A)	276

19.1.2	Bestimmung der Dichte durch Eingrenzen in Prüfflüssigkeiten (Verfahren C)	277
19.1.3	Bestimmung der Dichte von Schaumstoffen aus Kautschuk und Kunststoffen	277
19.2	Bestimmung des Gehalts an Füll- und Verstärkungsstoffen	278
19.2.1	Bestimmung des Gehalts an anorganischen Füllstoffen	278
19.2.2	Ermittlung des Glasfasergehalts und des Gehalts anderer mineralischer Füllstoffe aus den Dichtewerten	282
19.3	Thermische Analysenverfahren	283
19.4	Infrarot-Spektroskopie	288
19.5	Gel-Permeations-Chromatographie GPC	290
20	Datenkatalog für Prüfungen, Herstellungsbedingungen für Probekörper, Prüfverfahren zur Ermittlung von Werkstoffkennwerten	293
20.1	Datenbank CAMPUS	294
20.2	Herstellbedingungen für Probekörper und Prüfbedingungen	296
21	Mechanische Prüfungen	305
21.1	Zugversuch	305
21.2	Druckversuch	323
21.3	Biegeversuch	330
21.4	Versuche zur Bestimmung dynamisch-mechanischer Eigenschaften – Torsionsschwingungsversuch	338
21.5	Härteprüfung	347
21.5.1	Härteprüfung durch Kugeleindruckversuch	348
21.5.2	Härteprüfung nach Rockwell	353
21.5.3	Härteprüfung nach Shore	354
21.6	Kratzprüfung	356
21.6.1	Kratzeigenschaften von Kunststoffen	357
21.6.2	Bestimmung der Kratzbeständigkeit	358
21.6.3	Gitterschnittprüfung	359
21.6.4	Ritzhärteprüfung mit Ring- oder Schleifenstichel	360
21.6.5	Ritzhärteprüfung mit Bleistiften	361
21.6.6	Waschanlagenprüfung	362
21.7	Schlagversuche	363
21.7.1	Schlagbiegeversuche nach Charpy	365
21.7.1.1	Schlagbiegeversuche nach DIN EN ISO 179-1	365

21.7.1.2	Instrumentierte Schlagzähigkeitsprüfung DIN EN ISO 179-2	370
21.7.2	Schlagbiegeversuche nach Izod	381
21.7.3	Schlagzugversuch	383
21.8	Zeitstandversuch	386
21.9	Zeitschwingversuch	400
21.10	Reibungs- und Verschleißverhalten	408
22	Thermische Prüfungen	411
22.1	Formbeständigkeit in der Wärme	411
22.1.1	Wärmeformbeständigkeitstemperatur T_f	411
22.1.2	Vicat-Erweichungstemperatur VST	416
22.2	Verhalten von Kunststoffen bei Temperatureinwirkung	420
22.3	Gebrauchstemperaturbereiche	423
22.4	Wärmeleitfähigkeit	427
22.4.1	Transientes Flächenquellenverfahren (Hot-Disk-Methode) ..	432
22.4.2	Laserblitzverfahren	432
22.5	Thermischer Längenausdehnungskoeffizient	433
23	Brennverhalten von Kunststoffen	439
23.1	Prüfung zur Ermittlung der Brandgefahr nach DIN EN 60695	443
23.1.1	Brandprüfung nach DIN EN 60695 Verfahren A - Horizontalbrennprüfung	445
23.1.2	Brandprüfung nach DIN EN 60695 Verfahren B - Vertikalbrennprüfung	447
23.1.3	Brandprüfung nach DIN EN 60695-11-20	448
23.1.4	Anmerkung zur Ermittlung des Brennverhaltens	448
23.2	Brennbarkeitsprüfungen nach UL	451
23.3	Bestimmung des Brennverhaltens durch den Sauerstoff-Index	453
24	Elektrische Prüfungen	455
24.1	Elektrische Spannungs- und Widerstandswerte	456
24.1.1	Elektrische Durchschlagspannung, elektrische Durchschlagfestigkeit	457
24.1.2	Durchgangswiderstand, spezifischer Oberflächenwiderstand, Isolationswiderstand	461
24.2	Dielektrische Eigenschaftswerte	471
24.3	Kriechwegbildung (Kriechstromfestigkeit)	478

25	Optische Prüfungen	481
25.1	Brechzahl	481
25.2	Lichtdurchlässigkeit	483
26	Wasseraufnahme und Permeation	489
26.1	Wasserdampf- und Gasdurchlässigkeit (Permeation)	490
26.2	Bestimmung der Wasseraufnahme	493
26.3	Konditionieren	497
27	Schwindung, Schrumpfung	499
27.1	Schwindung	499
27.2	Schrumpfung	505
28	Chemische Beständigkeit von Kunststoffen	507
29	Viskositätsmessungen	511
29.1	Viskositätsmessungen an Thermoplasten	511
29.1.1	Bestimmung von Schmelze-Massefließrate und Schmelze- Volumenfließrate (früher Schmelzindex und Volumen- Fließindex)	512
29.1.2	Rheometrie – Aufnahme von Fließkurven	515
29.1.3	Aufnahme von pVT -Diagrammen	517
29.1.4	Bestimmung der Viskositätszahl von Thermoplasten in verdünnter Lösung	520
29.2	Fließ-Härtungsverhalten von härtbaren Formmassen	523
29.2.1	Bestimmung der Schließzeit von härtbaren Formmassen (PMC)	523
29.2.2	Bestimmung des Fließ-Härtungsverhaltens von rieselfähigen duroplastischen Formmassen (PMC)	524
29.2.3	Bestimmung des Härungsverhaltens faserverstärkter härtpbarer Kunststoffe	527
29.2.3.1	Verfahren I	527
29.2.3.1	Verfahren II	529
29.2.4	Bestimmung der Fließfähigkeit, Reifung und Gebrauchsdauer faserverstärkter, härtpbarer Kunststoffe	531
29.2.4.1	Verfahren I	531

30	Materialeingangsprüfungen	535
30.1	Bezeichnung von Formmassen	535
30.2	Erkennen der Kunststoffart	535
30.3	Viskositätsmessungen	536
30.4	Korngröße, Kornform	536
30.5	Schüttdichte und Stopfdichte	537
30.6	Rieselfähigkeit	539
30.7	Feuchtegehalt, Flüchte	539
31	Prüfung von Kunststoff-Formteilen	541
31.1	Zusammenstellung von Formteilprüfungen	541
31.1.1	Prüfung des Formstoffs im Formteil	541
31.1.2	Prüfung des ganzen Formteils	543
31.1.3	Gebrauchsprüfungen des Formteils	544
31.2	Ermittlung von Eigenspannungen	545
31.2.1	Warmlagerungsversuch	546
31.2.2	Spannungsrissverhalten von Thermoplasten	548
31.2.2.1	Beurteilung des Spannungsrissverhaltens durch Zeitstandzugversuch	552
31.2.2.2	Beurteilung des Spannungsrissverhaltens im Biegestreifenverfahren	554
31.2.2.3	Beurteilung des Spannungsrissverhaltens durch Kugel- oder Stifteindrückverfahren	557
31.2.2.4	Bell-Telephone Test	561
31.3	Mikroskopische Untersuchungen	561
31.3.1	Präparation für Durchlichtuntersuchungen	562
31.3.1.1	Herstellung von Dünnschnitten	562
31.3.1.2	Herstellung von Dünnschliffen	563
31.3.2	Präparation für Auflichtuntersuchungen	564
31.3.3	Mikroskopierverfahren	564
31.3.3.1	Beurteilung von teilkristallinen Thermoplasten	565
31.3.3.2	Beurteilung der Füllstoffverteilung in Kunststoff-Formteilen	567
31.3.4	Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen	568
31.4	Stoßversuche	569
31.4.1	Nichtinstrumentierter Schlagversuch DIN EN ISO 6603-1 (Fallbolzenversuch)	570
31.4.2	Instrumentierter Schlagversuch DIN EN ISO 6603-2 (Durchstoßversuch)	572

31.4.3	Vergleich von Ergebnissen aus Fall- und Durchstoßversuchen	572
31.5	Farbbeurteilung	574
31.5.1	Farbarmusterung nach DIN 6173	576
31.5.2	Farbmessungen	576
31.6	Bewitterungsversuche	578
31.6.1	Bewitterung in Naturversuchen (Freibewitterung)	579
31.6.2	Bewitterung in Kurzprüfungen	580
TEIL IV Anhang		581
32	Größen, Einheiten, Umrechnungsmöglichkeiten	583
33	Literaturhinweise	587
34	Fachverbände und Fachorganisationen	591
35	Hersteller und Lieferanten von Kunststoffen	595
36	Prüfgeräte- und Prüfmittelhersteller	601
Index		605

TEIL I

Aufbau und Verhalten von Kunststoffen

1

Grundlagen

■ 1.1 Ausgangsstoffe, Kennzeichnung und Einteilung

Kunststoffe sind hochmolekulare Werkstoffe (Polymere), die heute noch überwiegend auf Erdölbasis hergestellt werden. *Biopolymere* (s. Abschnitt 16.3) auf der Basis nachwachsender Rohstoffe, auch als technische Kunststoffe, finden immer mehr Anwendung.

Kunststoffe ist ein Sammel- oder Überbegriff für

- Thermoplaste und thermoplastische Elastomere,
- Duroplaste,
- Elastomere.

Ausgangsstoffe für Kunststofferzeugnisse sind Erdöl, Erdgas und Kohle als Träger von Kohlenstoff C, sowie Wasserstoff H, Sauerstoff O und Stoffe, die Stickstoff N, Chlor Cl, Schwefel S und Fluor F enthalten. Als Ausgangsstoff kommen heute teilweise auch schon Pyrolyseöle aus Recyclinganlagen zur Anwendung.

Vielfältige Variationsmöglichkeiten bei der Herstellung von Kunststoffen ergeben große Verschiedenartigkeit der entstehenden Kunststoffe als Homopolymerisate, Copolymerisate, Pfropfpolymerisate, Polymergemische (Polymerlegierungen, Polymerblends), vernetzte Systeme.

Die Eigenschaften der Kunststoffe ergeben sich aus dem *chemischen Aufbau* („Bausteine“) und der *physikalischen Struktur*, z. B. lineare oder verzweigte Kettenmoleküle, weit- oder engmaschig vernetzte Raummoleküle.

Kunststoffe bringen gegenüber anderen Werkstoffgruppen z. T. völlig neue Eigenschaften mit, die eine Verwirklichung bestimmter technischer Probleme erst ermöglichen, z. B. in Form von *Schnappverbindungen*, *Federelementen*, *Filmscharnieren*, *Strukturschäumen*, *speziellen Gleitelementen*, *schmierungsfreien Lagern* oder bei der *integralen Fertigungmehrfunktionaler Formteile*.

Die *Kennzeichnung* von Kunststoffen und ihre *Normung* ist wegen der großen Vielfalt, der besonderen Eigenschaften und Verarbeitungseinflüsse anders als bei Metallen:

- International verständliche Kurzzeichen nach DIN EN ISO 1043, DIN 16780, z. B. PE, PA, PC, PF, EP (vgl. Kap. 9)
- Neues Ordnungssystem für Kunststoffe, wie es in den Formmassenormen nach DIN EN ISO enthalten ist (vgl. Kap. 9).

Biopolymere (siehe Abschnitt 16.3) oder Kunststoffe aus nachwachsenden Rohstoffen sind noch nicht genormt.

Gummiwerkstoffe (Elastomere) werden häufig nicht zu den Kunststoffen gezählt, obwohl sie überwiegend ebenfalls synthetisch hergestellt werden. Der Aufbau von Gummimischungen und die Verarbeitung unterscheiden sich wesentlich von der für Kunststoffe üblichen Technik (siehe Abschnitt 14.1).

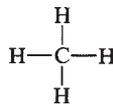
Silicone sind ebenfalls hochmolekulare Verbindungen mit Siliziumketten und organischen Seitengruppen. Sie kommen vor als hochvernetzte Duroplaste (Abschnitt 12.5) oder Elastomere (Abschnitt 14.1).

■ 1.2 Besonderheiten des Kohlenstoffatoms

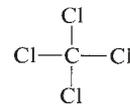
Ein Kohlenstoffatom kann mit allen vier Wertigkeiten Bindungen eingehen (Elektronenpaarbindung), z. B. mit Wasserstoff H (Kohlenwasserstoffe), Chlor Cl und anderen Elementen, sowie organischen Molekülresten.



Kohlenstoff C ist vierwertig

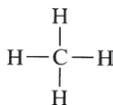


Methan

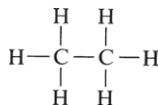


Tetrachlorkohlenstoff

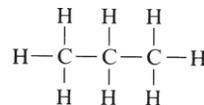
Kohlenstoff C kann mit sich selbst unter *Kettenbildung* Bindungen eingehen. Es entstehen dann *kettenförmige, aliphatische* Kohlenwasserstoffe $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ (Alkane). Solche *gesättigten* Kohlenwasserstoffe sind *reaktionsträge*.



Methan



Ethan

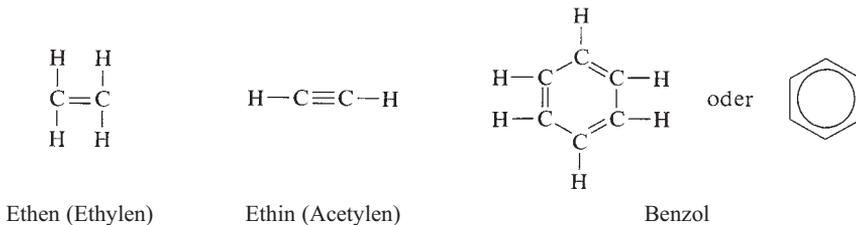


Propan usw.

Unter Normalbedingungen sind die gesättigten Kohlenwasserstoffe bis C_4H_{10} *gasförmig*, ab C_5H_{12} *flüssig* und ab $C_{16}H_{34}$ *fest* (Paraffine). Daraus erkennt man, dass die *Kettenlänge* entscheidend ist für das Verhalten der Moleküle. Allerdings kommt man erst bei sehr großen Kettenlängen zu technisch brauchbaren, festen Stoffen, den *Kunststoffen* als *technischen Werkstoffen*.

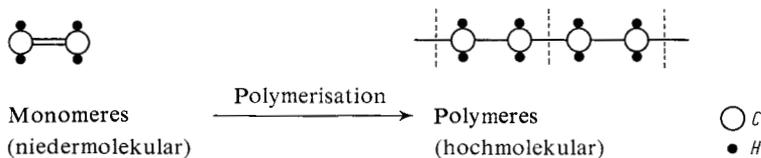
Kohlenstoffatome können mit sich selbst auch Mehrfachbindungen eingehen zu ungesättigten, reaktionsfreudigen Verbindungen mit Doppelbindungen (Alkene) oder Dreifachbindungen (Alkine).

Aromaten sind *ringförmige* Kohlenwasserstoffe, z. B. Benzol C_6H_6 .



Bei den *Kohlenwasserstoffen* kann der Wasserstoff durch andere Elemente (Cl, F) oder organische Molekülreste ($-\text{CH}_3$, $-\text{CN}$ usw.) ersetzt (substituiert) werden.

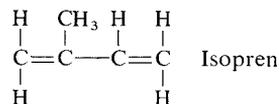
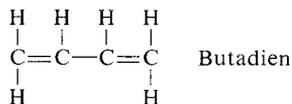
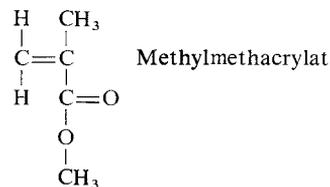
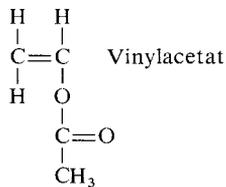
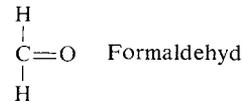
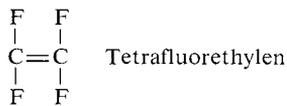
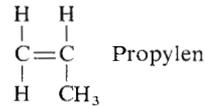
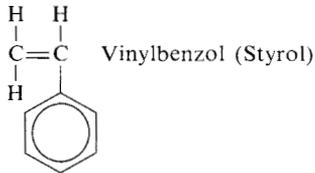
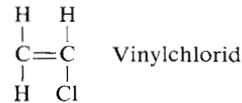
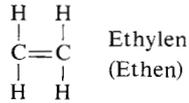
Bei den Molekülen mit Doppelbindungen, die sehr *reaktionsfreudig* sind, werden Reaktionen möglich, die zu *Makromolekülen* führen (Abschnitt 2.1).



Durch die Vielfalt der Ausgangsmoleküle (Bausteine) sind sehr große *Variationsmöglichkeiten* bei der Bildung und beim Aufbau von Makromolekülen mit den unterschiedlichsten Eigenschaften gegeben. Das ergibt die Vielfalt der herzustellenden Kunststoffe als „Werkstoffe nach Maß“.

Sind in einem Monomer mehr als eine Doppelbindung enthalten (Isopren, Butadien, ungesättigte Polyester UP), so ist eine *Vernetzung*, d. h. eine echte chemische Bindung zwischen den Makromolekülen möglich. Je nach Anzahl der Vernetzungspunkte ergeben sich weich- bis hartelastische Elastomere bzw. Duroplaste.

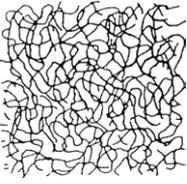
Wichtige Ausgangsstoffe (Monomere) für die Kunststoffherzeugung sind (Auswahl):



■ 1.3 Strukturen von Makromolekülen

Hochmolekulare Stoffe enthalten bei den Thermoplasten Kettenmoleküle mit bis zu 10^6 Atomen. Bei eng vernetzten Duroplasten und lose vernetzten Elastomeren kann man nur noch von einem einzigen „Riesenmolekül“ sprechen.

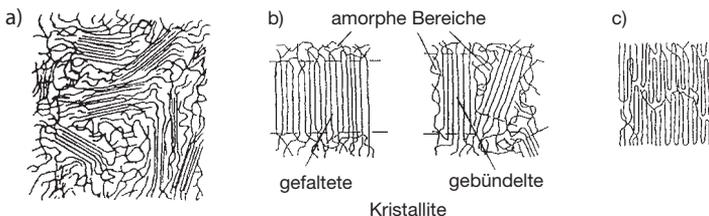
Amorphe Thermoplaste (Bild 1.1) bestehen aus langen Kettenmolekülen, die sich bei ihrer Bildung ineinander verschlingen und verfilzen. Die „gestreckte“, mittlere Kettenlänge beträgt ca. 10^{-10} mm bis 10^{-3} mm bei einer „Dicke der Kette“ von ca. $0,3 \cdot 10^{-6}$ mm.

**Bild 1.1**

Molekülanordnung in amorphen Thermoplasten (schematisch)

Amorphe Thermoplaste kristallisieren wegen ihres unsymmetrischen Aufbaus bzw. großen Seitengruppen nicht, sie sind daher i. A. glasklar, wenn sie nicht modifiziert sind. Sie haben deshalb meist gute optische Eigenschaften und weisen geringe Verarbeitungsschwindung auf. Die *Einsatztemperaturbereiche* von amorphen Thermoplasten liegen unterhalb der *Glasübergangstemperatur* T_g (Einfrier-temperatur), vgl. Abschnitt 6.2 und 21.4. Weil Fadenmoleküle ohne chemische Bindungen untereinander vorliegen, können amorphe Thermoplaste nach allen „thermoplastischen“ Verarbeitungsverfahren wie Spritzgießen, Extrudieren, Warmumformen und Schweißen ver- bzw. bearbeitet werden. Ausnahmen sind sehr hochmolekulare Kunststoffe wie z. B. formpolymerisiertes („gegossenes“) PMMA.

Teilkristalline Kunststoffe (Bild 1.2) haben teilweise besonders geordnete Molekülbereiche, die als *kristalline* Bereiche bezeichnet werden. Solche Ordnungszustände sind möglich z. B. bei symmetrischem und weitgehend linearem Molekülaufbau wie z. B. bei PE-HD (Bild 1.2). Durch die Kristallisation sind teilkristalline Thermoplaste i. A. opak. Mit zunehmender Kristallinität nimmt die Transparenz ab. Die Verarbeitungsschwindung ist höher als bei amorphen Thermoplasten. Die *Einsatztemperaturbereiche* liegen zwischen der Glasübergangstemperatur T_g und der Kristallschmelztemperatur T_m . Verarbeitungsmöglichkeiten wie bei amorphen Thermoplasten; jedoch haben die Abkühlungsbedingungen (z. B. die Werkzeugtemperatur) großen Einfluss auf die Eigenschaften wegen unterschiedlicher Kristallinität und Nachkristallisation.

**Bild 1.2** a) Molekülanordnung in teilkristallinen Thermoplasten (schematisch)

b) gefaltete und gebündelte Kristallite

c) gerichtete Kristallitstruktur nach dem Verstrecken

Die Eigenschaften von Thermoplasten sind abhängig vom chemischen Aufbau der Grundbausteine, von der Kettenlänge, der Kristallinität, und den Kräften zwischen

den Molekülketten (ZMK: Zwischenmolekulare Kräfte, Nebervalenzen), siehe Abschnitt 2.2.

Elastomere (Bild 1.3) bestehen meist aus weitmaschig vernetzten Kettenmolekülen (Hauptvalenzbindungen). Die Anzahl der Verknüpfungspunkte ist abhängig von der Anzahl an multifunktionellen Gruppen in den Ausgangsmonomeren und beeinflusst die Elastizität. Die weitmaschige Vernetzung erfolgt bei der Formgebung; ein Warmumformen und Schweißen ist nachträglich nicht mehr möglich. *Thermoplastische Elastomere TPE* (Abschnitt 14.2) sind *physikalisch vernetzt* und deshalb wie Thermoplaste zu verarbeiten.



Bild 1.3

Molekülanordnung in weitmaschig vernetzten Elastomeren (schematisch)

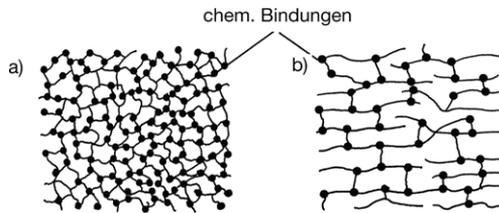


Bild 1.4 Molekülanordnung in eng vernetzten Duroplasten (schematisch)

- a) Vernetzung von „Einzelbausteinen“ bei duroplastischen Formmassen
b) Quervernetzung von Ketten bei UP-Gießharzen

Duroplaste (Bild 1.4) bestehen aus engmaschig, räumlich vernetzten Molekülstrukturen. Die Vernetzung erfolgt bei der Formgebung; diese Werkstoffe sind dann nach der Formgebung nicht mehr schmelzbar und daher nicht schweißbar und nur noch spanend bearbeitbar. Duroplaste werden meist durch Gießen, Laminieren, Pressen und Spritzgießen verarbeitet. Die *Einsatztemperaturbereiche* sind wegen der Vernetzung höher als bei Thermoplasten.

2

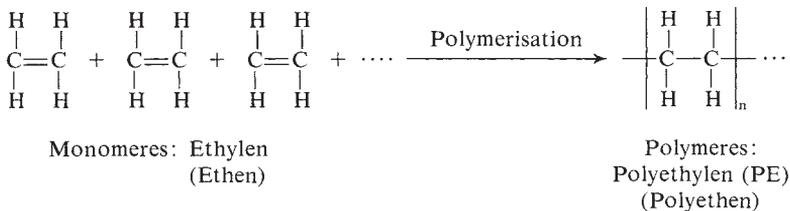
Bildung von Makromolekülen

2.1 Bildungsreaktionen

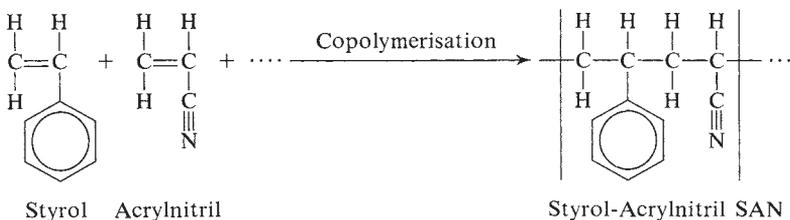
Polymerisation (nach IUPAC: Additionspolymerisation als Kettenreaktion APK) ist die Verkoppelung von reaktionsfreudigen Monomeren durch Aufbrechen der Doppelbindungen und damit ein „Aneinanderhängen“ von Einzelbausteinen zu Ketten ohne Abspaltung von Nebenprodukten.

Die Polymerisation wird eingeleitet durch Temperatur, Druck und Katalysatoren. Bei exothermen Reaktionen muss Wärme abgeführt werden. Das entstehende Polymerisat enthält die Bausteine des Monomeren ohne Doppelbindungen bei einer höheren molaren Masse (Molekulargewicht).

Homo- oder *Unipolymerisate*, z. B. PE, PP, PS, PMMA, POM, PTFE bestehen aus gleichen Monomerbausteinen:

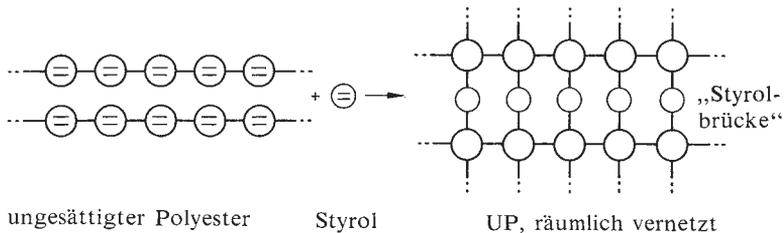


Bei *Copolymerisaten*, z. B. SAN, ABS, UP sind zur Veränderung der Eigenschaften unterschiedliche Monomere am Aufbau der Kette beteiligt:

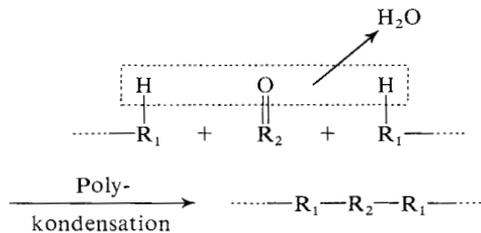


Entstehen bei der Copolymerisation lineare Makromoleküle, so sind die entstandenen Copolymerisate *Thermoplaste* (z. B. SAN, ABS).

Bei der Copolymerisation von mehrfunktionellen Monomeren oder Monomeren mit reaktionsfähigen Gruppen entstehen durch räumliche Vernetzung *duroplastische* Copolymerisate. So erfolgt bei UP bei der Verarbeitung durch Copolymerisation von ungesättigtem Polyester mit Styrol eine räumliche Vernetzung und dadurch die Aushärtung (*katalytische Härtung*); als Reaktionsmittel dienen organische Peroxide und Beschleuniger, die aber nicht Bestandteil der vernetzten Struktur sind:

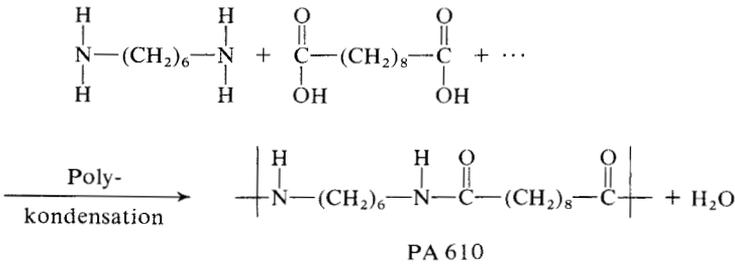
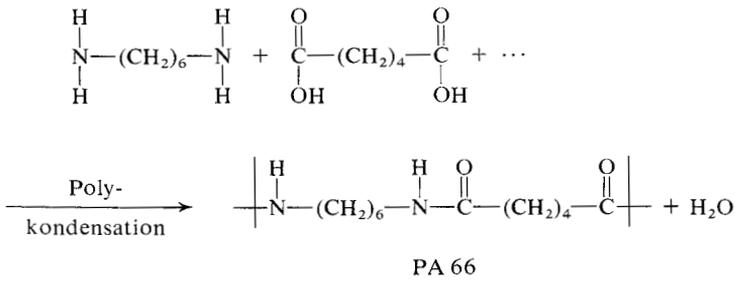


Polykondensation (nach IUPAC: Kondensationspolymerisation KP) ist eine Reaktion zwischen reaktionsfähigen Gruppen unterschiedlicher Ausgangsstoffe. Allgemein sind mindestens *zweifunktionelle* (bifunktionelle) Ausgangsstoffe notwendig. Meist erfolgt die Reaktion zwischen Wasserstoff und Hydroxylgruppen (–OH) unter Bildung von Wasser (Polykondensation).

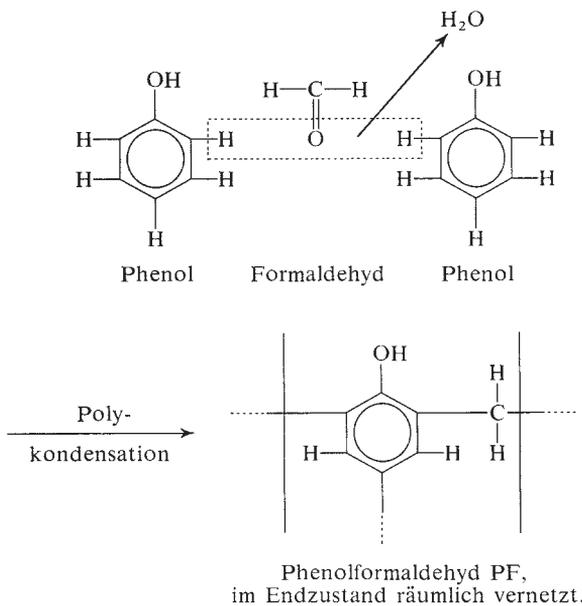


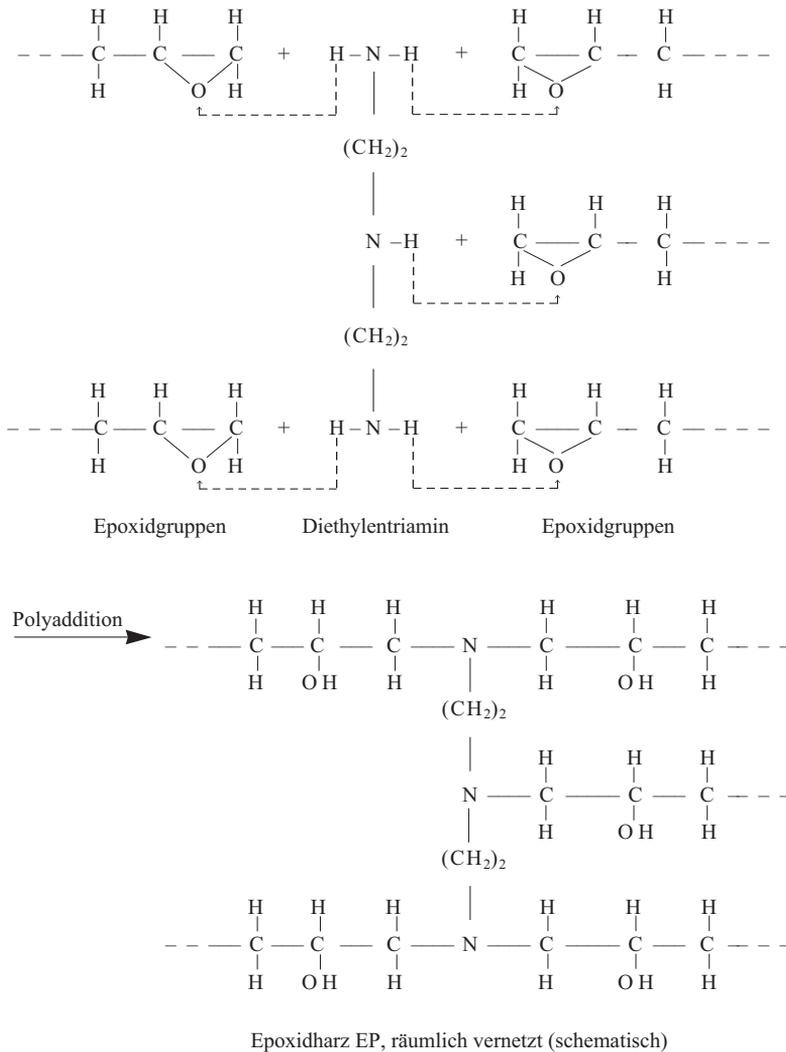
Die Polykondensation läuft schrittweise ab und kann an beliebigen Stellen unterbrochen werden. Das ist wichtig für die Herstellung, Lagerung und Verarbeitung von härtbaren Polykondensaten (Abschnitt 12.1).

Bei der Polykondensation entstehen *Thermoplaste*, wenn lineare Ketten gebildet werden, z. B. bei bifunktionellen Ausgangsmolekülen. So ergibt Hexamethylendiamin mit Adipinsäure das thermoplastische Polyamid PA 66 und mit Sebazinsäure das thermoplastische Polyamid PA 610:



Bei der Polykondensation entstehen *Duroplaste* (z.B. bei trifunktionellen Ausgangsstoffen), wenn die Kondensationsreaktion an mehr als zwei Stellen ablaufen kann und somit eine räumliche Vernetzung möglich ist. Aus Phenol und Formaldehyd entsteht so (bei der Formgebung) das *duroplastische* Phenolformaldehyd PF:





■ 2.2 Innere Kräfte in Molekülsystemen

Kräfte *innerhalb* der Kettenmoleküle sind Hauptvalenzbindungen (Elektronenpaarbindungen).

Kräfte *zwischen* den Kettenmolekülen sind Nebervalenzbindungen (ZMK: Zwischenmolekulare Kräfte), wie z. B. *Van der Waalssche Kräfte*, *polare Kräfte*, *Wasserstoffbrückenbindungen*. „*Mechanische Verschlingungen*“ durch *Verknäuelung* bewirken ebenfalls einen Zusammenhalt der Makromoleküle.

Bei *Thermoplasten* sind für die Eigenschaften bestimmend:

- Van der Waalsche Kräfte; maßgebend bei unpolaren Kunststoffen, ggf. erhöht in teilkristallinen Bereichen
- Polare Kräfte, z. B. bei PVC, PA, PMMA
- Wasserstoffbrückenbindungen, z. B. bei PA 6
- Länge der Makromoleküle (Verknäuelung)

Bei *Elastomeren* sind für die Eigenschaften bestimmend:

- Hauptvalenzbindungen } Die Anteile der beiden Bindungsarten
- Nebervalenzbindungen } beeinflussen die Elastizität

Bei *Duroplasten* sind für die Eigenschaften bestimmend:

- fast ausschließlich Hauptvalenzbindungen (alles vernetzt).

Hauptvalenzbindungen tragen am meisten zur Festigkeit der Kunststoffe bei. Sie wirken sich am stärksten bei Duroplasten aus.

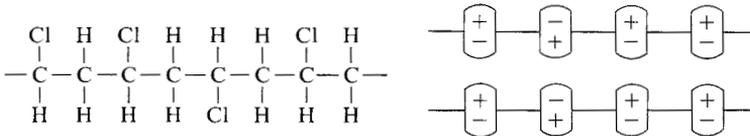
Bei allen thermoplastischen Verarbeitungsprozessen bleiben die Hauptvalenzbindungen innerhalb der Makromoleküle erhalten, wenn keine (thermische) Schädigung auftritt. Hauptvalenzbindungen werden erst dann zerstört, wenn die Zersetzung der Kunststoffe beginnt.

Van der Waalsche Bindungen wirken zwischen allen Atomen und Molekülen infolge zeitlich unterschiedlicher Aufenthalte der Elektronen in der Atomhülle, wodurch sich im Mittel eine kleine Anziehungskraft ergibt. Solche Kräfte wirken auch z. B. in Flüssigkeiten aus niedermolekularen, unpolaren Molekülen. Bei Duroplasten spielen diese Kräfte nur eine untergeordnete Rolle, da die Hauptvalenzbindungen überwiegen. Die Van der Waalschen Kräfte sind um eine Größenordnung kleiner als die Hauptvalenzkräfte und stark von der Temperatur abhängig, da mit zunehmender Temperatur die Molekülabstände größer werden. Bei Thermoplasten werden sie dabei soweit verringert, dass eine „gummiähnliche“ Flexibilität der untereinander verknäuelten Kettenmoleküle eintritt (thermoelastischer Zustand, Erweichung). Bei Duroplasten ist dieser Effekt bei Temperaturerhöhung wegen der Vernetzung so gering, dass auch bei hohen Temperaturen keine Erweichung eintritt. Bei teilkristallinen Thermoplasten sind in den kristallinen Bereichen wegen der Ordnung und dichteren Packung von Molekülabschnitten die Van der Waalschen Kräfte erhöht; dieser Effekt geht verloren, wenn die Kristallitschmelztemperatur T_m erreicht ist.

Polare Kräfte (Dipoleffekt) wirken z. B. bei PVC durch die stark negative Ladung des Chlors, d. h. die Ladungsschwerpunkte sind verschoben (Dipole). Dipole ziehen sich gegenseitig an; ihre Wirkung nimmt mit steigender Temperatur stark ab (Erweichung von PVC).

Atomgruppen mit Dipolmomenten sind:

- Hydroxylgruppe (–OH)
- Chloridgruppe (–Cl)
- Fluoridgruppe (–F)
- Nitrilgruppe (–CN)
- Estergruppe (–COOR)



Zu den polaren Bindungen gehört auch die *Wasserstoffbrückenbindung* mit lokalisierter starker Dipolanziehung zwischen OH- und NH-Gruppen einerseits und O-Atomen anderer Ketten. Sie sind maßgebend für die Wasseraufnahme bei Cellulosederivaten und Polyamiden und haben damit Auswirkungen auf die Festigkeit und Steifigkeit.

■ 2.3 Polymerisationsgrad, Vernetzungsgrad

Der *Polymerisationsgrad* P (engl.: DP = Degree of polymerization) ist eine kennzeichnende Größe für *thermoplastische* Kunststoffe. Man versteht darunter die Anzahl der Grundbausteine in den Kettenmolekülen. Kunststoffe bestehen i. A. nicht aus einem System von gleich langen Kettenmolekülen, sondern aus Ketten verschiedener Länge, entsprechend einer Gaußschen Verteilungskurve. Der Polymerisationsgrad kann bei der Herstellung der Kunststoffe beeinflusst werden. Der *mittlere Polymerisationsgrad* gibt den Durchschnittswert der mehr oder weniger breiten Verteilungskurve an. Zum Erzielen guter Fließeigenschaften wird oft eine möglichst „enge“ Verteilungsfunktion (CR = Controlled Rheology) angestrebt (Bild 2.1), was eine größere Gleichmäßigkeit der Kunststoffeigenschaften ergibt, z. B. einen sehr engen Schmelz- bzw. Erweichungsbereich. Der mittlere Polymerisationsgrad kann als Zahlenmittelwert M_n , als Gewichtsmittelwert M_w oder als Viskositätsmittelwert M_v angegeben werden. Eine weitere wichtige Kenngröße ist das *mittlere Molekulargewicht* MW (molecular weight) oder die *mittlere molare Masse* MM (molar mass). Das Molekulargewicht ist die Summe der Massen aller Atome eines Makromoleküls. Für Polyethylen ergibt sich bei einem mittleren Polymerisationsgrad von 10000 ein Molekulargewicht von $10\,000 \cdot (2 \cdot 12 + 4 \cdot 1) = 280\,000$ (für $C = 12$ und $H = 1$).

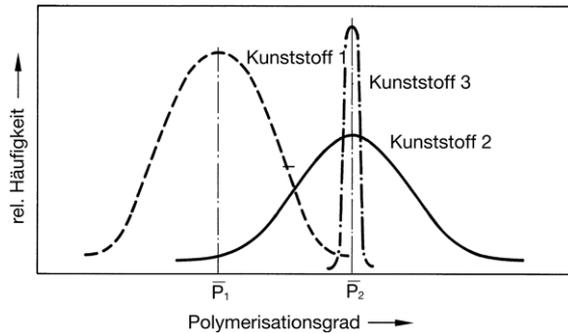


Bild 2.1 Verteilungskurven für das Molekulargewicht (schematisch) a) Kunststoff 1: niedriger Polymerisationsgrad, geringe Viskosität b) Kunststoff 2: höherer Polymerisationsgrad, höhere Viskosität c) Kunststoff 3: enge Molekulargewichtsverteilung CR (controlled rheology), gute Fließfähigkeit, z. B. für dünnwandige Verpackungsbecher aus PP

Mit zunehmendem Polymerisationsgrad P nehmen zu:

Schmelzviskosität, Zugfestigkeit, Einreißfestigkeit, Härte, Bruchdehnung und Schlagzähigkeit.

Mit zunehmendem Polymerisationsgrad P nehmen ab:

Fließfähigkeit, Kristallisationsneigung, Quellung und Spannungsrisssbildung.

Der *Vernetzungsgrad* ist eine kennzeichnende Größe für *Elastomere* und *Duroplaste*. Man versteht darunter den Anteil der Vernetzungspunkte im Gesamtsystem nach der Verarbeitung.

Mit zunehmendem Vernetzungsgrad steigen:

Festigkeit, Steifigkeit und Wärmeformbeständigkeit.

Das *elastische Verhalten* von Elastomeren ist durch die Variation des Vernetzungsgrades in weiten Bereichen einstellbar.

3

Strukturen von thermoplastischen Kunststoffen

■ 3.1 Orientierung von Makromolekülen

Im normalen Zustand liegen die Ketten- oder Makromoleküle von *amorphen* Thermoplasten im ungeordneten, verknäuelten Zustand (Bild 1.1) vor, z.B. bei PS, PMMA, PC.

Bei der *Verarbeitung* der Thermoplaste kann durch hohe Scherbeanspruchung in einer zähflüssigen Schmelze eine Ausrichtung der Makromoleküle erfolgen. Dies spielt eine Rolle beim Extrudieren mit nachfolgendem Abkühlen und ggf. mechanischem Verstrecken. Beim Spritzgießen sind die *Orientierungen* abhängig von *Masstemperatur*, *Einspritzgeschwindigkeit* und *Werkzeugtemperatur*; sie sind unterschiedlich groß über den Querschnitt der Wanddicke eines Formteils. Besonders hoch sind die Orientierungen am Anguss und in der Außenschicht von Spritzgussteilen, weil an der kälteren Werkzeugwand eine höhere Scherbeanspruchung und damit stärkere Orientierungen der Makromoleküle erfolgt, die dort dann auch schneller eingefroren werden. Orientierungen wirken sich aus durch richtungsabhängige Eigenschaften (Anisotropie), z. B. höhere Zugfestigkeit und Schlagzähigkeit in Orientierungsrichtung. Orientierungen können nachgewiesen werden durch die *Schrumpfung* nach Warmlagerung oder bei glasklaren Formteilen durch Betrachtung im polarisierten Licht (Abschnitt 31.2).

Bei zähen Thermoplasten kann durch starke mechanische Verformung eine gewisse Orientierung der Makromoleküle erreicht werden, z. B. biaxiales Recken von Folien oder *Verstrecken* von Fasern und Bändern aus PE, PP, PA und linearen Polyestern.

■ 3.2 Kristallinität

Je nach Aufbau der Makromoleküle ist eine mehr oder weniger starke, parallele Ausrichtung (kristalline Bereiche) der Makromoleküle möglich, daneben liegen aber auch noch ungeordnete (amorphe) Bereiche vor; auch eine Faltungskristallisation kann auftreten (Bilder 3.1 und 1.2c).

Maßgebend für die Kristallisation ist neben dem *Aufbau* und der *Länge* der Makromoleküle auch die *Kristallkeimbildungs-* und *Kristallwachstumsgeschwindigkeit*.

Die Kristallinität wird *erhöht* durch:

- langsame Abkühlung der Schmelze (z. B. hohe Werkzeugtemperatur beim Spritzgießen)
- Zugabe von Keimbildnern (Nukleierungsmittel)
- symmetrischen oder isotaktischen Bau der Makromoleküle
- niedrige molare Masse (kurze Ketten)
- mechanisches Verstrecken.

Niedrige Kristallinität ergibt sich durch:

- schnelle Abkühlung der Schmelze (durchsichtige Flaschen aus PET)
- unsymmetrischen Aufbau der Makromoleküle (verzweigte Makromoleküle oder ataktischer Aufbau der Makromoleküle, große Seitenketten)
- hohe molare Masse (Verschlingung infolge langer Ketten)
- Vernetzung.

Durch *Erhöhung* der Kristallinität

nehmen zu: *nehmen ab:*

- | | |
|----------------|-----------------------|
| ■ Dichte | ■ Verformungsvermögen |
| ■ Festigkeit | ■ Transparenz |
| ■ Steifigkeit. | |

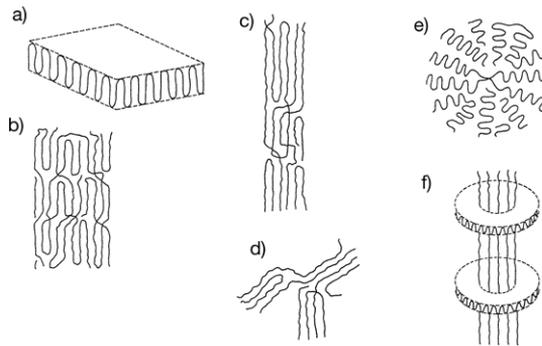


Bild 3.1 Kristallstrukturen in Polymeren (schematisch)

- a) Einkristall
- b) Kristalllamellen
- c) Fibrillen
- d) Fransenmizellen
- e) Sphärolithe
- f) Shish-Kebab-Struktur

Bei teilkristallinen Kunststoffen sind die kristallinen Bereiche *steif*, die amorphen dagegen *beweglicher* („amorphe Gelenke“). Beim Erwärmen schmelzen die Kristallite bei Erreichen des *Kristallitschmelzpunktes* T_m auf.

Bei der Verarbeitung von teilkristallinen Thermoplasten werden je nach Verarbeitungsbedingungen unterschiedliche *Kristallinitätsgrade* erreicht. Tabelle 3.1 zeigt maximal erreichbare Kristallinitätsgrade; man kann dabei die Auswirkungen des unterschiedlichen Aufbaus von Makromolekülen (linear, verzweigt, isotaktisch usw.) erkennen.

Kristallisation tritt hauptsächlich bei (teilkristallinen) Thermoplasten auf, kann aber auch bei weitmaschig vernetzten Elastomeren zwischen den Vernetzungspunkten vorkommen, was aber i. A. nicht erwünscht ist (Versprödung von Gummi bei tiefen Temperaturen). Engmaschig vernetzte Duroplaste weisen keine Kristallinität auf.

Tabelle 3.1 Kristallinitätsgrade verschiedener teilkristalliner Thermoplaste

Kunststoff		erreichbarer Kristallinitätsgrad in %
lineares Polyethylen	PE-HD	70 bis 80
verzweigtes Polyethylen	PE-LD	45 bis 55
isotaktisches Polypropylen	PP	60 bis 70
Polyamide	PA	bis 60
Polybutylenterephthalat	PBT	bis 50
Polyacetal/Polyoximethylen	POM	bis 70

Bei *flüssigkristallinen LC-Polymeren* (Abschnitt 16.1) ist eine Verknäuelung der Makromoleküle wegen stäbchenförmigem Molekülaufbau nicht möglich, sodass eine starke molekulare Orientierung vorliegt, z. B. bei Aramidfasern. Solche Kunststoffe haben sehr hohe Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften sowie hohe Einsatztemperaturbereiche.

■ 3.3 Überstrukturen

Bei teilkristallinen Kunststoffen gibt es zwei Ordnungsstufen (vgl. auch Bild 3.1):

- Ordnung von Makromolekülen zu kristallinen Bereichen
- Übermolekulare Ordnungen, d. h. sog. Überstrukturen oder Sphärolithe.

Sphärolithe entstehen in der Schmelze aus Kristallkeimen bei langsamer Abkühlung. Die Größe der Sphärolithe beträgt 5 µm bis 100 µm, abhängig von den *thermischen Bedingungen* der Schmelze, wie Massetemperatur und Abkühlungsgeschwindigkeit, sowie von der *Keimzahl* (Verunreinigungen oder Nukleierungsmittel als Keimbildner).

Während man die kristallinen Bereiche lichtmikroskopisch nicht erkennen kann, stellen sich die *Sphärolithe* durch Betrachten von *Dünnschnitten* mit einer Dicke von etwa 10 µm im Lichtmikroskop unter polarisiertem Licht dar; dabei sind z. B. bei nicht nukleiertem PA sog. *Sphärolithenkreuze* erkennbar. Darstellung der Präparations- und Auswertetechnik für lichtmikroskopische Untersuchungen an teilkristallinen Thermoplasten, siehe Abschnitt 31.3.

Das Gefüge von Spritzgussteilen aus teilkristallinen Kunststoffen ist meist nicht einheitlich wegen ungleicher Abkühlung. Am Rand treten meist, je nach Abkühlbedingungen, *keine* bis *sehr kleine* Sphärolithe auf; gegen den Kern werden die Sphärolithe größer. Grobe Sphärolithe ergeben spröderes Gefüge aber ggf. höheren Verschleißwiderstand. Bei einem Bruch verlaufen die Risse dann entlang der Sphärolithgrenzen oder aber längs der Sphärolithradialen.

PA 6 zeigt typische Sphärolithenkreuze; POM dagegen „fasrige“ Sphärolithe (Dendriten), teilweise senkrecht zum Rand ausgerichtet (Abschnitt 31.3). Bei PE-HD und PBT lassen sich ebenfalls Sphärolithstrukturen nachweisen.

4

Polymerkombinationen

Bei vielen Kunststoffen erfolgt der Aufbau aus nur einer Monomerart, man spricht dann von einem *Homopolymerisat*, z. B. PE und PS.

Zur gezielten Beeinflussung von Kunststoffeigenschaften (Modifizierung) in eine bestimmte Richtung oder zur Kombination verschiedener Eigenschaften von Grundkunststoffen, stehen mehrere Verfahren zur Verfügung, die erst die große Vielfalt der Kunststoffe als „Werkstoffe nach Maß“ ermöglichen.

■ 4.1 Copolymerisation, Pfropfpolymerisation

Der Aufbau von *Co-* und *Pfropfpolymerisaten* erfolgt aus zwei oder mehr Monomerarten. Je nach Mengenanteil der einzelnen Monomere können die physikalischen, chemischen und Verarbeitungseigenschaften beeinflusst werden.

Bei der *inneren Weichmachung* werden „elastische“ Bausteine, z. B. durch Copolymerisation, in Molekülketten eingebaut, wo sie wie „elastische Gelenke“ wirken und insbesondere die Schlagzähigkeit verbessern, z. B. SB als Copolymerisat. Die *äußere Weichmachung* wird in den Abschnitten 4.2 und 5.4 behandelt.

Bei der *Copolymerisation* erfolgt eine „Vermischung“ der Ausgangsstoffe (Monomere) bei der Synthese *innerhalb* der Molekülketten, wie z. B. bei SAN.

Je nach Anordnung der Einzelkomponenten (Einzelmonomere) im Molekülverband ergibt sich ein unterschiedlicher Aufbau der Polymere (Bild 4.1) mit ggf. variierenden Eigenschaften:

- Statistisches oder Random-Copolymer, mit geringer Kristallisationsneigung, z. B. durchsichtiges Random-PP mit Ethylenanteilen
- Block- oder Sequenzpolymere bei thermoplastischen Elastomeren
- alternierende Copolymere
- Pfropfcopolymere, z. B. bei der Schlagzähmodifizierung von PS durch Polybutadien.

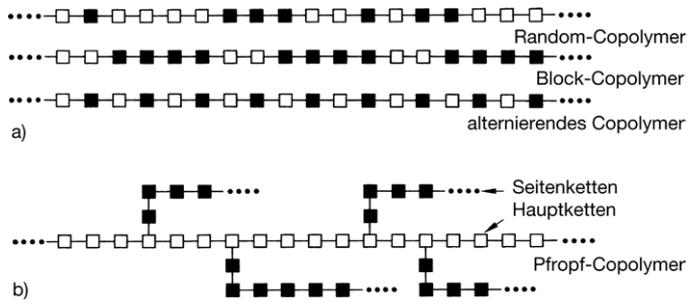


Bild 4.1 Aufbauschema von thermoplastischen Makromolekülen

a) lineare Verkettungen

b) Kettenverzweigungen

Bei den aufgeführten Co- oder Pfropfpolymeren handelt es sich um *Thermoplaste*, weil keine Vernetzung vorliegt.

Auch bei *Duroplasten* sind Kombinationen von Harzen möglich und üblich, z. B. bei den Melamin-Phenol-Formaldehyd-Formmassen MPF und UP-Harzen (Abschnitt 12.2 und 12.3).

■ 4.2 Polymerblends, Polymerlegierungen, Kunststoffmischungen

Durch Vermischen fertiger aber unterschiedlicher Polymerrohstoffe werden *Polymerblends* oder *Polymerlegierungen* (Alloys) hergestellt, die ebenfalls in Form verarbeitungsfähiger Granulate vorliegen (vgl. DIN 16780). Es können dadurch optimierte Eigenschaftsprofile von Kunststoffen für Spezialanwendungen, z. B. für Stoßfängersysteme eingestellt werden, indem die unterschiedlichen Eigenschaften der Ausgangskunststoffe kombiniert werden, z. B. PP+EPDM. Wichtige Kunststofflegierungen sind: PE+PP, unterschiedliche Blends auf Basis PC, PPE, PBT, ASA und PA. Einzelheiten sind bei den Basiskunststoffen in Teil II zu finden. Die Mischungen werden so gewählt, dass bestimmte spezielle Eigenschaften gezielt erreicht werden. Es gibt darunter eine Reihe von Hochleistungskunststoffen (siehe Kap. 13).

Bei *PS-Modifikationen* werden auch feinverteilte Partikel eines elastomeren Stoffes in den thermoplastischen Kunststoff (Matrix) eingearbeitet, z. B. PS-I (SB) als „Legierung“ (Bild 4.2)

Einen Sonderfall stellt die *Weichmachung* von PVC zu PVC-P (Weich-PVC) dar. Dabei werden *Weichmachermoleküle* bei höherer Temperatur in das PVC eingearbeitet, sodass sie sich zwischen die Kettenmoleküle legen und dabei ein „gummi-

elastisches“ Verhalten bewirken. Ein so weichgemachtes PVC kann den Weichmacher durch *Ausschwitzen* oder *Weichmacherwanderung* an die Umgebung abgeben und so wieder „verhärten“. Derart weichgemachte Kunststoffe dürfen i.A. im Lebensmittelbereich nicht eingesetzt werden, ggf. bei lebensmittelrechtlich unbedenklichen, zugelassenen Weichmachern.

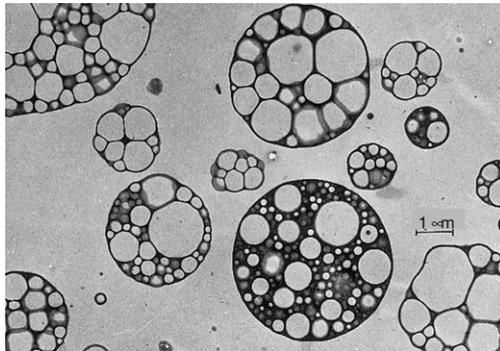


Bild 4.2 Elektronenmikroskopische Aufnahme eines schlagzähem Polystyrol (PS-HI) mit aufgepfropftem Butadienkautschuk
hell: Polystyrol, dunkel: Butadien-Kautschuk

Bei den *thermoplastisch verarbeitbaren Elastomeren TPE* (14.2) handelt es sich um Copolymerisate oder Blends mit überwiegenden „Weichanteilen“ im gummielastischen Zustand, eingebunden in eine amorphe oder teilkristalline Grundmasse (Matrix). Oberhalb einer werkstoffspezifischen Grenztemperatur wird der „Hartanteil“ thermoplastisch und somit thermoplastisch verarbeitbar, z. B. EVAC, Polyesterelastomere, thermoplastische Polyurethane (Abschnitt 14.2).

Beim Recycling von unterschiedlichen Thermoplastabfällen müssen beim *Compoundieren* ggf. durch geeignete Zusätze (Verträglichkeitsmodifikatoren) die Eigenschaften verbessert werden. Bei Polyamiden und thermoplastischen Polyestern verbessern CBC-Additive die Aufarbeitung von Rezyklaten.

5

Zusatzstoffe

In Kunststoffen sind bereits durch die Herstellung Stoffe, wie z. B. Emulgatoren und Katalysatoren in kleinen Mengen enthalten. Bei der Konfektionierung (Compoundierung) der Kunststoffe zu verarbeitungsfähigen *Formmassen* und *Granulaten* werden üblicherweise *Zusatzstoffe* in bestimmten Mengen als *Verarbeitungshilfen* und zur *Eigenschaftsänderung* zugegeben:

- Füll- und Verstärkungsstoffe zur gezielten Eigenschaftsverbesserung
- *Stabilisatoren* gegen thermische Schädigungen bei der Verarbeitung und als Alterungs- und UV-Schutz im Gebrauch
- *Gleitmittel* als Verarbeitungshilfen bei Thermo- und Duroplasten
- Farbmittel zur Einfärbung
- *Nukleierungsmittel* zur Verbesserung der Kristallisation bei teilkristallinen Thermoplasten und dadurch zur Verkürzung der Zykluszeit
- Weichmacher und Flexibilisatoren zur Erhöhung der Schlagzähigkeit
- Flammenschutzmittel zur Reduzierung der Entflammbarkeit
- leitfähige Zusatzstoffe, z. B. Ruße zur Verminderung der Widerstandswerte
- *Antistatika* gegen elektrostatische Aufladung
- Festschmierstoffe zur Verbesserung der Gleiteigenschaften
- Treibmittel zur Schaumstoffherstellung
- *Haftvermittler* zur Verbesserung der Haftung zwischen Kunststoff und Verstärkungsstoffen
- *Antibakterielle* und *antifungizide* Zusätze
- Sauerstoffabsorber für Lebensmittelverpackungen.

■ 5.1 Füllstoffe und Verstärkungsstoffe

Normen

DIN 55625	Füllstoffe für Kunststoffe
DIN EN 12971	Verstärkungen – Spezifikationen für geschnittene Textilglasgarne
DIN EN 13002	Kohlenstoff-Filamentgarne
DIN EN 13003	Para-Aramid-Filamentgarne
DIN EN 13417	Verstärkung – Spezifikation für Gewebe T1: Bezeichnung T2: Prüfverfahren und allgemeine Anforderungen T3: Besondere Anforderungen
DIN EN 13677	Verstärkte Thermoplast-Formmassen – Spezifikation für GMT
DIN EN 14118	Verstärkungsprodukte – Spezifikation für Textilglasmatten (Glasseiden- und Endlosmatten) T1: Bezeichnung T2: Prüfverfahren und allgemeine Anforderungen T3: Besondere Anforderungen
DIN EN ISO 10618	Kohlenstofffasern – Bestimmung des Zugverhaltens eines harz imprägnierten Garns

Füllstoffe sind kleine Partikel, kurze oder lange Fasern, Kugeln aus *organischen* (Zellulose, Holzmehl, Sisal- und Kokosfasern) oder *anorganischen* (Gesteins- und Mineralmehle, Kreide, Talkum, Glaskugeln) Stoffen (siehe auch DIN 55625). Sie dienen bei *Duroplasten* als Streckmittel zur Harzeinsparung, zur Verbesserung der Oberflächengüte, zur Verminderung der Sprödigkeit und zur Erhöhung der Steifigkeit. Bei *Thermoplasten* dienen sie ebenfalls zur Streckung, zur Veränderung der mechanischen Eigenschaften und zur Reduktion der Schwindung. Grafit, MoS₂ und PTFE dienen bei Thermoplasten zur Verbesserung des *Gleitverhaltens*. Je nach Gehalt der Füllstoffe und in Abhängigkeit vom Verarbeitungsverfahren kann in Formteilen ungleichmäßige Verteilung und damit *Anisotropie* auftreten. Bei klassischen *Elastomeren* sind Füllstoffe wie Gasruß, Kreide, Kaolin zur Verbesserung der Eigenschaften erforderlich (Abschnitt 14.1).

Verstärkungsstoffe sind längere Fasern oder Faserprodukte in Form von Geweben, Matten, Vliesen oder Rovings (siehe Kap. 13). Tabelle 13.1 zeigt mechanische Eigenschaften einiger wichtiger Verstärkungsfasern.

Bei *Duroplasten* werden den Formmassen kurze Fasern (Glas, Textil) sowie Gewebeschnitzel zugegeben. Sie dienen der Erhöhung von Festigkeit, Steifigkeit und Wärmestandfestigkeit. Spezielle Formmassen bestehen aus Reaktionsharzen (UP, EP) mit Glasfaser-, Kohlenstoff-, Aramid- und PEI-Faserprodukten unterschiedlicher Form als SMC- bzw. BMC-Formmassen in teigiger oder rieselfähiger Form

(siehe auch Abschnitt 12.3 und 12.4). Bei *Laminaten* kann „gezielt“ verstärkt werden; die Verstärkungsstoffgehalte können sehr unterschiedlich sein.

Bei *Thermoplasten* werden kurze Fasern mit ca. 1 mm Länge oder auch längere Fasern (LFT) in das Granulat beim Compoundieren eingearbeitet. Handelsüblich sind Formmassen mit unterschiedlichen Glasgehalten von etwa 45 bis 50 Gew.-%. Längere Fasern erfordern besondere Maßnahmen bei der Einarbeitung in die Thermoplaste und bei der Verarbeitung. Die Verstärkung mit Glas-, Kohlenstoff-, Aramid- und Naturfasern (GF, CF, RF, NF) bewirkt eine wesentliche Erhöhung der Steifigkeit (Elastizitätsmodul), Verringerung der Schwindung und der (Schlag-) Zähigkeit. Je nach Konstruktion und Herstellung der Formteile ist mit Anisotropien durch die faserigen Füllstoffe zu rechnen. Glaskugeln (GB) und Mineralpulver (MD) bewirken keine Anisotropie, jedoch ist auch der Verstärkungseffekt geringer.

Bei *glasmattenverstärkten Thermoplasten GMT* werden flächige Faserverstärkungen mit dem aufgeschmolzenen Thermoplasten, meist PP, zu flächigen Halbzeugen verarbeitet.

Naturfasern (Hanf, Flachs, Sisal, Jute und Baumwolle), als nachwachsende Rohstoffe, werden vor allem im Automobilbau eingesetzt. Verwendete Kunststoffe sind Thermoplaste (PE, PP) und Duroplaste. Das meist angewandte Verarbeitungsverfahren ist das *Formpressen*. Holz ist ein schon lange verwendeter natürlicher Füllstoff, z. B. in PF und MF/UF als WPC (Wood Plastics Compound).

Bei Formteilen aus (duroplastischen) Kunststoffen mit Verstärkungsmitteln wird fast immer die äußere Oberfläche aus reinem Kunststoff gebildet; bei spanender Bearbeitung werden die Verstärkungsstoffe freigelegt, was eine oft schnelle Schädigung der Formteile, vor allem bei Außenanwendungen bewirkt.

Nano-Füllstoffe sind Füllstoffe wie Ruß, Kieselsäure, Whiskers, Titandioxid TiO_2 , mit einer Partikelgröße unter 100 nm, vor allem für PA 6, PA 12, PP, PMMA, PUR und EP. Erreicht wird eine starke Verbesserung der mechanischen Eigenschaften und der Flammwidrigkeit und eine Verringerung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten.

Kohlenstoff-Nanoröhrchen, sog. Carbon Nanotubes (CNT), verbessern die mechanische Belastbarkeit und vermeiden elektrostatische Aufladung.

■ 5.2 Stabilisatoren

Stabilisatoren unterschiedlichen chemischen Aufbaus sind notwendig, um z. B. *Schädigungen* sowohl bei der Verarbeitung durch Wärme, als auch im Gebrauch durch Wärme-, Licht- oder UV-Einfluss zu vermeiden oder mindestens zu reduzieren. Durch UV-Strahlung und Wärmeeinfluss ergeben sich z. B. eine Reduzierung

der mechanischen Eigenschaften, Verfärbungen an der Oberfläche und Glanzverlust. Manche Kunststoffe sind ohne entsprechende Stabilisatoren überhaupt nicht zu Formteilen zu verarbeiten. Die vielfältigen Stabilisatorensysteme müssen in ihrer Zusammensetzung und ihren Anteilen abgestimmt sein auf den verwendeten Kunststoff und auf die Anforderungen während des Gebrauchs der Formteile. So können bei Außenanwendungen in sonnenreichen Gegenden andere Stabilisatorensysteme in anderen Dosierungen notwendig sein, als in sonnenärmeren mit geringerer UV-Einstrahlung. Besonders wichtig ist die Stabilisierung für die Verarbeitung und den Gebrauch bei PVC. *Ruß* ist ein hervorragender UV-Stabilisator, lässt sich jedoch nur für schwarze Einfärbungen einsetzen. Für hellfarbige Kunststoffe gibt es unterschiedliche Stabilisatorensysteme. Bekannt sind, vor allem für Polyolefine die sterisch gehinderten Amine (HALS), auch in Kombination mit anderen Systemen.

Da sich Stabilisatoren verbrauchen, auch beim *Recycling*, sind bei der Aufbereitung (Compoundierung) von Kunststoffabfällen zusätzliche Stabilisatorzugaben notwendig (vgl. auch Kap. 8).

Zur Lösung des Müllproblems bei Verpackungen wurde versucht, Systeme in die Kunststoffe einzubauen, die anders als die Stabilisatoren wirken und nach bestimmter Zeit zu einem *gezielten Abbau* führen (biochemischer oder photochemischer Abbau, siehe auch Abschnitt 8.1).

■ 5.3 Farbmittel

Man unterscheidet im Kunststoff unlösliche, organische oder anorganische Farbstoffe, sog. Pigmente und im Kunststoff lösliche Farbstoffe; Anteile rd. 0,5 % bis 2 %.

Pigmente ergeben bei normaler Teilchengröße eine gedeckte *Durchfärbung* des Kunststoffs, während lösliche Farbstoffe bei glasklaren Kunststoffen (PMMA, PS, PC) besondere Bedeutung haben für *farbig transparente* Formteile oder Halbzeuge. Hierzu zählen auch *lichtsammelnde* und *fluoreszierende* Farbstoffe und Effektpigmente. Rußzusätze ergeben Schwarzfärbung und gleichzeitig eine Verbesserung anderer Eigenschaften, z. B. *Verminderung der statischen Aufladung* und *Erhöhung der UV-Stabilität* (siehe auch Abschnitt 5.2). Spezielle Farbpigmente verbessern die Laserbeschriftbarkeit und deren Haltbarkeit. Durch Farbstoffzusätze treten bei kleinen Anteilen i. A. keine wesentlichen Änderungen mechanischer oder sonstiger Eigenschaften auf. Es ist aber zu beachten, dass Farbstoffe die Eigenschaften, z. B. Festigkeit der Kunststoffe, verändern können, wenn z. B. die Pigmente nicht gleichmäßig verteilt sind. Pigmentanhäufungen können durch lichtmikroskopische Untersuchungen nachgewiesen werden (Abschnitt 31.3).

Farbstoffe sind dem verarbeitungsfähigen Granulat i. A. bereits bei der Compounding beigemischt. Sie können jedoch auch als Pulver mit dem naturfarbenen Granulat gemischt und bei der Verarbeitung auf Schneckenmaschinen gleichmäßig verteilt werden. Eine andere Möglichkeit der Einfärbung ist die Zugabe von *Masterbatches*, d.h. Granulat mit sehr hoher Farbkonzentration zum naturfarbenen Granulat und dadurch staubfreie Verarbeitung auf Schneckenmaschinen.

■ 5.4 Weichmacher und Flexibilisatoren

Zusätze von *Weichmachern* (DIN EN ISO 1043-3) bewirken schon bei *kleinen* Mengen eine Erhöhung der Flexibilität und damit auch der Schlagzähigkeit, z. B. bei Rezepturen von PVC-Systemen. Bei der Herstellung von weichgemachtem PVC-P (Abschnitt 10.2.3) werden größere Anteile von 20 % bis 50 % an Weichmachern heiß bei der Aufbereitung eingemischt; man spricht von der *äußeren Weichmachung* (Bild 5.1) im Gegensatz zur *inneren Weichmachung* (Kap. 4).

Weichmacher sind meist niedermolekulare Produkte in zähflüssiger bis teigiger Konsistenz, die sich beim „Gelieren“ des PVC zwischen die Kettenmoleküle einfügen und dadurch die Beweglichkeit der Ketten verbessern, was sich u. a. in einer höheren Schlagzähigkeit auswirkt. Je nach Art und Anteil der Weichmacher können die verschiedensten Eigenschaftskombinationen erreicht werden. Es ist aber zu beachten, dass im Gebrauch solche *äußeren Weichmacher* zum Verdampfen oder Auswandern („Weichmacherwanderung“) neigen können, wodurch sich die Flexibilität irreversibel vermindert.

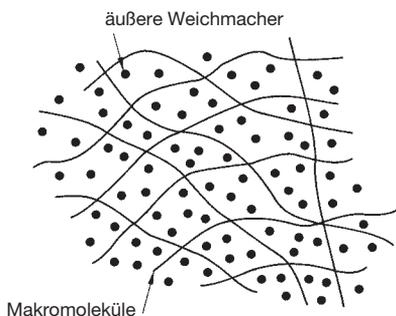


Bild 5.1

PVC-Moleküle mit eingefügten Weichmachermolekülen (schematisch)

Bei *Polyamiden* wirkt die *Aufnahme von Wassermolekülen* ebenfalls im Sinne einer Weichmachung; die Eigenschaften sind somit bei den Polyamiden vom Feuchtegehalt abhängig (Abschnitt 6.6 und 26).

Flexibilisatoren sind Zusätze, die vor allem die Schlagzähigkeit von Thermoplasten (POM-HI oder PBT-HI) erhöhen; EPDM erhöht die Schlagzähigkeit von PP.

■ 5.5 Flammenschutzmittel

Flammenschutzmittel (siehe auch Abschnitt 9.1) dienen der Herabsetzung der Entflamm- und Brennbarkeit von Kunststoffen. Sie greifen in den Brennmechanismus entweder *physikalisch* durch Kühlen, Beschichten oder Verdünnen ein oder *chemisch* durch Reaktion in der Gasphase (Beseitigung energiereicher Radikale) oder festen Phase (Ausbildung einer schützenden Ascheschicht), vgl. auch Kap. 23. Zur Anwendung kommen z. B. Aluminiumhydroxid $\text{Al}(\text{OH})_3$, halogenabspaltende oder phosphorhaltige Produkte. Aus *Umweltschutzgründen* sind die halogenhaltigen Flammenschutzmittel durch neuere, allerdings z. T. weniger wirksame halogenfreie Brandschutzmittel ersetzt, die dann aber in höheren Mengenanteilen zugegeben werden müssen.

Bei FlammSchutzausrüstung im Verkehrswesen, vor allem im Flugzeugbau, sind besonders die Eigenschaften bezüglich Flammwidrigkeit, Rauchentwicklung und Toxizität (FST: Flame, Smoke, Toxicity) zu bewerten.

Beachte: Durch die Zersetzung entsprechender Brandschutzmittel können sich ätzende Stoffe abspalten; bei PVC-Bränden sind Sekundärschäden durch Salzsäurebildung möglich.

Anorganische Füll- und Verstärkungsstoffe beeinflussen das Brennverhalten durch Verringerung des brennbaren Kunststoffanteils.

Kunststoffe mit FlammSchutzmitteln auf der Basis von polybromierten Diphenylethern PBDE dürfen *nicht* recycelt werden.

■ 5.6 Leitfähige Zusatzstoffe

Antistatika dienen zur Verminderung des Oberflächenwiderstands von Kunststoffen, sodass Staubanziehung durch elektrische Aufladung verhindert wird.

Leitfähige Zusatzstoffe, z. B. Spezialruße und Grafit, Kohlenstofffasern und Kohlenstoffröhrchen (Nanotubes) und eingearbeitete metallische Pulver, Flocken oder Fasern erniedrigen den spezifischen Widerstand der Kunststoffe je nach Art und Anteil. Anwendung hauptsächlich für Bauteile der Elektrotechnik (z. B. EMI-Abschirmungen), siehe auch Abschnitt 16.2.

■ 5.7 Treibmittel

Außer dem Einbringen von Gasen unter Druck in aufzuschäumende Vorprodukte oder Freiwerden von Treibmitteln aus chemischen Reaktionen bei der Formteilherstellung, können Kunststoffen auch Treibmittel zugesetzt werden, die durch Wärmezufuhr verdampfen und dadurch den Kunststoff aufschäumen, z. B. Herstellung von PS-E (früher EPS) nach dem „Styropor-Verfahren“ und bei der Herstellung von Thermoplastschaumguss TSG (siehe auch Kap. 15).

Zu einem besonderen Problem sind, wegen der Umweltschädigung, die für das Schäumen von Polyurethanen verwendeten Fluorchlorkohlenwasserstoffe FCKW geworden. Insbesondere das Trichlorfluormethan R11 wurde bei Kühlgeräten für die Wärmeisolierung in PUR-Schäumen eingesetzt. Die Industrie entwickelt Ersatzprodukte oder verwendet halogenfreie Treibmittel (CO_2 , aliphatische Kohlenwasserstoffe wie Propan, Butan), um eine Umweltschädigung bei ausgedienten Schaumstoffen und Kühlgeräten zu vermeiden.

6

Verhalten von Kunststoffen

Die grundlegenden Eigenschaften der Kunststoffe können aus ihrem inneren Aufbau hergeleitet werden. So leiten die Kunststoffe elektrische und Wärmeenergie schlecht, d. h. sie sind *Isolatoren*, da sie infolge der Elektronenpaarbindungen keine freien Elektronen besitzen. Die *Dichte* der Kunststoffe ist gegenüber anderen Werkstoffen verhältnismäßig niedrig infolge eines relativ „lockeren“ Aufbaus. Die *thermische Beständigkeit* ist eingeschränkt, da bei diesen organischen Werkstoffen schon bei verhältnismäßig niedrigen Temperaturen Erweichung bzw. Zersetzung eintritt. Die *chemische Widerstandsfähigkeit* der Kunststoffe ist i. A. sehr gut, d. h. sie brauchen keinen besonderen Oberflächenschutz; sie haben aber eine unterschiedliche Empfindlichkeit bei Einwirkung bestimmter Chemikalien, Lösemittel, UV- und energiereicher Strahlung (s. Abschnitt 6.6 und 28). Es kann aber auch *Alterung* (Abbau der Makromoleküle) oder *Spannungsrissbildung* (Abschnitt 31.2.2) auftreten.

Duroplastische Kunststoffe sind infolge der räumlichen Vernetzung hart und spröde und benötigen meist Füll- oder Verstärkungsstoffe. Sie haben durch die Vernetzung höhere Wärmeformbeständigkeit. Sie werden i. a. mit Pigmenten gedeckt eingefärbt.

Thermoplastische Kunststoffe sind je nach Aufbau amorph oder teilkristallin und unterscheiden sich dadurch stark in ihren Eigenschaften. *Amorphe Thermoplaste* sind meist glasklar und transparent einfärbbar; *teilkristalline Thermoplaste* sind wegen der kristallinen Bereiche milchglasartig trüb (opak, transluzent oder transparent) und deshalb nur gedeckt einfärbbar. Amorphe und teilkristalline Thermoplaste können durch Füll- und Verstärkungsstoffe in ihrem Eigenschaftsbild wesentlich beeinflusst werden.

Besondere Vorteile für den Einsatz von Kunststoffen sind:

- geringe Dichte
- leichte Formgebung bei relativ niedrigen Temperaturen
- komplizierte Formen wirtschaftlich in einem Arbeitsgang herstellbar („integrale Fertigung“)

- Eignung für Massenproduktion
- gute Eignung als Isolatoren
- gute Geräuschkämpfung
- Durchfärbbarkeit
- besondere Verbindungstechniken, z.B. Schnappverbindungen und Filmscharniere
- günstige Gleiteigenschaften, z. T. auch ohne Schmiermittel.

In den nachfolgenden Kapiteln sind auch Besonderheiten im Verhalten der Kunststoffe im Gegensatz zum Verhalten anderer Werkstoffe aufgeführt.

■ 6.1 Mechanisches Verhalten

Der besondere Aufbau der Kunststoffe und die Art der Bindungskräfte gegenüber den Metallen erklärt die weniger kompakte Struktur der Kunststoffe im Vergleich zu der dichteren Atompäckung im Metallkristall.

Daraus ergeben sich für die Kunststoffe:

- relativ niedrige Festigkeit
- niedriger Elastizitätsmodul (geringe Steifigkeit)
- Zeitabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften und damit Kriechen und Entspannen bereits bei Raumtemperatur, insbesondere bei Thermoplasten (Abschnitt 21.7)
- relativ starke Temperaturabhängigkeit der Eigenschaften von Thermoplasten schon bei wenig erhöhten Temperaturen (Abschnitt 21.4)
- Schlag- und Kerbschlagempfindlichkeit, bei Thermoplasten sehr kunststoffspezifisch von *spröde* bei PS, PMMA bis *zäh* bei PC, PA feucht.

Das *Verformungsverhalten* der Kunststoffe unter mechanischer Beanspruchung muss auch im Zusammenwirken mit den thermischen Zuständen (Abschnitt 6.2) betrachtet werden.

Thermoplastische Kunststoffe unterscheiden sich in ihrem Verformungsverhalten grundlegend von dem der Metalle. Metallische Werkstoffe haben infolge ihres *atomaren* Aufbaus bei hohem Elastizitätsmodul ein verhältnismäßig steifes Verhalten und grundsätzlich ein inneres Gleitvermögen durch Verschiebung der Metallatome gegeneinander, ohne dass dabei eine Trennung auftritt (plastisches Verhalten), siehe Bild 6.1. Thermoplastische Kunststoffe zeigen aufgrund ihres *molekularen* Aufbaus und der unterschiedlichen inneren Kraftwirkungen ein anderes Verhalten.

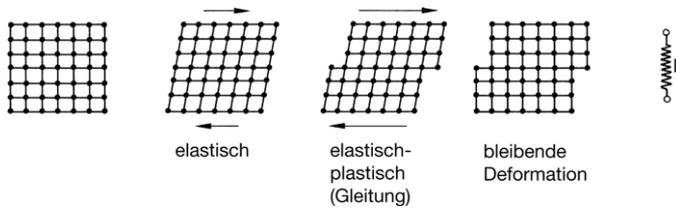


Bild 6.1 Formänderungen des Metallgitters (schematisch), elastisches Verhalten gekennzeichnet durch eine Feder („Elastizitätsmodul“)

Man erkennt dabei das

- reine *energie-elastische* Verformungsverhalten (Bild 6.2a) mit kleinem „Elastizitätsmodul“
- *entropie-elastische* Verformungsverhalten (Bild 6.2b) im *thermoelastischen* Bereich, in dem die zwischenmolekularen Kräfte weitgehend gelockert sind und der „Elastizitätsmodul“ um mehrere Größenordnungen abgenommen hat. Diese Art der Verformung ist zeitabhängig und ermöglicht große Formänderung bei kleinen Kräften. Die Verformungen werden bei der *Warmumformung* unter Aufrechterhaltung der Formungskraft „eingefroren“; bei der Wiedererwärmung erfolgt weitgehende *Rückdeformation*, die bei warmumgeformten Teilen unerwünscht ist, bei *Schrumpfsystemen* (Schrumpffolien, Schrumpfschläuchen) jedoch technisch ausgenutzt wird.
- Oberhalb der Glasübergangstemperatur T_g oder der Kristallitschmelztemperatur T_m überwiegt das *quasi-viskose* Verhalten, bei dem Kettengleitungen und Lösungen der mechanischen Verschlingungen erfolgen, insbesondere durch Scherbeanspruchungen beim *Urformen*, wie Spritzgießen und Extrudieren (Bild 6.2c). Die hohe Viskosität der Schmelze tritt auf infolge Behinderung der Kettenbeweglichkeit der Makromoleküle.

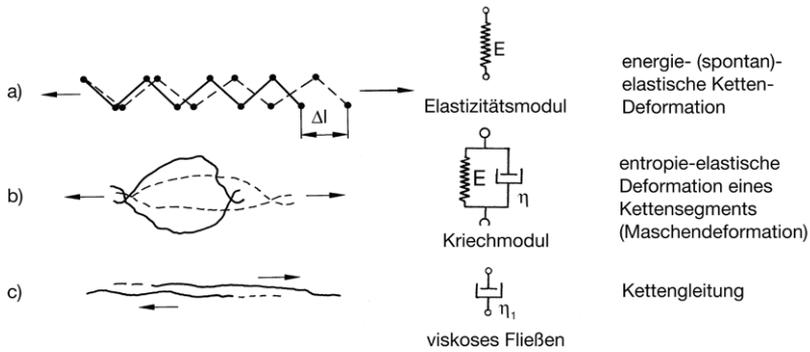


Bild 6.2 Formänderungen bei thermoplastischen Kunststoffen

- a) energie-elastische Kettendeformation bei Gebrauchstemperatur Verformungsverhalten gekennzeichnet durch Feder („Elastizitätsmodul“)
- b) *entropie-elastische* Kettendeformation im thermoelastischen Bereich Verformungsverhalten gekennzeichnet durch Feder/Dämpfer-System („Kriechmodul“)
- c) *Kettengleitungen* im thermoplastischen Bereich, Lösen der mechanischen Verschlingungen (*viskoses Verhalten*), Verformungsverhalten gekennzeichnet durch *Dämpfer*

Einzelne thermoplastische Kunststoffe (PP, PA, PE, lineare Polyester) lassen sich *verstrecken*, wobei sich die Kettenmoleküle bzw. Kristallitbereiche in Beanspruchungsrichtung orientieren. Dabei wirkt sich die hohe Bindungsfestigkeit der Hauptvalenzen aus, was zu einer sehr hohen *Verfestigung* in Beanspruchungsrichtung führt und bei der Herstellung von Fasern und Bändern ausgenutzt wird.

Duroplaste sind durch fehlende innere Gleitmöglichkeiten wegen der räumlichen, chemischen Vernetzung grundsätzlich spröder als Thermoplaste. Bei erhöhter Temperatur tritt nur eine geringe Reduzierung des Elastizitätsmoduls auf, aber kein thermoelastischer und kein thermoplastischer Zustand.

Das innere Federungs- und Verformungsverhalten verleiht den Kunststoffen eine hohe Dämpfung, führt dadurch aber auch zu einer Erwärmung bei hohen Belastungsgeschwindigkeiten und hohen Beanspruchungsfrequenzen.

Bei *verstärkten Kunststoffen* ändert sich das mechanische Verhalten entsprechend Menge und Art der Füll- und Verstärkungstoffe.

Die genannten Besonderheiten der Kunststoffeigenschaften gegenüber anderen Werkstoffen und Werkstoffgruppen sind in Teil III, Prüfung von Kunststoffen, Kennwerte ausführlich behandelt.

■ 6.2 Thermisches Verhalten

Um die Besonderheiten des thermischen Verhaltens von Kunststoffen zu verstehen, ist es zweckmäßig, verschiedene thermische Zustände und deren Grenztemperaturen in *Bereichsdiagrammen* (Bild 6.3) gegenüber zu stellen. Man erkennt bei Wasser den eindeutigen Übergang fest/flüssig und flüssig/dampfförmig. Bei *amorphen Thermoplasten* (PS, PC, PVC-U, PVC-P) zeigen sich *Glasübergangstemperatur* T_g , bzw. ein Glasübergangstemperaturbereich und der Übergang vom thermoelastischen in den thermoplastischen Bereich (Bild 6.4). Bei *teilkristallinen Thermoplasten* (POM) erkennt man die *Glasübergangstemperatur* T_g der amorphen Anteile und die *Kristallitschmelztemperatur* T_m der kristallinen Bereiche als Übergang zum thermoplastischen Zustand (Bild 6.5). *Duroplaste* lassen das Bestehen des festen Zustands bis zur *Zersetzungstemperatur* erkennen (Bild 6.6). Zur Bestimmung der *Temperaturgrenzen* siehe Abschnitt 21.4 und DIN 7724.

Alle Kunststoffe haben *Zersetzungstemperaturen* (T_z), die nicht nur temperatur- und zeitabhängig sind sondern auch von den Umgebungsbedingungen (Sauerstoffeinwirkung oder Luftabschluss) abhängen.

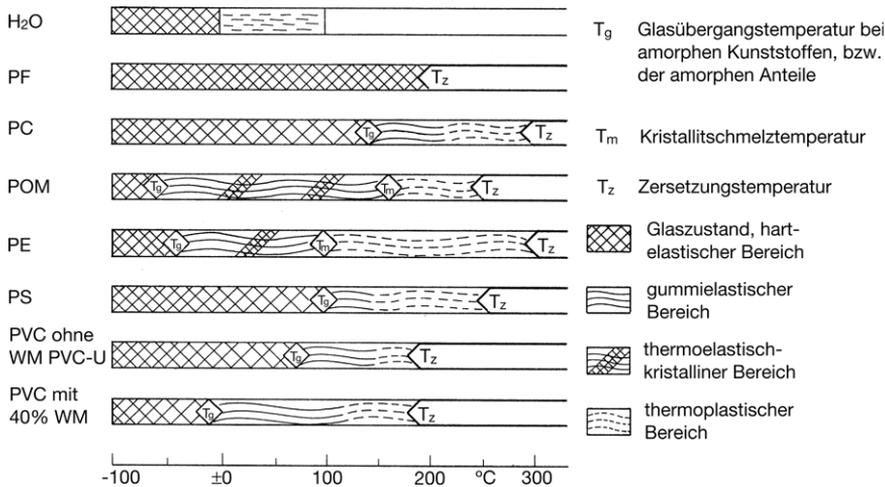


Bild 6.3 Beispiele für Zustandsbereiche verschiedener Stoffe

Thermoplaste verspröden bei tiefen Temperaturen bei kunststoffspezifischen Temperaturen. Bei steigenden Temperaturen tritt zunächst ein stetiger Abfall des Elastizitätsmoduls mit Abnahme der Steifigkeit auf. Bei *amorphen* Thermoplasten folgt dann in einem Temperaturbereich die sog. Erweichung, d. h. der Übergang in den *thermoelastischen*, quasi-gummielastischen Bereich. In diesem können mit kleinen Umformkräften große Formänderungen vorgenommen und durch Abkühlen einge-

froren werden (Warmumformung). Bei weiterer Erwärmung wird die thermische Beweglichkeit der Kettenmoleküle so groß, dass im *thermoplastischen* Zustand die Ketten gegeneinander abgleiten können; in diesem Bereich erfolgen *Urformung* und *Schweißen*. Dieser Bereich wird durch die *Zersetzungstemperatur* T_z begrenzt (Bild 6.4). Bei *teilkristallinen* Thermoplasten liegen im Gebrauchsbereich erweichte, amorphe und steife, kristalline Bereiche vor. Bei steigender Temperatur ist eine Umformung erst dann möglich, wenn die kristallinen Bereiche in einem engen Temperaturbereich (Bild 6.5) bei Erreichen der *Kristallitschmelztemperatur* T_m aufzuschmelzen beginnen. Kurz darauf ist der *thermoplastische Zustand* zum *Urformen* und *Schweißen* erreicht. Er ist gekennzeichnet durch Transparentwerden des vorher opaken Kunststoffes. Dieser Bereich wird auch bei den teilkristallinen Thermoplasten durch die *Zersetzungstemperatur* T_z begrenzt.

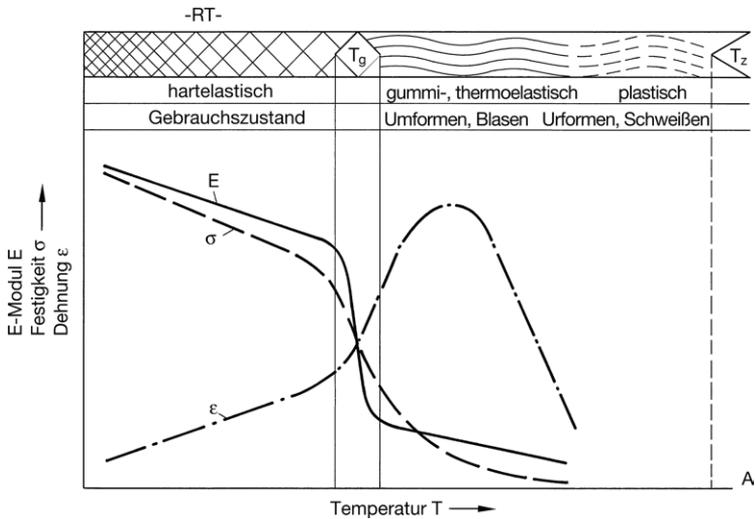


Bild 6.4 Zustandsbereiche für amorphe Thermoplaste

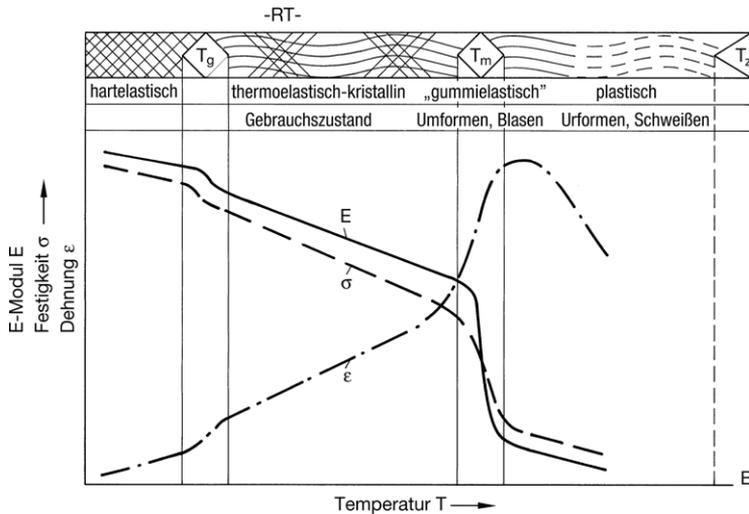


Bild 6.5 Zustandsbereiche für teilkristalline Thermoplaste

Duroplaste sind in ihrem gesamten Temperaturbereich spröde; sie erweichen nicht und schmelzen nicht; sie sind daher auch nicht *umform-* und *schweißbar*. Kurz unter der *Zersetzungstemperatur* T_z tritt nur eine geringfügige Verminderung der Steifigkeit auf (Bild 6.6).

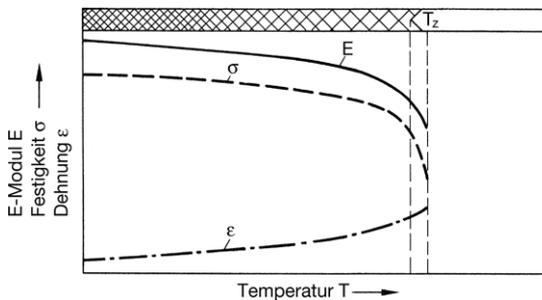


Bild 6.6 Zustandsbereiche für Duroplaste

Die Kunststoffe erleiden strukturbedingt bei Temperaturerhöhung eine verhältnismäßig große Volumenausdehnung, was sich auch in einer entsprechenden *linearen Wärmeausdehnung* (Abschnitt 22.5) zeigt. Bei verstärkten Kunststoffen reduziert sich die Wärmeausdehnung je nach Art und Anteil der Füll- und Verstärkungstoffe. Wegen der in Kunststoffen fehlenden freien Elektronen haben Kunststoffe eine *niedrigere Wärmeleitung* und sind daher als thermisches Isoliermaterial geeignet. Besonders ausgeprägt ist die thermische Isolierwirkung bei Schaumstoffen wegen der zusätzlich vorhandenen Luft- oder Gaseinschlüsse.

■ 6.3 Elektrisches Verhalten

Da die Kunststoffe wegen fehlender freier Elektronen ein günstiges elektrisches Isolierverhalten aufweisen, werden sie vielfach in der Elektrotechnik und Elektronik eingesetzt, z.B. als isolierende Gehäuse, Steckverbindungen, Substrate, Ummantelungen von integrierten Schaltkreisen. Nachstehende elektrischen Eigenschaften sind von großer Bedeutung:

- Durchschlagfestigkeit (Abschnitt 24.1.1)
- Oberflächenwiderstand (Abschnitt 24.1.2)
- Durchgangswiderstand (Abschnitt 24.1.3)
- dielektrische Eigenschaftswerte (Abschnitt 24.2)
- Kriechwegbildung (Abschnitt 24.3).

■ 6.4 Verhalten gegen Umwelteinflüsse

Die meisten Kunststoffe, insbesondere Duroplaste, zeigen gute chemische Beständigkeit. Ein besonderes Problem stellt die Alterung von Thermoplasten und Elastomeren dar. Es handelt sich dabei um komplexe Vorgänge physikalischer und chemischer Art im Molekulargefüge in Abhängigkeit insbesondere von der Zeit, bei Einwirkung von Luftsauerstoff.

Die Widerstandsfähigkeit von Kunststoffen gegen Umwelteinflüsse kann betrachtet werden unter dem Gesichtspunkt der Einwirkung von gasförmigen, flüssigen oder festen chemischen Agenzien (Kap. 28). Ferner spielen das *Lösungs-* und *Quellverhalten*, die *Wasseraufnahme* (Kap. 26) und das *Verhalten gegenüber Strahlung* (Wärme-, UV- und energiereiche Strahlung, siehe Abschnitt 31.5) eine wichtige Rolle.

Ein besonderes Problem ist dabei das gleichzeitige Zusammenwirken verschiedener Einflüsse zusammen mit vorhandenen Spannungen als Eigen- und/oder Betriebsspannungen, was zur *Spannungsrisssbildung ESC* (Abschnitt 31.2.2) führen kann.

Das Verhalten der Kunststoffe gegen diese Einflüsse hängt vom Aufbau des Kunststoffs und vom Medium ab. Besonders auffallend ist die starke Wirkung bestimmter organischer Lösemittel auf gewisse Kunststoffe; dabei gilt „Ähnliches löst Ähnliches“, z.B. chlorhaltige Lösemittel bei PVC oder Benzol bei PS. Allerdings kann dieses Löseverhalten auch zum Kleben mit *Lösemittelklebstoffen* verwendet werden (aber: ggf. Gefahr der Spannungsrisssbildung beachten!).

In der Praxis spielt besonders das *Technoklima* (Temperatur, Feuchte, Medium, Luftverunreinigungen wie NO_x , SO_x usw.) die ausschlaggebende Rolle. Bei den Beschreibungen der einzelnen Kunststoffe im Teil II sind jeweils besondere Angaben zur Beständigkeit gemacht, allgemeinere Angaben in Kapitel 28.

■ 6.5 Wasseraufnahme

Die Aufnahme von Feuchte aus der umgebenden Luft oder bei Wasserlagerung (*Konditionieren*) ist bei den einzelnen Kunststoffen sehr unterschiedlich. Sehr wenig Feuchte nehmen z.B. *unpolare* Kunststoffe wie PE, PP, PS, PTFE auf, etwas mehr *polare* Kunststoffe wie PUR, Celluloseester und in hohem Maße die Polyamide PA (Abschnitt 10.6 und 26). Bei den Polyamiden ist es üblich, Formteile nach der Herstellung durch *Konditionieren* (Abschnitt 26.3) auf einen bestimmten Feuchtegehalt einzustellen. Bei den Polyamiden werden die Eigenschaften und das Volumen durch den Feuchtegehalt reversibel beeinflusst. Es ist zu empfehlen, vor der Verarbeitung das Granulat zu trocknen, um Dampfbildung bei der Verarbeitung zu vermeiden. Bei duroplastischen Kunststoffen mit organischen Füllstoffen, die zur Feuchteaufnahme neigen, kann nach spangebender Bearbeitung Feuchte in die Formteile eindringen, was Auswirkungen besonders auf die elektrischen Eigenschaften hat.

■ 6.6 Permeation

Für die Verwendung von Kunststoffen in der Verpackungsindustrie, z. B. als Folien und Flaschen, ist die Durchlässigkeit gegenüber Gasen und Wasserdampf von großer Bedeutung. Sie ist außer vom Kunststoff auch abhängig von der Dicke der Folie und der Temperatur (siehe auch Abschnitt 26). Oft müssen Verbundsysteme eingesetzt werden.

■ 6.7 Reibung und Verschleiß

Das Reibungsverhalten von Kunststoffen ist sehr komplex und ist gekennzeichnet durch das Zusammenwirken von *Werkstoffpaarung* (Gleitpartner), *Oberflächenbeschaffenheit*, *Schmiermittel*, *spezifischer Belastung* (Flächenpressung) und *Gleitge-*

schwindigkeit. Von überwiegender Bedeutung bei Lagern ist die Werkstoffpaarung (Kunststoff/gehärteter Stahl oder Kunststoff/Kunststoff), wobei dann die Wärmeabfuhr, z. B. durch den metallischen Partner eine wesentliche Rolle spielt. *Reibungskoeffizienten* gelten immer nur für ganz bestimmte, übliche und bewährte Werkstoffpaarungen unter ganz bestimmten Lauf- und Schmierbedingungen (Abschnitt 21.9). Dasselbe gilt entsprechend auch für das *Verschleißverhalten*.

7

Verarbeiten von Kunststoffen

Bei Kunststoffen sind Fertigungsverfahren möglich, die besonders für die Herstellung von *Massenteilen* bzw. *Endlosprofilen* geeignet sind. Eine Nacharbeit ist meist nicht erforderlich (siehe Abschnitt 7.1). Zur Verarbeitung von Kunststoffen werden spezielle Verarbeitungsmaschinen verwendet.

Je nach Anforderungen an die Enderzeugnisse gibt es nach der Formgebung noch eine Vielzahl von *Nach- und Weiterbearbeitungsverfahren* (Abschnitt 7.2 bis 7.6).

Die möglichen Ver- und Bearbeitungsverfahren richten sich nach der Kunststoffgruppe, d. h. ob es sich um Thermoplaste, Duroplaste oder Elastomere handelt. Besondere Bedingungen gelten für Faserverbundwerkstoffe (Kap. 13).

Neben den im Folgenden aufgeführten, üblichen Verarbeitungsverfahren für Kunststoffe gibt es noch spezielle Verfahren in verschiedenen technischen Bereichen, so z. B. zur Modellherstellung durch *Stereolithografie* oder *Rapid Prototyping*; in der Elektrotechnik zur *Drahtummantelung* und in der Elektronik z. B. *zum Aufbau von Widerständen*.

■ 7.1 Urformen

Unter *Urformen* versteht man die erstmalige Formgebung von Formteilen und Halbzeugen aus *pulverförmigen, granulatformigen, flüssigen* oder *besonders aufbereiteten Vorprodukten* (z. B. Prepregs, GMT).

7.1.1 Urformen von Thermoplasten

Bei den Urformverfahren für Thermoplaste handelt es sich um *reversible physikalische* Formgebungsprozesse. Dabei wird die Formmasse *aufgeschmolzen, geformt* und dann in den festen Zustand *abgekühlt*.

Formteile werden i. A. aus Granulaten durch *Spritzgießen* auf Schneckenspritzgießmaschinen (Bild 7.1) hergestellt. Im Zylinder der Schneckenspritzgießmaschine wird das thermoplastische Granulat aufgeschmolzen, die Schmelze homogenisiert und in das *Werkzeug* eingespritzt. Die *Werkzeugtemperatur* liegt bei *amorphen* Thermoplasten unterhalb der Glasübergangstemperatur T_g (siehe Abschnitt 6.2), damit nach dem Abkühlen ein formstabiles *Formteil* aus dem Werkzeug entnommen werden kann. Bei *teilkristallinen* Thermoplasten liegen die Werkzeugtemperaturen oberhalb der Glasübergangstemperatur T_g und unterhalb der Kristallitschmelztemperatur T_m (siehe Abschnitt 6.2); die Werkzeugtemperatur beeinflusst die Gefügeausbildung im Formteil. Nähere Angaben für Verarbeitungsbedingungen beim Spritzgießen finden sich bei den entsprechenden Kunststoffen im Teil II. Zur Herstellung einwandfreier Formteile empfiehlt sich die *Prozessüberwachung*; dabei werden die *Prozessparameter*, die die *Qualität der Spritzgussteile* besonders beeinflussen (Massetemperatur, Werkzeugtemperatur, Druckverlauf im Werkzeug), laufend überwacht.

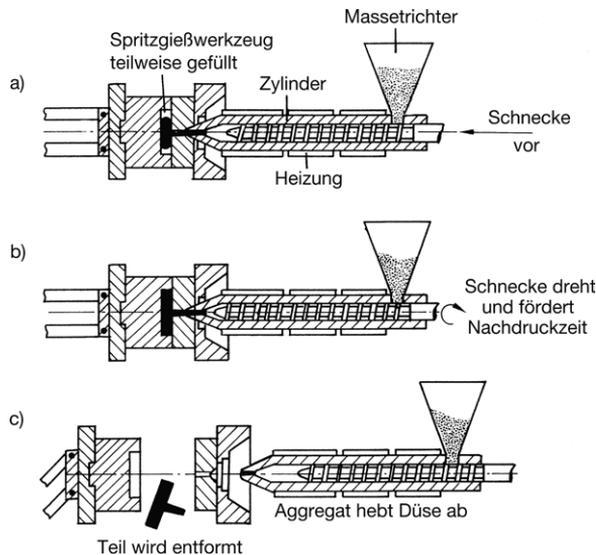


Bild 7.1 Arbeitsweise der Schneckenspritzgießmaschine

- Einspritzen (axiale Schneckenbewegung)
- Werkzeug gefüllt, Formteil kühlt ab, Schnecke rotiert, Plastifizierung beginnt
- „Erkaltetes“ Formteil wird entformt, vor der Schnecke steht neue Schmelze für nächstes Formteil bereit

Als Sonderverfahren des Spritzgießens sind noch zu erwähnen: *Zweikomponentenspritzgießen* (z.B. zur Kombination von harten und weichen Kunststoffen), *Kernausschmelzverfahren* (zur Herstellung von Formteilen mit komplizierten Innenkonturen), *Gasinnendrucktechnik* GIT, *Gasaußendrucktechnik* EGM – External Gas

Moulding – (für anspruchsvolle, flächige Bauteile), *Hinterspritztechnik* (von Textilien und Folien im Austausch gegen die Kaschiertechnik) und das *Thermoplastschaumspritzgießen* TSG (Kap. 15). Beim *MuCell®*-Verfahren (nach Trexel) werden technische, gewichtsreduzierte, verzugsarme Spritzgussteile mit hoher Kantenpräzision mit einer kompakten Außenschicht und einer Mikroschaumstruktur von 5 µm bis 50 µm im Innern gefertigt; außerdem wird die Zykluszeit reduziert. Ein Gas wird in der Schmelze gelöst und bei der Werkzeugfüllung entsteht eine sehr gleichmäßige *Mikrozellenstruktur*.

Als spezielles Gebiet beim Spritzgießen hat sich das *Mikrospritzgießen* eingeführt. Es werden dabei Mikroteile hergestellt mit kleinsten Schussgewichten im Milligrammbereich bei höchster Präzision.

Exjection®, eine Kombination aus Spritzgießen und Extrusion ermöglicht die Herstellung langer und dünner Formteile bei geringer Schließkraft und niedrigen Verarbeitungsdrücken, wobei trotzdem funktionelle Elemente (Schnapphaken, Befestigungselemente) angeformt werden können.

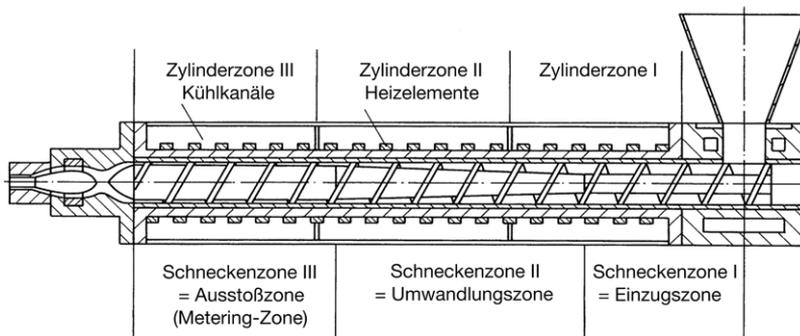


Bild 7.2 Extruder (Schneckenmaschine)

Beim Spritzgießen können durch Aufbringen eines Funktionspolymers (Modifikator) in das Werkzeug Formteiloberflächen aktiviert werden, damit sie für weitere Behandlungen, wie z. B. Kleben oder Bedrucken, nicht mehr nachträglich behandelt werden müssen. Dieses Verfahren nennt sich *prozessorientierte Oberflächenbehandlung* (oberflächenreaktives Spritzgießen der TU Chemnitz).

Halbzeuge werden auf *Extrudern* (Schneckenmaschinen Bild 7.2) hergestellt. Dabei wird die homogene Schmelze kontinuierlich durch eine Profildüse ausgedrückt und das entstehende Profil nachfolgend kalibriert und abgekühlt. Ergänzende Verfahren beim Extrudieren sind das *Hohlkörperblasen* (Bild 7.3) zur Herstellung von Hohlkörpern ohne Kern und das *Schlauchfolienblasen* (Bild 7.4) zur Herstellung von dünnen Folien. Durch *Coextrusion* werden *Verbundfolien* oder *Verbundhohlkörper* mit mehreren Kunststoffschichten für Sonderzwecke hergestellt. Zum Recyc-