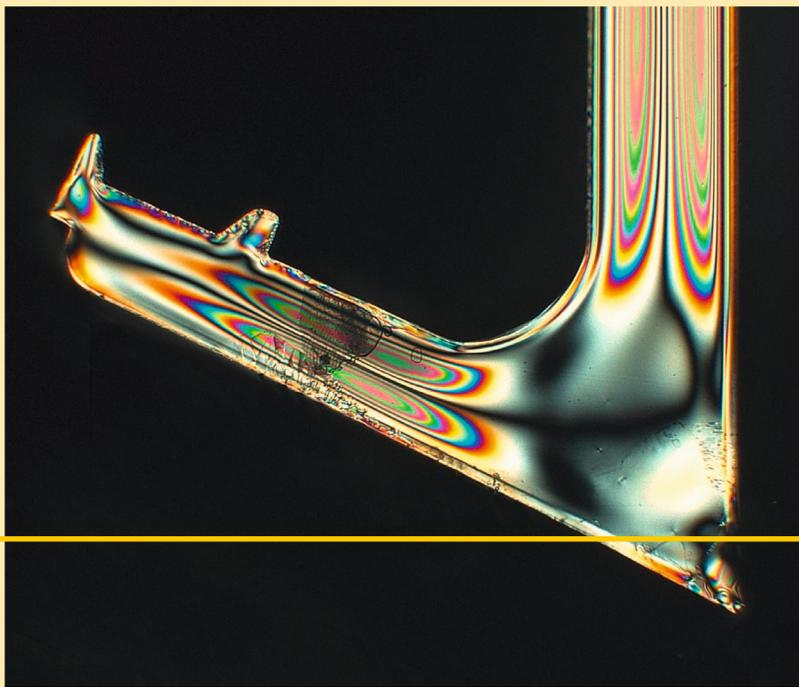


Rainer Dahlmann
Edmund Haberstroh
Georg Menges

Menges Werkstoffkunde Kunststoffe



7., vollständig neu bearbeitete 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

Rainer Dahmann
Edmund Haberstroh
Georg Menges

Menges Werkstoffkunde Kunststoffe

7., vollständig neu bearbeitete Auflage

HANSER

Die Autoren:

Prof. Dr. rer. nat. Rainer Dahlmann,
Institut für Kunststoffverarbeitung in Industrie und Handwerk an der RWTH Aachen

Prof. Dr.-Ing. Edmund Haberstroh,
Institut für Kunststoffverarbeitung in Industrie und Handwerk an der RWTH Aachen

Prof. Dr.-Ing. Georg Menges,
Institut für Kunststoffverarbeitung in Industrie und Handwerk an der RWTH Aachen



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.

© 2022 Carl Hanser Verlag München
www.hanser-fachbuch.de
Herstellung: Der Buchmacher, Arthur Lenner, Windach
Coverconcept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München
Coverrealisierung: Max Kostopoulos
Satz: Eberl & Koesel Studio GmbH, Krugzell, Germany
Druck und Bindung: CPI books GmbH, Leck
Printed in Germany

ISBN: 978-3-446-45801-7
E-Book-ISBN: 978-3-446-46086-7

Vorwort zur 7. Auflage

Die vorliegende Auflage der „Menges Werkstoffkunde Kunststoffe“ erscheint wenige Monate, nachdem Georg Menges im Alter von 97 Jahren von uns gegangen ist. Er hatte den Lehrstuhl für Kunststoffverarbeitung der RWTH Aachen 1965 übernommen. 1970 erschien im Verlag de Gruyter (Sammlung Göschen) ein kleinformatiges Büchlein von 95 Seiten mit dem Titel „Werkstoffkunde der Kunststoffe“, das zum Gebrauch in der Vorlesung konzipiert war. In diesem Jahr wurde in der Fakultät für Maschinenwesen der RWTH Aachen die Studienrichtung Kunststofftechnik ins Leben gerufen. 1979 entschloss sich der Hanser Verlag zur Veröffentlichung der ersten Auflage des vorliegenden Buchs. Georg Menges trat 1989 in den Ruhestand und blieb auch in der Weiterentwicklung dieses Buches aktiv. Gemäß dem Grundsatz, dass es zwischen Forschung, Lehre und industrieller Praxis keine Brüche und keine Lücken geben darf, waren Bücher über Verarbeitung und über Werkstoffkunde der Kunststoffe, die in gleichem Maße im Studium wie in der Industrie Verwendung finden können, für ihn immer ein Anliegen gewesen.

Vor nunmehr 10 Jahren erschien die 6. Auflage des vorliegenden Buches, die er gemeinsam mit seinen Schülern und Nachfolgern Michaeli, Haberstroh und Schmachtenberg erarbeitet hatte. Dabei wurde gemäß dem Vorschlag des Verlags sein Name als Teil des Titels eingefügt: „Menges Werkstoffkunde Kunststoffe“.

Wie sich in dem Zeitraum von über 50 Jahren das Fachgebiet entwickelt und gewandelt hat, so hat sich dieses Buch kontinuierlich verbreitert, vertieft und gewandelt. Für diese 7. Auflage wurden nahezu alle Kapitel des Buches neu strukturiert und zu großen Teilen vollständig überarbeitet, ohne dass der Grundgedanke einer ganzheitlichen Betrachtung ignoriert wird. Im Gegenteil: Es wurden einige wichtige Themen als neue Akzente aufgenommen bzw. ausgedehnt. So wird das wichtige und aktuelle Themenfeld Kreislaufwirtschaft für Kunststoffe gleich im ersten Kapitel neu aufgegriffen, wobei auch dies mit der Grundeinstellung und Denkweise von Georg Menges konform ist: Er hat sich auch noch nach seiner Emeritierung im Jahre 1989 intensiv mit den Fragen des Recyclings von Kunststoffen beschäftigt und hierzu Vorträge, Artikel, Bücher und Patente erarbeitet, deren Passung zu den heutigen Problemstellungen bestechend ist.

Weiterhin erscheint in dieser Auflage nun das Thema Alterung als ein eigenständiges Kapitel, was es ermöglichte, die komplexen und werkstoffspezifischen Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge durch eine neue Struktur verständlich und zugänglich zu machen. Durch die Darstellung einiger üblicher Alterungsmechanismen aus der Praxis wird dabei bewusst ein zu tiefer Einstieg in chemische Prozesse vermieden.

Völlig neu wurde die Schadensanalyse an Kunststoffprodukten in dieses Buch aufgenommen, die aufgrund ihrer Methoden sehr nah an die Werkstoffkunde anknüpft. Zur Lösung komplexer Schadensfälle sind werkstoffkundliche Kenntnisse notwendig, aber nicht hinreichend. Dazu ist weiterhin Wissen aus der Verarbeitung, der Konstruktion und der Analytik nötig. Außerdem unterstützt bei Schadensanalysen eine systematische Methodik, die ebenfalls in Kapitel 14 vorgestellt wird.

Auch die übrigen Kapitel wurden einer grundlegenden Überarbeitung unterzogen, die das Ziel hatte, die werkstoffkundlichen Zusammenhänge bei Kunststoffen noch verständlicher zu machen, ohne die wahre Komplexität zu verdecken.

Die Herausgeber bedanken sich sehr herzlich bei den Mitarbeitern des Carl Hanser Verlags für die stets sehr entgegenkommende Unterstützung. Besonderer Dank gebührt Frau Ulrike Wittmann und nach der Staffelübergabe Herrn Dr. Mark Smith für die hilfreichen Diskussionen und praktischen Tipps, deren Ergebnisse in die aktuelle Auflage eingeflossen sind. Frau Melanie Lindwurm-Giordani danken wir sehr herzlich für die sehr gewissenhafte Durchsicht der Skripte und die gelungene Umsetzung von Verbesserungen.

Ein Buch dieses Umfangs und dieser Geschichte baut letztendlich auf beinahe unzählbar viele Personen, die auch schon durch Mitarbeit an früheren Auflagen zum Resultat dieser Auflage einen Beitrag geliefert haben. Einige wissenschaftliche Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter wurden mit der sachkundigen Durchsicht und Korrektur einzelner Abschnitte oder Kapitel betraut, was zum vorliegenden Ergebnis führte. Ihnen gilt unser besonderer Dank.

Dieses Buch wurde für Studierende und für Ingenieurinnen und Ingenieure in der Praxis verfasst. Das komplexe Werkstoffverhalten der Kunststoffe ist darin kompakt beschrieben, sodass dieses Buch die wichtigsten Grundlagen zur Beschreibung des Werkstoffverhaltens von Kunststoffen umfasst. Es soll insbesondere der jungen Generationen helfen, für technische Problemstellungen nachhaltige Lösungen durch den Einsatz von Kunststoffen zu schaffen.

R. Dahlmann

E. Haberstroh

Dieses Buch entstand unter Mitarbeit der folgenden wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des Instituts für Kunststoffverarbeitung in Industrie und Handwerk an der RWTH Aachen:

Dr. Petra Scheller-Brüninghaus und Daniela Brücker	Unterstützung bei der Koordinierung und beim Korrekturlesen
Dr.-Ing. Max Adamy	Kapitel 3
Sina Butting, M. Sc.	Kapitel 5
Hakan Çelik, M. Sc.	Kapitel 11
Maiko Ersch, M. Sc.	Kapitel 6
Dominik Foerges, M. Sc.	Kapitel 4
Thomas Gebhart, M. Sc.	Kapitel 7
Jonas Gerads, M. Sc.	Kapitel 10
Montgomery Jaritz, M. Sc.	Kapitel 1
Lara Kleines, M. Sc.	Kapitel 8
Simon Koch, M. Sc.	Kapitel 7
Maximilian Kramer, M. Sc.	Kapitel 9
Dipl.-Ing. Michèle Marson-Pahle	Kapitel 4
Jonas Müller, M. Sc.	Kapitel 7
Dr.-Ing. Jakob Onken	Kapitel 7
Nicolas Reinhardt, M. Sc.	Kapitel 2 und 13
Dr.-Ing. Marcel Spekowius	Kapitel 5
Dr. rer. nat. Sabine Standfuß-Holthausen	Kapitel 13
Stefan Wilski, M. Sc.	Kapitel 12
Jens Wipperfürth, M. Sc.	Kapitel 2 und 6
Sezer Yildiz, M. Sc.	Kapitel 2
Christoph Zekorn	Kapitel 14

Die Autoren



(Quelle: IKV)

Prof. Dr. rer. nat. Rainer Dahlmann

Prof. Dr. rer. nat. Rainer Dahlmann ist Professor an der RWTH Aachen und Wissenschaftlicher Direktor am Institut für Kunststoffverarbeitung in Industrie und Handwerk an der RWTH Aachen (IKV). Er lehrt unter anderem das Fach Werkstoffkunde der Kunststoffe. Darüber hinaus leitet er das Zentrum für Kunststoffanalyse und -prüfung (KAP) am IKV.



(Quelle: privat)

Prof. Dr.-Ing. Edmund Haberstroh

Prof. em. Dr.-Ing. Edmund Haberstroh war ab 1995 Inhaber der Professur für Kautschuktechnologie am Institut für Kunststoffverarbeitung in Industrie und Handwerk an der RWTH Aachen (IKV). Er lehrte unter anderem das Fach Werkstoffkunde der Kunststoffe und ist seit 2014 emeritiert.



(Quelle: IKV)

Prof. Dr.-Ing. Georg Menges

Prof. Dr.-Ing. Georg Menges war bis 1989 Leiter des Instituts für Kunststoffverarbeitung in Industrie und Handwerk an der RWTH Aachen. Er legte den Grundstein für dieses Buch. Georg Menges ist im Februar 2021 verstorben.

Inhalt

Vorwort zur 7. Auflage	V
Die Autoren	IX
1 Die Werkstoffgruppe der Kunststoffe	1
1.1 Geschichte der Kunststoffe	2
1.2 Die Eigenschaften von Kunststoffen	5
1.3 Einsatzgebiete von Kunststoffen	10
1.4 Die Kunststoffindustrie	11
1.5 Kunststoffe im Kreislauf	13
1.5.1 Kreislaufwirtschaft	14
1.5.2 Kunststoffverwertung	15
1.5.3 Biokunststoffe und alternative Rohstoffe	22
1.6 Kunststofftechnik	24
2 Bildung von Makromolekülen und Polymeren	27
2.1 Begriffsdefinitionen: Monomer, Makromolekül, Polymer, Kunststoff	27
2.2 Ausgangsstoffe zur Herstellung von Kunststoffen	31
2.3 Aufbau und Eigenschaften von Makromolekülen	35
2.3.1 Lineare Makromoleküle	35
2.3.2 Verzweigte Makromoleküle	35
2.3.3 Vernetzte Makromoleküle (Duroplaste, Elastomere)	36
2.4 Bildung und Herstellung von Polymeren	37
2.4.1 Vom Atom zum Molekül über kovalente Bindungen	37
2.4.2 Hauptvalenzbindungen	40

2.4.2.1	Kovalente Atombindung	40
2.4.2.2	Ionenbindung	42
2.4.3	Polymerisation über ungesättigte Bindungen (Kettenwachstumsreaktion)	43
2.4.3.1	Radikalische Polymerisation	43
2.4.3.2	Anionische Polymerisation	47
2.4.3.3	Kationische Polymerisation	48
2.4.3.4	Koordinative Polymerisation	50
2.4.4	Polyaddition und Polykondensation über reaktive Endgruppen (Stufenwachstumsreaktion)	50
2.4.5	Vernetzung	54
2.4.5.1	Vernetzungen über ungesättigte Bindungen	54
2.4.5.2	Vernetzung über reaktive Gruppen	54
2.4.5.3	Vernetzung über Strahlung oder Peroxide	56
2.4.6	Biopolymere	56
2.4.6.1	Produkte	57
2.4.6.2	Bandbreite der Biopolymere	57
2.4.6.3	Biopolymere natürlichen Ursprungs	58
2.4.7	Molmasse und Molmassenverteilung	60
2.4.7.1	Messung von Molmassen und Molmassen- verteilungen	65
2.4.8	Relevante technische Herstellungsverfahren	67
3	Polymere Strukturen	73
3.1	Wechselwirkungen von Makromolekülen	73
3.1.1	Dispersionskräfte	74
3.1.2	Dipolkräfte	75
3.1.3	Wasserstoffbrückenbindungen	76
3.1.4	Vergleich der Nebervalenzkräfte	77
3.2	Primärstruktur und Eigenschaften	78
3.2.1	Molekülordnung	78
3.2.2	Sterische Ordnung	79
3.2.3	Taktizität	79
3.2.4	Konfiguration der Doppelbindungen in der Kette	81
3.2.5	Verzweigungen	82

3.3	Sekundärstruktur und Eigenschaften	84
3.4	Supramolekulare Strukturen	90
3.4.1	Vernetzungen	90
3.4.2	Kristallisation	92
3.5	Besondere polymere Strukturen	93
3.5.1	Flüssigkristalline Kunststoffe (liquid crystalline polymers, LCP)	93
3.5.2	Polysalze (intrinsisch leitfähige Polymere)	94
3.6	Modifizierung der Eigenschaften	95
3.6.1	Copolymere	95
3.6.1.1	Eigenschaften ausgewählter Copolymere	97
3.6.1.2	Copolymere für die industrielle Anwendung	101
3.6.2	Polymerblends	102
3.6.2.1	Thermodynamisches Kriterium für verträgliche Polymerblends	103
3.6.2.2	Homogene Blends aus verträglichen Polymeren	106
3.6.2.3	Heterogene Blends aus begrenzt verträglichen Polymeren	106
3.6.2.4	Heterogene Blends aus Mehrphasengemischen	107
3.6.3	Modifizierungen durch Füllstoffe	109
3.6.3.1	Verarbeitungshilfsmittel	109
3.6.3.2	Gebrauchsfähigkeitsverlängernde Zuschlagstoffe ...	111
3.6.3.3	Flammschutzmittel	111
3.6.3.4	Färbende Zuschlagstoffe	111
3.6.3.5	Festigkeitserhöhende Zuschlagstoffe	111
3.6.3.6	Steifigkeitserhöhende Zuschlagstoffe	112
3.6.3.7	Festigkeit und Steifigkeit herabsetzende Zuschlagstoffe	113
3.6.3.8	Treibmittel	113
3.6.3.9	Nanofüllstoffe	114

4	Verhalten im Schmelzzustand	119
4.1	Viskose Kunststoffschmelzen unter stationärer Scherströmung	122
4.1.1	Abhängigkeit der Viskosität von der Schergeschwindigkeit	124
4.1.1.1	Mathematische Modellierung der Schergeschwindigkeitsabhängigkeit	126
4.1.2	Abhängigkeit der Viskosität von Temperatur und Druck	130
4.1.2.1	Temperaturabhängigkeit	130
4.1.3	Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt	136
4.1.4	Druckströmungen in einfachen Fließkanälen	138
4.1.5	Erwärmung infolge von Scherung	141
4.1.6	Schergeschwindigkeitsbereiche in Verarbeitungsprozessen	142
4.2	Überlagerung von Scher- und Dehnströmung	143
4.3	Viskoelastische Kunststoffschmelzen	146
4.3.1	Viskoelastische Eigenschaften und ihre Beschreibung	148
4.3.2	Normalspannungen in der Scherströmung	149
4.3.3	Die Deborah-Zahl	150
4.3.4	Bedeutung für die Verarbeitung	151
4.4	Polymere mit zeitlich veränderlichen Fließeigenschaften	155
4.4.1	Vernetzende Systeme	155
4.5	Messtechnik	158
4.5.1	Kapillarrheometer	160
4.5.2	MFR-Messgerät (Schmelze-Massefließrate)	162
4.5.3	Rotationsrheometer	164
4.5.3.1	Bauarten von Rotationsrheometern	165
4.5.3.2	Grundversuche mit Rotationsrheometern	166
4.5.3.3	Anwendungsbeispiel für den Schwingversuch	168
4.5.3.4	Viskositätsmessung mittels oszillierender Scherdeformation oder in stationärer Strömung	170
4.5.4	Bestimmung der Dehnviskosität	172
4.5.4.1	Messtechnik für uniaxiale Dehnung	172
4.5.4.2	Messtechnik für biaxiale Dehnung	174

5	Abkühlen aus der Schmelze und Entstehung von innerer Struktur	181
5.1	Einleitung	181
5.2	Erstarrung amorpher Thermoplaste	184
5.2.1	Molekülorientierungen	185
5.2.2	Berechnung der Orientierung	192
5.3	Erstarrung teilkristalliner Thermoplaste	193
5.3.1	Kristallstrukturen	195
5.3.2	Beschreibung des Kristallisationsprozesses	198
5.3.3	Berechnung des Keimbildungsprozesses	203
5.3.3.1	Ruhender Anteil der Gibbsenergie	207
5.3.3.2	Strömungsanteil der Gibbsenergie	209
5.3.4	Berechnung des Kristallwachstums	210
5.3.5	Berechnung des relativen Kristallisationsgrades	212
5.4	Gefügebeobachtungen	213
5.4.1	Lichtmikroskopie	214
5.4.2	Elektronenmikroskopie	220
5.4.3	Zerstörungsfreie Analyse	225
6	Mechanisches Verhalten von Kunststoffen	227
6.1	Beschreibung der mechanischen Spannung - elastische Konstanten und Kennwerte	228
6.1.1	Der Elastizitätsmodul (Dehnungsbeanspruchung)	228
6.1.2	Die Querkontraktion	229
6.1.3	Der Schubmodul (Scherungsbeanspruchung)	231
6.1.4	Der Kompressionsmodul (Kompressionsbeanspruchung)	233
6.1.5	Korrelationen der Moduln und Spannungstensor	233
6.2	Die Zustandsbereiche der Kunststoffe	235
6.2.1	Amorphe Thermoplaste	235
6.2.2	Teilkristalline Thermoplaste	236
6.2.3	Vernetzte Polymere (Duroplaste und Elastomere)	238
6.3	Das Verformungsverhalten fester Kunststoffe	240
6.3.1	Viskoelastische Eigenschaften und ihre Beschreibung	240

6.3.1.1	Mechanische Ersatzmodelle für die lineare Viskoelastizität	245
6.3.1.2	Modellierung der nichtlinearen Viskoelastizität	253
6.4	Richtungsabhängige Werkstoffeigenschaften	257
6.4.1	Orientierung der Makromoleküle	257
6.4.2	Gefüllte und verstärkte Kunststoffe	260
6.5	Bestimmung der mechanischen Eigenschaften viskoelastischer Kunststoffe	263
6.5.1	Die dynamisch-mechanische Analyse	263
6.5.2	Der Zugversuch	265
6.5.3	Der dehnungsgeregelte Zugversuch	266
6.5.4	Dehnungsmessung	268
6.5.5	Der Zeitstandzugversuch (Kriechversuch)	269
6.5.6	Der Relaxationsversuch	271
6.6	Zeitraffende Prüfung	274
7	Die mechanische Tragfähigkeit von Kunststoffprodukten	281
7.1	Das mikromechanische Verhalten von Kunststoffen unter Zugbeanspruchung	282
7.1.1	Kunststoffe im Dehnbereich bis zur kritischen Dehnung	282
7.1.1.1	Erklärungsansätze für die Bildung von Crazes	286
7.1.2	Kunststoffe im Dehnbereich oberhalb der kritischen Dehnung bis zum Bruch	289
7.1.3	Veränderung des mikromechanischen Verhaltens von Kunststoffen durch Additive und Füllstoffe	291
7.1.3.1	Niedermolekulare Additive	291
7.1.3.2	Weiche Füllstoffe	291
7.1.3.3	Harte Füllstoffe	293
7.2	Auslegung und Bemessung von Bauteilen aus unverstärkten Kunststoffen unter statischer Last	293
7.2.1	Grundsätzliches Vorgehen	294
7.2.2	Werkstoffabminderungsfaktoren	296
7.2.3	Dimensionierungskennwerte	300
7.2.4	Sicherheitsbeiwerte	301
7.2.5	Spannungsbezogene Vergleichshypothesen	302

7.3	Auslegung und Bemessung von Bauteilen aus unverstärkten Kunststoffen unter dynamischer Last	309
7.3.1	Zyklische Belastung	309
7.3.2	Stoßartige Belastung	315
7.4	Verhalten von Kunststoffprodukten bei Druckbelastung (Schalen, Platten, Stäbe)	323
7.4.1	Mathematische Herleitung der kritischen Stauchung	325
7.4.2	Schlankheitsgrade verschiedener Standardlastfälle	328
7.5	Die Tragfähigkeit von faserverstärkten Kunststoffen	330
7.5.1	Faserarten	331
7.5.2	Aufmachung von Verstärkungsfasern	333
7.5.3	Eigenschaften des Verbundes aus Matrix und Fasern	335
7.5.4	Tragfähigkeit kurzfaserverstärkter Kunststoffe	342
7.6	Reibung und Verschleiß	344
7.6.1	Reibung	344
7.6.2	Verschleiß	352
8	Thermische Eigenschaften und Analyse	359
8.1	Thermische Eigenschaften	359
8.1.1	Einsatztemperatur und Wärmeformbeständigkeit	360
8.1.2	Enthalpie und Wärmekapazität	361
8.1.3	Wärmeausdehnung	364
8.1.4	Wärme- und Temperaturleitfähigkeit	367
8.1.5	Wärmeeindringzahl	376
8.2	Thermische Analyse	377
8.2.1	Messung der Wärmeformbeständigkeit	378
8.2.2	Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC)	381
8.2.3	Thermomechanische Analyse (TMA)	389
8.2.4	Messung von Wärme- und Temperaturleitfähigkeit	392
8.2.5	Thermogravimetrische Analyse (TGA)	396

9	Elektrische Eigenschaften	401
9.1	Das elektrische Isolationsverhalten	402
9.1.1	Der elektrische Durchgangswiderstand	402
9.1.2	Der elektrische Oberflächenwiderstand	404
9.1.3	Einfluss langzeitiger elektrischer Beanspruchung	406
9.2	Kunststoffe in elektrischen Feldern	408
9.2.1	Dielektrisches Verhalten	408
9.2.1.1	Die relative Permittivität ϵ_r	408
9.2.1.2	Dielektrische Verluste	411
9.3	Weitere elektrische Eigenschaften von Kunststoffen	414
9.3.1	Elektrostatische Aufladung	414
9.3.2	Schirmdämpfung (engl.: Electro-Magnetic Interference (EMI))	415
9.3.3	Polymere mit speziellen elektrischen Eigenschaften	416
9.3.3.1	Intrinsisch leitfähige Polymere	416
9.3.3.2	Elektrete	419
9.3.3.3	Elektrooptische Polymere (OLED)	420
9.3.3.4	Elektorrheologische Flüssigkeiten	420
9.4	Magnetische Eigenschaften	422
9.4.1	Magnetisierbarkeit	423
9.4.2	Magnetische Resonanz	423
9.5	Messverfahren zur Bestimmung der elektrischen Eigenschaften	425
9.5.1	Bestimmung des Durchgangs- und Oberflächenwiderstandes	425
9.5.2	Bestimmung der Durchschlag- und Kriechstromfestigkeit	427
9.5.3	Bestimmung des dielektrischen Verhaltens	429
9.5.4	Bestimmung der elektrostatischen Aufladung	430
10	Optische Eigenschaften	433
10.1	Die Grundgesetzmäßigkeiten	433
10.1.1	Brechzahl	434
10.1.2	Wellenlängenabhängigkeit der Brechzahl (Dispersion des Lichts)	436
10.1.3	Der imaginäre Teil der Brechzahl	439
10.1.4	Die Totalreflexion	444
10.1.5	Doppelbrechung	445

10.2	Farbe, Glanz und Trübung	447
10.3	Einfärben von Kunststoffen	450
10.4	Die Anwendung der Infrarotstrahlung in der Kunststoffindustrie	455
10.4.1	Aufheizung durch Infrarotstrahlung	455
10.4.2	Kunststoffschweißen mittels Infrarotstrahlung	457
10.4.3	Infrarotspektroskopie	458
10.4.4	Berührungslose Temperaturmessung von Kunststoffoberflächen	461
10.5	Lichtstreuung in Mehrphasenkunststoffen	462
11	Akustische Eigenschaften	465
11.1	Grundlagen der Akustik	466
11.2	Schallausbreitung und -übertragung in polymeren Werkstoffen	471
11.3	Dämmung und Dämpfung zur Reduktion von Vibration und Lärm	476
11.4	Experimentelle und numerische Methoden der technischen Akustik ..	479
11.4.1	Messung akustischer Eigenschaften	479
11.4.2	Numerische Methoden zur Beschreibung akustischer Eigenschaften	482
12	Stofftransportvorgänge	485
12.1	Physikalische Beschreibung	487
12.1.1	Adsorption	488
12.1.2	Absorption	488
12.1.3	Diffusion	489
12.1.4	Desorption	490
12.1.5	Gesamter Permeationsvorgang	490
12.2	Temperaturabhängigkeit des Stofftransports	492
12.3	Permeationsbestimmende Eigenschaften der Polymere	495
12.3.1	Elastomere	496
12.3.2	Duroplaste	496
12.3.3	Thermoplaste	497
12.3.3.1	Kristallinität	497
12.3.3.2	Orientierung der Polymerketten	498
12.4	Abschätzung permeationsbestimmender Koeffizienten	499

12.4.1	Löslichkeitskoeffizient	499
12.4.2	Diffusionskoeffizient	500
12.5	Permeation durch Kunststoffe	501
12.5.1	Sorption und Diffusion von Wasser durch Kunststoffe	503
12.6	Maßnahmen zur Permeationsminderung	504
12.6.1	Mehrschichtige Verbundsysteme	505
12.6.2	Kunststofffolien	506
12.6.3	Kunststoff-Hohlkörper	507
12.7	Verfahren zur Messung von Permeationsgrößen	510
12.7.1	Volumetrisches Verfahren nach DIN 53380-1 Teil 1	511
12.7.2	Manometrisches Verfahren nach DIN 53380-2 Teil 2	511
12.7.3	Gravimetrisches Verfahren	512
12.7.4	Massenspektroskopisches Verfahren	512
12.7.5	Gaschromatografisches Verfahren	513
12.7.6	O ₂ -spezifisches Trägergasverfahren nach DIN 53380-3 Teil 3 ..	513
12.7.7	O ₂ -Fluoreszenzverfahren	515
12.7.8	CO ₂ -spezifisches Infrarotabsorptionsverfahren nach DIN 53380-4 Teil 4	515
13	Die Alterung von Kunststoffen	519
13.1	Alterungserscheinungen an Kunststoffen	519
13.2	Die Bandbreite des Begriffs „Alterung“	521
13.2.1	Innere und äußere Ursachen der Alterung	522
13.2.2	Kunststoffalterung durch die Beanspruchung von außen	523
13.2.3	Die Überlagerung von Beanspruchungen: Lastkollektive	525
13.3	Mechanismen gängiger Alterungsprozesse	527
13.3.1	Die (thermo-)oxidative Alterung	527
13.3.2	Das strahleninduzierte Alterungsverhalten	531
13.3.3	Die hydrolytische Zersetzung	532
13.3.4	Die Entstehung von Spannungsrissen	537
13.4	Abhilfe- bzw. Vorbeugemaßnahmen zum Entschleunigen von Alterungsprozessen	541
13.4.1	Antioxidantien	542
13.4.2	Lichtschutzmittel	544

13.4.3 Metalldesaktivatoren	545
13.4.4 Biostabilisatoren	546
13.5 Beabsichtigte Alterungsvorgänge	546
13.5.1 Biologisch abbaubare Kunststoffe	547
13.5.2 Resorbierbare Kunststoffe in der Medizintechnik	548
13.6 Beschleunigte Alterung zur Vorhersage des Langzeitverhaltens	550
13.7 Biopolymere fossilen Ursprungs mit der Eigenschaft biologischer Abbaubarkeit	553
13.7.1 Polyester	553
13.7.2 Polyesteramide	554
14 Schadensanalyse an Kunststoffprodukten	557
14.1 Definition der Begriffe Fehler und Schaden	559
14.2 Durchführung von Schadensanalysen	560
14.2.1 Erfassung und Dokumentation des Schadensbildes	561
14.2.2 Erfassung des Schadensumfeldes	562
14.2.3 Entwicklung von Schadensthesen	566
14.2.4 Festlegung des Prüfplans	567
14.2.5 Durchführung instrumenteller Analysen	568
14.2.6 Benennung von Einflüssen, Ursachen und Abhilfemaßnahmen	569
14.2.7 Praxis der Schadensanalyse	569
Sachverzeichnis	587

1

Die Werkstoffgruppe der Kunststoffe

Die Welt der Technik umfasst Elemente von unterschiedlicher Art: Maschinen, Geräte, Computer, Fahrzeuge und viele mehr. Das Technischelement Werkstoffe gilt für Nichtspezialisten meist als notwendig, aber unspektakulär. Unter den Werkstoffen wiederum werden die Kunststoffe – allgemeiner gesagt die Polymerwerkstoffe – noch dazu häufig als problembehaftet angesehen. Eine genauere Betrachtung der Polymerwerkstoffe, deren Verarbeitung und der Produkte zeigt, dass sie **die** Werkstoffe des 20. und 21. Jahrhunderts sind, und dafür gibt es eine Fülle von Gründen. In diesem Einführungskapitel werden die wesentlichen Aspekte der heutigen Bedeutung von Polymerwerkstoffen, der Leistungen der Kunststofftechnik wie auch der Umweltproblematik bei der Nutzung von Kunststoffen sowie die Entwicklungsgeschichte dieser Werkstoffgruppe in kurzer Form aufgezeigt. In den nachfolgenden Kapiteln sollen die Inhalte behandelt werden, die zur werkstoffkundlichen Beschreibung von Polymerwerkstoffen erforderlich sind. Dabei ist es im Rahmen dieses Buches nicht möglich, die Elastomere (Kautschuk und Gummi) sowie die Duroplaste detailliert zu behandeln. Es werden lediglich einige Hinweise gegeben.

Die isolierte Betrachtung einer einzelnen Werkstoffgruppe ist nicht immer der Weg, um deren Platz in der Welt der Technik richtig einzuschätzen. Kunststoffe lassen sich häufig erst im Zusammenwirken verschiedener Werkstoffgruppen bei wichtigen Endprodukten umfassend beurteilen. Das zeigt sich schon bei der vielfältigen Produktgruppe der Kabel für Elektrotechnik, Elektronik, Computer- und Informationstechnik. Ein Kabel besteht aus Kupfer oder Glas für den Leiter und aus Thermoplasten oder Elastomeren für die Isolation. Ein Beispiel aus der Medizin sind Injektionsflaschen und Spritzen, die aus Glas, Kunststoff, Gummi und Metall bestehen. In einer Pandemie wird die Bedeutung des Testens und des Impfens mit allen dafür notwendigen Injektionsfläschchen und Injektionsspritzen schlagartig für jedermann sichtbar. Beispiele für Produkte, die prinzipiell nur in der Kombination verschiedener Werkstoffgruppen denkbar sind, finden sich in der gesamten Medizintechnik, ebenso im Automotive-Sektor.

In vielen anderen Fällen kann aber die auf den einzelnen Werkstoff fokussierte Betrachtung und Bewertung von reinen Kunststoffprodukten die richtige Sicht-

weise darstellen, so z. B. bei Rohren für die Wasserversorgung, bei Wärmedämmplatten im Bauwesen, bei technischen Teilen oder bei Schläuchen für die Medizintechnik.

Bevor konkret auf die grundlegenden Eigenschaften von Kunststoffen eingegangen wird, soll die geschichtliche Entwicklung der Polymerwerkstoffe in einem kurzen Abriss dargestellt werden.

■ 1.1 Geschichte der Kunststoffe

Seit jeher streben Menschen danach, Naturmaterialien für sich nutzbar zu machen und Werkstoffe zu entwickeln, deren Eigenschaften die der natürlichen Materialien übertreffen. Naturstoffe mit besonderen Eigenschaften waren z. B. der Naturkautschuk, das zähelastische und klebrige Guttapercha oder auch der Schellack, eine harzartige Substanz, welche aus den Ausscheidungen der Lackschildlaus gewonnen wird.

Die industrielle Herstellung von Polymerwerkstoffen zeichnete sich schon im 19. Jahrhundert ab, konnte aber wesentlich erst im 20. Jahrhundert realisiert werden. 1907 wurde Bakelit patentiert, der erste industriell produzierte vollsynthetische Kunststoff, ein Duroplast. Der erste Synthesekautschuk wurde 1909 patentiert. 1911 wurde dann der Begriff Kunststoff eingeführt. Die Erkenntnis der Existenz von Makromolekülen wurde erst 1920 von Hermann Staudinger postuliert, der auch diesen Begriff prägte. Er experimentierte übrigens u. a. mit Naturkautschuk und synthetisierte einen thermoplastischen Kunststoff. Jahrelang kämpfte er in der Chemie für die Durchsetzung dieser revolutionären Erkenntnis, die sich anschließend auch für einige andere Wissenschaftsgebiete als bahnbrechend erwies. 1953 erhielt er den Nobelpreis für Chemie.

Kunststoff wurde die prägende Werkstoffgruppe des 20. Jahrhunderts. Heute sind die diversen Kunststoffe und Verbundwerkstoffe aufgrund ihres unermesslich großen Einsatzspektrums essenziell in alle Lebensbereiche unverzichtbar integriert und in allen Branchen präsent. Aus ihrer massenhaften Verwendung resultieren heute aber auch schwerwiegende Entsorgungs- und Umweltprobleme.

Dieses einführende Kapitel beschreibt kurz die geschichtliche Entwicklung der Kunststoffe sowie die aktuelle Situation der Kunststoffindustrie. Wichtige Werkstoffeigenschaften und einige Einsatzgebiete werden kurz vorgestellt. Danach wird das Thema der Kreislaufwirtschaft für Kunststoffe behandelt, und abschließend wird die Bedeutung der Werkstofftechnik in der Kunststofftechnik in knapper Form aufgezeigt.

Bild 1.1 illustriert die Entwicklung der Kunststoffe anhand eines Zeitstrahls. Im Folgenden werden wichtige Werkstoffbeispiele und Entwicklungstrends dargestellt.

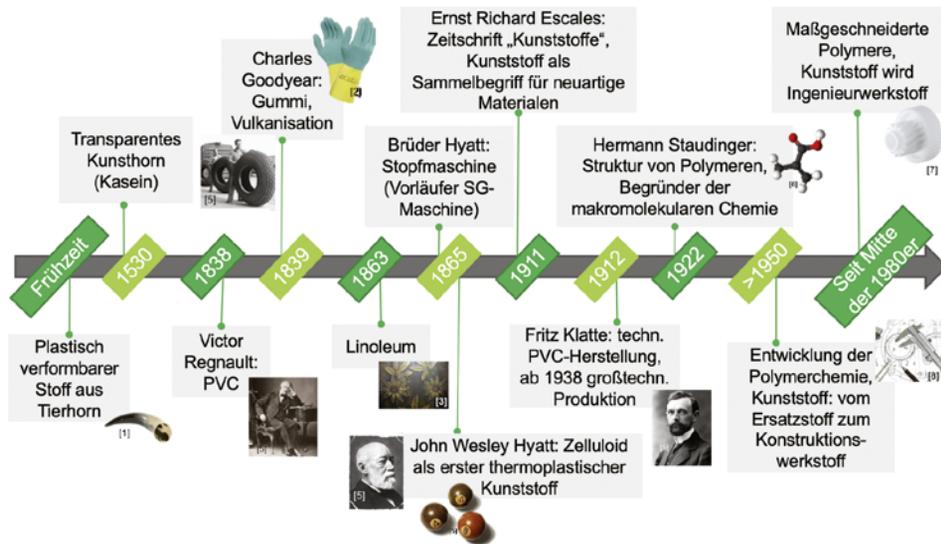


Bild 1.1 Geschichte der Kunststoffe¹⁾

Die möglicherweise bekanntesten Pioniere auf dem Gebiet der von Menschen hergestellten Polymere sind Victor Regnault und Charles Goodyear. Regnault stellte 1838 das erste Polyvinylchlorid (PVC) im Labor her, indem er das Gas Vinylchlorid den Strahlen der Sonne aussetzte. Charles Goodyear entdeckte im Jahr 1839, dass Naturkautschuk und Schwefel unter Wärmeeinwirkung zu dem wesentlich elastischeren und nicht mehr klebrigen Gummi reagieren und entwickelte daraus das Verfahren, das später als Vulkanisation bezeichnet wurde. Erste Produkte waren Gummischeue und Zeltplanen. Somit wurden für die ab Mitte des 19. Jahrhunderts für die aufkommende Elektrotechnik so wichtigen Isolationsmaterialien wie auch für die Reifentechnologie eine bedeutende Grundlage geschaffen. Der für Reifen notwendige elastische und abriebfeste Werkstoff Gummi wurde erst durch die Kombination von verschiedenen Kautschukpolymeren mit dem Füllstoff Ruß und mit weiteren Mischungsbestandteilen möglich.

Der erste bei höheren Temperaturen verformbare, thermoplastische Kunststoff auf Naturstoffbasis geht auf Wesley Hyatt zurück, der um 1844 nach einem Ersatzwerkstoff für die bis dahin aus Elfenbein gefertigten Billardkugeln suchte. Aus Nitrocellulose und Kampfer erzeugte er Zelluloid, das sich schnell über den Einsatz

¹⁾ Bildquellen: <https://www.nadeco.de>, <https://www.idealclean.de>, [wikipedia.de](https://www.wikipedia.de), <https://www.kern.de/>, <https://commons.wikimedia.org/>, <https://de.f-morat.com>, <http://www.smv-online.de/>

als Billardkugeln hinaus in verschiedensten Anwendungen etablieren konnte. Die wohl bekannteste Anwendung ist der Einsatz als Trägermaterial für fotografische Filme; auch Käämme, Messergriffe und Spielzeug wurden damals aus Zelluloid hergestellt.

Durch das Aufkommen neuer Materialien entstand auch der Bedarf an neuen Methoden, um diese in die gewünschte Form zu bringen. Eine der ersten Entwicklungen auf diesem Gebiet ist die „Stopfmaschine“ aus dem Jahr 1860, die die Gebrüder Hyatt zur Verarbeitung von Zelluloid entwickelten. Diese Maschine wird als ein früher Vorläufer heutiger Spritzgießmaschinen angesehen.

Ein weiterer Meilenstein auf dem Weg zur heutigen Kunststoffindustrie ist die Entwicklung der Polymerisation von Polyvinylchlorid (PVC) im technischen Maßstab durch Fritz Klätte. 1912 erhielt der deutsche Chemiker von der Chemischen Fabrik Griesheim-Elektron (Griesheim bei Frankfurt, später ein Produktionsort der Firma Hoechst) den Auftrag, für den in großen Mengen vorhandenen Rohstoff Ethen (Ethylen) neue Umsetzungsprodukte zu finden.

Mit der stetigen Entwicklung neuer Kunststoffe, Verarbeitungsmethoden und Anwendungen stieg auch der Bedarf nach fundiertem Wissen über die neue Werkstoffgruppe. Tatsächlich war zu Beginn des 20. Jahrhunderts noch kaum etwas über die Struktur der Materialien bekannt; erst mit den Arbeiten von Hermann Staudinger änderte sich dies in den 1920er-Jahren. Er prägte den Begriff des Makromoleküls und schuf die Grundlage für ein erstes Verständnis polymerer Werkstoffe.

Einen regelrechten Boom erfuhren Kunststoffe ab 1950. Es wurden zahlreiche Erfolge im Bereich der Polymerchemie erzielt und neue großtechnisch umsetzbare Verarbeitungsverfahren entwickelt, insbesondere für thermoplastische Kunststoffe. Waren Kunststoffe anfangs Ersatzstoffe oder Werkstoffe für einzelne technische Aufgaben, für die es noch gar keinen Werkstoff mit passenden Eigenschaften gab, so wurden sie nach und nach zu Werkstoffen für die industrielle Massenfertigung.

Mit dem steigenden Verbrauch von Erdöl nach dem zweiten Weltkrieg, bedingt vor allem durch die rapide Zunahme von Autos und den Wechsel von Kohle zu Öl für den Heizbedarf, entstand das dringende Bedürfnis bei den Herstellern der Brennstoffe, den Raffinerien, die beim Cracken entstehenden Abfälle (vor allem die Gase Ethylen und Propylen) einer Nutzung zuzuführen. Damals war gerade von Ziegler und Natta die katalytisch bewirkte Polymerisation der Polyolefine – Polyethylen und Polypropylen – erfunden worden. Die Großchemiekonzerne wurden nun auch zu Herstellern dieser Rohstoffe. Das war der Auslöser dafür, große Teile der Chemieerzeugung auf Erdölbasis umzustellen. Der neue Name war Petrochemie. Die Produktion von Polymerwerkstoffen in den Industrieländern wuchs damals boomartig um 10% pro Jahr. Die Gase, die zunächst noch als Abfälle verfügbar waren, reichten bald nicht mehr aus. Man war gezwungen, bei der Spaltung des Rohöls in

den Crackern eine besondere Qualität – das Naphta – als Rohstoff für die Polymerisation zu erzeugen.

Mit der Erdölkrise 1973 trat eine gewisse Dämpfung ein, die sich nach der zweiten Erdölkrise 1982 zu einer Bewegung für Ressourcenschonung ausweitete; mit der Forderung, Kunststoffe genauso wie Metalle zu recyceln. Die Tatsache, dass verschmutzte Kunststoffe aus Verpackungen oft auf wilden Müllkippen landeten, führte mitunter zu einer ablehnenden Haltung gegenüber Kunststoffen.

Neue Kunststoffe entstanden nicht nur durch die Synthese grundlegend neuer Polymere; mehr und mehr wurden die vorhandenen Kunststoffe in ihrer Molekülstruktur modifiziert. Polymergemische und die vermehrte Verwendung der verschiedensten Füll- und Verstärkungsstoffe brachten eine wesentliche Erweiterung des Eigenschaftsspektrums. Die Ansprüche an die Endprodukte wuchsen weiter und es wuchsen auch die Ansprüche an die Fertigungstechnologien. Zahlreiche „maßgeschneiderte“ Polymerwerkstoffe für spezielle Anwendungen und ebenso die Ausdifferenzierung der Verarbeitungstechniken prägten die Entwicklung der Kunststofftechnik insbesondere seit Mitte der 1980er-Jahre.

■ 1.2 Die Eigenschaften von Kunststoffen

Im Folgenden werden die wichtigsten Eigenschaften von Kunststoffen benannt und einige Einsatzgebiete und konkrete Anwendungen beispielhaft aufgezeigt.

Dichte

Die Dichte von Kunststoffen liegt überschlägig betrachtet im Bereich zwischen $0,8 \text{ g/cm}^3$ und $2,2 \text{ g/cm}^3$. Im Vergleich dazu betragen die Dichten von Aluminium $2,7 \text{ g/cm}^3$ und von Eisen $7,9 \text{ g/cm}^3$, Keramiken bewegen sich im Bereich von $3,7 \text{ g/cm}^3$ bis $4,0 \text{ g/cm}^3$. Trotz der geringen Dichte ist das mechanische Leistungsspektrum von Kunststoffen sehr weitreichend. Sie können weich und dehnbar, aber auch hart und steif sein.

Die Polymerwerkstoffe mit ihrer geringen Dichte haben in modernen Autos einen Gewichtsanteil von ca. 20 bis 25 % (Elastomere und Polymerfasern mit eingeschlossen). Hier hat das Leichtbau-Prinzip seit langem nicht nur die Substitution von Stahl durch Leichtmetalle vorangetrieben, sondern auch die Substitution von Leichtmetallen durch Kunststoffe. Es ist üblich, die einzelnen mechanischen Eigenschaften zur Dichte ins Verhältnis zu setzen; die Vorteile von Kunststoffen und Faserverbundkunststoffen gegenüber den Metallen werden dabei am deutlichsten erkennbar. Der Elektroantrieb für Fahrzeuge bietet heute ganz neue Möglichkeiten durch Kunststoffe, aber auch Herausforderungen für Kunststoffe, nicht nur in Karosserie und Innenraum, sondern auch im Motorraum selbst.

Der Flugzeugbau hatte im Leichtbau seit jeher eine Vorreiterrolle. Bei Verkehrsflugzeugen können heute nicht nur große Bauteile wie das Seitenleitwerk, sondern auch der gesamte Rumpf in Faserverbund-Kunststoff-Bauweise gefertigt werden. Weil Kohlefasern hier so dominant sind, wird in der Umgangssprache meist nur von „Carbon“ gesprochen und der Kunststoffanteil gar nicht mehr erwähnt; bei Sportgeräten ist das ähnlich. Der generelle Nutzen der Leichtbauweise im Fahrzeug- und Flugzeugbau liegt sowohl in der Reduktion des Treibstoffverbrauchs als auch in der Reduktion klimaschädlicher und gesundheitsschädlicher Emissionen.

Mechanische Eigenschaften

Für einige mechanische Eigenschaften von Kunststoffen liegen die Werte um Größenordnungen unter denen von Metallen oder Keramiken. Dazu zählen beispielsweise die Steifigkeit und die Festigkeit. Kunststoffe haben aber auch bestimmte mechanische Eigenschaften, die denen von Metallen und Keramiken deutlich überlegen sind. Sie sind beispielsweise wesentlich besser dehn- und biegsam und sie haben eine deutlich bessere Schlagzähigkeit. Dadurch sind Kunststoffe beispielsweise sehr gut in der Lage, bei schlagartigen Belastungen Energie zu absorbieren, wodurch sie sich für den passiven Personenschutz im Fahrzeugbau etabliert haben.

Bild 1.2 zeigt eine Gegenüberstellung der E-Moduln verschiedener Kunststoffe sowie von Aluminium und Stahl. Man beachte dabei die doppelt-logarithmische Auftragung. Die geringere Steifigkeit (E-Modul) und Festigkeit lassen sich teilweise durch konstruktive Maßnahmen, teilweise auch durch das Einbringen von verstärkenden Fasern kompensieren. Auch hier bietet die Kunststofftechnik viele Möglichkeiten. Allerdings bleibt gegenüber Metallen und Keramiken eine relativ starke Abhängigkeit dieser mechanischen Eigenschaften von der Temperatur als Nachteil erhalten, was stets zu berücksichtigen ist.

Charakteristisch für die Kunststoffe ist neben ihrer Temperaturabhängigkeit ein mehr oder weniger ausgeprägtes viskoelastisches Spannungs-Dehnungs-Verhalten. Praktisch betrachtet zeigt sich diese Viskoelastizität in einer Neigung zum sog. Kriechen, d. h. in einer fortschreitenden Zunahme der Dehnung bei anhaltender Belastung. Nach der Entlastung bildet sich diese Deformation nach einer definierten Funktion über der Zeit ganz oder nur teilweise zurück.

Die Bedeutung von Füllstoffen in der Kunststoffwerkstofftechnik wird häufig unterschätzt. Füllstoffe können zur Erzielung bestimmter mechanischer Eigenschaften von großer Bedeutung sein, insbesondere dann, wenn die Partikelgröße im Bereich von nur einigen bis zu einigen hundert Nanometern liegt. Man spricht von Nano-Füllstoffen. Sie werden in Kunststoffen wie in Elastomeren eingesetzt. Nanoskaliger Ruß war schon von Anfang an für Reifen wie für viele andere Gummiprodukte unverzichtbar. Die wissenschaftlichen Erkenntnisse über Nano-Füllstoffe haben sich erst nach und nach entwickelt. Das Netzwerk aus Rußpartikeln – oder