

# HANSER



## Leseprobe

zu

## **Menges Werkstoffkunde Kunststoffe**

von Rainer Dahlmann, Edmund Haberstroh und Georg  
Menges

Print-ISBN: 978-3-446-45801-7

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

Weitere Informationen und Bestellungen unter

<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446458017>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

# 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 Spekowitz	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

<b>Vorwort zur 7. Auflage</b> .....	<b>V</b>
<b>Die Autoren</b> .....	<b>IX</b>
<b>1 Die Werkstoffgruppe der Kunststoffe</b> .....	<b>1</b>
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
<b>2 Bildung von Makromolekülen und Polymeren</b> .....	<b>27</b>
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
<b>3</b>	<b>Polymere Strukturen .....</b>	<b>73</b>
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

<b>4</b>	<b>Verhalten im Schmelzzustand</b>	<b>119</b>
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

<b>5</b>	<b>Abkühlen aus der Schmelze und Entstehung von innerer Struktur</b> .....	<b>181</b>
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
<b>6</b>	<b>Mechanisches Verhalten von Kunststoffen</b> .....	<b>227</b>
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
<b>7</b>	<b>Die mechanische Tragfähigkeit von Kunststoffprodukten ....</b>	<b>281</b>
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
<b>8</b>	<b>Thermische Eigenschaften und Analyse .....</b>	<b>359</b>
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

<b>9</b>	<b>Elektrische Eigenschaften</b> .....	<b>401</b>
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 $\epsilon_r$ .....	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
<b>10</b>	<b>Optische Eigenschaften</b> .....	<b>433</b>
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
<b>11</b>	<b>Akustische Eigenschaften .....</b>	<b>465</b>
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
<b>12</b>	<b>Stofftransportvorgänge .....</b>	<b>485</b>
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 <sub>2</sub> -spezifisches Trägergasverfahren nach DIN 53380-3 Teil 3 ..	513
12.7.7	O <sub>2</sub> -Fluoreszenzverfahren .....	515
12.7.8	CO <sub>2</sub> -spezifisches Infrarotabsorptionsverfahren nach DIN 53380-4 Teil 4 .....	515
<b>13</b>	<b>Die Alterung von Kunststoffen .....</b>	<b>519</b>
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
<b>14 Schadensanalyse an Kunststoffprodukten .....</b>	<b>557</b>
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
<b>Sachverzeichnis .....</b>	<b>587</b>



# 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

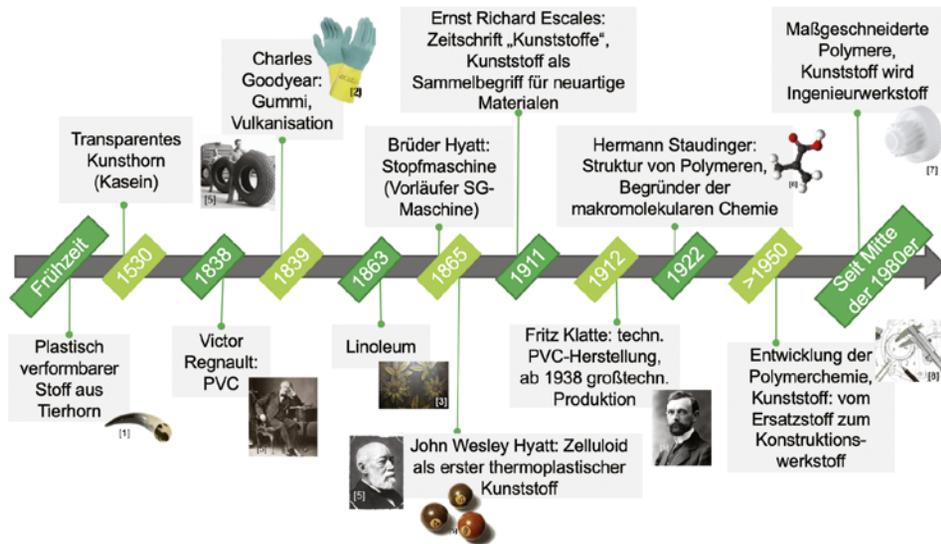
Seit jeher streben Menschen danach, Naturmaterialien für sich nutzbar zu machen und Werkstoffe zu entwickeln, deren Eigenschaften die der natürlichen Materialien übertreffen. Naturstoffe mit besonderen Eigenschaften waren z. B. der Naturkautschuk, das zähelastische und klebrige Guttapercha oder auch 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 Kunststoffe<sup>1)</sup>

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 Gummischeuhe 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

<sup>1)</sup> 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**

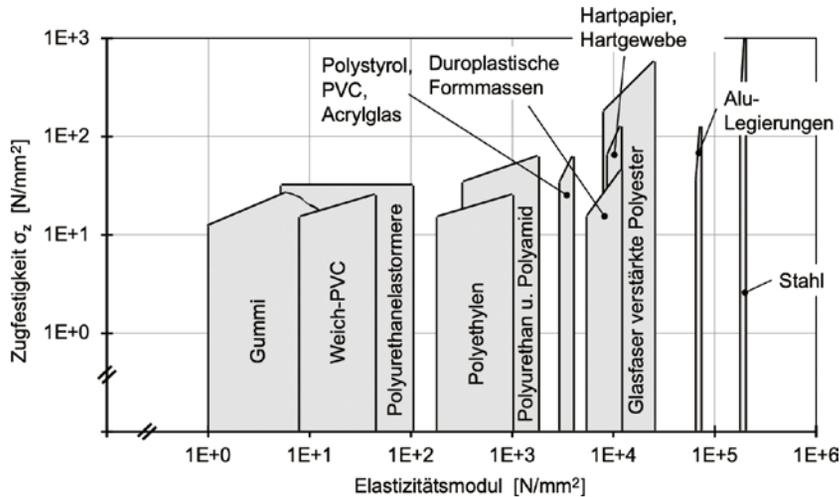
Für einige mechanische Eigenschaften von Kunststoffen liegen die Werte um Größenordnungen unter denen von Metallen oder Keramiken. Dazu zählen beispielsweise die Steifigkeit und die Festigkeit. Kunststoffe haben aber auch bestimmte mechanische Eigenschaften, die denen von Metallen und Keramiken deutlich 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

heute auch aus Silicapartikeln – ist neben dem Polymerketten-Netzwerk mitbestimmend für die mechanischen Eigenschaften von Elastomeren. Heute wird in Kunststoffen wie in Elastomeren neben den konventionellen Füll- und Verstärkungsstoffen eine ganze Palette verschiedenster Nanofüllstoffe genutzt.



**Bild 1.2** Zugfestigkeit und Elastizitätsmodul verschiedener Werkstoffe

### Isolation

Kunststoffe sind in erster Linie hervorragende Isolatoren. Im Bauwesen können Kunststoffe dank ihrer herausragenden thermischen Isolationseigenschaften und Langlebigkeit einen besonderen Beitrag zur Energieeinsparung leisten. In der Elektrotechnik waren isolierte Kabel für die Energieverteilung und für elektrische Maschinen bereits bei deren ersten Entwicklungen essenziell. Heute sind Elemente der Mikroelektronik, Computertechnik und Telekommunikation oder die organischen Leuchtdioden in Displays (OLED) allgegenwärtig und ohne Kunststoffe nicht denkbar.

Mit den guten elektrischen Isolationseigenschaften sind aufgrund der molekularen Struktur stets auch die guten thermischen Isolationseigenschaften gekoppelt. Allerdings existieren Anwendungen, die konträre Anforderungen stellen, wie zum Beispiel eine gute elektrische Isolationswirkung bei gleichzeitig guter Wärmeableitung. Dies kann man bei Kunststoffen durch Zugabe geeigneter Füllstoffe recht gut gezielt einstellen, wodurch Kunststoffe insbesondere in der Leistungselektrik und -elektronik eine große Verbreitung gefunden haben.

### **Durchlässigkeit**

Die meisten Kunststoffe haben eine relativ hohe selektive Durchlässigkeit für Gase. Das erlaubt zum Beispiel den Einsatz als Membranen zur Gastrennung, schränkt ihre Eignung aber für Lebensmittelverpackungen ein. Speziellere Kunststofftypen wiederum besitzen gute Gasbarriere-Eigenschaften, haben aber oftmals einen hohen Preis und für Verpackungen ungünstige mechanische Eigenschaften. Solche Kunststoffe mit geringer Durchlässigkeit nutzt man als Barrierschichten im Inneren von mehrschichtig aufgebauten Folien (Verbundfolien), die im Coextrusionsverfahren hergestellt werden.

Selektive Durchlässigkeit wird in einer speziellen Weise auch in bestimmten Brennstoffzellentypen genutzt, bei denen durch semipermeable Polymermembranen hindurch Protonen transportiert werden.

### **Beständigkeit**

Hohe Chemikalienbeständigkeit ist eine herausragende Eigenschaft von Kunststoffen. Neben der traditionellen Verwendung für Kunststoff-Rohrleitungssysteme in der chemischen Industrie werden sie auch für die Auskleidung von metallischen Rohren und Behältern eingesetzt. Spezielle Anwendungen von Thermoplasten finden sich bei Rohrleitungssystemen für die Halbleiterherstellung (starke Säuren oder hochreines Wasser) und in der Biotechnologie.

Ein traditionelles umfangreiches Einsatzgebiet sind erdverlegte Wasser- und Gasrohrleitungen. Dabei kommt die generelle hohe Korrosionsbeständigkeit von Kunststoffen ebenso zum Tragen wie die Fähigkeit eines Kunststoffrohrs, gewisse Deformationen durch Verschiebungen im Erdreich über sehr lange Zeiten ohne Bruch zu ertragen.

Die gute Beständigkeit hat aber auch zur Folge, dass Kunststoffe im Vergleich zu natürlichen Werkstoffen wie Holz oder Baumwolle teilweise nur sehr langsam abgebaut werden. Das bedeutet, dass Kunststoffprodukte bei nicht fachgerechter Entsorgung gegen den Einfluss von Umweltbedingungen über mehrere 100 Jahre bestehen können. Weltweit wird daher eine Anreicherung von Kunststoffmüll an Stränden, in Meeresstrudeln und Sedimenten beobachtet. Mit dieser Ansammlung von Kunststoffmüll geht eine massive Umweltschädigung einher, und deswegen muss besonders bei kurzlebigen Produkten, wie zum Beispiel Verpackungen, ein verantwortungsvoller Umgang mit den Kunststoffen durchgesetzt werden (siehe Abschnitt 1.5).

Schon seit langem gehen Entwicklungen auch in Richtung biologisch abbaubarer Kunststoffe, die sich durch Umwelteinflüsse zersetzen und deren Verweildauer in der Natur dadurch deutlich reduziert wird (Kapitel 13). Dabei besteht eine Herausforderung darin, den Werkstoff so einzustellen, dass er während des Gebrauchs seinen Zweck (z. B. als Verpackung oder Medizinprodukt) in vollem Umfang erfüllt, nach der Nutzung aber möglichst schnell in unbedenkliche Stoffe zerfällt.

### **Temperaturstabilität**

Dem Vorteil der vergleichsweise niedrigen Formgebungstemperaturen steht die im Vergleich zu den Metallen geringe Temperaturbeständigkeit von Kunststoffprodukten gegenüber. Für die Einsatztemperaturen von technischen Thermoplasten kann als Obergrenze zur ersten groben Orientierung der Bereich von 70 ° bis 150 °C angegeben werden, für die generell teureren hochtemperaturbeständigen Thermoplaste liegt der Bereich bei 150 ° bis 250 °C. Duroplaste sind nicht schmelzbar und deshalb in der Regel bis zu höheren Temperaturen einsetzbar.

### **Wirtschaftlichkeit**

Viele Kunststoffprodukte sind äußerst wirtschaftlich in großen Mengen herstellbar. Bei Formteilen zeigt sich die besondere Stärke des Spritzgießverfahrens, mit dem auch geometrisch sehr komplexe Formteile mit hohen Genauigkeitsanforderungen in einem einzigen Arbeitsgang in kurzen Zykluszeiten vollautomatisch gefertigt werden können. Die im Vergleich zu anderen Werkstoffen relativ niedrigen Schmelztemperaturen sind einer der Einflussfaktoren für diese hohe Wirtschaftlichkeit. Der im Vergleich zu anderen Werkstoffen niedrige Energieverbrauch bei der Verarbeitung dient sowohl dem wirtschaftlichen Ziel der niedrigen Energiekosten als auch dem ökologischen Ziel der Reduktion des Verbrauchs an Primärenergieträgern und der Reduktion der klimaschädlichen Emissionen.

Die preisgünstige Herstellung und einfache Verfügbarkeit von Kunststoffprodukten – u. a. im Bereich der Verpackungen – haben in den letzten Jahrzehnten bis heute in einigen Bereichen zu einem unreflektierten Umgang mit den Endprodukten geführt. Die umweltgerechte Handhabung von Abfällen ist längst zu einer großen Herausforderung geworden. Dieser Herausforderung müssen sich sowohl die Nutzer der Produkte als auch Industrie und Forschung stellen, indem sie nachhaltige, praktikable und überzeugende Lösungen für die Reduzierung und Verwertung der Abfälle entwickeln (siehe Abschnitt 1.5).

### **Rezyklierbarkeit**

Kunststoffe sind in vielen Fällen wiederverwertbar. Es bestehen verschiedene Möglichkeiten, Endprodukte nach ihrem Gebrauch so aufzubereiten, dass eine mehrfache gleich- oder ähnlichwertige Verwendung technisch möglich ist. Die Steigerung des Anteils an wiederverwertendem Material wird nicht nur durch technische, sondern auch durch nichttechnische Hemmnisse erschwert. Im Abschnitt 1.5 wird hierauf näher eingegangen.

Abschließend ist zu sagen, dass Kunststoffe neben vielen Vorteilen auch einige Defizite mit sich bringen. Die Aufgabe des Kunststoffingenieurs besteht dabei darin, durch Werkstoffwahl und Konstruktion in der Gesamtbewertung das bestmögliche Ergebnis zu erzielen.

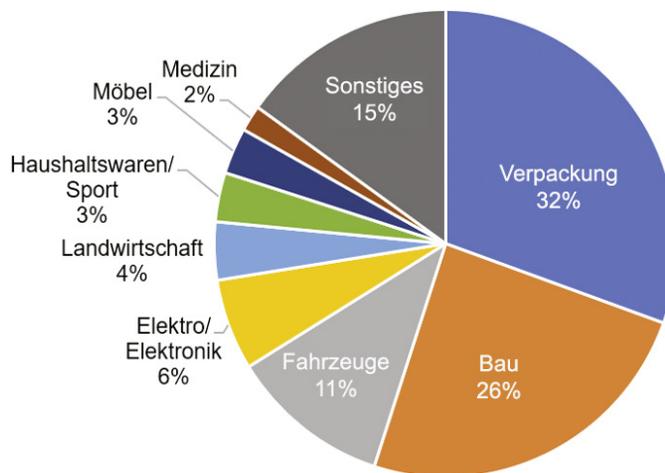
## ■ 1.3 Einsatzgebiete von Kunststoffen

Bild 1.3 gibt einen Überblick über die mengenmäßige Verteilung von Kunststoffen in Deutschland. Mehr als die Hälfte der Kunststoffe wird im Verpackungs- oder Baubereich eingesetzt, es folgen die Branchen Fahrzeugbau, Elektro und Elektronik, die Landwirtschaft und weitere Bereiche. Im Verpackungsbereich dominieren Polyethylen (PE) und Polypropylen (PP) sowie Polyethylenterephthalat (PET). Im Baubereich kommt neben PE und PP vorwiegend auch Polyvinylchlorid (PVC) zum Einsatz. Die Polyolefine PE und PP haben insgesamt den größten Mengenanteil.

Einige Anwendungsbeispiele mit typischen Merkmalen liefert die folgende Aufzählung:

- Verpackung: Folien, Beutel, Flaschen und andere Behälter ermöglichen es, Waren wirtschaftlich und ökologisch günstig zu verpacken. Der Erhalt von Lebensmitteln während des Transports und der Lagerung hat gerade in den warmen Erdregionen eine große Bedeutung.
- Bauwesen: Für Rohrleitungen, Bodenbeläge oder Fensterrahmen, sowie für die Wärmedämmung von Wänden, Böden und Dächern sind Kunststoffe unverzichtbar.
- Automobil: Der Innenraum im modernen PKW besteht nahezu vollständig aus Kunststoffen. Sie bieten viele Gestaltungsmöglichkeiten und damit eine große Designfreiheit für die Innen- und Außenausstattung der Fahrzeuge. Zahllose technische Teile, auch solche unter der Motorhaube, werden aus Thermoplasten gefertigt; manche davon sind mit Kurzglasfasern verstärkt. Hochleistungskunststoffe z. B. mit Carbonfaserverstärkung im Leichtbau ermöglichen emissionsärmere Mobilität und leisten damit einen Beitrag zur Nachhaltigkeit. Mit der Elektromobilität wird diese Bedeutung noch weiter zunehmen. Reifen, Schwingungsdämpfer und Dichtungen wären ohne Elastomere gar nicht denkbar.
- Energietechnik, Elektrotechnik, Elektronik, Computertechnik: Strom aus erneuerbaren Quellen wie Windenergie muss in Zukunft mehr und mehr über große Distanzen in Energiekabeln transportiert werden. Für die Gewinnung von elektrischer Energie aus Sonnenlicht sind organische Photovoltaikzellen eine moderne spezielle Anwendung von Polymerwerkstoffen. Für das Internet der Dinge werden zukünftig zahllose RFID-Mikrochips gebraucht, bei denen Chip und Antenne in Kunststoff eingebettet sind.
- Erneuerbare Energien: Beispiele sind organische Solarzellen in der Photovoltaik, Wärmetauscher und Leitungen in der Geothermie und Rotorblätter in Windkraftanlagen, deren Rotoren heute Durchmesser bis 120 Meter aufweisen und die nur mit Faser-Kunststoffverbund-Werkstoffen realisierbar sind.

- **Medizin und Pharmazie:** Die heutige Medizintechnik ist ohne Kunststoffe nicht vorstellbar. 45 Prozent aller weltweit hergestellten medizintechnischen Produkte bestehen aus Kunststoffen. Einige Beispiele sind:
  - Fäden für chirurgische Nähte sind im Körper abbaubar und werden resorbiert. In künstlichen Gelenken werden Kunststoffe in Kombination mit Keramik und Metall eingesetzt. Schrauben für die Chirurgie sind je nach Anwendung langlebig und verbleiben im Körper, oder sie müssen kurzlebig sein und im Körper abgebaut und resorbiert werden. Platten für die Unfallchirurgie aus dem Thermoplasten PEEK enthalten Füllstoffe, die sie im Röntgenbild sichtbar machen.
  - Bei Injektionsfläschchen und Fertigspritzen ist das Medikament oft sowohl mit Glas als auch mit Kunststoff und Gummi in direktem Kontakt, auch über lange Lagerzeiten. Bei diesen sog. Primärpackmitteln müssen aus Gründen der Sicherheit alle im konkreten Fall eingesetzten Typen dieser Werkstoffe für das jeweilige Medikament behördlich zugelassen werden.

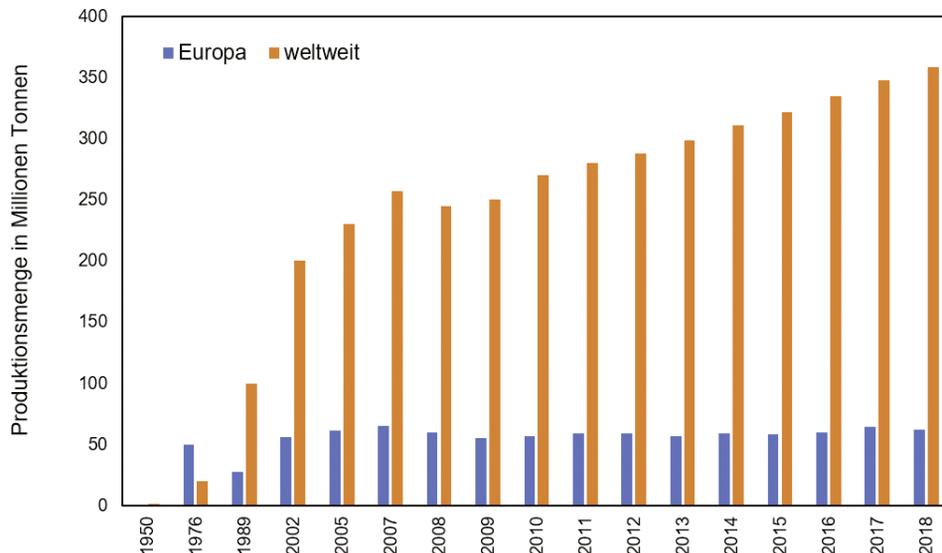


**Bild 1.3** Einsatzgebiete von Kunststoffen in Deutschland 2017 [nach PlasticsEurope, Conversio]

## ■ 1.4 Die Kunststoffindustrie

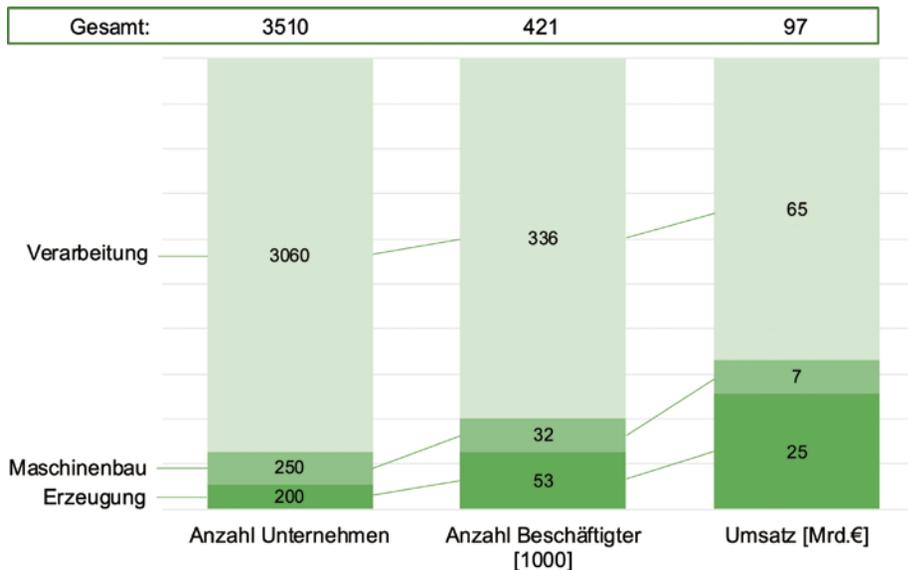
Seit dem Beginn der massenhaften Produktion von Kunststoff in den 1950er-Jahren wächst die Kunststoffproduktion weltweit stetig an (Bild 1.4). Zwischen den Ländern bzw. Weltregionen gibt es jedoch große Unterschiede beim Wachstum: Während die bereits große Kunststoffindustrie in Deutschland nur noch leicht wächst bzw. in einzelnen Sparten stagniert, wächst sie in Ländern wie China, aber

auch in Osteuropa deutlich stärker. Dabei werden in vielen Ländern die Produktionskapazitäten erweitert, da die weltweite Nachfrage nach Kunststoffen steigt. 1989 überstieg das weltweit produzierte Kunststoffvolumen erstmals die Produktionsmenge von Stahl.



**Bild 1.4** Kunststoffproduktion in Europa und weltweit von 1950 bis 2018 [nach Statista]. In diesen Zahlen sind alle thermoplastischen, duroplastischen und elastomeren Polymerwerkstoffe enthalten, zudem auch Klebstoffe, Beschichtungswerkstoffe, Dichtstoffe und Fasern aus Polypropylen. Nicht enthalten sind Fasern aus Polyethylenterephthalat („Polyester“), Polyamid und Polyacryl

Für Deutschland ist die Kunststoffindustrie volkswirtschaftlich – insbesondere auch für den Arbeitsmarkt – eine Schlüsselindustrie. Eingeteilt wird sie häufig in die Bereiche Kunststoffherzeugung, Kunststoffverarbeitung und Maschinenbau (siehe Bild 1.5). Die Kunststoffherzeuger produzieren Kunststoffe und entwickeln diese weiter, beispielsweise durch Modifikation des chemischen Aufbaus oder Zugabe geeigneter Zusatzstoffe. Kunststoffverarbeiter erzeugen aus den Kunststoffen funktionsgerechte Fertigteile, wobei häufig höchste Ansprüche an die Bauteilqualität gestellt werden. Schließlich entwickelt und produziert der Kunststoff-Maschinenbau spezialisierte Anlagen und Werkzeuge für einen kunststoffgerechten und wirtschaftlichen Verarbeitungsprozess. Mit rund 336 000 Erwerbstätigen im Jahr 2019 ist die von kleinen und mittelständischen Unternehmen geprägte Gruppe der Kunststoffverarbeiter von außerordentlicher Bedeutung für den deutschen Arbeitsmarkt. Im Jahr 2019 umfasste die gesamte Kunststoffindustrie 3510 Unternehmen und erzielte einen Umsatz von rund 97 Milliarden Euro.



**Bild 1.5** Struktur der Kunststoffindustrie in Deutschland im Jahre 2019 [nach PlasticsEurope]

## ■ 1.5 Kunststoffe im Kreislauf

Kunststoffe zeichnen sich durch eine Vielzahl positiver Eigenschaften aus und sind für viele Anwendungsbereiche unverzichtbar. Trotz der Vorteile von Kunststoffen gegenüber anderen Materialien werden sie in den letzten Jahren zunehmend negativ wahrgenommen und in vielerlei Hinsicht kritisiert. Begriffe wie ökologischer Fußabdruck, Abfallvermeidung und Nachhaltigkeit prägen die Debatten. Kunststoffen werden in diesem Zusammenhang vor allem eine geringe Recyclingquote im Zusammenspiel mit der Kurzlebigkeit von Verpackungen und die unkontrollierten Einträge von Kunststoffabfällen in die Umwelt, besonders in Gewässer, zugeschrieben. Tatsächlich zeigen Untersuchungen, dass etwa 75 % der in den Weltmeeren gesammelten Abfälle aus Kunststoffen bestehen, die durch den Menschen in die marine Umwelt gelangt sind. Dies ist unter dem Begriff des „Marine Litter“ bekannt. Dabei handelt es sich vor allem um Verpackungsmaterialien sowie um Abfälle aus Fischerei und Schifffahrt. Ein weiteres Problem ist die wachsende Menge an Mikrokunststoffen („Mikroplastik“), also kleinen Kunststoffpartikeln mit einem Durchmesser von weniger als fünf Millimetern, die unkontrolliert, z. B. durch Reifenabrieb oder Auswaschung aus Bekleidung, in die Umwelt gelangen oder durch den Zerfall von Kunststoffprodukten entstehen. Mikroplastik steht in der Kritik, schwerwiegende Folgen für die Biodiversität und die Gesundheit von Lebewesen zu haben.

Vor dem Hintergrund weiterhin steigender Kunststoff-Produktionsmengen (siehe Abschnitt 1.4) ergibt sich die Forderung nach einem grundsätzlichen Umdenken in der Industrie und bei den Verbrauchern. In den Fokus gelangen die Entwicklung von hocheffizienten Recyclingverfahren, die Berücksichtigung der Rezyklierbarkeit bereits in der Phase der Produktentwicklung und intelligente Prozesse, die sich an die unterschiedliche Qualität recycelter und nicht recycelter Materialien anpassen, sowie biobasierte und biologisch abbaubare Kunststoffe als Alternative zu konventionellen Polymer-Werkstoffen; die Ansätze erstrecken sich notwendigerweise über alle Bereiche der Kunststofftechnik und fordern Rohstoffhersteller, Produktentwickler, Verarbeiter, Recycler und Maschinenbauer gleichermaßen heraus. Ein Leitgedanke für den Umgang mit den negativen Umweltauswirkungen der Kunststoffe ist das Konzept der Kreislaufwirtschaft, das im Folgenden näher erläutert wird.

### **1.5.1 Kreislaufwirtschaft**

Der Begriff Kreislaufwirtschaft bezeichnet das gegensätzliche Modell zur Linearwirtschaft, in der hochwertige Materialien nach einer einmaligen Nutzung den Abfallströmen zugeführt werden und durch Verbrennung beziehungsweise Deponierung nicht mehr für eine weitere Nutzung zur Verfügung stehen. Demgegenüber ist die Kreislaufwirtschaft ein Modell, bei dem Werkstoffe so lange wie möglich durch Wiederverwendung (z.B. in Mehrwegsystemen), Reparatur, Aufarbeitung und Recycling in der Wirtschaft erhalten bleiben und so Abfälle und Ressourcenverbrauch reduziert werden. Bild 1.6 illustriert vereinfacht dieses Modell der Kreislaufwirtschaft.



**Bild 1.6** Definition des Europäischen Parlaments zur Kreislaufwirtschaft (2018) (Quelle: EU)

Der Begriff Kreislaufwirtschaft geht über den des Recyclings weit hinaus und beschreibt eine ganzheitliche Betrachtung geschlossener Kreisläufe, die zu einer Reduzierung von Müll, Emissionen (insbesondere  $\text{CO}_2$ ) und Ressourcen (Rohstoffe und Energie) führt. Zwar sind in Deutschland bereits wichtige Lösungen in der Abfallproblematik etabliert, jedoch müssen weitere Innovationen und langfristige ökologisch und ökonomisch sinnvolle Gesamtlösungen zur Umsetzung der bestehenden Herausforderungen erarbeitet werden, die sich von der Rohstoffbereitstellung und Produktentwicklung über die industrielle Produktion bis hin zum Handel, zu den Verbrauchern und zum Recycling erstrecken.

## 1.5.2 Kunststoffverwertung

Die Verwertung von Kunststoffen ist ein wichtiger Eckpfeiler auf dem Weg hin zu einem nachhaltigen Wirtschaftssystem. Um mögliche Kreisläufe zu beschreiben, werden derzeit sinnvollerweise fünf Pfade unterschieden, die vom Prinzip her hierarchisch zu interpretieren sind (s. Bild 1.7). Dies soll bedeuten, dass die erste Pri-

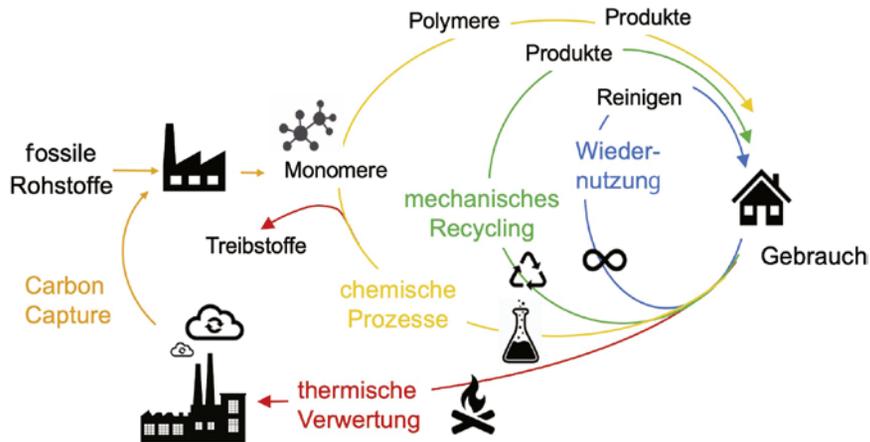
orität für ein gebrauchtes Kunststoffprodukt die Wiederverwendung sein soll. Danach werden gemäß der untenstehenden Auflistung Möglichkeiten des mechanischen Recyclings erwogen usw. Die Wahl des Verwertungsverfahrens ist allerdings auch abhängig von Kunststoffart, -zusammensetzung und Verschmutzungsgrad der Abfälle, wodurch die Grundvoraussetzung für qualitativ hochwertiges Recycling eine funktionierende Abfallsortierung und -analytik ist. Faktoren wie Materialverschmutzung oder schlecht trennbare Materialverbunde beeinflussen häufig die Umsetzung des aus der Perspektive des Kunststoffkreislaufs optimalen Verwertungswegs.

- Wiederverwendung

Der für viele Produkte ökonomisch und ökologisch sinnvollste Weg ist die mehrfache Nutzung. Als Beispiel dient bei Verpackungen die Mehrweg-PET-Flasche. Aufwände entstehen in diesem Zyklus durch Sammlung, Transport, Sortierung und Waschvorgänge. Bei der Wiederverwendung bleibt nicht nur der Werkstoff, sondern wesentliche Teile des Produktes erhalten. Bei Mehrwegflaschen werden allerdings Verschlüsse und Etiketten derzeit nicht als Produkt, sondern nur als Werkstoff wiederverwendet.

- Mechanisches bzw. werkstoffliches Recycling

Beim mechanischen Recycling werden die Produkte gesammelt, nach Werkstofftype sortiert, zerkleinert, gewaschen und regranuliert. Die Produkte werden also zerstört, der Kunststoff bleibt jedoch als Werkstoff mit seiner molekularen Struktur im Wesentlichen erhalten. Beim mechanischen Recycling ist zu unterscheiden zwischen Produkten aus einer Nutzungsphase, wie zum Beispiel einem Joghurtbecher, und Produkten aus einem Produktionsprozess, die dort als Reststoffe anfallen. Letztere lassen sich sehr sortenrein und in sauberem Zustand sammeln, während erstere meistens (Lebensmittel-)Rückstände enthalten und wegen der bestehenden Entsorgungssysteme aus der Masse wegen der Sortenvielfalt heraussortiert werden müssen. Dies wiederum erfordert einen wesentlich höheren Sortier- und Waschaufwand. Für das Recycling dieser beiden Abfalltypen haben sich daher auch zwei unterschiedliche Bezeichnungen ausgeprägt: Rezyklate aus dem industriellen Produktionsumfeld werden *Post Industrial Recyclates* (PIR), Rezyklate aus Produkten nach einer Nutzungsphase werden *Post Consumer Recyclates* (PCR) genannt.



**Bild 1.7** Pfade des Recyclings

- Chemische Prozesse

Chemische Prozesse haben das Ziel, die chemische Struktur des Polymers aufzubrechen. Dabei werden die Makromoleküle in kleinere Fragmente zerlegt. Die Produkte der chemischen Prozesse sind dabei zwar prinzipiell Ausgangsstoffe für die erneute Synthese, allerdings sind diese Produkte auch sehr gut als Brenn- oder Treibstoff geeignet. Dieser Pfad erscheint zwar im Einzelfall ökonomisch sinnvoll, entzieht aber damit die Stoffe dem Kunststoffkreislauf (siehe Bild 1.7). Aus diesem Grunde werden chemische Prozesse nicht per se auch als Recyclingprozesse anerkannt.

In aller Regel sind chemische Prozesse energetisch wesentlich aufwendiger als mechanische Prozesse, weswegen chemische Prozesse derzeit nur unter bestimmten Bedingungen bzw. für bestimmte Werkstoffe wie Polystyrol, Polymethylmethacrylat, Polyurethan, Polyamid oder Polyethylenterephthalat diskutiert werden.

- Thermische/energetische Verwertung

Für viele Kunststoffabfälle ist derzeit eine stoffliche Verwertung im Sinne eines mechanischen Recyclings oder einer chemischen Verwertung sowohl ökonomisch als auch ökologisch noch nicht praktikabel. Vor allem für die Trennung von Verbunden aus verschiedenen Kunststoffen, wie sie häufig in Verpackungsmaterial vorzufinden sind, gibt es derzeit noch keine zufriedenstellende Lösung. In diesen Fällen werden die Abfälle einer energetischen bzw. thermischen Verwertung zugeführt. Diese hat zum Ziel, die nicht weiter rezyklierbaren Kunststoffe durch eine vollständige und schadstoffarme Verbrennung zur Energiegewinnung zu nutzen. Hierzu werden Kunststoffabfälle als Brennstoffe in Kraftwerken, Hochöfen und Zementwerken eingesetzt. Auch

dieser Pfad entzieht diese Stoffe dem Kunststoffkreislauf, weswegen danach gestrebt wird, die Rezyklierbarkeit von Kunststoffprodukten bereits beim Design als Anforderung zu berücksichtigen („Design for Recycling“).

- Synthese aus CO<sub>2</sub>-Abgasen („Carbon Capture“)

Ein weiterer Pfad eröffnet sich dadurch, dass auch die Abgase aus der thermischen Verwertung (wie auch aus allen anderen Verbrennungsprozessen) aufgefangen und zur Synthese neuer Monomere und Polymere genutzt werden. Dieser Pfad lässt sich dem Begriff *Carbon Capture and Utilization* (CCU) zuordnen, der allgemein die Abscheidung von CO<sub>2</sub> und deren Weiterverwertung bezeichnet. Auch in diesem Pfad ist die weitere Nutzung als Treib- oder Brennstoff aus rein ökonomischen Gründen oft naheliegender als die Synthese neuwertiger Polymere. Allerdings gibt es durchaus Unternehmen der chemischen Industrie, die demonstriert haben, dass so gewonnenes CO<sub>2</sub> bei der Synthese von Kunststoffen fossile Rohstoffe ersetzen kann. (Literaturangabe: „CroCo2Pet“)

Neben diesen fünf Pfaden wird derzeit stark der Weg verfolgt, bereits bei der Produktentwicklung bzw. dem Produktdesign den Faktor Rezyklierbarkeit miteinzubeziehen. Dies wird als recyclinggerechte Konstruktion bzw. *Design for Recycling* bezeichnet. Bedacht werden dabei z. B. die Auswahl der Materialien und die Demontier-, Sortier- oder Trennbarkeit im Recyclingprozess. Hier spielen Farbe, Etiketten und Bedruckungen eine Rolle, insbesondere aber die Bevorzugung von Monomateriallösungen. Über die Eignung eines Produktes für ein Leben nach dem Erstgebrauch entscheidet also maßgeblich der Produktentwickler.

Die Unterscheidung der verschiedenen chemischen Prozesse vom mechanischen Recycling soll anhand von Bild 1.8 kurz erläutert werden. Zu den physikalischen Prozessen gehören das mechanische Recycling wie auch einige solvolytische Prozesse.

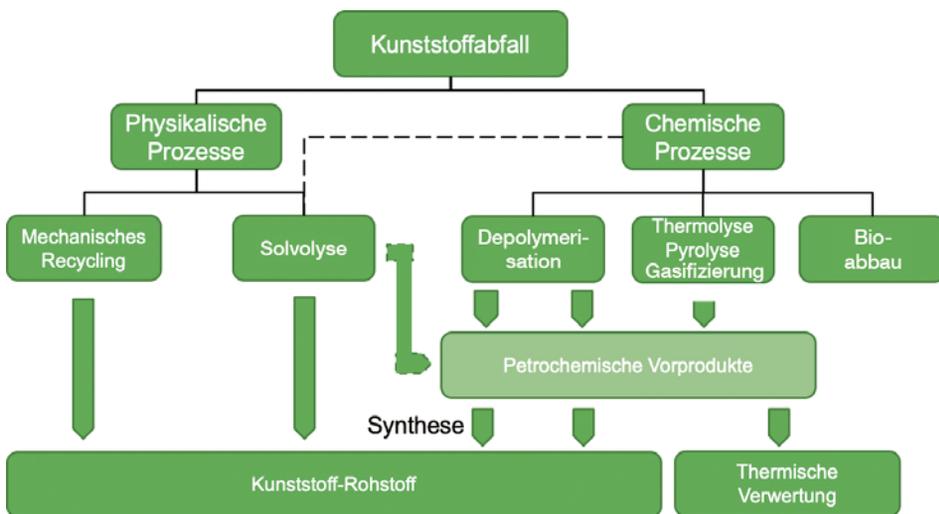
Vorteilhaft ist beim mechanischen Recycling, dass die polymere Struktur im Wesentlichen erhalten bleibt. Einbußen müssen jedoch hinsichtlich des möglichen molekularen Abbaus und der Auswaschung von Additiven hingenommen werden. Dies kann zu dem sogenannten *Downcycling* führen. Dieser Begriff deutet an, dass die Rezyklate aus dem mechanischen Recycling nicht per se zu gleichwertigen Produkten verarbeitet werden können. Weiterhin ist die Qualität der Rezyklate von der Sortierung abhängig, die Verunreinigungen durch Fremdpolymere nicht immer vollständig verhindern kann. Die Rezyklate müssen teilweise erneut additiviert werden.

Wie der Name andeutet, werden Kunststoffe bei der Solvolyse in einem geeigneten Lösemittel gelöst. Das Lösemittel muss dazu werkstoffspezifisch ausgewählt werden. Ein Lösungsvorgang löst dabei nur die Nebenvalenzkräfte auf, die zwischen den Makromolekülen herrschen. Die Makromoleküle selbst bleiben dabei in der

Lösung erhalten. Aus diesem Grunde handelt es sich in erster Näherung um einen physikalischen Prozess, wie er beispielsweise bei Polyethylenen stattfindet. Das Polyethylen kann anschließend aus der Lösung heraus gewonnen werden, braucht allerdings in aller Regel eine neue Additivierung.

Bei anderen Werkstoffen wie zum Beispiel Polyethylenterephthalat kann dieser Lösungsprozess je nach Lösemittel von einem Hydrolysevorgang begleitet werden, der parallel einen molekularen Abbau bewirkt. Dieser chemische Prozess hat zur Wirkung, dass anschließend das Molekulargewicht durch Synthesevorgänge wieder erhöht werden muss.

Der chemische Prozess „Depolymerisation“ zerlegt das Polymer in seine monomeren Bestandteile, die unmittelbar wieder zur Synthese genutzt werden können. Die so hergestellten Polymere stehen den ursprünglichen Werkstoffen in nichts nach. Dies ist allerdings nur für einige Kunststoffe, wie beispielsweise Polystyrol, möglich. Andere Kunststoffe lassen sich durch solche Prozesse nur in petrochemische Vorprodukte zerlegen, aus denen zwar auch Monomere erzeugt werden können, für die sich aber auch der Pfad der thermischen Verwertung eröffnet.



**Bild 1.8** Merkmale physikalischer und chemischer Prozesse bei der Behandlung von Kunststoffabfällen

Thermolyse, Pyrolyse und Gasifizierung sind chemische Prozesse, die stark endotherm und daher energieintensiv sind. Aus diesem Grunde sind diese Prozesse nur dann attraktiv, wenn das mechanische Recycling z. B. aufgrund nur minderer Rezyklatqualität ausscheidet und zugleich ausreichend große Stoffmengen verfügbar sind. Das chemische Recycling benötigt in den meisten Fällen eine vorsortierte Fraktion und ist gegenüber dem Vorhandensein von Fremdstoffen nicht zwingend

toleranter als das mechanische Recycling. Dies gilt insbesondere, wenn Katalysatoren im Spiel sind.

Das chemische Recycling hat momentan deutschland-, europa- und weltweit vom Volumen her nur eine sehr ungeordnete Bedeutung. Chemische Recyclinganlagen kommen zurzeit über den Pilotstatus noch nicht hinaus. Die Masse chemisch rezyklierten Kunststoffs beläuft sich in Deutschland 2019 auf einen Anteil von weniger als 1 % (10 kt) der Gesamtmasse verwerteten Kunststoffs (6,28 Mio. t). Etwa 46 % der Gesamtmasse werden als mechanisch rezykliert (2,93 Mio. t) registriert, wovon ein Anteil von ca. 20 % (580 kt) exportiert wird, ohne dass sichergestellt ist, wie dieser Anteil weiter verwertet wird. Derzeit wird der größte Teil der Kunststoffabfälle mit ca. 53 % (3,31 Mio. t) energetisch verwertet.

In Deutschland werden folglich über 99 % der Kunststoffabfälle verwertet. Betrachtet man hingegen die Menge an Kunststoffen, die tatsächlich in einen Kunststoffkreislauf zurückgeführt werden, so reduziert sich diese Quote auf ca. 33 %. Das deutsche Verpackungsgesetz, das zum 1.1.2019 in Kraft getreten ist, sieht für 2022 eine Kunststoffkreislaufquote von 63 % vor.

Weniger als 1 % der Kunststoffabfälle werden in Deutschland deponiert und damit dem Kreislauf vollständig entzogen. Dieser Wert ist im direkten Vergleich zu vielen anderen europäischen Ländern vergleichsweise niedrig. Bild 1.9 zeigt die Situation zur Verwertung von Kunststoffabfällen in Europa. Europaweit liegt die Deponiequote bei ca. 25 % der Kunststoffabfälle. Das mechanische Recycling erreicht europaweit einen Anteil von etwa 31 %; dabei ist allerdings zu beachten, dass sich über die Länder ein sehr breites Spektrum auftut. Das Ziel der EU, in 2025 50 % und in 2030 55 % aller Kunststoffabfälle zu rezyklieren, stellt dadurch starke Anforderungen an die Rezyklierkapazitäten und die Wiederverarbeitung von Rezyklaten.



### 1.5.3 Biokunststoffe und alternative Rohstoffe

Auch wenn derzeit nur etwa 6% der aus den Erdölraffinerien stammenden Produkte für die Herstellung und Verarbeitung von Kunststoffen verwendet werden, ist auf lange Sicht eine Reduktion des fossilen Anteils bei der Produktion von Kunststoffen notwendig, um CO<sub>2</sub>-Einträge in die Atmosphäre aus fossilen Rohstoffen zu vermindern. Eine Möglichkeit besteht in der Herstellung von Polymeren aus alternativen, insbesondere nachwachsenden Rohstoffen, die in ihrem Wachstum CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre binden. Die wichtigsten Rohstoffe für die Herstellung von sogenannten biobasierten Kunststoffen sind Zucker, Stärke, Zellulose, Fette und Öle sowie Proteine und Lignine. Kapitel 2.4.6 geht auf biobasierte Kunststoffe näher ein.

Die Bioabbaubarkeit von Kunststoffen ist von der Herkunft der Ausgangsstoffe zunächst völlig entkoppelt. Es existieren Polymere sowohl fossiler wie auch biologischer Herkunft, die biologisch abbaubar sind. Kapitel 13.6.1 beleuchtet die Alterungsvorgänge bioabbaubarer Kunststoffe.

Zu den Biopolymeren gehört eine Vielzahl von Werkstoffen, die keiner einheitlichen Polymerklasse zuzuordnen sind und die sehr unterschiedliche Eigenschaften besitzen können. Es werden zudem Polymere als Biopolymere bezeichnet, die aus nachwachsenden Rohstoffen synthetisiert werden, wie auch solche, die durch biologischen Einfluss, wie beispielsweise Mikroorganismen, zersetzt werden können. Im allgemeinen Sprachgebrauch werden Biokunststoffe oftmals weniger mit der nachwachsenden Rohstoffbasis als vielmehr mit der Eigenschaft „biologisch abbaubar“ verknüpft; eine bekannte Anwendung sind z. B. Müllbeutel für kompostierbare Abfälle.

Konventionelle Kunststoffe sind i. A. nicht biologisch abbaubar, im Gegenteil versucht man sogar häufig, sie gegen jeglichen durch thermische oder mechanische Einflüsse bedingten Abbau zu schützen, da man im Allgemeinen Produkte mit einer langen Lebensdauer und anhaltender Funktionalität herstellen möchte. Es jedoch durchaus möglich, abbaubare Elemente in eine Polymerkette einzubauen, welche dann mikrobakteriell (bei Kompostierung) oder photochemisch zerstört werden. Vor allem die Diskussion um Kunststoff-Verpackungen, die nur für einen kurzzeitigen Gebrauch vorgesehen sind, macht biologisch, chemisch oder photochemisch abbaubare Kunststoffe interessant. Dies ist allerdings auf solche Abbauprozesse beschränkt, in denen die entstehenden Produkte, wie z. B. CO<sub>2</sub>, einer weiteren Verwertung zugeführt werden können.

Ein Beispiel für einen derzeit relativ bekannten biobasierten Kunststoff ist Polylactid (PLA, auch Polymilchsäure genannt), das aus fermentierter Maisstärke hergestellt wird. PLA ist ein vergleichsweise spröder Werkstoff, dessen Eigenschaften sich jedoch durch Mischen mit anderen Kunststoffen, in der Regel mit Copolyestern und Additiven, in einem weiten Bereich einstellen lassen.

Auch für biobasierte Kunststoffe ist die Umweltverträglichkeit gesamtbilanziell zu betrachten: Wenn nicht auf Abfallprodukte aus der Lebensmittelproduktion (z. B. nicht essbare Pflanzenteile) zurückgegriffen werden kann, müssen große Ackerflächen für den Anbau der Pflanzen, die den Rohstoff liefern sollen, zur Verfügung stehen, die dann ggf. für die Nahrungsmittelproduktion fehlen. Auch können durch Maßnahmen zur Ertragsmaximierung, durch Transportvorgänge etc. weitere negative Umweltauswirkungen entstehen. Ebenso sind bei einer CO<sub>2</sub>-Bilanzierung alle Faktoren zu berücksichtigen, die für das Säen, das Wachstum und die Ernte der Pflanzen erforderlich sind. Dadurch haben biobasierte Kunststoffe nicht per se einen günstigeren CO<sub>2</sub>-Fußabdruck als Kunststoffe aus fossilen Rohstoffen (Quelle: LCA Biobased Polymers).

### Marktsituation

Trotz des Zugangs dieser Werkstoffklasse in weitere Anwendungen des täglichen Lebens und ihrer verstärkten Präsenz im Supermarkt sowie in den Medien ist der Anteil der Biokunststoffe gemessen an der Gesamtproduktion von Kunststoffen mit weniger als 2% nach wie vor gering. Entsprechend einer Studie des Verbandes European Bioplastics lag die globale Produktion von Biopolymeren im Jahr 2016 bei etwa 2,05 Mio. Tonnen. 42,9% entfielen demnach auf biologisch abbaubare und 57,1% auf biobasierte (und nicht biologisch abbaubare) Kunststoffe. Gemäß der Studie wird für das Jahr 2020 eine weltweite Produktionskapazität von gerade einmal 2,19 Mio. Tonnen vorausgesagt. Vor zehn Jahren wurde hierfür noch ein Wert von 5 Mio. t prognostiziert.

Die tatsächlichen zukünftigen Marktentwicklungen hängen entscheidend von unterschiedlichen dynamischen Faktoren ab:

- Preisentwicklung bei den fossilen und den nachwachsenden Rohstoffen,
- Preisentwicklung bei konventionell hergestellten Produkten sowie der Entwicklung des Rohstoffkostenanteils,
- politische und rechtliche Rahmenbedingungen,
- Bereitschaft seitens der Industrie, neue Produkte in den Markt einzuführen,
- Bereitschaft zu Investitionen in den Bau und zur Optimierung größerer Produktionsanlagen.

Diese Faktoren haben sich trotz anderslautender Prognosen in den letzten Jahrzehnten nicht maßgeblich geändert. Der Hauptgrund dafür liegt darin, dass das Vorkommen von Rohstoffen fossiler Herkunft derzeit weit weniger einer Verknappung unterliegt, als dies zu früheren Zeiten bewertet worden war.

## ■ 1.6 Kunststofftechnik

Aus der Vielzahl an unterschiedlichen Kunststoffen, ihrem breiten Eigenschaftsspektrum und den immer weiter entwickelten Verarbeitungstechnologien resultiert eine hohe Komplexität in allen Prozessen, mit denen sich die Kunststofftechnik beschäftigt. Die Kunststofftechnik befasst sich dabei im weitesten Sinne mit der Werkstofftechnik, der (Weiter-)Entwicklung von Verarbeitungsverfahren und werkstoff- und verarbeitungsgerechten Konstruktionsweisen. Essenziell ist es dabei, die Wechselwirkungen zwischen Konstruktion, Werkstoff, Verarbeitung und Wiederverwertung zu berücksichtigen, was vor allem durch den Anspruch an eine Kunststoffkreislaufwirtschaft in Zukunft einen noch höheren Rang bekommen wird.

Die Konstruktion von Kunststoffprodukten muss dabei rezykliertechnische, werkstofftechnische wie auch verarbeitungstechnische Aspekte berücksichtigen. Sie ist in erster Linie auf die Eigenschaften und Funktionalitäten des Produkts gerichtet und muss dabei die werkstofflichen Voraussetzungen einfließen lassen. Die Konstruktion muss aber auch die verarbeitungstechnischen Gegebenheiten und Möglichkeiten berücksichtigen und dabei oftmals Kompromisse eingehen, weil vordergründig vorteilhafte Produkteigenschaften nicht zwingend vorteilhaft bei der Verarbeitung sind (und sich damit auch nachteilig auf die Produkteigenschaften auswirken).

Die mengenmäßig wichtigsten Verfahren der Kunststoffverarbeitung sind das Extrusions- und das Spritzgießverfahren. Das Extrudieren ist ein kontinuierlicher Prozess, in dem Endloseile wie Profile, Rohre oder Folien hergestellt werden. Das Spritzgießen als diskontinuierliches Verfahren wird zur Herstellung von Bauteilen mit teilweise hoher Komplexität in Bezug auf Geometrien und Funktionalitäten eingesetzt. Die additive Fertigung, im allgemeinen Sprachgebrauch als „3D-Druck“ bekannt, ist ein Verfahren, das in letzter Zeit ein deutliches Wachstum erfahren hat. Der Begriff „additive Fertigungsverfahren“ ist darauf zurückzuführen, dass das Werkstück Schicht für Schicht, „additiv“, aufgebaut wird, bis es sein vollständiges Volumen erreicht hat. Verfahren wie die Extrusion und das Spritzgießen hingegen nutzen Werkzeuge zur Formgebung der Produkte. Für eine Einführung in die Verfahren der Kunststoffverarbeitung sei auf die weiterführende Literatur verwiesen, beispielsweise [Hopmann/Michaeli: „Einführung in die Kunststoffverarbeitung“].

Bei der Herstellung von Kunststoffprodukten beeinflussen sich Konstruktion, Werkstoff und Verarbeitung gegenseitig. Sowohl das zu realisierende Produkt wie auch das ausgewählte Verarbeitungsverfahren stellen Anforderungen an Werkstoffe, die mitunter gegenläufig sind. Als Beispiel dient das Molekulargewicht, das im Hinblick auf gute mechanische Produkteigenschaften in der Regel hoch sein

sollte, was sich aber auf die Fließfähigkeit im Spritzgießprozess nachteilig auswirken kann. Die Konstruktion muss daher Produkt-, Verarbeitungs- und Wiederverwertungseigenschaften im Blick haben. Eine wesentliche Stütze ist dabei die Werkstofftechnik. Die Werkstofftechnik umfasst dabei ausgehend von polymeren Struktureigenschaften die Werkstoffentwicklung und die Werkstoffeigenschaften im Gebrauch und während der Verarbeitung auf einem ingenieurwissenschaftlichen Niveau. Ein durchgängiges und vollständiges Verständnis ist dabei ein Ziel der Werkstofftechnik, das allerdings nicht zuletzt aufgrund der großen Vielfalt verfügbarer Kunststoffe viele Lücken aufweist, die Bestandteil aktueller Forschungsarbeiten sind.

Dieses Buch bietet einen Überblick über die Eigenschaften von Kunststoffen. Dabei spielen die makromolekulare Struktur sowie Zusatzstoffe eine wichtige Rolle, da sie für die Ausbildung sowohl der Gebrauchs- als auch der Verarbeitungseigenschaften entscheidend sind. Daher wird dem Werkstoffverhalten in der Schmelze, den Bedingungen beim Erstarren aus der Schmelze und den sich daraus ausbildenden Eigenschaften besondere Bedeutung zugeordnet. Ziel soll es sein, ein gutes und weitgehend durchgängiges Verständnis des Werkstoffzustandes von Kunststoffen unter dem Einfluss der Verarbeitungs- und Gebrauchsbedingungen zu gewinnen.

### Literatur zu Kapitel 1

- Baur, E.; Osswald, T. A.; Rudolph, N.: *Plastics Handbook*. München: Carl Hanser Verlag, 2019
- Baur, E.; Osswald, T. A.; Rudolph, N.: *Saechtling Kunststoff-Taschenbuch*. München: Carl Hanser Verlag, 31. Aufl., 2013
- Braun, D.: *Simple Methods for Identification of Plastics*. München: Carl Hanser Verlag, 2013
- Braun, D.: *Erkennen von Kunststoffen*. München: Carl Hanser Verlag, 2012
- Braun, D.: *Kleine Geschichte der Kunststoffe*. München: Carl Hanser Verlag, 2017
- Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz: *Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die hochwertige Verwertung von Verpackungen (Verpackungsgesetz - VerpackG)*. Berlin, 2017
- Conversio Market & Strategy: *Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2017*. Mainaschaff, 2018
- Endres, H.-J.; Siebert-Raths, A.: *Technische Biopolymere*. München: Carl Hanser Verlag, 2009
- European Commission (EU): *COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS- A European Strategy for Plastics in a Circular Economy*. (2018) 28 final
- European Plastics e. V.: *European Bioplastics*, nova Institut, Köln, 2020
- Hopmann, C.; Michaeli, W.: *Einführung in die Kunststoffverarbeitung*. München: Carl Hanser Verlag, 2017
- Hopmann, C.; Schmitz, M.: *Plastics Industry 4.0*. München: Carl Hanser Verlag, 2020
- Lechleitner, A.; Schwabl, D.; Schubert, T.; Bauer, M.; Lehner, M.: Chemisches Recycling von gemischten Kunststoffabfällen als ergänzender Recyclingpfad zur Erhöhung der Recyclingquote. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 72 (2019), S. 47 – 60; <https://doi.org/10.1007/s00506-019-00628-w>

- Lindner, L.; Schmitt, J.; Hein, J.: *Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2019*. Conversio Market & Strategy, Mainaschaff, 2020
- Naranjo, A.; Noriega, M., Osswald, T.A.; et al.: *Plastics Testing and Characterization*. München: Carl Hanser Verlag, 2012
- Osswald, T.A; Menges, G.: *Materials Science of Polymers for Engineers*. München: Carl Hanser Verlag, 2012
- Walker, S.; Rothman, R.: Life cycle assessment of bio-based and fossil-based plastic: A review. *Journal of Cleaner Production* 261, Elsevier, 10 July 2020

# Sachverzeichnis

## Symbole

(NMR)-Spektroskopie 423  
(thermo-)oxidative Alterung 527

## A

abbaubare Kunststoffe 547  
Absolutmethode 65  
Absorption 439, 487  
Absorptionskoeffizient 439  
Adsorption 487  
Aktivierungsenergie der Permeation 493  
aliphatische Polyester 553  
Alterung 519  
Alterungsphänomene 520  
Alterungsprozesse 527  
Analyse, dynamisch-mechanische 263  
Anisotropie 445  
Antioxidantien 542  
antistatische Ausrüstung 414  
Aramidfasern 332  
Arrheniusauftragung 494  
Arrhenius-Funktion 244  
ataktisch 80  
Atombindung, kovalente 40  
Aufbau, molekularer 35  
Aufladung, elektrostatische 414  
Autooxidation 529

## B

basisch induzierte Hydrolyse 533  
Bauteilgestaltung 281

Belastung, dynamische 309  
Benzin 508  
beschleunigte Alterung 550  
Beulen 323  
Bindung, kovalente 38  
Bindung, polare 42  
Bindungsenergie 40  
biologische Beanspruchung 523  
Biopolymere fossilen Ursprungs 553  
Biostabilisatoren 546  
Brechungsgesetz 434  
Brechzahl 433, 436  
Bruchenergie 284  
Bruchversagen 281, 286  
Burgers-Modell 249

## C

chemische Alterungsvorgänge 522  
Crazes 284, 537  
CVD-Verfahren 506

## D

Dämmung 476  
Dämpfung 471 f., 474, 476  
Dämpfungsfaktor 473 f., 479  
Deborah-Zahl 150  
Deformationsmodell 256  
Dehngeschwindigkeit 267  
Dehnungs-Überhöhung 337  
Desorption 487, 490  
Dielektrizitätskonstante 408

Diffusion 487, 489  
 Diffusionskoeffizient 490  
 Dipolkräfte 75  
 Dispersion 437  
 Dispersionskräfte 74  
 Dispersionszahl 438  
 DMA 472, 474  
 Dotierung 418  
 Druck-Durchsatz-Beziehungen 138  
 DSC 543  
 Durchgangswiderstand 402  
 Duroplaste 36

## E

Eigenfrequenz 472, 475, 483  
 Eigenschaften, elektrische 401  
 Eigenschaften, magnetische 422  
 Eigenschaften, piezoelektrische 419  
 Eigenspannungen 538  
 Einfriertemperatur 182  
 Einlaufdruckverlust 161  
 Einstein-Guth-Gold-Beziehung 137  
 Elastizitätsmodul 475  
 Elastizitätsmodul, komplex 472 f.  
 Elastomere 36  
 Elektrete 419  
 elektromagnetische Abschirmung 416  
 Elektronegativität 41  
 Elektronenpaarbindung 41  
 elektrooptische Polymere 420  
 Energieabsorptionsvermögen 333  
 Enthalpie 361 f.  
 Entwicklung der Schadensthesen 563, 566  
 Erfassung des Schadensumfeldes 563  
 Extrudatschwellen 151

## F

Farbe 448  
 Farbmessung 452  
 Farbspektrum 453  
 Faserorientierung 261

Faserverstärkung 261  
 Feder-Dämpfer-Modelle 249  
 Fehler 559  
 Ficksche Gesetze 489  
 Flory-Rehner-Gleichung 91  
 flüssigkristallin 93  
 Folgeschäden 560

## G

Gefügeeinfluss 284  
 Gelege 335  
 Geräusch 470, 476 ff.  
 Getränkeflaschen 507  
 Gewebe 334  
 Glanz 448  
 Glanzmessungen 449  
 Glasfasern 332  
 Glastemperatur 87  
 Glastemperatur, reduzierte 231  
 Gleichgewichtsreaktion 52  
 Gleitpaarungen 351  
 GPC 67  
 Grenzviskositätszahl 66

## H

HALS 545  
 Hauptvalenzbindung 40  
 Henrysches Gesetz 489  
 Hindered Amine Light Stabilizers 545  
 Hochbarrierewerkstoff 505  
 hydrolytische Zersetzung 532

## I

Individualschaden 564  
 Infrarotkamera 461  
 Infrarotstrahlung 433  
 innere und äußere Ursachen der  
 Alterung 522  
 intrinsisch leitende Kunststoffe 416  
 Ionenbindung 42  
 isochron 273  
 Isolationsverhalten, elektrisches 402

isotaktisch 80  
isotrop 328

## K

Kaltversprödung 289  
Kapillarrheometer 160  
Kegel-Platte-System 166  
Kennwertermittlung 263  
Kennwertfunktion 275  
klassische Laminattheorie 340  
klimatische Beanspruchung 523  
Knicken 323  
Knittern 323  
Kohlenstofffasern 331f.  
Kollektivschaden 565  
Kompostierung 547  
Kontakttemperatur 376  
Körperschall 465, 469, 479  
Korrespondenzprinzip 253  
Kraftstofftanks 507  
Kriechen 241  
Kriechmodul 329  
Kristallinität 497  
Kristallinitätsgrad 50  
Kristallisation 92  
Kristallitschmelztemperatur 87, 90  
kritische Faserlänge 344  
künstliche Alterung 550  
Kunststoffe, amorphe 285  
Kunststoff, faserverstärkter 330  
Kunststoffkraftstoffbehälter 508  
kurzfaserverstärkte Kunststoffe 342  
Kurzzeitzugversuch 266

## L

Lambert-Beersches Gesetz 439  
Lastkollektive 525  
Lautstärkepegel 470  
Lebensdauervorhersage 550  
Leitfähigkeit, intrinsische 416  
Lichtschutzmittel 544  
Lichtstreuung 462  
Lichttransmission 443

Lösemittelviskosimetrie 65  
Löslichkeit 489  
Löslichkeitskoeffizient 489, 499  
Lösungsenthalpie 493  
Luftschall 465, 477, 480

## M

Matte 334  
Maxwell-Modell 246  
Maxwell-Modell, erweitertes 250  
mechanische/tribologische  
  Beanspruchung 523  
mediale Beanspruchung 523  
Mehrschichtverbund 505  
Membrane-Inflation-Rheometer 176  
Memory-Effekt 254  
Metalldesaktivatoren 545  
Metalloccen-Katalysatoren 50, 505  
MFI 162  
Mikroorganismen 524, 546  
Mikrorisse 284, 537  
Mischungsregel 338  
Modellierung der Viskoelastizität 245  
Molekülbindung 41  
Moleküldurchmesser, effektiver 500  
Moleküle, ungesättigte 44  
Molekülorientierungen 538  
Molmasse, gewichtsmittlere 60  
Molmasse, viskositätsmittlere 61  
Molmasse, zahlenmittlere 60

## N

Nachstellversuche 569  
Nebervalenzkräfte 41  
Netztheorie 340

## O

Oberflächendefekte 153  
Oberflächenwiderstand 405  
Oligomere 52  
Orientierung 257  
Orientierungsdoppelbrechung 446

Oxidationsinduktionszeit (OIT) 543  
Ozon 531

## P

Perkolationsschwelle 403  
Permeabilität 492  
Permeation 487, 490  
Permeationskoeffizienten 486  
Permeationsminderung 504  
Permeationsmodell 487  
Permeation von Dämpfen 501  
Permeation von Wasser 503  
Permittivität 408  
Peroxid 528  
PET-Flaschen 507  
physikalische Alterungsvorgänge 522  
Pigmentremission 451  
PLA 548  
Platte-Platte-System 166  
Polarisationsfilter 445  
Polyacrylnitril 332  
Polyester 51  
Polyesteramide 554  
Polyesterharze, ungesättigte 54  
Polylactid 548  
Polymere 27f.  
Polymere, organische 30  
Polymere, teilkristalline 195  
Polymerisation, anionische 43  
Polymerisation, kationische 43  
Polymerisation, koordinative 50  
Polymerisation, radikalische 43  
Polysalze 94  
Präpolymer 54  
Primäre Antioxidantien 542  
Primärschäden 560  
Primärstruktur 78  
PVD-Verfahren 506  
p-v-T-Diagramm 202

## Q

Quellspannung 539  
Quellung 502, 538

## R

Radikale 528  
Radikalketten-Polymerisation 44  
Reflexionsgrad 441  
Reibung 344  
Reibungskoeffizienten 351  
Reibungswärme 348  
Relaxationszeit 247, 249  
Relaxieren 271  
Resonanz 472, 483  
Resonanz, magnetische 423  
resorbierbare Kunststoffe 548  
Rotationsrheometer 164  
Roving 333

## S

sauer induzierte Hydrolyse 535  
Schaden 559  
Schadensanalyse 557  
Schadensanalyse an Elektroniksteckern 570  
Schadensanalyse an GFK-Hülsen aus Sicherungseinsätzen 582  
Schadensanalyse an PET-Mehrwegflaschen 572  
Schadensanalyse an PVDF-Bauteilen mit Rissbildungen 576  
Schadensanalyse an versprödeten PP-Heizungsrohren 579  
Schadensbild 561  
Schadenshergang 569  
Schadensthesen 568  
Schadensumfeld 562  
Schalldämmung 477  
Schalldämpfung 477f.  
Schalldruck 467, 469f., 480  
Schalldruckpegel 469f.  
Schalldruckpegel, A-bewertet 470  
Schallgeschwindigkeit 467  
Schallintensität 469  
Schallschnelle 467, 469  
Schallwelle 466f., 478  
Schichtsilikat 505

Schlankheitsgrad 328  
Schmelzebruch 155  
Schmelzindex 67  
Schmelzindexmessgerät 162  
Schubbruch 323  
schwarze Strahler 461  
Schwindung 202  
Schwingung 467, 469, 476, 479  
Schwingung, mechanisch 465 f.,  
469, 472, 476  
Schwingungsverhalten 468, 471,  
474, 476, 480 f.  
Schwingversuch 167  
sekundäre Antioxidantien 542  
Sekundärstruktur 84  
shark skin 153  
Shear Yielding 290  
Siedetemperatur 499  
Spannungs-Dehnungs-Diagramm,  
isochrones 273  
Spannungs-Doppelbrechung  
445  
Spannungsriß 286  
Spannungsrißbildung 540  
Spannungsrisse 537  
Spannungsrissskorrosion 540  
Spannversuch 166  
Speichermodul 473  
Spektralphotometer 452  
Stabilisatoren 541  
Stauchung, kritische 325  
Staudinger-Index 66  
Steifigkeitserhöhung 262  
Stereoisomere 79  
sterische Hinderung 86  
sterische Ordnung 79  
Stick-Slip-Effekt 153  
Stofftransport 492  
strahleninduzierte Alterung 531  
Strahlungsmessgeräte 461  
Strahlungsmessung 461  
Streuungskoeffizient 439  
Strukturaufklärung 425  
Struktur, morphologische 193  
Stufenwachstumsreaktion 52

Superpositionsprinzip, Boltzmannsches  
251 f.  
syndiotaktisch 80  
systemische Schadensanalyse 558

## T

Taber-Reibrad 355  
Taktizität 50, 79  
Temperaturbeanspruchung 523  
Temperatureinfluss 241  
Temperatur, kritische 499  
Tempern 258  
Thermoplaste 35  
Time-Lag-Methode 514  
Tragverhalten 281  
Transmissionsgrad 441

## U

UV-Absorber 544  
UV-Quencher 545  
UV-Strahlung 531

## V

VDI-Richtlinie 3822 558  
Verhalten, akustisch 465  
Verlustmodul 473  
Verlustzahl, dielektrische 411  
Vernetzung 54, 90  
Vernetzungsgrad 91  
Versagensformen 323  
Verschlaufungen 259  
Verschleiß 352  
Verschleiß, volumetrischer 353  
Verstreckgrad 259  
Verzweigungen 82  
Viskoelastizität, linear 248  
Viskoelastizität, nicht-linear 253 f.  
Viskosität, repräsentativ 139  
Vlies 334  
Volumenleitfähigkeit 402  
Vulkanisation 54

**W**

Wärmeeindringzahl **376**  
Wasserdampfpermeation **494**  
Wasserstoffbrückenbindungen **76**  
Weißbruch **285**  
Werkstoffkennwerte **274**  
wichtige Analysemethoden zur  
  Schadensanalyse **568**  
Wirkungsquerschnitt **500**

**Z**

Zeiteinfluss **267**  
Zeit-Temperatur-Verschiebungsprinzip  
  **242, 289**