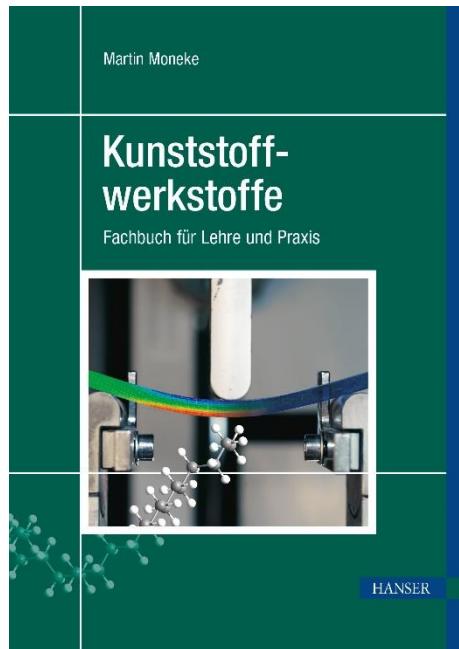


HANSER



Leseprobe

zu

Kunststoffwerkstoffe

von Martin Moneke

Print-ISBN: 978-3-446-47016-3

E-Book-ISBN: 978-3-446-47017-0

Weitere Informationen und Bestellungen unter
<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446470163>
sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	XI
1 Einleitung	1
1.1 Anwendungen der Kunststoffe	1
1.2 Wirtschaftliche Bedeutung der Kunststoffe	7
1.3 Vergleich von Kunststoffwerkstoffen und metallischen Werkstoffen	11
1.3.1 Zeitliche Zusammenhänge	12
1.3.2 Werkstoffverhalten	13
1.3.3 (Teil-)Kristallinität	15
1.3.4 Glasübergang	16
1.3.5 Entropieelastizität	17
1.3.6 Kräfte in und zwischen Molekülen	17
1.3.7 Zeitabhängiges Verhalten	18
1.3.8 Rohstoffverbrauch	19
1.3.9 Energiebedarf	23
1.3.10 Preise	25
2 Polymere	33
2.1 Stoffe, Verbindungen, Atome und Elemente	33
2.2 Aufbau und Struktur von Polymeren	37
2.2.1 Monomer, Polymer und lineare Kette	37
2.2.2 Konstitution, Konfiguration und Konformation	43
2.2.3 Co- und Terpolymere	49
2.2.4 Verzweigungen	51
2.2.5 Chemische und physikalische Vernetzung	53
2.2.6 Klassifizierung der Polymere nach ihrer Struktur	57
2.2.7 Klassifizierung der Thermoplaste nach Kennwerten und Produktionsmenge	58
2.2.8 Klassifizierung der Polymere nach ihrer Rohstoffbasis	59

2.3	Molmasse	64
2.4	Haupt- und Nebenvalenzbindungen	71
2.4.1	Hauptvalenzbindung	72
2.4.2	Nebenvalenzbindung	75
2.4.2.1	Polarität	76
2.4.2.2	Dipol-Dipol-Bindung	80
2.4.2.3	Wasserstoffbrückenbindung	81
2.4.2.4	Induktionskräfte	82
2.4.2.5	Dispersionskräfte	82
2.5	Zustandsbereiche und Zustandsänderungen	83
2.5.1	Amorpher Zustand	83
2.5.2	Bewegung von Polymeren im amorphen Zustand	86
2.5.3	Glasübergang	89
2.5.4	Teilkristalliner Zustand	96
2.5.5	Schmelzen von Kristallen	107
2.5.6	Kristallisieren	110
2.6	Innere und äußere Weichmachung	118
2.6.1	Äußere Weichmachung	118
2.6.2	Innere Weichmachung	119
3	Kunststoffe	123
3.1	Additive	123
3.1.1	Antioxidanzien	125
3.1.2	UV-Stabilisatoren	129
3.1.3	Flammschutzmittel	132
3.1.4	Weichmacher	136
3.1.5	Farbmittel	138
3.2	Füllstoffe	144
3.2.1	Kreide	154
3.2.2	Talkum	156
3.2.3	Glaskugeln	157
3.3	Verstärkungsstoffe	157
3.3.1	Glasfasern	164
3.3.2	Aramidfasern	166
3.3.3	Kohlenstofffasern	168
3.3.4	Fasern aus nachwachsenden Rohstoffen	171
3.3.5	Verstärkung durch Fasern	176
3.4	Kunststoffwerkstoffe	186
3.4.1	Bezeichnung der Kunststoffe	186
3.4.2	Anwendungsbereiche für Kunststoffe	188

3.4.3	Normative Anforderungen an Kunststoffwerkstoffe	191
3.4.4	Datenbanken für Kunststoffe	193
4	Verarbeitung von Kunststoffen	197
4.1	Spritzgießen	197
4.2	Extrudieren	200
4.3	Formpressen	202
4.4	Entstehen von Orientierungen beim Spritzgießen	204
4.5	Verarbeitungstypische Morphologien	209
5	Nachhaltigkeit von Kunststoffen	215
5.1	Kunststoffe in der Umwelt	215
5.1.1	Mikroplastik	216
5.1.2	Marine Litter	219
5.2	Entwicklung der Nachhaltigkeit	223
5.3	Gesetzliche Vorgaben	226
5.3.1	Vermeidung	229
5.3.2	Wiederverwendung	231
5.3.3	Recycling	232
5.3.4	Sonstige Verwertung	232
5.3.5	Beseitigung	232
5.4	Abfallmengen und ihre Entwicklung	233
5.5	Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland	234
5.6	Sammlung von Kunststoffabfällen	239
5.7	Recycling	242
5.7.1	Anfänge des Kunststoffrecyclings in Deutschland	242
5.7.2	Kunststoffrecycling in der Europäischen Union	244
5.7.3	Werkstoffabhängige Arten des Recyclings	244
5.7.4	Herausforderungen beim Recycling von Kunststoffen . .	246
5.7.5	Sortierung	247
5.7.6	Werkstoffliches Recycling von Kunststoffabfällen	251
5.7.7	Rohstoffliches Recycling von Kunststoffabfällen	257
5.7.8	Design für Recycling	259
5.8	Ökobilanz, Life Cycle Assessment (LCA)	262
5.8.1	Vorgehen bei der Erstellung einer Ökobilanz	262
5.8.2	Normen zur Ökobilanz	267
5.8.3	Datenquellen für Ökobilanzen	269
5.9	Beitrag von Kunststoffen zu einer nachhaltigen Entwicklung . .	269

5.9.1	Verringerung von Lebensmittelabfällen durch Kunststoffverpackungen	271
5.9.2	Weniger Treibstoffverbrauch durch Leichtbau mit Kunststoffen	276
5.9.3	Energieeinsparungen durch Kunststoffdämmstoffe	277
5.9.4	Wasser- und Energieeinsparung in der Landwirtschaft ..	279
5.9.5	Schutzmasken aus Kunststoffen	281
5.9.6	Kunststoffe als Enabler für die Nutzung regenerativer Energien	283
5.10	Entwicklungsfelder für nachhaltige Kunststoffe	287
5.10.1	Rohstoffbasis ändern	287
5.10.2	Stoffkreisläufe schließen	288
5.10.3	Nutzungsphase verlängern	289
6	Grundlagen der Normung	297
6.1	Entwicklung und Nutzen der Normung	297
6.2	Normung in der Kunststofftechnik	299
7	Mechanisches Verhalten fester Kunststoffe	303
7.1	Methoden der Werkstoffprüfung	303
7.1.1	Zusammenhang zwischen Normen	303
7.1.2	Normalklima für Konditionierung und Prüfung	305
7.1.3	Probekörper	308
7.1.4	Bestimmung der Zugeigenschaften	313
7.1.5	Bestimmung der Biegeeigenschaften	319
7.1.6	Bestimmung der Härte	327
7.1.6.1	Grundlagen der Härtemessung	327
7.1.6.2	Kugleindruckhärte	330
7.1.6.3	Shore-Härte	331
7.1.7	Bestimmung des Kriechverhaltens	333
7.1.8	Bestimmung der Schlagbiegeeigenschaften	337
7.2	Verhalten der Kunststoffe	343
7.2.1	Verhalten im Zugversuch	343
7.2.2	Temperaturabhängigkeit des mechanischen Verhaltens	345
7.2.3	Zeitabhängigkeit des mechanischen Verhaltens	350
7.2.4	Feuchteabhängigkeit des mechanischen Verhaltens	355
7.2.5	Der Übergang vom linearen zum nicht-linearen Verhalten	358
7.3	Mechanische Werkstoffmodelle	361
7.3.1	Begriffe und Konzepte der Mechanik	362

7.3.1.1	Spannungen	364
7.3.1.2	Verzerrungen	364
7.3.1.3	Annahme kleiner Deformationen	365
7.3.1.4	Stoffgesetz	366
7.3.1.5	Linearität	366
7.3.1.6	Annahmen in der Elastostatik	367
7.3.1.7	Begriffe zur Beschreibung des Materialverhaltens	368
7.3.2	Phänomenologische Beschreibung des Materialverhaltens	370
7.3.2.1	Ideal linear-elastisches Verhalten	371
7.3.2.2	Ideal linear-viskoses Verhalten	373
7.3.2.3	Ideal plastisches Verhalten	375
7.3.2.4	Vergleich viskoser und plastischer Deformation	378
7.3.2.5	Maxwell-Modell zur Beschreibung der Relaxation	378
7.3.2.6	Kelvin-Voigt-Modell zur Beschreibung der Retardation	381
7.3.2.7	Burgers- oder Vier-Parameter-Modell	382
7.3.3	Molekulare Begründung der Elastizität in Kunststoffen	384
7.3.3.1	Energieelastizität	384
7.3.3.2	Entropieelastizität	385
7.3.4	Zeit-Temperatur-Superpositionsprinzip	386
7.3.5	Einfluss verarbeitungsbedingter Eigenspannungen auf mechanische Kennwerte	391
A	Kurzzeichen für Kunststoffe	395
Index		401

Vorwort

Dieses Buch zur Werkstofftechnik der Kunststoffe richtet sich an Studierende und Praktiker:innen gleichermaßen. Bachelor- und Masterstudierende der Ingenieurdisziplinen an Universitäten und Hochschulen für angewandte Wissenschaften und insbesondere Studierende der Kunststofftechnik und des Maschinenbaus finden in ihm die Inhalte der Vorlesungen zur Werkstofftechnik der Kunststoffe. Praktiker:innen in der Industrie und hier vor allem Personen, die im Bereich der Produktentwicklung tätig sind, soll es sowohl einen schnellen Überblick über Kennwerte und deren Ermittlung als auch über die Hintergründe für das Verhalten von Kunststoffen verschaffen. Es werden aber auch viele gesellschaftlich relevante Aspekte beleuchtet, sodass auch allgemein interessierte Personen einen Nutzen aus diesem Buch ziehen können sollten.

Der Ansatz des Buches ist daher, das Wissen auf zwei Ebenen zu vermitteln: Es gibt z.B. Teile, in denen Wissen zu Werkstoffen und deren Prüfung für die Anwendung im Alltag von Ingenieurinnen und Ingenieuren auf dem durch Normen gegebenen Stand der Technik dargestellt wird. Und es gibt Teile in denen versucht wird, die ingenieur- und naturwissenschaftlichen Hintergründe zusammenzufassen und zu analysieren, die zu einem Verständnis des Verhaltens der Kunststoffwerkstoffe notwendig sind. Hier ist der Anspruch, die bekannten und vielfach dargestellten Zusammenhänge neu und sehr systematisch zu vermitteln. Zum Beispiel gibt es einen Abschnitt zur Einordnung von viskoelastischem und plastischem Verhalten sowie des Fließens, Begriffe die manchmal fälschlicherweise synonym verwendet werden. In Fußnoten werden tiefergehende Informationen vermittelt, die meist für eher fortgeschrittene Leser:innen interessant sein dürften.

Es wurde versucht, auch vermeintliche Kleinigkeiten, die Anfänger:innen in der Kunststofftechnik und gestandene Praktiker:innen mit Ausbildung im Bereich der Metalle typischerweise verwundern, zu erläutern. Grundlegende Begriffe der Fachsprache und Erläuterungen von wesentlichen Konzepten werden durch Kästen eingerahmt, sodass sie eindeutig erkannt werden können. Das Sachwortverzeichnis ist sehr umfangreich und verweist auf Stellen, an denen Begriffe definiert oder erläutert werden. Die referenzierten Wörter sind zum schnelleren Auffinden

im Text kursiv gedruckt. Das Sachwortverzeichnis soll so als Nachschlagewerk dienen. An Stellen mit typisch kunststofftechnischer Terminologie wird auf die inhaltsgleichen Begriffe in der Welt der Metalle verwiesen.

Es gibt viele Verweise auf Datenbanken, Verweise auf Informationsangebote im Internet für die Kunststoffindustrie und darüber hinaus, Verweise auf Normen sowie Verweise auf die verwendete und weiterführende Literatur. Dabei sind viele Quellen direkt verlinkt, sodass Nutzer:innen digitaler Versionen des Buches die Angaben direkt weiterverfolgen, nachvollziehen und vertiefen können. Dies soll vor allem Personen helfen, die nicht den an Hochschulen und Universitäten üblichen kostenfreien und umfassenden Zugang zu Fachliteratur haben. Die wissenschaftliche Literatur wird angegeben, bevorzugt werden aber allgemein zugängliche Quellen und Bücher.

Ein ganzes Kapitel zur Nachhaltigkeit von Kunststoffen spannt den Bogen zwischen den beiden Seiten ein und derselben Medaille: einerseits Kunststoffe als Mikroplastik im Meer und andererseits Kunststoffe als die Enabler für die nachhaltige Entwicklung schlechthin. Dieses Kapitel enthält auch einen geschichtlichen Abriss der Nachhaltigkeit, behandelt die aktuelle Gesetzgebung und die Grundzüge von Ökobilanzen, um mit beispielhaften Beiträgen von Kunststoffen zur Nachhaltigen Entwicklung zu schließen.

Beim Schreiben wurde versucht, alle Methoden der geschlechtergerechten Sprache anzuwenden, die im Duden (www.duden.de/sprachwissen/sprachratgeber/GeschlechtergerechterSprachgebrauch) und von Journalistinnen (www.genderleicht.de/schreibtipps/) empfohlen werden. Die jüngeren Generationen, die unser Leben in den nächsten Jahren und Jahrzehnten gestalten werden, empfinden das nach Erfahrung des Autors als normal und angebracht.

Schließlich wurde versucht, das Buch „aus einem Guss“ zu gestalten. Alle Abbildungen wurden in einem einheitlichen Design erstellt, alle Kapitel wurden im gleichen Stil, vom gleichen Autor und mit dem gleichen didaktischen Anspruch geschrieben.

Ein großer Dank geht an die Personen, die auf vielfältige Art bei der Erstellung des Buches unterstützt haben: zuallererst Fabian Heer, der die allermeisten Abbildungen erstellt und dabei auf die formale Gestaltung geachtet hat, Katharina Malek für die Erstellung der REM-Aufnahmen, Felix Große-Aschhoff für die Erstellung der lichtmikroskopischen Aufnahmen sowie Christian Freiberger für die Erstellung der Strukturformeln und Abbildungen von Molekülen. Die sehr engagierten Studierenden der Vorlesung „Nachhaltige Kunststoffwerkstoffe“ haben das Kapitel zur Nachhaltigkeit kritisch reflektiert und durch ihre Beiträge verbessert. Für die Überlassung von Daten möchte ich auch der Conversio Market & Strategy GmbH in Person von Christoph Lindner und der Kunststoff Information Verlagsgesellschaft mbH in Person von Christian Preiser danken. Einige Kolleg:innen innerhalb und

außerhalb der Hochschule Darmstadt haben ebenfalls mit ihren Antworten auf gestellte Fragen zu einer Schärfung der Betrachtung beigetragen und wertvollen Input geliefert.

Und schließlich wurde das Schreiben des Buches auch zu einem Familienprojekt. Neben dem ganz besonders großen Dank an meine Familie und meine Eltern für ihre Geduld mit und Rücksicht auf eine schreibende Person danke ich meiner Frau, Prof. Dr.-Ing. Beate Lauterbach, für die fachlichen Diskussionen insbesondere zur Mechanik, Charlotte und Marlene Moneke für die Unterstützung bei der Erstellung einiger Diagramme, Bernhard Moneke für das rigide Korrekturlesen sowie Katharina und Bernhard Moneke für die generöse Unterstützung im Vorfeld.

Und schließlich gilt mein Dank dem Carl Hanser Verlag und insbesondere Dr. Mark Smith für die Anregung zur Erstellung des Buches sowie Melanie Lindwurm-Giordani und Rebecca Wehrmann für die editorische Bearbeitung und allen für ihre Hilfe.

Darmstadt, im Mai 2022

Martin Moneke

■ 1.1 Anwendungen der Kunststoffe

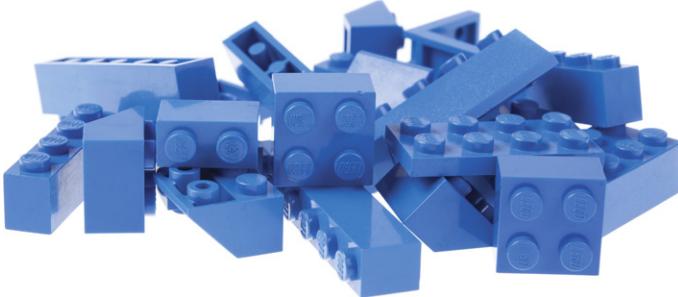
Kunststoffwerkstoffe sind moderne, ständig an Bedeutung zunehmende, nachhaltige und in vielen verschiedenen Anwendungen einsetzbare Werkstoffe. Sie kommen in allen Lebensbereichen vor und haben andere Materialien wegen ihres außerordentlichen Eigenschaftsspektrums ersetzt.

Im Leistungssport sind oft eine geringe Masse und die hohe mechanische Belastbarkeit eine Anforderung. Das gilt im Wintersport für Skier, Snowboards, Schutzhelme und Schutzbrillen. Im sommerlichen Wassersport bei den Kanuten [1], beim Rudern, Surfen und Segeln ist es das Gleiche. Extreme Anforderungen an Mensch und Material werden unter anderem beim America's Cup gestellt, vgl. Bild 1.1. Hier hatte das Team aus Neuseeland im Jahr 2012 die Foils bei einem Katamaran eingeführt, die das Boot buchstäblich zum Fliegen bringen [2]. Rumpf, Foils und Ruder sind wie die Aufbauten und der Mast bei Rennjachten aus Kohlenstofffaser-Epoxidharz-Verbund auf Schaumkernen, die Segel sind ebenfalls aus Carbon- oder Polyesterfasern.

Weniger dramatisch aber ähnlich anspruchsvoll sind Anforderungen an Spielzeugbausteine, die von Lego seit den 1960er-Jahren aus Acrylnitril-Butadien-Styrol Kunststoff (ABS) gefertigt werden, vgl. Bild 1.2. Bei diesen Bausteinen ist für einen dauerhaften Klemmmechanismus die sehr geringe Toleranz genauso wichtig wie die geringe, aber vorhandene Verformbarkeit von Noppen und Noppenaufnahmen. Hinzu kommen Anforderungen hinsichtlich der Beständigkeit gegen Bruch durch Schläge oder Fallenlassen, gegen UV-Strahlung, gegen Medieneinflüsse wie Kinderspeichel, gegen Kratzen und gegen Reibverschleiß. Auch nach Jahrzehnten funktioniert der Klemmmechanismus noch, wie man schnell selbst herausfinden kann.

**Bild 1.1**

Mechanisch stark belasteter und korrosionsfester Katamaran aus Kohlenstofffaser-Epoxidharz-Verbund (CFK) des Teams Emirates aus Neuseeland beim America's Cup 2013 auf seinen Foils (iStock.com/SteveDF)

**Bild 1.2** Maßhaltige und belastbare Spielzeugbausteine aus Acrylnitril-Butadien-Styrol Kunststoff (ABS) (iStock.com/CTRPhotos)

Auf eine Einsatzdauer von 50 Jahren werden Wohngebäude und damit auch die Fußbodenheizungen in ihnen ausgelegt. Für Fußbodenheizungen kommen Rohre aus vernetztem Polyethylen mittlerer Dichte (PE-MD) mit Sauerstoffbarriere aus Ethylen-Vinylalkohol Kunststoff (EVOH) zum Einsatz, vgl. Bild 1.3. Weil sie leicht und flexibel sind, ist die Verlegung sehr effizient möglich und an verschiedene Raumformen schnell anpassbar. Die Anforderungen sind in Normen zusammen mit den Prüfmethoden gelistet. Sie umfassen die Beständigkeit gegen Wasser mit

Temperaturen bis 100 °C, die Druckbeständigkeit bei hohen Temperaturen, Maßhaltigkeit sowie die Sperrwirkung gegen Sauerstoff. Letzteres ist zum Schutz der metallischen Bauteile in Heizungssystemen wichtig.



Bild 1.3 50 Jahre haltbare, korrosionsbeständige, leichte und leicht zu verlegende Rohre einer Fußbodenheizung aus vernetztem Polyethylen mittlerer Dichte (PE-MD) mit Sauerstoffbarriere aus Ethylen-Vinylalkohol Kunststoff (EVOH) (iStock.com/romaset)

Ein Bereich, in dem Kunststoffe ebenfalls metallische Werkstoffe ersetzen und hohe Anforderungen erfüllen müssen, ist der Motorraum von Fahrzeugen, vgl. Bild 1.4. Fahrzeuge werden für eine Gebrauchsdauer von zehn Jahren ausgelegt. In dieser Zeit treten für Kunststoffbauteile relevante Temperaturen zwischen -40 °C in kalten Winternächten in nördlichen Ländern und 140 °C¹ beim Betrieb eines Verbrennungsmotors auf. Dazu kommt die chemische Beständigkeit gegen Medien wie Treibstoffe, Öle, Kühlmittel, Bremsflüssigkeit oder Streusalz. Ausgelegt werden die Bauteile auch für Belastungen durch Innendrücke und Vibrationen. Infrage kommen dafür je nach konkretem Bauteil verschiedene Kunststoffe wie Polyamide (PA), Polypropylen (PP) und Polyethylen (PE), letzteres z. B. für den Wischwasserbehälter links in Bild 1.4.

¹⁾ Prüftemperatur für Kraftstoffschlauchleitungen nach DIN 73388.



Bild 1.4 Bauteile aus Polyamiden (PA), Polypropylen (PP) und Polyethylen (PE) sowie Elastomeren im Motorraum eines Toyota Mirai mit Wasserstoffbrennstoffzelle (iStock.com/Tramino)

Automobile [3] enthalten unabhängig von der Antriebsart einen hohen Anteil von Kunststoffen in der Karosserie für flächige Teile wie Stoßfänger und Kotflügel sowie Anbauteile wie Seitenspiegel oder aerodynamisch geformte Unterbodenabdeckungen zur Verringerung des Luftwiderstands. Der Vorteil von Kunststoffen ist dabei insbesondere die geringe Dichte gegenüber metallischen Werkstoffen. Auch in tragenden Strukturen der Karosserie bei Sport- und Luxuswagen kommen Kunststoffe zum Einsatz. Hier werden vor allem faserverstärkte Duromere eingesetzt. Der Fahrzeuginnenraum besteht überwiegend aus Kunststoffen wie Polypropylen (PP) und Acrylnitril-Butadien-Styrol Kunststoff (ABS). Für Verscheibungen und Lampen kommt Polycarbonat (PC) zum Einsatz. Bei Brennstoffzellen und Batterien werden Polymermembranen verwendet, für Batteriegehäuse kommen thermisch leitfähige, aber elektrisch isolierende Kunststoffe zum Einsatz.

Allgemein gilt, dass Kunststoffe immer häufiger eingesetzt werden, weil sie bei den Kriterien [3]

- Design,
- Maßhaltigkeit,
- Integration,
- Korrosion,
- Oberfläche,
- Bruchverhalten,
- Kosten und
- Gewicht

Vorteile gegenüber den Materialien Stahl, Aluminium und Magnesium bieten. Mit der Zunahme von alternativen Antrieben fallen einige klassische Anforderungen hinsichtlich der Motorkühlung und der Massenverteilung weg. Dies schafft neue Designmöglichkeiten. Das autonome Fahren wird weiter zu einer neuen Nutzung und Gestaltung des Automobils beitragen. Hierdurch wird der Trend zu mehr Kunststoffen im Automobil weiter steigen.



Bild 1.5 FFP2-Maske links mit zwei äußeren Schutzvliesen und einem virenfilternden Vlies aus Polypropylen (PP) sowie eine medizinische Maske rechts mit zwei Vlieslagen aus Polypropylen (PP) (iStock.com/Axel Goehns)

Vertraut sind wir alle mit Masken zum Schutz vor Viren, vgl. Bild 1.5. Diese Masken und die Filterwirkung der Vliese in ihnen sind überhaupt nur mit Kunststoffen möglich, siehe auch Kapitel 5. Die Feinheit der Fasern in ihnen und die den Kunststoffen eigene statische Aufladung sind ursächlich für den Filtereffekt bei gleichzeitig geringem Atemwiderstand. Der Einsatz von Kunststoffen führt zu leichten, tragbaren und günstig zu produzierenden Masken.

Die Medizintechnik ist ohnehin reich an Kunststoffen. Was wenigen bewusst sein dürfte, ist, dass Blutbeutel, also Produkte, die wegen des Kontakts mit Blut die höchsten Anforderungen an Produkt, Material und Herstellprozess erfüllen müssen, aus dem Kunststoff Polyvinylchlorid (PVC) hergestellt werden, vgl. Bild 1.6.

Diese wenigen Beispiele zeigen, dass Kunststoffe für sehr vielfältige Anwendungen verwendet werden. In Europa ging im Jahr 2020 mit 40,5% der größte Anteil der 49,1 Millionen t verbrauchter Kunststoffe in den Verpackungsbereich, gefolgt von der Baubranche mit 20,4% und der Fahrzeugindustrie mit 8,8% [4], siehe Bild 1.7. Die Zahlen für Deutschland waren 2020 bei einem Gesamtverbrauch von 12,3 Millionen t sehr ähnlich [5], wobei in Deutschland der Anteil der Verpackungen mit 34% geringer und der Anteil der Fahrzeugindustrie mit 12% höher war als in Europa.



Bild 1.6 Steriler und reißfester Blutbeutel aus Polyvinylchlorid (PVC) (iStock.com/flyingv43)

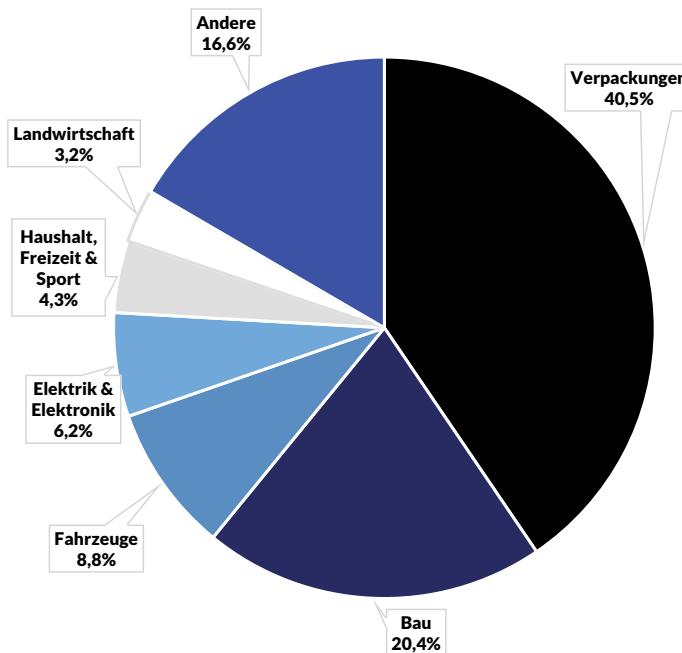


Bild 1.7 Anteil der verschiedenen Branchen am Kunststoffverbrauch in Europa 2020 [4]

Für die unterschiedlichen Anwendungen kommen verschiedene Polymere mit spezifischem chemischem Aufbau und daher auch mit spezifischen Eigenschaften zum Einsatz. Ihre Eigenschaften können dann weiter durch eine geschickte und zielorientierte Einstellung der *Rezeptur* der Kunststoffe gezielt an die jeweilige An-

wendung angepasst werden. Dadurch ergibt sich eine große Anzahl verschiedener Kunststoffe:

- In ISO 1043 Teil 1 werden Kurzzeichen für 124 verschiedene, in der Kunststofftechnik verwendete Polymere definiert.
- In Teil 2 von ISO 1043 werden 17 Kategorien von Füll- und Verstärkungsstoffen wie Aramid, Glas, Kohlenstoff, Mineral, Holz, Calciumcarbonat, Glimmer und Talk, um die gebräuchlichsten zu nennen, aufgelistet. Diese wiederum werden in 23 Kategorien bezüglich Form und Struktur wie Kugel, Pulver, Faser, Mahlgut, Roving, Schnittmatte und Gewebe eingeteilt.

In der von vielen Kunststoffproduzenten getragenen und für Nutzer kostenlosen *CAMPUS*-Datenbank werden 9358 einzelne Kunststofftypen aufgelistet (Stand: März 2021). Dabei umfasst diese Datenbank nur die Thermoplaste und nicht alle Kunststoffhersteller weltweit. In der kostenpflichtigen Datenbank *Material Data Center* sind dagegen 55 684 Typen von Thermoplasten, Elastomeren und Duromeren enthalten (Stand: März 2021).

Die Welt der Kunststoffe ist also auf jeden Fall vielfältig. Für fast jede Anwendung gibt es eine Kunststofflösung.

■ 1.2 Wirtschaftliche Bedeutung der Kunststoffe

Seit Leo Baekeland 1907 das Phenol-Formaldehyd Harz erfand [6], sind Kunststoffwerkstoffe weltweit in ständig wachsenden Mengen produziert worden, vgl. Bild 1.8. Dabei ist die produzierte Kunststoffmenge zwischen den Jahren 1950 und 1980 weltweit exponentiell gewachsen, siehe die gelbe gepunktete Linie in Bild 1.8. Ab dem Jahr 2000 ist das Wachstum weltweit nur noch linear, wobei eine Rücksetzung aufgrund der Finanz- und Eurokrise in den Jahren 2008 und 2009 deutlich zu erkennen ist. Die Ölpreiskrisen in den Jahren 1973 und 1979 haben ebenfalls ihre Spuren hinterlassen. Genauso hat die Coronapandemie ab dem Jahr 2020 zu einem Rückgang bei der Kunststoffproduktion und -verarbeitung geführt.

Während bis ca. 1960 die weltweite Produktion hauptsächlich in den Ländern Deutschland, Japan und USA stattfand, ist die produzierte Menge in Deutschland seit den 1990er-Jahren konstant. In Europa gilt dies spätestens seit 2000. Das weltweite Wachstum ist hauptsächlich auf das in China zurückzuführen. Hier hat sich die produzierte Kunststoffmenge zwischen 2006 und 2019 mehr als verdreifacht. Die Kunststoffproduktion in Nordamerika, Lateinamerika und Asien (ohne China und Japan) ist im gleichen Zeitraum um jeweils 21, 50 und 50 % gewachsen.

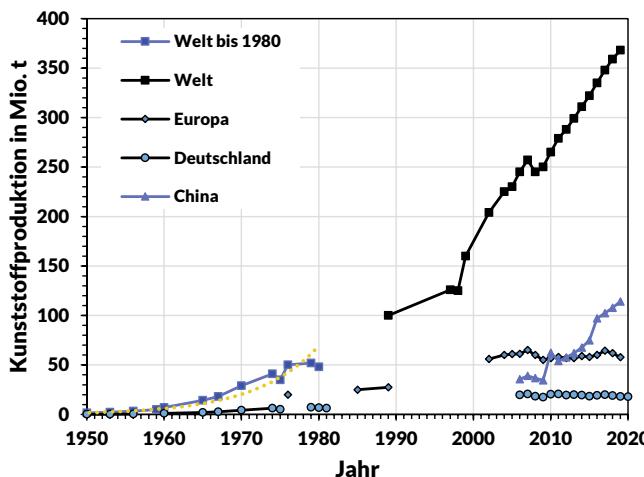


Bild 1.8 Zeitliche Entwicklung der weltweiten Kunststoffproduktion mit Daten aus [7, 8, 9, 10]

Bild 1.9 zeigt den Anteil der Regionen und der Länder China und Japan an der weltweiten Produktion von Kunststoffen im Jahr 2020 im Umfang von 367 Millionen t. Mit 52 % wird gut die Hälfte der Kunststoffe in Asien produziert. Zusammen mit der Tatsache, dass die USA und China in den letzten Jahren die größten Handelspartner Europas für Kunststoffe und Kunststoffprodukte waren, zeigt dies, wie international die Kunststoffbranche aufgestellt und vernetzt ist [4].

Die Kunststoffindustrie hat trotz der Verschiebung nach Asien in Europa und speziell auch in Deutschland immer noch eine große Bedeutung. Dies gilt insbesondere für die Hersteller von Gummi- und Kunststoffwaren, also den Teil der Industrie, in dem Ingenieur*innen der Kunststofftechnik überwiegend arbeiten. Zwar sind nur ca. 7 % der 47 638 Betriebe² mit 20 und mehr Beschäftigten und ca. 6 % der 6,3 Millionen Beschäftigten des verarbeitenden Gewerbes (inkl. Bergbau und Gewinnung von Steinen und Erden) den Herstellern von Gummi- und Kunststoffwaren zuzuordnen [11]. Bild 1.10 zeigt aber deutlich, wie robust und wachstumsstark die Hersteller von Gummi- und Kunststoffwaren sind. Zur besseren Vergleichbarkeit werden Indizes gebildet, indem die Zahlen der Betriebe und Beschäftigten jeweils auf die Zahlen des Jahres 2000 bezogen werden. Man sieht, dass das verarbeitende Gewerbe als Ganzes vor der Finanzkrise 2008 einen Abwärtstrend zeigte und sich in den letzten zehn wachstumsstarken Jahren wieder auf das Niveau des Jahres 2000 zurückbewegt hat. Demgegenüber haben die Zahlen der Betriebe und Beschäftigten in der Kunststoffverarbeitung von 2010 bis 2019 (das Jahr vor der Coronapandemie) um 9 bzw. 15 % zugenommen. Sie liegen damit deutlich, nämlich 8 bzw. 7 %, über den Werten für 2000.

²⁾ In der amtlichen Statistik ist ein Betrieb eine örtliche Niederlassung eines Unternehmens. Die Zahl der Unternehmen ist kleiner als die Zahl der Betriebe.

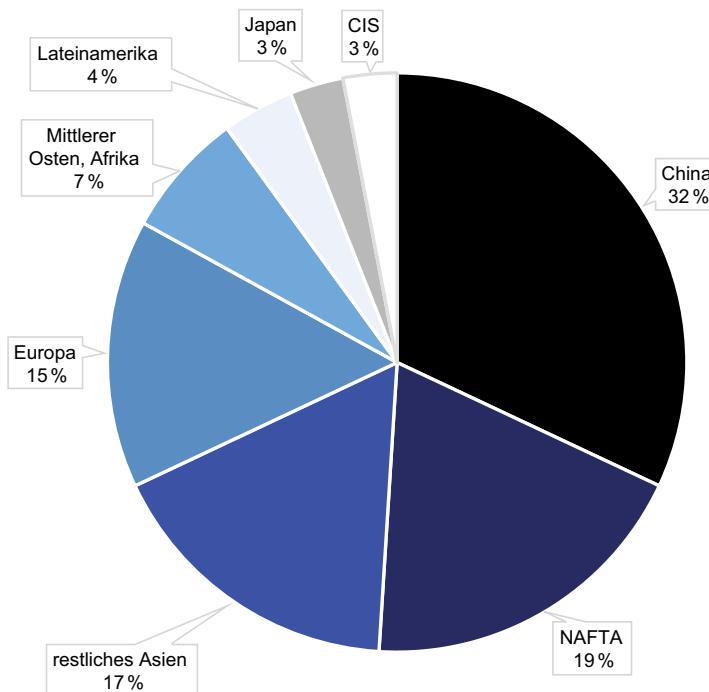


Bild 1.9 Anteil der Regionen und einzelner Länder an der weltweiten Produktion von Kunststoffen im Umfang von 367 Millionen t im Jahr 2020 [4]³

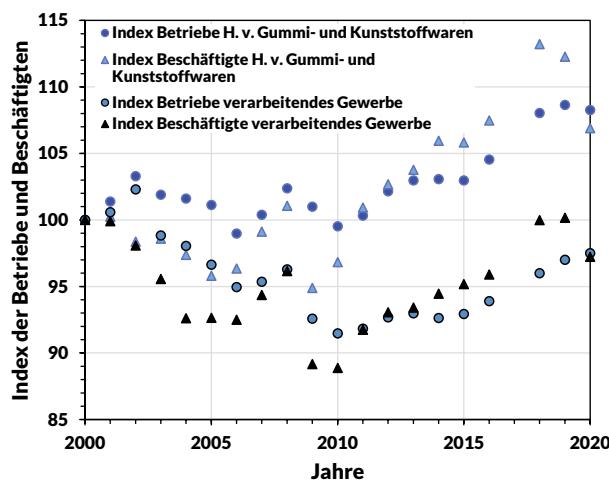


Bild 1.10 Index der Betriebe und Beschäftigten der Hersteller von Gummi- und Kunststoffwaren und des verarbeitenden Gewerbes insgesamt (Werte bezogen auf das Jahr 2000) [11]

³⁾ NAFTA steht für „North American Free Trade Agreement“ zwischen Kanada, USA und Mexiko. CIS ist die Abkürzung von „Commonwealth of Independent States“, auf Deutsch GUS für „Gemeinschaft unabhängiger Staaten“. Damit wird der Zusammenschluss von zwölf ehemaligen Sowjetrepubliken bezeichnet.

Die Gummi- und Kunststoffverarbeitung in Deutschland ist wie das verarbeitende Gewerbe insgesamt geprägt von kleinen und mittelständischen Unternehmen. Gut 90 % der Betriebe beschäftigen weniger als 250 Personen [11], vgl. Bild 1.11. Im Mittel arbeiten 116 Beschäftigte in den Betrieben der Kunststoffverarbeitung, im gesamten verarbeitenden Gewerbe sind es 131.

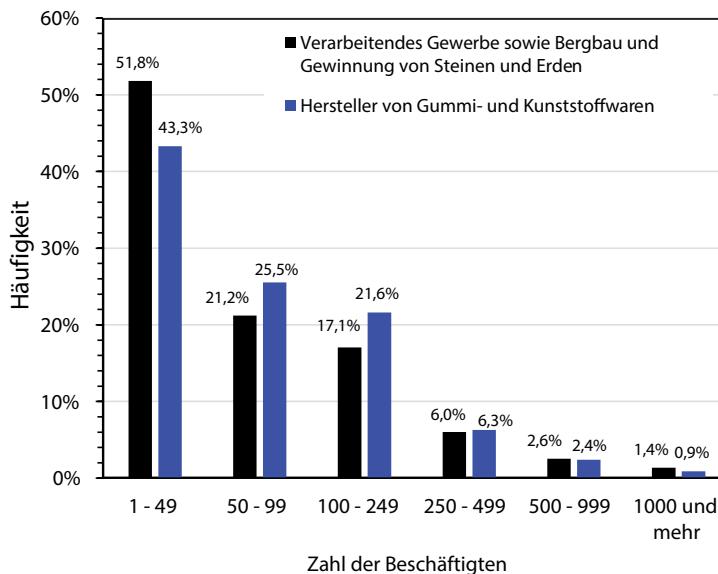


Bild 1.11 Verteilung der Betriebe der Gummi- und Kunststoffverarbeitung und des verarbeitenden Gewerbes insgesamt nach Beschäftigten in Deutschland 2020 [11]

Für die Erfassung der Daten durch das Statistische Bundesamt werden die Betriebe der Gummi- und Kunststoffverarbeitung in Deutschland sechs Klassen zugeordnet, siehe Bild 1.12. Die mit Abstand größte Klasse sind „Sonstige Kunststoffwaren“, zu der sowohl Automobilzulieferer wie auch Hersteller von Haushaltsartikeln, Medizinprodukten und weiteren Konsumgütern gehören.

Die „Herstellung von Platten, Folien, Schläuchen und Profilen aus Kunststoffen“ ist die zweitgrößte Sparte der Kunststoffverarbeitung. In ihr werden auch Halbzeuge, fertige Schläuche, Rohre und die Verbindungsstücke aus Kunststoffen produziert. Zu den „Verpackungsmitteln aus Kunststoffen“ zählen auch PET-Flaschen, Kisten und Beutel. Die „Herstellung von Baubedarfsartikeln aus Kunststoffen“ umfasst Fenster, Rollläden, Tanks, Spülkästen und Bodenbeläge.

Die beiden der Gummiverarbeitung zugeordneten Klassen „Herstellung und Runderneuerung von Bereifungen“ sowie „Sonstige Gummiwaren“ umfassen zusammen nur 11 % der gummi- und kunststoffverarbeitenden Betriebe. „Sonstige Gummiwaren“ beinhalten Dichtungen, Lagerungen und flexible Formteile aus Elastomeren.

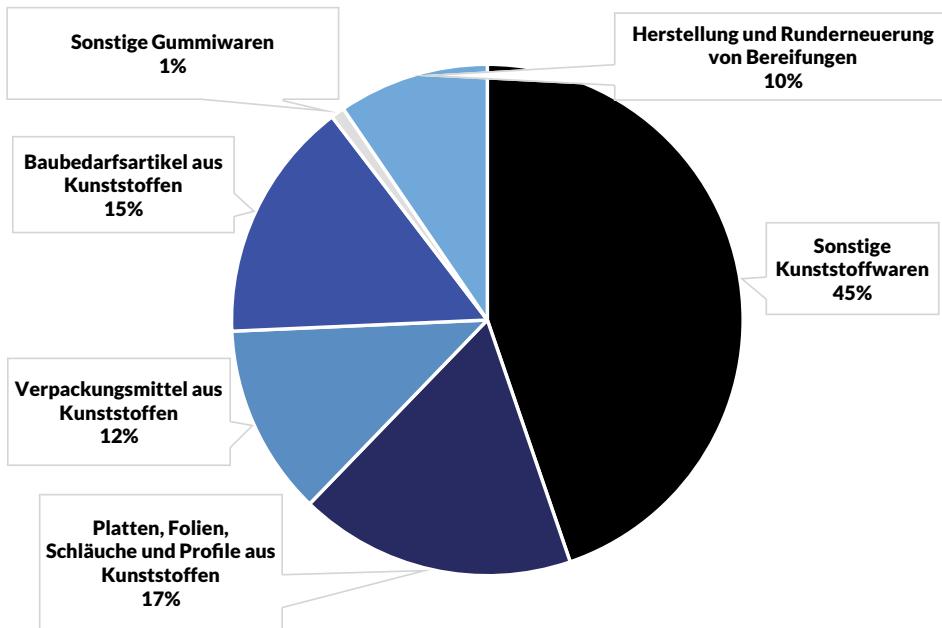


Bild 1.12 Anteil der Betriebe an den Sparten der Gummi- und Kunststoffverarbeitung in Deutschland 2020 [11]

■ 1.3 Vergleich von Kunststoffwerkstoffen und metallischen Werkstoffen

Jeder Werkstoff hat seine Bedeutung. Es kommt auf die Anwendung an, welcher Werkstoff oder eher welche Werkstoffkombination am besten geeignet ist. Daher sollte jede Person, die in der Produktentwicklung tätig ist, einen guten Überblick über alle relevanten Werkstoffe haben. Kunststoffe gehören definitiv dazu. Leider spiegelt die Ausbildung von Ingenieur*innen in Deutschland das nicht ausreichend wider. Dieses Kapitel ist der Versuch, den oft als Widerstreit der Werkstoffe wahrgenommenen Wettbewerb um den bestmöglichen Einsatz von Ressourcen für nachhaltige Anwendungen zu entschärfen. Für Leser*innen, die aus ihrer Ausbildung keine große Kunststoffkompetenz mitbringen, sollen deshalb die grundsätzlichen Unterschiede zwischen den beiden Werkstoffgruppen, die im Maschinenbau gleich wichtig sind, schnell im Überblick dargestellt werden.

1.3.1 Zeitliche Zusammenhänge

Die Erfahrungen der Menschheit bei der Gewinnung und Verarbeitung von Metallen reichen weit zurück, vgl. Bild 1.13. Während Gold und Kupfer als reine Metalle vorkommen und sehr früh als solche verwendet wurden, wurden die Legierungen der Bronze- und Eisenzeit durch Sammeln von Erfahrungen und Probieren entwickelt [12]. Im 20.Jahrhundert spielten zunehmend wissenschaftliche Erkenntnisse für die Entwicklung der Werkstoffe – metallische wie polymere – eine Rolle.

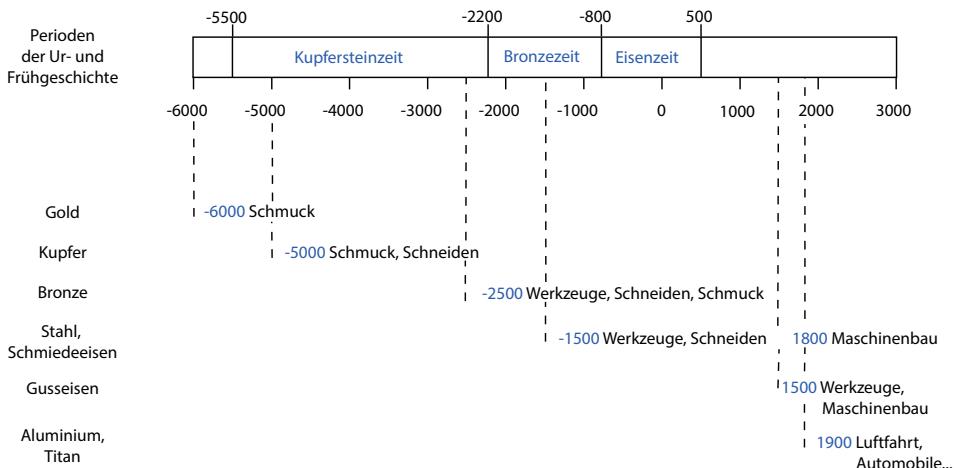


Bild 1.13 Zeitliche Entwicklung der technischen Verwendung der metallischen Werkstoffe [12]

Der Startpunkt für den Einsatz von Kunststoffen als Werkstoffe wird auf das Jahr 1907 [6, 13] datiert, als Leo Baekeland ein Phenol-Formaldehyd Harz erfand und in der Folge unter dem Handelsnamen Bakelit in den Markt einföhrte. In größerem Umfang und mit steigenden Mengen werden Kunststoffe erst seit dem Zweiten Weltkrieg eingesetzt, vgl. Abschnitt 1.2.

Mit dem Aufkommen der neuen Werkstoffklasse und der Erzeugung neuer Polymere und Kunststoffe stand in der zweiten Hälfte des 20.Jahrhunderts die Untersuchung dieser mit chemischen und physikalischen Methoden im Fokus, um ein Verständnis vom Aufbau und den Struktur-Eigenschafts-Beziehungen zu generieren. In der Welt der Metalle waren diese Themen zu diesem Zeitpunkt bereits weitgehend abgeschlossen, auch wenn natürlich auf allen Gebieten immer neue und auch grundlegende Fragen auftauchen und erforscht werden.

Aus diesem zeitlichen Versatz in der Erforschung und Nutzung von Metallen einerseits und Kunststoffen andererseits ergibt sich auch die heutige Situation. So gab es in der zweiten Hälfte des 20.Jahrhunderts im Bereich der Metalle und der Metallverarbeitung bereits viele nationale Normen, die den Stand der Technik wieder-

gaben und Ingenieur*innen bei der Arbeit unterstützten und leiteten. Im Bereich der Kunststoffe wurde auf diese Vorlagen zurückgegriffen und auf sie aufgebaut, weil die grundlegenden physikalischen Konzepte und Vorstellungen für beide Werkstoffklassen in gleicher Weise gelten sollten. Allerdings ergaben sich zwei Unterschiede:

- Während Normen für Metalle in der Zeit der Nationalstaaten entstanden und damit nationale Normen sind – der Maschinenbau in Deutschland ist von DIN-Normen geprägt – begann die Normungsarbeit für Kunststoffe in einer zunehmend globalisierten Welt. Der Bereich der Kunststoffe ist von international abgestimmten ISO-Normen geprägt.
- Methoden und Vorgehensweisen, die für metallische Werkstoffe entwickelt wurden, müssen angepasst oder grundsätzlich neu erarbeitet werden, um sinnvoll bei Kunststoffen anwendbar zu sein.

Die Kunststofftechnik ist sozusagen als eine Vertiefung des Maschinenbaus gestartet, um sich im Lauf der Zeit als verwandte, aber doch andere, eigenständige Disziplin zu entwickeln. So gibt es heute bei Studiengängen auch beide Ausprägungen: Kunststofftechnik als Vertiefungsrichtung oder als eigenständiger Bachelor- und Masterstudiengang wie z.B. an der Hochschule Darmstadt.

1.3.2 Werkstoffverhalten

Aufgrund der Unterschiede im molekularen Aufbau von Kunststoffen und Metallen ergeben sich fundamentale Unterschiede im Verhalten beider Werkstoffklassen, vgl. Tabelle 1.1.

Kunststoffe bestehen überwiegend aus Kohlenstoffatomen und Wasserstoffatomen und haben damit eine deutlich geringere Dichte als Metalle und insbesondere Eisenwerkstoffe, die vor allem im Maschinenbau eingesetzt werden.

Kunststoffe bestehen aus Makromolekülen, in denen die Atome durch starke kovalente Bindungen verknüpft sind, was hohe theoretische Festigkeiten ergibt. Diese werden bei der Belastung von Fasern in Faserrichtung auch annähernd erreicht, weil die Moleküle parallel zu den Fasern ausgerichtet sind. Bei der Beanspruchung der meisten Kunststoffartikel hingegen, in denen die Makromoleküle eher ungeordnet ineinander verschlungen sind, sind die Kräfte zwischen einzelnen Molekülen relevant. Diese wiederum sind deutlich schwächer als die kovalenten Bindungen in den Molekülen. Deshalb liegen Festigkeit und Steifigkeit unter den theoretisch erreichbaren Werten und unter den von Metallen bekannten Werten. Metalle bestehen hingegen überwiegend aus Kristallen, in denen die Atomröhmpfe und das sie umgebende Elektronengas sehr große Bindungskräfte erzeugen. Hieraus resultieren hohe Steifigkeiten und Festigkeiten, vgl. Tabelle 1.1.

Bezieht man die beiden Kennwerte für Steifigkeit und Festigkeit, den E-Modul und die Zugfestigkeit, auf die Dichte der Werkstoffe, erhält man den spezifischen E-Modul und die spezifische Festigkeit. Bei Betrachtung dieser Größen werden die Unterschiede deutlich kleiner. Die spezifischen E-Moduln für die Metalle sind für alle Metalle fast gleich. Die spezifischen E-Moduln für die mit Glasfasern verstärkten Kunststoffe, und nur verstärkte Kunststoffe kommen für vergleichbare Anwendungen wie Metalle infrage, betragen ungefähr ein Viertel der Werte der Metalle. Die spezifische Festigkeit der Kunststoffe ist gleich der der meisten Metalle und wird nur von den hochfesten Legierungen der Metalle übertroffen.

Tabelle 1.1 Vergleich der Kennwerte von Kunststoffwerkstoffen und metallischen Werkstoffen bei Raumtemperatur

	Dichte in g/cm ³	E-Modul in N/mm ²	Festigkeit in N/mm ²	Spezifischer E-Modul in 10 ⁶ N mm/g	Spezifische Festigkeit in 10 ³ N mm/g
Reinaluminium [14]	2,7	69 000	80–90	25,6	30–33
Aluminium-legierungen [14]	2,3–2,8	68 000–76 000	140–590	24,5–33,1	50–257
Reinmagnesium [15]	1,74	44 300	100–130	25	57–75
Magnesium-legierungen [15]	1,74	45 000	125–275	25	69–155
Titan [16]	4,49	120 000	250–700	27	56–156
Einfacher Baustahl [16]	7,87	210 000	350–700	27	44–89
Legierter Stahl [16]	7,87	210 000	1000–1500	27	127–191
Polypropylen [17]	0,9	1450	30	2	33
Polypropylen mit 30 % Glasfasern [17]	1,14	6300	88	6	77
Polyamid 6 [17]	1,13	1000	45	1	40
Polyamid 6 mit 30 % Glasfasern [17]	1,36	6200	115	5	85
Polyetheretherketon [17]	1,3	3600	96	3	74
Polyetheretherketon mit 10 % Glasfasern [17]	1,37	5700	97	4	71

Die Betrachtung der sogenannten spezifischen Kennwerte ist die einzige sinnvolle Betrachtung, weil bei der Produktentwicklung immer auch der Ressourceneinsatz eine Rolle spielt. Der Leichtbau hat dies im Besonderen im Fokus. Bei allen Anwendungen, in denen bewegte Massen zum Energieverbrauch während der Nutzungs-

dauer beitragen wie im Automobilbau, in der Luftfahrt oder beim Schienenverkehr, müssen Produkte mit möglichst kleiner Masse realisiert werden. Die Nachhaltigkeit gebietet zudem generell die Minimierung des Ressourcenverbrauchs.

1.3.3 (Teil-)Kristallinität

Sowohl in Metallen wie auch in Kunststoffen findet Kristallisation statt. Sie wird bei allen Werkstoffen als Abfolge der zwei Phasen Keimbildung und Wachstum aufgefasst. Es gibt aber einen wichtigen Unterschied im Ablauf der Phasen und damit im Ergebnis des Kristallisationsprozesses.

Metalle bilden in typischen technischen Anwendungen immer Kristalle. Diese werden als Körner bezeichnet und bilden ihrerseits das sogenannte Gefüge.⁴ Dabei gibt es zwischen Körnern Korngrenzen. Kristalle sind wegen ihres regelmäßigen Aufbaus anisotrop, ein Gefüge ist in der Regel wegen der unterschiedlichen Orientierung der vielen Körner in ihm isotrop.

Von den Kunststoffen können nur die mit linearen Kettenmolekülen, die Thermoplaste, überhaupt kristallisieren.⁵ Thermoplaste werden unter den üblichen Bedingungen technischer Prozesse, insbesondere hoher Abkühlraten, niemals vollständig kristallisieren. Es liegen immer amorphe und kristalline Bereiche nebeneinander vor, die Kristalle wachsen nicht in alle drei Raumrichtungen, sondern bilden zweidimensionale Lamellen. Daraus ergeben sich zwei prinzipielle Konsequenzen:

Erstens handelt es sich beim gleichzeitigen Vorhandensein von amorpher und kristalliner Phase bei einer Temperatur um einen thermodynamischen Ungleichgewichtszustand. Im Lauf der Zeit wird sich der Werkstoff also bei der Annäherung an das thermodynamische Gleichgewicht verändern, man spricht von physikalischer Alterung.

Zweitens muss bei der Beschreibung der Eigenschaften eines Kunststoffwerkstoffes immer der Beitrag beider Phasen, amorph und kristallin, und der Morphologie, also der räumlichen Anordnung der beiden Phasen, berücksichtigt werden. Das wiederum heißt erstens, dass das Verhalten von vielen Faktoren abhängt. So treten z. B. bei der plastischen Deformation und dem Versagen verschiedenste Effekte wie Mikrorissbildung, Rekristallisation und Orientierungsänderungen auf. Zweitens lassen sich, weil die Morphologie wie in Sphärolithen und im statistischen Knäul sehr komplex ist, keine technisch relevanten Berechnungsmethoden anwenden, um von der Struktur auf Werkstoffeigenschaften zu schließen. Bei Metallen wird

⁴⁾ Im Bereich der Metalle spricht man bei der entstehenden Struktur von Gefüge, im Bereich der Kunststoffe von Morphologie.

⁵⁾ Voraussetzung zur Bildung von Kristallen ist, dass es Molekülabschnitte gibt, die erstens innerhalb der Molekülabschnitte regelmäßig angeordnet sind und die sich zweitens mit anderen Molekülen bzw. Molekülabschnitten regelmäßig anordnen. Dies kann auch in Elastomeren der Fall sein.

dies bei der Betrachtung von Struktur-Eigenschafts-Beziehungen regelmäßig gemacht. Durch den Verzicht auf mathematische Beschreibungen zur Erfassung von Struktur-Eigenschafts-Beziehungen bei Kunststoffen werden diese eher qualitativ beschrieben. Dies lässt die Beschreibung der Kunststoffe einfacher erscheinen, obwohl das Verhalten komplexer ist.

Natürlich kann man argumentieren, dass auch technische Metalle nicht im thermodynamischen Gleichgewicht vorliegen und dass auch in Metallen die realen Strukturen komplex und nur aufwendig zu beschreiben sind. Das ist sicher richtig. Bei Kunststoffen sind diese Effekte aber stärker ausgeprägt.

Die Kristallisation von Kunststoffen wird in Abschnitt 2.5.6 näher beschrieben.

1.3.4 Glasübergang

Ein weiterer fundamentaler Unterschied zwischen Metallen und Kunststoffen ist die Existenz des sogenannten Glasübergangs in Kunststoffen. Wie der Name nahelegt, ist der Glasübergang von den anorganisch-nichtmetallischen Gläsern bzw. Silikatgläsern bekannt. Es gibt auch Legierungen mit Metallen, die amorphe Strukturen bilden und damit eine Glastemperatur aufweisen. Sowohl anorganische wie auch metallische Gläser spielen aber im Maschinenbau keine oder zumindest keine große Rolle.

Der Glasübergang wird dadurch charakterisiert, dass beim Abkühlen ein (amorpher) Kunststoff bei der Glasübergangstemperatur erstarrt. Bei niedrigeren Temperaturen als die Glasübergangstemperatur verhält sich ein Kunststoff eher wie ein starrer Festkörper, oberhalb neigt er eher zur Gummielastizität. Die Glastemperatur liegt dabei abhängig vom Aufbau der Kunststoffe ungefähr zwischen $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ für Polyethylen (PE) und $290\text{ }^{\circ}\text{C}$ für Polyphenylensulfid (PPS).

- Bei Elastomeren liegt die Glasübergangstemperatur unterhalb der Raumtemperatur bzw. allgemeiner unterhalb des Anwendungstemperaturbereichs.
- Bei amorphen Thermoplasten liegt die Glasübergangstemperatur oberhalb des Anwendungstemperaturbereichs.
- Bei Duromeren und teilkristallinen Thermoplasten spielt der Glasübergang nur eine untergeordnete Rolle.

Die Eigenschaften einiger Kunststoffe werden also wesentlich vom Glasübergang geprägt. Dieser liegt in der Nähe des Anwendungstemperaturbereichs und muss daher immer mit betrachtet werden. Die Eigenschaften der Kunststoffe sind auch bei normalen Umgebungstemperaturen stark temperaturabhängig. Bei Metallen ist das nicht der Fall.

Der Glasübergang in Kunststoffen wird in Abschnitt 2.5.3 näher beschrieben.

1.3.5 Entropieelastizität

Bei Temperaturen größer als die Glasübergangstemperatur sind Moleküle in amorphen Kunststoffen oder in amorphen Bereichen von Kunststoffen beweglich. Verschlaufungen der Moleküle verhindern aber ein vollständiges Abgleiten wie in der Schmelze. Die Kunststoffe verhalten sich daher auch bei Temperaturen oberhalb der Glasübergangstemperatur wie elastische Festkörper, sie fließen nicht. Der Übergang zum Fließen einer Schmelze beginnt ungefähr bei Temperaturen, die etwa 100 °C größer als die Glastemperatur sind. Allerdings führen oberhalb der Glastemperatur vergleichsweise kleine Kräfte bereits zu deutlich größeren Verformungen des Festkörpers im Vergleich zu gleich großen Belastungen bei Temperaturen kleiner als die Glasübergangstemperatur. Dies liegt daran, dass nicht Bindungskräfte in den Kunststoffmolekülen die elastische Rückstellung bewirken, sondern das Bestreben der unter Belastung gestreckten Moleküle wieder in einen ungeordneten Zustand zurückzukehren. Da somit die Entropie die treibende Kraft für die Elastizität im gummielastischen Bereich von amorphen Thermoplasten und Elastomeren ist, spricht man von Entropieelastizität. Die großen elastischen Verformungen aufgrund von Entropieelastizität und ihre Erklärung sind im Bereich der Metalle nicht bekannt.

Modelle zur Beschreibung des mechanischen Verhaltens der Kunststoffe werden in Abschnitt 7.3 und die Entropieelastizität im Speziellen in Abschnitt 7.3.3 beschrieben.

1.3.6 Kräfte in und zwischen Molekülen

In Abschnitt 1.3.2 wurde bereits erläutert, dass nicht die innermolekularen Kräfte, sondern die Kräfte zwischen Molekülen für die mechanischen Kennwerte für Steifigkeit und Festigkeit von Kunststoffen verantwortlich sind. Wie erläutert, führt dies zu deutlich kleineren Werten im Vergleich zu den Werten für Metalle. Es führt auch dazu, dass die Kennwerte von der Streckung der Moleküle und ihrer Ausrichtung in Bezug zur wirkenden Kraft abhängen. In einer Kunststofffaser sind wegen des Spinnprozesses bei der Herstellung der Faser die Moleküle überwiegend in Faserrichtung orientiert. Die Kennwerte in Faserrichtung ergeben sich über die innermolekularen Bindungen und erreichen nahezu die theoretischen Werte. Wird senkrecht zur Faserrichtung belastet, was nur in Faser-Kunststoff-Verbunden tatsächlich real vorkommt, sind die Kennwerte der Faser deutlich kleiner, weil hier nur die schwachen Nebenvalenzkräfte der Beanspruchung entgegenwirken. Die Kennwerte für Kunststoffe sind also nicht nur kleiner als für Metalle, es ergibt sich auch eine Anisotropie, die mit zunehmender Orientierung der Moleküle größer wird. Die Orientierung der Moleküle ergibt sich bei Produktionsprozessen wie

Spritzgießen und Extrudieren abhängig von Bauteil- oder Halbzeuggeometrie und abhängig von den Prozessbedingungen. Sie ist also bei Bauteilen, die mit gleicher Geometrie im gleichen Prozess aus dem gleichen Kunststoff gefertigt werden, unterschiedlich, wenn die Prozessparameter unterschiedlich sind. Die Molekülorientierung ist auch innerhalb eines Bauteils abhängig vom Ort bzw. vom Weg des Moleküls zu diesem Ort.

Anisotropie und Inhomogenität sind auch bei Metallen bekannt. Beim Oberflächenhärten, bei Walztexturen und in Gradientenwerkstoffen spielen diese eine Rolle. In den meisten Fällen der Bauteilauslegung kann bei Metallen aber von homogenen und isotropen Werkstoffen ausgegangen werden, bei Kunststoffen ist das nur eine erste Betrachtung.

Die Kräfte innerhalb und zwischen Molekülen werden in Abschnitt 2.4 erläutert.

1.3.7 Zeitabhängiges Verhalten

Kunststoffe befinden sich prinzipiell im thermodynamischen Nichtgleichgewicht. In Abschnitt 1.3.3 wurde dies für teilkristalline Kunststoffe schon angesprochen. Für amorphe Kunststoffe bzw. amorphe Bereiche in Kunststoffen ist das ebenso der Fall, auch unterhalb der Glasübergangstemperatur. Daraus ergibt sich die sogenannte physikalische Alterung. Damit ist eine langsame Änderung von Form und Eigenschaften gemeint, auch ohne, dass äußere Kräfte oder andere Belastungen (Medien, Temperatur, ...) wirken. In Kunststoffen lässt sich die physikalische Alterung auf die Molekülbeweglichkeit zurückführen.

Die Molekülbeweglichkeit zeigt sich auch unter Einwirkung von äußeren Kräften. Bei den sehr großen Makromolekülen, aus denen Polymere und Kunststoffe bestehen, vergeht eine gewisse Zeit, bis Bewegungen von vollständigen Molekülen oder Teilen davon stattgefunden haben. Die Energie für die Bewegung stammt aus der thermischen Energie. Das Vermögen, sich zu bewegen, ist also temperaturabhängig. So kommt es, dass, abhängig von der Temperatur, Kunststoffe auf äußere Belastungen mehr oder weniger schnell reagieren. Bei hohen Temperaturen finden Verformungsvorgänge schneller statt, bei tieferen Temperaturen langsamer. Ein Kunststoffwerkstoff verhält sich bei hohen Temperaturen oder lange andauernden Belastungen eher duktil, bei niedrigen Temperaturen oder schnellen Beanspruchungen eher spröde. Sehr deutlich wird dies beim Kriechen, also bei Deformationen, die sich unter statischer Last über Wochen, Monate oder Jahre einstellen. Hier werden hohe bleibende Deformationen erreicht. Aber auch bei kurzzeitiger, quasistatischer Last und bei Wechselbeanspruchungen macht sich dies bemerkbar. Bei Wechselbeanspruchungen führt das zeitabhängige Verhalten dazu, dass die Moleküle sich während eines Belastungszyklus entsprechend der Beanspruchung ausrichten. Allerdings hinkt die Ausrichtung der Moleküle in der Regel der Änderung

der Belastung hinterher. Daher verhalten sich Kunststoffe bei Wechselbeanspruchungen nicht rein elastisch. Ein Teil der eingebrachten Energie wird nicht zurückgewonnen, sondern in Wärme umgewandelt. Die Kunststoffe dämpfen daher Schwingungen.

Auch Kriechen und Dämpfung werden bei Metallen beobachtet. Aber wieder gilt, dass diese Effekte bei Kunststoffen deutlich stärker ausgeprägt sind und bei gewöhnlichen Artikeln und Anwendungen bereits berücksichtigt werden müssen.

Das zeitabhängige Verhalten von Kunststoffen wird in Abschnitt 7.2.3 betrachtet, das Zeit-Temperatur-Superpositionsprinzip in Abschnitt 7.3.4.

1.3.8 Rohstoffverbrauch

Es gibt zwei Prämissen beim Thema Rohstoffverbrauch:

- Die Erde ist endlich und Rohstoffvorkommen sind damit begrenzt. Es gibt nur die Ressourcen, die hier verfügbar sind. Versuche, Rohstoffe auf anderen Planeten oder Monden zu gewinnen, verschieben diese Grenze, ändern aber an ihrer Existenz nichts.
- Was heute verbraucht wird, steht in Zukunft nicht oder nur durch andere, vermutlich aufwendigere Rückgewinnungsprozesse zur Verfügung. Nachhaltiges Handeln berücksichtigt dabei die Bedürfnisse zukünftiger Generationen.

Daher lohnt ein Blick auf die Vorkommen der Rohstoffe für Metalle und Kunststoffe sowie den Energieeinsatz zu ihrer Herstellung. Die vollständige Betrachtung muss in Ökobilanzen erfolgen. Diese sind aber nicht nur aufwendig, sondern in ihrem Ergebnis vor allem von der Definition von Ziel, Betrachtungsgegenstand („funktionselle Einheit“) und Systemgrenzen abhängig, siehe Abschnitt 5.8.

Tabelle 1.2 zeigt die globalen Reserven für Eisenerz [18], genauer den Eisenanteil im Eisenerz, und Erdöl [19].



Reserven sind dabei definiert als Vorkommen, die heute bekannt und mit heute verfügbaren Technologien gewinnbar sind. In Abgrenzung dazu bezeichnet der Begriff Ressourcen die heute bekannten, aber nicht gewinnbaren Vorkommen.

Bei Erdöl und Erdgas gehörten z.B. in Schiefergesteinen enthaltene Vorkommen lange zu den Ressourcen, bis Technologien wie Fracking entwickelt wurden, die die Gewinnung möglich machten. Seitdem werden die Vorkommen zu den Reserven gezählt. Sie werden in Statistiken wegen dieser geschichtlichen Entwicklung oft als „nicht konventionelle Reserven“ bezeichnet. Beim Erdöl sind die globalen Ressourcen mit ca. 501 Milliarden t etwa doppelt so groß wie die globalen Reserven [19].

Tabelle 1.2 Globale Reserven für Eisenerz 2021 [18] und Erdöl 2020 [19]

Land	Eisenerz-reserven in Millionen t	Eisenerz-reserven in %	Land	Erdölreserven in Millionen t	Erdölreserven in %
Australien	25 000	29,6	Venezuela	47 385	19,3
Brasilien	15 000	17,7	Saudi-Arabien	39 617	16,2
Russland	14 000	16,6	Kanada	26 554	10,8
China	6900	8,2	Iran	21 657	8,8
Indien	3400	4,0	Irak	19 730	8,0
Kanada	2300	2,7	Russland	14 767	6,0
Ukraine	2300	2,7	Kuwait	13 810	5,6
Iran	1500	1,8	Vereinigte Arabische Emirate	13 306	5,4
Peru	1500	1,8	USA	8493	3,5
USA	1000	1,2	Libyen	6580	2,7
Kasachstan	900	1,1	Nigeria	5019	2,0
Südafrika	670	0,8	Kasachstan	4082	1,7
Schweden	600	0,7	China	3542	1,4
-	-	-	Katar	3435	1,4
-	-	-	Brasilien	1622	0,7
Rest	9500	11,2	Rest	15 581	6,4
Welt	84 570	100	Welt	24 5180	100
Globale Fördermenge 2020 in Millionen t					
	1600			4163	
Statische Reichweite in Jahren					
	53			59	

Wie man Tabelle 1.2 entnehmen kann, sind beim Eisenerz ca. 89 % der globalen Reserven in 13 Ländern zu finden. Beim Erdöl liegen knapp 94 % der Reserven in 15 Ländern. Teilt man die Werte für die globalen Reserven durch die Fördermenge eines Jahres, erhält man die *statische Reichweite*. Diese beträgt für Eisenerz und Erdöl jeweils 53 bzw. 59 Jahre. Vom Erdöl weiß man allerdings, dass immer wieder neue Vorkommen gefunden und neue Fördertechnologien entwickelt werden. Auch der Verbrauch bzw. die Fördermenge kann sich ändern. Daher ist die statische Reichweite tatsächlich seit einigen Jahrzehnten etwa gleich groß geblieben. Trotzdem vermitteln die Zahlen einen guten Eindruck von der Endlichkeit der konventionellen Energierohstoffe und der metallischen Rohstoffe.

Index

A

Abbau 73, 75, 126
- thermisch-mechanisch 75
- thermisch-oxidativ 75
- thermooxidativer 126, 128
Abfälle 228
- Post-Consumer- 228, 247
- Post-Production- 247
- Siedlungs- 228
Abquetschpresswerkzeug 202
Acrylnitril-Butadien-Styrol 119
Additive 123
AFK 163
Agglomerat 143, 252
Aggregate 143, 146
Alterung
- physikalische 103
amorpher Zustand 84
Anfangsspannung 334
Anforderung 297, 299
angeregten Zustand 130
Anisotropie 303, 367
ANSYS Granta 193
Antagonisten 127
Antioxidanzien
- primäre 127
Aramid
- para- 166
Arbeitsvermögen
- des Pendels 340
Aspektverhältnis 145, 147
ATHAS-Datenbank 105
Atlasbindung 160
Atombindung 72
Aufbereitungsprozess 252
Ausblühen 143
Ausbluten 143
Auslagern 177

Ausscheidungshärten 177
Autoxidationszyklus 126

B

Basis 99
Bastfasern 172
Beanspruchung 364
Belastung 364
- quasistatische 315
- statische 315, 334
Benetzbarkeit 143
Beständigkeit 142
Beständigkeitstabelle 194
Bewitterung 132
Biegebalken 322
Biegedehnung 324
- bei Biegefestigkeit 325
- beim Bruch 325
Biege-Elastizitätsmodul 324
Biegefestigkeit 325
Biegemodul 324
Biegespannung 323f.
- bei konventioneller Durchbiegung 325
- beim Bruch 325
Biegung
- reine 322
Bildanalyse
- dynamische 145
- statische 145
Bindung 160
- Dipol-Dipol- 80
Bindungsabstand 73
Bindungsenergie 73
Biopolymer 61
blanc fixe 141
Blend 187
Blockcopolymere 50
BMC 164

- Boltzmann-Faktor 387
 Boltzmann'sches Superpositionsprinzip 373
 Boltzmann-Statistik 387
 Bravais-Gitter 99
 Brennwert 132
 Bruchdehnung 319
 - nominelle 319
 Bruchkennlinie 336
 Bruchspannung 318
 bulk molding compound 164
- C**
- calcium carbonate
 - ground 154
 - precipitated 154
 CAMPUS 299
 CAMPUS-Platte 309
 CE-Kennzeichnung 192
 Cellulose 174
 CFK 163
 Chromophoren 129
 CLT 163
 CO₂-Äquivalent 266
 CO₂-Fußabdruck 266
 Colour Index 138
 Composite Materials Database 194
 Compound 143, 187
 Compoundierprozess 252
 Copolymer 49, 186
 Coulomb-Gesetz 73
 coulombsche Reibung 376
 Craze 344, 367
- D**
- Data Quality Levels 254
 Datenbank
 - CAMPUS 7, 193
 Datenqualitätslevel 254
 Dauergebrauchstemperatur 59
 Deformation 363
 - bleibende 375
 Degradation 126
 Dehnrate 388
 Dehnströmung 204
 Dehnung 364
 - logarithmische 317
 - nominelle 317
 - nominelle bei Zugfestigkeit 319
 - technische 317
 Dehnung bei Zugfestigkeit 318
 Dehnungsmesstreifen 315
- Depolymerisation 75, 257
 Designdaten 299
 Dichtefluktuation 85, 111, 113
 Differential Scanning Calorimetry 118
 Dipol
 - permanenter 76, 80
 Dispergierbarkeit 143
 Dispergieren 143
 Dispergierung 146
 Dissoziationsenergie 73
 DMC 164
 dough moulding compound 164
 Drei-Punkt-Biegeversuch 320
 Drop-in 62
 - Smart 63
 Druckfinne 321
 duktil 338
 Duktilität 369
 Durchbiegung 320f.
 - konventionelle 325
 Duromere 186
 Dynamische Differenz-Thermoanalyse 104, 109
- E**
- Echtheit 142f.
 Ecolnvent 194, 269
 Eco-Profile 194
 Effizienz
 - Energie- 270
 - Ressourcen- 270
 Eigenspannung 303, 391
 Eindringkörper 327
 Eindringtiefe 327
 Einfallstelle 313
 elastisch 371
 Elektronegativität 34, 76
 Elektronenaffinität 34
 Elektronenpaarbindung 37, 72
 Elementarzelle 96
 Endlosfaser 159
 Energie
 - potenzielle 86
 Energieelastizität 385
 Energieinhalt 25
 Entformungsschräge 313
 Entropieelastizität 386
 Entschlichten 162
 Enzyme 258
 erneuerbare Energie 23
 Erstarren
 - glasiges 85
 erstes Fick'sches Gesetz 148

Erweichungstemperatur 110
Eshelby-Lösung 182
European BioPlastics 194
Extender 149
Extensometer 315

F

Farbe 143
Farbmittel 139
Farbstoff 124, 139
Faser
- entschlichtete 162
- neutrale 323
- Rand- 323
Faser-Matrix-Haftung 181
Fehlwurf 247
Feinheit 158
Fernordnung 85
Festigkeit 86, 368
Festkörper 363
- starrer 90
Feststoffverunreinigungen 253
feucht 307
Filament 158
FKV 163
Flächengebilde
- textile 159
Flakes 252
Fließen 373
Fließspannung 376
Flüssigkeit
- eingefrorene 85
Fogging 137
Formfaktor 147
Formmasse 187
Formstoff 187
Freibewitterung 132
Fühlhebelmessuhr 313
Füllraumpresswerkzeug 202
Füllstoffe
- aktive 149
- inaktive 149
Funktion 263
funktionelle Einheit 23, 264
FVW 163

G

GaBi 194, 269
Garn 159
GCC 154
Geflecht 162

Gefügeaufbau 209
Gelber Sack 241f.
Gelbe Tonne 241f.
Gelege 161
gemischt 253
Geschwindigkeit 370
Gestrick 161
Gewebe 160
GFK 163
Gitter
- primitives 97
Gitterpunkt 97
Glastemperatur 90
Glasübergang 90
Gleichgewichtsabstand 73, 86
Gleichgewichtsschmelztemperatur 107f.
Gleitung 364
Global LCA Data Access Netzwerk 194, 269
Global Warming Potential 266
GMT 164
Größenverteilung 145
Grundstabilisierung 129
Grüner Punkt 240, 242
Gütezeichen 254
Gyrationradius 48, 83

H

hart 327
Härte 327, 369
- Eindruck 328
- Kugleindruck- 330
Härten 54
Härteprüfung 327
Härteskala
- mohssche 327
Hartfasern 172
Hart-Weich-Verbunde 56
Harz 186
Hauptkette 101
Hauptvalenzbindung 37, 71
Hauptvalenzbindungen 72
Hemicellulose 174
Heteroatom 39
heterogen 33
Hitzebeständigkeit 143
Höchstkonzentration
- zulässige 137, 141
homogen 33, 367, 370
homogenisieren 367
Homogenisierung 182
homöopolare Bindung 37, 72
Homopolymer 186

Hook'sches Gesetz 366, 372
 Hydrolyse 75, 257
 Hydroperoxidzersetzer 127

I

ideal 371
 Idemal 269
 Infrarot-Spektroskopie 87
 inhomogen 198
 Inklusion 181
 instationär 198
 intermolekular 71
 intramolekular 71
 intumeszierend 135
 irreversibel 373
 Isotropie 367

K

Kaltverfestigung 177
 Keilstrichformeln 45
 Keimbildung 110
 - athermische 116
 - heterogene 116
 - homogene 113
 - primäre 113
 - sekundäre 115
 - thermische 113
 Keimbildungsgeschwindigkeit 114
 Keimbildungsrate 114
 Keimradius
 - kritischer 112
 Kennwert 299
 Kerbe 338
 Kerbgrund
 - Restbreite am 341
 Kerbgrundradius 341
 Kerbschlagbiegeversuch 338
 Kerbschlagzähigkeit
 - Charpy 338
 - Izod 338
 Kernladungszahl 34
 Kernschicht 200
 Kette 160
 - gestreckte 47, 100
 - lineare 38
 Kettenbewegung
 - kooperative 88, 114, 384
 Kettenbspaltung 75
 Kettenwachstumsreaktion 68
 Kettfaden 160
 Klassierung 248

Knäuel
 - statistisches 201
 Kompaktat 252
 Konditionerdauer 306
 Konditionerklima 306
 konditioniert 307
 Konditionierung 306
 Konditionierungsverfahren
 - beschleunigte 307
 Konfiguration 44
 Konformation 46, 101, 114
 - all-trans 46, 48
 - gauche-minus 48
 - gauche-plus 48
 Konformität 299
 Konstantklima 305
 Konstitution 43
 Kontinuum 367
 konventionelle Energie 23
 Körperbindung 160
 Korngrenzenhärtung 178
 Korngrößenverteilung 145
 Körper 308, 363
 kovalente Bindung 37, 72
 Kreide 154
 Kreidung 143
 Kriechdehnung
 - bei Zugbeanspruchung 334
 Kriechen 334, 363
 Kriechkurven 335
 Kriechmodul-Zeit-Kurve 337
 Kriechnachgiebigkeit 337
 Kristall 96
 Kristallgitter 96
 Kristallinität 103
 Kristallinitätsgrad 103
 Kristallisation 199
 Kristallisationsgrad 103, 105
 Kristallisationskinetik 117
 Kristallisationstemperatur 118
 Kristallstruktur 96
 Kugeleindruckhärte 330
 Kugeleindruckprüfung 330
 kugelförmig 147
 künstliche Bewitterung 132
 Kunststoff 61
 Kunststoff Information 194
 Kunststoffpyramide 58
 KunststoffWeb 193
 Kunststoffwerkstoffe 123
 Kurbelwellenbewegung 87, 389

L

Lagerabstand 323
Lamelle 102
Leinwandbindung 160
Lichtechtheit 143
Life Cycle Assessment 262
Lignin 174
Lignocellulose 174
Limonen 256
linear
- geometrisch 366
- physikalisch 366
linear-elastisches Verhalten
- ideal 372

M

Mahlgut 252
Makromolekül 42
Malteserkreuz 106
Massenmittel 66
Masterbatch 143
- Farb- 124
Material 363
Material Data Center 7, 193
Matrix 181
Matte 160
Maxwell-Modell 379
Merzerisierung 176
Messlänge 316
Metalldesaktivator 127
Migration 142
Migrieren 69
Mikrobeads 217
Mikrogranulate 217
Mikroplastik 217
- primäres 217
- sekundäres 217
Mindesthaltbarkeitsdatum 272
Mischkristallhärtung 177
Mischungsregel 185
Modell
- Kalotten- 46
- Kugel-Stab- 46
molare Masse 64
Molekülkette 42
Molekülorientierung 198
Molekülschwingungen 86
Molmasse 42, 64
Molmassenverteilung 43, 65
Monomer 41
Monomermolekül 41
Morphologie 209

N

Nachgiebigkeit 337, 369
Nachkondensation 257
Nahordnung 85
nass 307
Nebenvalenzbindung 71
Nichtverpackungen
- stoffgleiche 242
Normalklima 305
Nukleierungsmittel 116, 124

O

Oberfläche
- spezifische 145
Ökobilanz 262
Omnexus – The material selection platform 193
opak 138
Opazität 140
Ordnungszahl 34
Orientierung 85
orthorhombisch 368
orthotrop 368

P

para-Aramid 166
Partialladung 76
PCC 154
Pektin 174
Perinorm 194, 301
Periodensystem der Elemente 34
Petrochemie 59
Pflanzenhaare 172
Pfropfcopolymere 50
Photooxidation 129
Photooxidationsschema 130
physikalische Vernetzung 55, 57
Pigment 124, 139
PlasticsEurope 194
plastisch 375
plastische Seele 199
plättchenförmig 147
Poissonzahl 316
polar 77
Polarisationsmikroskop 85
Polarität 77
Polyacrylnitril 168
Polyamid
- aromatisches 166
Polydispersität 68
Polydispersitätsindex 67

Polykondensation 39, 41
 Polymer 43
 Polymerisation 38
 Polymerisationsgrad 38, 67
 Polymermischungen 187
 Polymermolekül 42
 Polymer Properties Database 194
 Polystyrol 119
 Post-Consumer 252
 Post-Industrial 252
 Precursor 168
 preimpregnate 164
 Prepreg 164
 Pressdruck 202
 Pressmasse 187
 Primärenergie 23
 Primärteilchen 143
 ProBas-Datenbank 194
 Probe 308
 Probekörper 308
 – prismatisch 320
 Produktssystem 264
 Produktssysteme 23
 Prospector Materials Database 193
 Prozess
 – thermisch aktivierter 387
 Prüfgeräteaufbiegung 330
 Prüfgeschwindigkeit 321
 Prüfklima 305
 Prüfkörper 308
 Pyrolyse 75, 133, 257

Q

Quellströmung 206
 Quellung 356
 Quencher 131
 Querhaupt 315
 Querkontraktionszahl 316
 Querschnittsfläche 316

R

Radikalfänger 127
 Randschicht
 – erstarrte 199
 Rate 370
 REACH 135
 Recompound 252
 Recycling
 – chemisches 245
 – mechanisches 245
 Recyclingquote 228, 244

Regenerat 252
 Regranulat 252
 Relaxation 380, 388
 Relaxationszeit 380, 388
 repräsentatives Volumenelement 182
 Reptationskanal 88
 Reptationsprozess 88, 92
 Reserven 19
 Ressourcen 19
 Retardation 382
 reversibel 373
 Rezeptur 6, 123
 Rezyklat 252
 – Preise 26
 RIWETA 194
 Rohstoff
 – sekundärer 232
 Rotationsschwingungen 87
 Roving 159
 Rutile 99

S

Schererwärmung 198, 303
 Schergeschwindigkeit 70
 Scherschicht 199, 206
 Scherströmung 204
 Scherung 365
 Scherverformung 344
 Schicht
 – Kern- 210
 – Rand- 210
 – Scher- 210
 Schlag
 – breitseitiger 340
 – schmalseitiger 340
 Schlagarbeit 338, 340
 Schlagbiegeversuch 338
 Schlageigenschaften
 – Charpy 338
 – Izod 338
 Schlagversuch 306
 Schlagzähigkeit 340
 – Charpy 338
 – Izod 338
 Schlagzähigkeitsprüfung 306
 Schlichte 162
 Schmelzebruch 68
 Schmelzefestigkeit 68, 70
 Schmelzenthalpie 104
 Schmelztemperatur 108f.
 Schnellzerreißversuch 315
 Schraubverbindung 381

- schubstarr 323
 Schuss 160
 Schussfaden 160
 Schwerspat 141
 Schwindung 142, 199 f.
 Schwingungen
 - Rotations- 87
 - Streck- 87
 - translatorische 87
 Seitengruppen 39, 101
 sekundäre Antioxidanzien 127
 semikristallin 103
 sheet molding compound 164
 Siebanalyse 145
 Siedlungsabfälle 233
 Siegelzeitpunkt 199
 SimaPro 194, 269
 Skelettformel 43, 47
 SMC 164
 Solvolyse 258
 sortenähnlich 253
 sortenrein 253
 Sortierfraktionen 251
 Spaghettihäufen 84, 88, 178, 385
 Spannung 364
 - technische 317
 - wahre 317
 Spannungs-Dehnungs-Kurve
 - isochrone 336
 Spannungsrelaxation 381
 Spannungsrissbeständigkeit 68
 Spannungszustand 364
 Sphärolith 106
 - gebänderter 212
 Spinnfaden 158
 Spinnfaser 158
 spontan-elastisch 373
 spritzfrisch 307
 Spritzgießzyklus 197
 spröde 368
 stäbchenförmig 147
 Stabilisierung 74
 Stapelfaser 159
 stationär 370
 statische Reichweite 20
 statistisches Knäuel 83
 Steifigkeit 86, 369
 Steigung
 - Regressionsgerade 319
 - Sekanten- 319
 Stereoisomerie 44
 Stoff 33
 Stoffgesetz 366
 Strangauflistung 70, 201
 Streckdehnung 319
 Streckgrenze 376
 Streckschwingung 87
 Streckspannung 318
 Strukturformel 43
 Strukturisomerie 43 f.
 Strukturviskosität 69
 Stufenwachstumsreaktion 68
 Stützweite 321
 - mittlere 321
 Styrol-Acrylnitril 119
 Styrol-Butadien 119
 Substanz 33
 Synergisten 127
 Systemgrenze 265 f.
- T**
- teilkristallin 103
 Temperatur
 - Erweichungs- 110
 - Gleichgewichtsschmelz- 108
 - Kristallisations- 118
 - Schmelz- 109
 Terpolymere 49 f.
 thermische Verwertung 25
 Thermooxidation 126
 Thermoplaste
 - glasmattenverstärkt 164
 - Hochleistungs- 59
 - Standard- 59
 - technische 59
 thermoplastische Elastomere 55
 Tie-Molekül 70, 103 f., 345
 Transluzenz 140
 transparent 84
 Transparenz 140
 Transparenzverstärker 124
 transversal isotrop 367
 Treibhauspotenzial 266
 trocken 307
 Trouton-Viskosität 375
 typenrein 253
- U**
- Überstruktur
 - kristalline 106
 UD-Schicht 163
 UD-Tape 164
 Uneinheitlichkeit 68
 unpolar 77

Unterkühlung 113
 Untersuchungsrahmen 263
 UV-Absorber 131

V

Valenzstrichformel 39
 Verbrauchsdatum 272
 Verdünnungseffekt 256
 Verformung 362
 Vergasung 258
 Verhalten
 - gummiartiges 90
 vernetzt
 - chemisch 53
 - physikalisch 55, 57
 Vernetzungsstellen
 - physikalische 92
 Verölung 258
 Verpackungsgesetz 240
 Verpackungsverordnung 240
 Versagensart 338
 Verschiebung 364
 Verschiebungsfaktor 390
 Verschiebungsfunktion 390
 Verschlaufungen 70, 85, 88, 92
 Verstärkung 176
 Verteilung
 - bimodale 71
 verunreinigt 253
 Verwertung
 - rohstoffliche 244
 - stoffliche 232, 244
 - werkstoffliche 244
 Verzerrungszustand 364
 Verzug 142, 200
 Verzweigungen 51
 Vielpunkt-Kennwerte 193
 Vielzweckprobekörper 310
 Vier-Punkt-Biegeversuch 320
 viskoelastisch 327
 viskos 373
 Viskosität 70, 86, 374
 Vlies 160
 Volumen
 - freies 90

Vorsortierung 248
 Vulkanisation 54

W

Wachstum
 - dendritisches 106
 - Kristall- 110
 Wasseraufnahme 79
 Wasserdampfdurchlässigkeit 79
 Wasserstoff-Donor 127
 weich 327
 Weichmacher 118
 - äußere 69
 Weichmachung
 - äußere 118, 137
 - innere 119
 Weißbruch 345
 Werkstoff 363
 Wertstofftonne 242
 Whisker 152
 Wiederholeinheit 42
 Windsichtung 248
 Wirbelstrominduktion 249
 Wirkungsindikator 266
 Wirkungskategorie 266

Z

zäh 338
 Zähigkeit 86, 338, 369
 Zahlenmittel 66
 zeitabhängig 373, 375
 Zeitstandschaubilder 336
 Zeitstand-Zugversuch 333
 Zeit-Temperatur-Superpositionsprinzip
 389
 Zentrifugenmittel 66
 Zerkleinerung 248
 Zersetzung 75
 Zirkularität 145
 Zug-Druck-Asymmetrie 180, 323, 393
 Zugfestigkeit 318
 Zug-Kriechmodul 337
 Zugversuch
 - quasistatischer 315