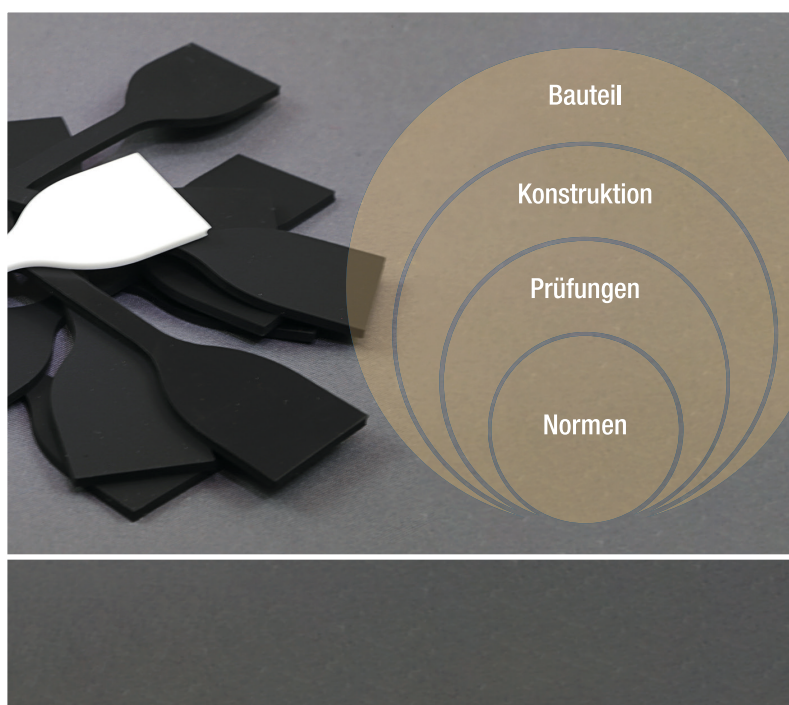


Erwin Baur
Günther Harsch
Martin Moneke

Werkstoff-Führer Kunststoffe

Eigenschaften – Prüfungen – Kennwerte



11., aktualisierte Auflage

HANSER



Bleiben Sie auf dem Laufenden!

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

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

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 härtbarer 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, härtbarer 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).

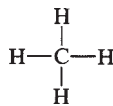
Silicone sind ebenfalls hochmolekulare Verbindungen mit Siliziumketten und organischen Seitengruppen. Sie kommen vor als hochvernetzte Duroplaste (Abschnitt 12.5) oder Elastomere (Abschnitt 14.1).

■ 1.2 Besonderheiten des Kohlenstoffatoms

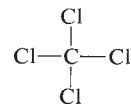
Ein Kohlenstoffatom kann mit allen vier Wertigkeiten Bindungen eingehen (Elektronenpaarbindung), z. B. mit Wasserstoff H (Kohlenwasserstoffe), Chlor Cl und anderen Elementen, sowie organischen Molekülresten.



Kohlenstoff C ist vierwertig

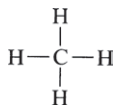


Methan

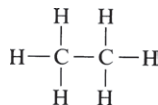


Tetrachlorkohlenstoff

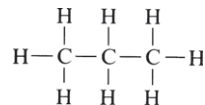
Kohlenstoff C kann mit sich selbst unter *Kettenbildung* Bindungen eingehen. Es entstehen dann *kettenförmige, aliphatische* Kohlenwasserstoffe $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ (Alkane). Solche *gesättigten* Kohlenwasserstoffe sind *reaktionsträge*.



Methan



Ethan

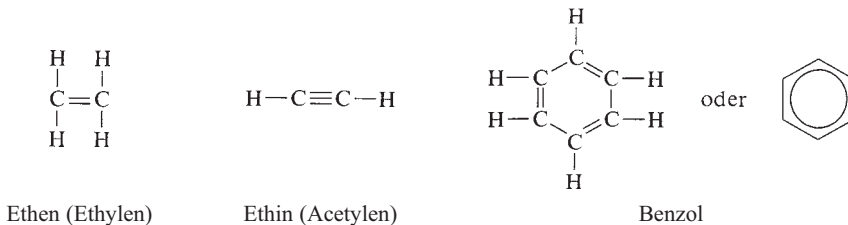


Propan usw.

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*.

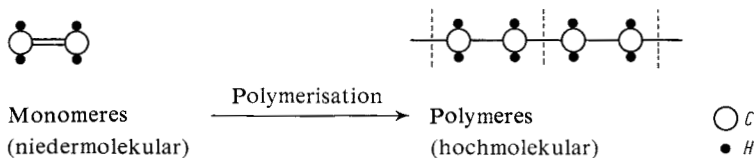
Kohlenstoffatome können mit sich selbst auch Mehrfachbindungen eingehen zu ungesättigten, reaktionsfreudigen Verbindungen mit Doppelbindungen (Alkene) oder Dreifachbindungen (Alkine).

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.

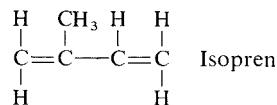
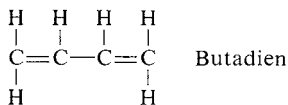
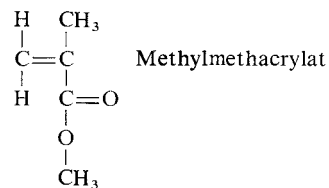
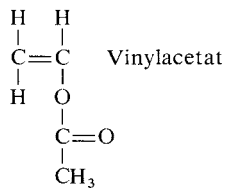
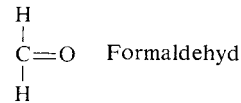
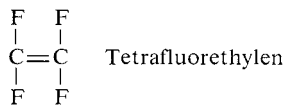
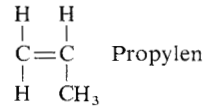
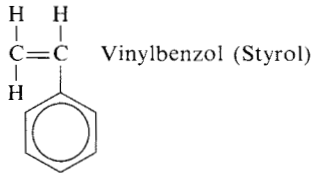
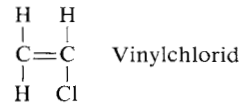
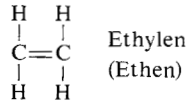
Bei den Molekülen mit Doppelbindungen, die sehr *reaktionsfreudig* sind, werden Reaktionen möglich, die zu *Makromolekülen* führen (Abschnitt 2.1).



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.

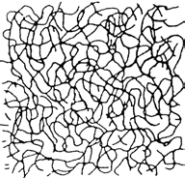
Wichtige Ausgangsstoffe (Monomere) für die Kunststoffherzeugung sind (Auswahl):



■ 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.

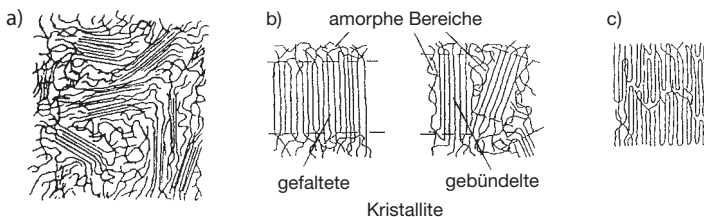
Amorphe Thermoplaste (Bild 1.1) bestehen aus langen Kettenmolekülen, die sich bei ihrer Bildung ineinander verschlingen und verfilzen. Die „gestreckte“, mittlere Kettenlänge beträgt ca. 10^{-10} mm bis 10^{-3} mm bei einer „Dicke der Kette“ von ca. $0,3 \cdot 10^{-6}$ mm.

**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 (Einfrieretemperatur), 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 Kristallitschmelztemperatur 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)

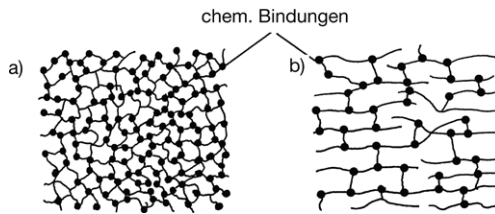


Bild 1.4 Molekülanordnung in eng vernetzten Duroplasten (schematisch)

- 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

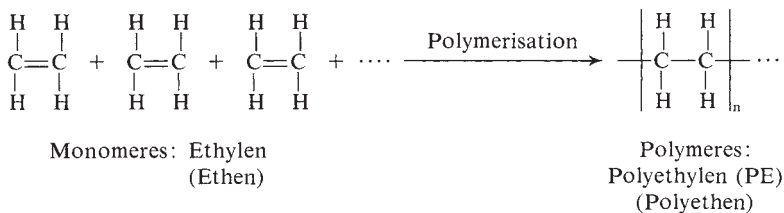
Bildung von Makromolekülen

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:

