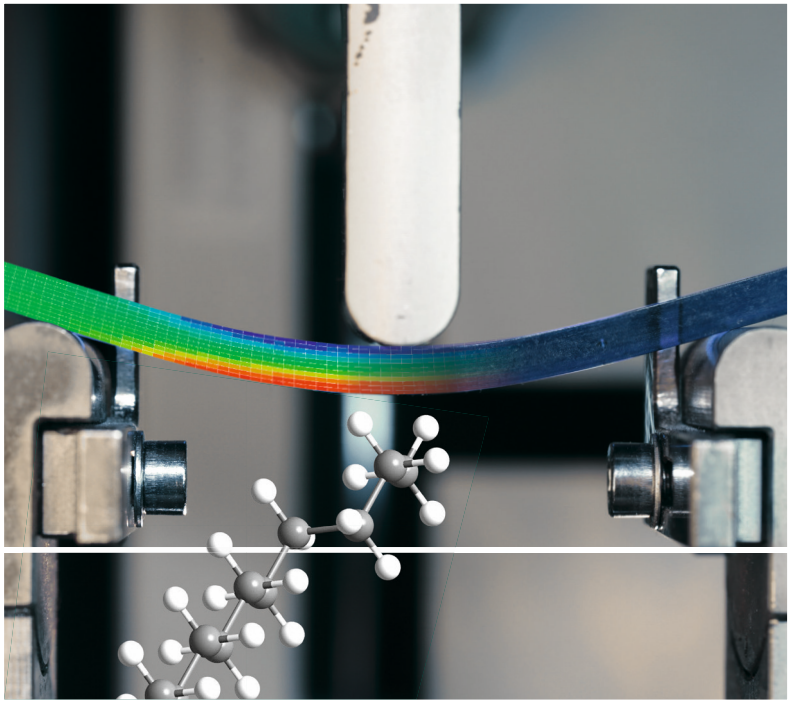
Martin Moneke

Kunststoff-werkstoffe

Fachbuch für Lehre und Praxis



HANSER

Moneke
Kunststoffwerkstoffe

Bleiben Sie auf dem Laufenden!

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

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Die Internet-Plattform für Entscheider!

Exklusiv: Das Online-Archiv der Zeitschrift Kunststoffe!

Richtungsweisend: Fach- und Brancheninformationen stets top-aktuell!

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

Kunststoffe.de

Martin Moneke

Kunststoff-werkstoffe

Fachbuch für Lehre und Praxis

HANSER

Der Autor:
Prof. Dr.-Ing. Martin Moneke
Hochschule Darmstadt, Institut für Kunststofftechnik Darmstadt (ikd)
Haardtring 100, 64295 Darmstadt

MIX
Papier aus verantwortungsvollen Quellen
FSC® C083411

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

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

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

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

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2022 Carl Hanser Verlag München
www.hanser-fachbuch.de
Lektorat: Mark Smith
Herstellung: Cornelia Speckmaier
Coverconcept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München
Titelbild: Foto und Molekül: Prof. Dr. Martin Moneke; FEM-Berechnung: Prof. Dr.-Ing. Beate Lauterbach
Coverrealisierung: Max Kostopoulos
Satz: Eberl & Koesel Studio, Altusried-Krugzell, Germany
Druck und Bindung: CPI books GmbH, Leck
Printed in Germany

ISBN: 978-3-446-47016-3
E-Book-ISBN: 978-3-446-47017-0

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 Normalklimate 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 Kugeleindruckhärte ... 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/Geschlechtergerechter-Sprachgebrauch*) 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 Einleitung

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)

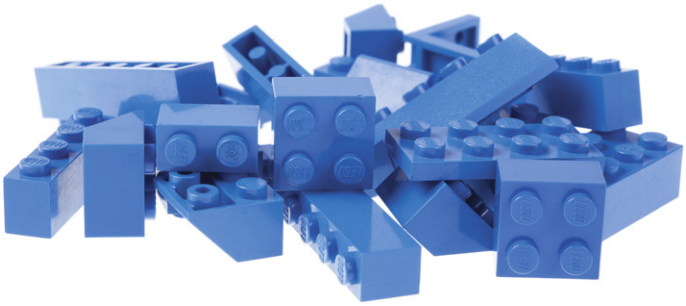


Bild 1.2 Maßhaltige und belastbare Spielzeugbausteine aus Acrylnitril-Butadien-Styrol Kunststoff (ABS) (iStock.com/CTRPhotos)

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 °C[1] 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 Seitenspeigel 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)

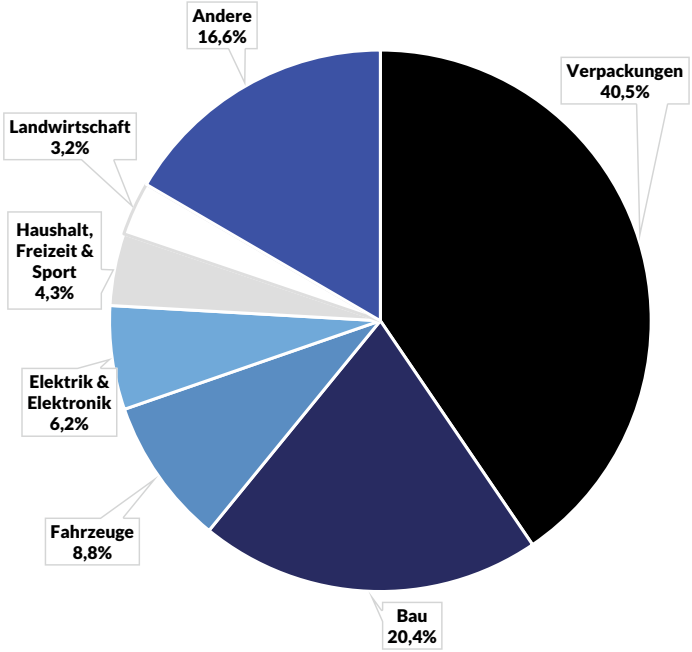


Bild 1.7 Anteil der verschiedenen Branchen am Kunststoffverbrauch in Europa 2020 [4]

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.

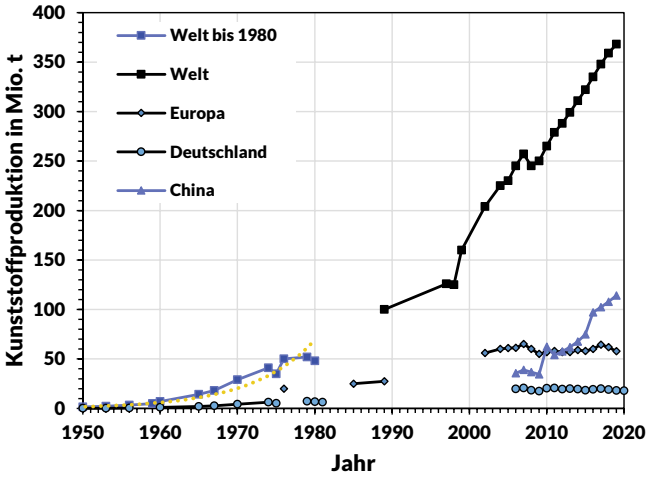


Bild 1.8 Zeitliche Entwicklung der weltweiten Kunststoffproduktion mit Daten aus [7, 8, 9, 10]

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 Betriebe[2] 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.

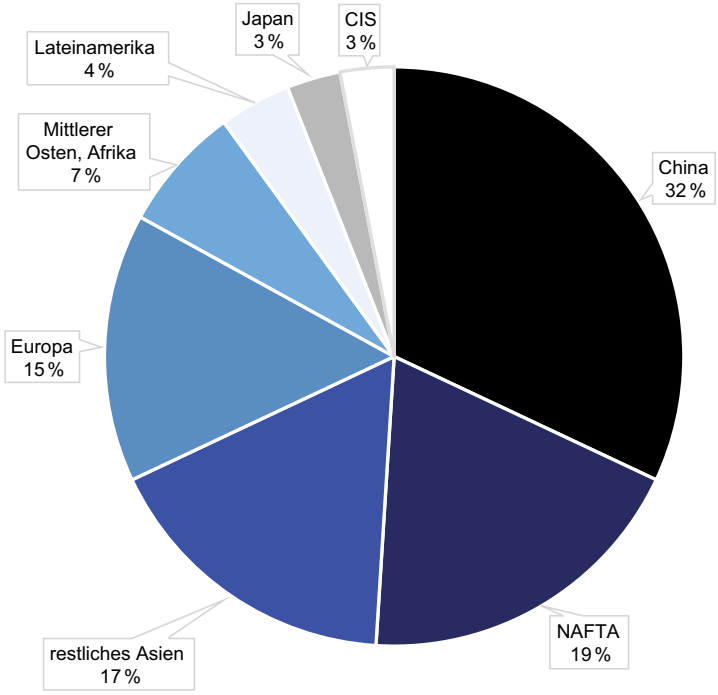


Bild 1.9 Anteil der Regionen und einzelner Länder an der weltweiten Produktion von Kunststoffen im Umfang von 367 Millionen t im Jahr 2020 [4][3]

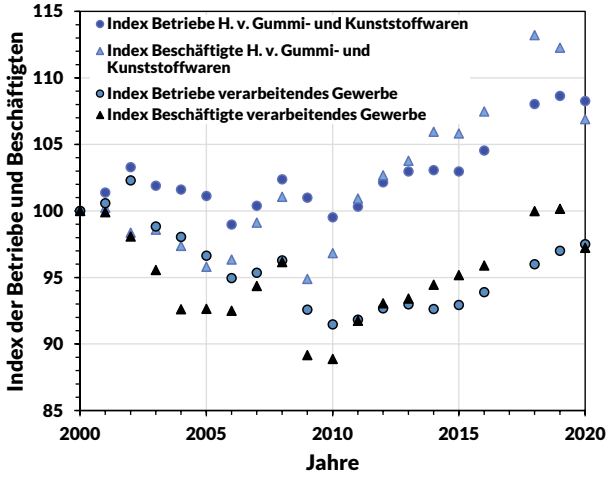


Bild 1.10 Index der Betriebe und Beschäftigten der Hersteller von Gummi- und Kunststoffwaren und des verarbeitenden Gewerbes insgesamt (Werte bezogen auf das Jahr 2000) [11]

[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.

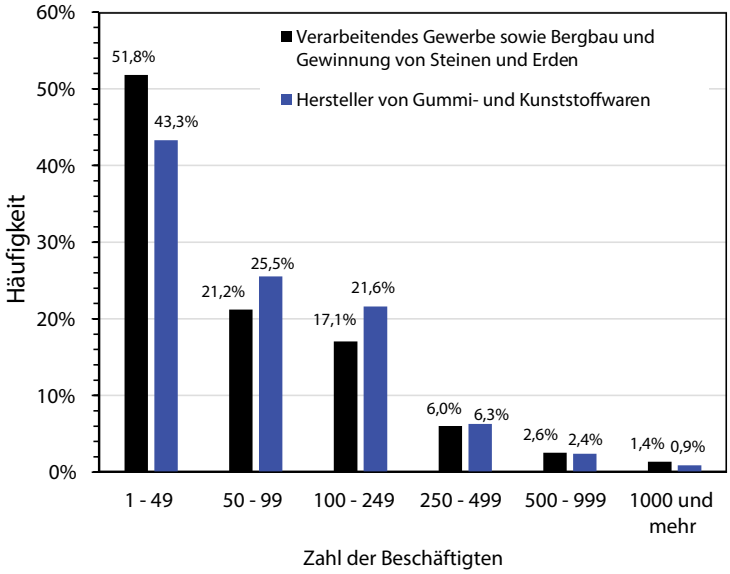


Bild 1.11 Verteilung der Betriebe der Gummi- und Kunststoffverarbeitung und des verarbeitenden Gewerbes insgesamt nach Beschäftigten in Deutschland 2020 [11]

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.

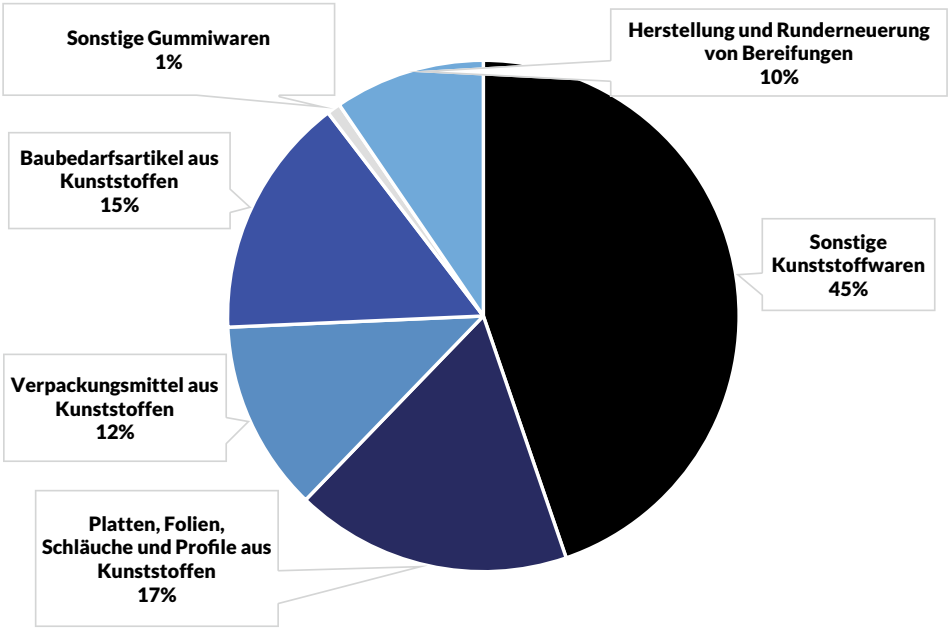


Bild 1.12 Anteil der Betriebe an den Sparten der Gummi- und Kunststoffverarbeitung in Deutschland 2020 [11]

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.

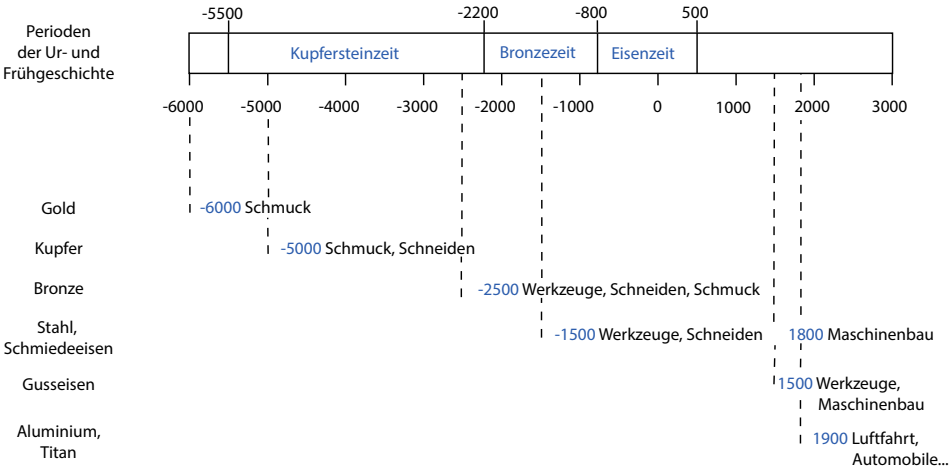


Bild 1.13 Zeitliche Entwicklung der technischen Verwendung der metallischen Werkstoffe [12]

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 einführte. 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 Atomrümpfe 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 einzig 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 Kunststoffwerkstoffs 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 °C für Polyethylen (PE) und 290 °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 („funktionelle 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**	**245 180**	**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.

In Deutschland werden 15 % des Erdöls als Rohstoff in der chemischen Industrie genutzt [20]. Nur ein Teil davon wird zur Herstellung von Kunststoffen verwendet. 63 % werden zu Kraftstoffen verarbeitet und 22 % energetisch genutzt. Weltweit werden 5 % der Erdöl-, Erdgas- und Kohlefördermengen in der chemischen Industrie als Rohstoff verendet.

Aus diesen Zahlen ergeben sich zwei grundsätzliche Beobachtungen und daraus Forderungen:

- Es gibt keinen prinzipiellen Unterschied bei der Reichweite für die Rohstoffe, die im Maschinenbau und in der Kunststofftechnik genutzt werden. Rohstoffvorkommen, egal ob es sich um metallhaltige Erze oder konventionelle Kohlenstofflieferanten handelt, müssen durch den Ausbau der Kreislaufwirtschaft geschont werden.
- Nur ein sehr kleiner Teil des Erdöls und Erdgases wird für die Herstellung von Kunststoffen verwendet, der weitaus größte Teil wird zur Energiegewinnung verbrannt. Das darf nicht länger passieren, Erdöl und Erdgas sollten als Rohstofflieferant und nicht als Energielieferant eingesetzt werden. Zusätzlich sollte langfristig die Änderung der Rohstoffbasis für die Kunststoffindustrie umgesetzt werden, wie in Kapitel 5 thematisiert.

Beim Vergleich von Metallen und Kunststoffen wird die Bedeutung der jeweiligen Werkstoffe gerne durch die Produktionsmenge dargestellt, vgl. Bild 1.8 und Bild 1.14.

In Bild 1.14 ist zu erkennen, dass

- bereits 1950 weltweit mit 191 Millionen t signifikante Mengen Rohstahl erzeugt wurden (die historischen Daten gehen bis ins Jahr 1870 zurück [21]); und dass
- wie bei Kunststoffen, vgl. Bild 1.8, ab 2000 ein deutliches, überwiegend lineares weltweites Wachstum der Produktion eingesetzt hat, welches durch das Wachstum der Produktion in China getragen wird, während die Produktion in Europa leicht zurückgeht.

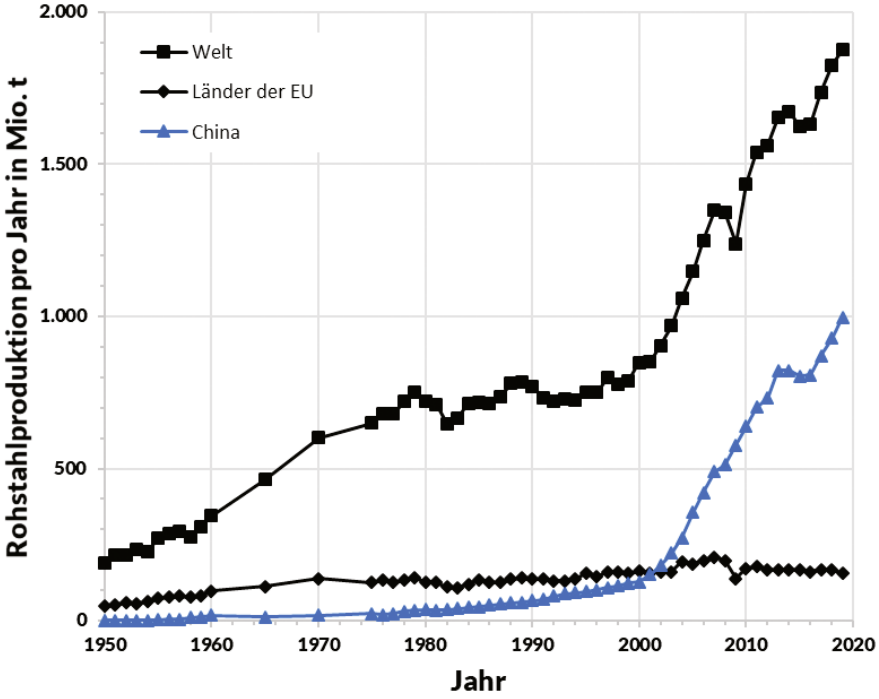


Bild 1.14 Zeitliche Entwicklung der Rohstahlproduktion [21]

Die absoluten Mengen in Millionen Tonnen sind bei Rohstahl ab dem Jahr 1990 nur noch um einen Faktor 7,8 größer als bei Kunststoffen, vgl. Bild 1.8. Berücksichtigt man die unterschiedlichen Dichten, vgl. Tabelle 1.1, kann man sagen, dass die Produktion von Kunststoffen die von Rohstahl weltweit bezogen auf das Produktionsvolumen ab dem Jahr 1990 überrundet hat. Allerdings haben diese Vergleiche der produzierten und letztlich verbrauchten Mengen nur einen begrenzten Wert, denn die Bedeutung von Werkstoffen lässt sich eher an der Verwendung festmachen. Erst wenn mit einem Werkstoff völlig neue Anwendungen möglich sind, prägt der Werkstoff eine zeitliche Periode. Das war in der Kupfersteinzeit, der Bronzezeit und der Eisenzeit so, vgl. Bild 1.13, weshalb die Werkstoffe diesen geschichtlichen Perioden den Namen gegeben haben. Das war auch mit der Einführung von Stahl um 1800 und von Aluminiumlegierungen ab 1900 so. Ebenso haben die Kunststoffe ab 1950 völlig neue Produkte und Anwendungen möglich gemacht. Allerdings wurde die zweite Hälfte des 20. Jahrhunderts wohl eher vom Werkstoff Silicium und den daraus herstellbaren Chips für Computer geprägt als von Kunststoffen oder Stahl.

Beispielhafte Anwendungen von Kunststoffen werden in Abschnitt 1.1 dargestellt. In Abschnitt 5.9 wird der Beitrag von Kunststoffen zu einer nachhaltigen Entwicklung hervorgehoben.

1.3.9 Energiebedarf

Es liegt nahe, die Werkstoffe zu beurteilen, indem die Energiebedarfe zu ihrer Herstellung oder der daraus resultierende CO_2-Fußabdruck verglichen werden.

Allerdings ist der Vergleich von Werkstoffen im Sinn von Ökobilanzen nur als Teil von Produkten (*Produktsysteme*) zulässig, vgl. Abschnitt 5.8. Denn nur bei der Betrachtung des gesamten Lebensweges und der Betrachtung eines konkreten Produktes bzw. Anwendungsfalls (*funktionelle Einheit*) ist ein Vergleich sinnvoll und wissenschaftlich fundiert. Dazu werden in Ökobilanzen Bilanzräume festgelegt und welche Stoff- und Energieströme betrachtet werden. Eingeschlossen werden dabei die Energiewandlungsprozesse z. B. bei der Stromerzeugung, um Werte für die sogenannte Primärenergie zu erhalten.

Primärenergie ist die Energie vor einer Wandlung in einen nutzbaren Energieträger. Sie wird bei Werkstoffen auf die Masse bezogen.

Die Primärenergie entspricht somit dem Energieinhalt in Rohöl, Erdgas, Kohle und Uran (*konventionelle Energie*) und der durch Sonne, Wind, Wasser und Biomasse gelieferten Energie (*erneuerbare Energie*).

Um einen qualitativen Eindruck von dem Unterschied der Energiebedarfe für die einzelnen Werkstoffe und für Produktion, Weiterverarbeitung und Recycling zu erhalten, ist eine Gegenüberstellung möglich. Tabelle 1.3 zeigt Werte für den Primärenergiebedarf zur Herstellung der Werkstoffe, für ihre Weiterverarbeitung und das Recycling. Die Daten entstammen überwiegend Publikationen der jeweiligen europäischen Wirtschaftsverbände, die dafür die Produktionsprozesse ihrer Mitgliedsunternehmen analysiert haben. Somit ergibt sich jeweils ein europaweiter Mittelwert für die eingesetzten Technologien und die dafür benötigten Energieträger. Es wird dabei auch der tatsächlich in der jeweiligen Industrie eingesetzte Strommix berücksichtigt, also die Aufteilung in die verschiedenen Primärenergieträger, vgl. Abschnitt 5.9.

Tabelle 1.3 Primärenergiebedarfe für die Erzeugung von 1 kg verschiedener Werkstoffe in Europa (wenn nicht anders genannt)

Werkstoff	Primärenergie für die Primär-produktion in MJ/kg	Primärenergie für das werkstoffliche Recycling in MJ/kg	Primärenergie für die Verarbeitung in MJ/kg
Kunststoff			
Polyethylen (PE-HE, PE-LD und PE-LLD)	81 [22] 56 [23]	–	Spritzgießen: 10 [24] Extrusion: 4 [24]
Polyethylenter-ephthalat (PET)	71 [25] 56 [23]	–	Spritzgießen: 10 [24] Extrusion: 4 [24]
Polyamid 66 (PA 66)	140 [26]	–	Spritzgießen: 10 [24] Extrusion: 4 [24]
Aluminium			
Aluminium in Barrenform	140 [27]	6 [27]	Bleche: 9 [27] Folien: 29 [27] Profile: 16 [27]
Primäraluminiummix als Halbzeug in Deutschland	204 [23]	16 [23]	–
Stahl			
Warmbandstahl (Oxygenstahl)	Ohne Schrottanteil: 21,6 [28] Mit Schrottanteil: 10,4 [28] Mix Deutschland: 22 [23]	15 [28] 10 [29]	–
Warmbandstahl (Elektrostahl)	4 [30] 9 [23]	–	–
Edelstahl (316), Warmbandstahl, (Oxygenstahl)	Ohne Schrottanteil: 51 [28] Mit Schrottanteil: 45 [28]	–	–

Die Werte für den Primärenergiebedarf für die Primärproduktion von Kunststoffen sind gleich oder niedriger als die für Aluminium und höher als die für Stahl. Dabei ist wieder zu berücksichtigen, dass die Dichte von Stahl ungefähr achtmal höher ist als die von Polyethylen. Eine volumenbezogene Betrachtung bzw. die für Ökobilanzen geforderte Betrachtung von funktionellen Einheiten, also Produktmengen, die den gleichen Nutzen haben, würde ein anderes Bild ergeben.

Für alle Materialien erkennt man, dass der Energiebedarf für Recycling bzw. Weiterverarbeitung deutlich kleiner ist als der Bedarf für die Primärproduktion.[6] Man kann daher werkstoffunabhängig die Aussage treffen, dass ein einmal produzierter Werkstoff so lange wie möglich verwendet oder durch Kreislaufwirtschaft wiederverwendet werden sollte.

Für Rohstahl werden zwei Werte angegeben, weil bereits bei der Primärproduktion von Rohstahl im integrierten Hüttenwerk bestehend aus Hochofen, Stahl- und Walzwerk Eisenschrott im Hochofen zum Einsatz kommt. Der Schrott wird beim sogenannten Frischen, dem Einblasen von Sauerstoff zur Oxidation von Kohlenstoff und anderen Elementen, zur Kühlung hinzugegeben. Der Schrottanteil liegt je nach Hersteller zwischen 10 und 30 % bezogen auf die erzeugte Menge Stahl. Der Wert ohne Schrottanteil ist somit nur ein theoretischer Wert. Primärstahl kann auch in Elektro- oder Lichtbogenstahlwerken erzeugt werden, diese werden aber häufiger zum Schmelzen von Schrott und der Erzeugung von Sekundärstahl eingesetzt. Im Elektrostahlwerk ist der Energiebedarf deutlich geringer als im klassischen Oxygenprozess.

Offensichtlich gibt es bei den Kunststoffen deutliche Unterschiede im Primärenergiebedarf für die Primärproduktion. Der *Energieinhalt* der Kunststoffe, also die bei der Verbrennung nutzbare Energie (*thermische Verwertung*), unterscheidet sich ebenfalls:

- Polyethylen: 46 MJ/kg [22]
- Polyethylenterephthalat: 24 MJ/kg [25]
- Polyamid 66: 35 MJ/kg [26]

Das Verhältnis von Energieinhalt zu Primärenergiebedarf ist bei den einzelnen Kunststoffen deutlich unterschiedlich. Daraus kann abgeleitet werden, dass sich das werkstoffliche Recycling von Polyamiden meistens energetisch lohnt, das von Polyethylen nicht immer. Hier ist die thermische Verwertung unter Energiegesichtspunkten eher sinnvoll.

1.3.10 Preise

In Bild 1.15 ist der sogenannte Referenzpreis für Standardkunststoffe und technische Thermoplaste ohne Verstärkungsstoffe oder besondere Bestandteile, die sogenannten Naturtypen, dargestellt. Referenzpreise sind die Listenpreise ohne Mehrwertsteuer ab Werk eines Erzeugers, Compoundeurs, Rezyklatherstellers oder

[6] Zahlenwerte für das Recycling von Kunststoffen liegen nicht vor, sind aber vermutlich in der gleichen Größenordnung wie Werte für die Extrusion. Zahlenwerte für die Weiterverarbeitung von Stahl lassen sich aus LCA-Datenbanken nur indirekt ermitteln und sind mit hohen Unsicherheiten behaftet, liegen aber vermutlich in der gleichen Größenordnung wie die Werte für Aluminium.

Händlers für größere und vertraglich vereinbarte Mengen [31]. Die Spannweite der Preise ergibt sich aus dem minimalen und dem maximalen Monatswert in den Jahren 2013–2019, also vor der Coronapandemie.

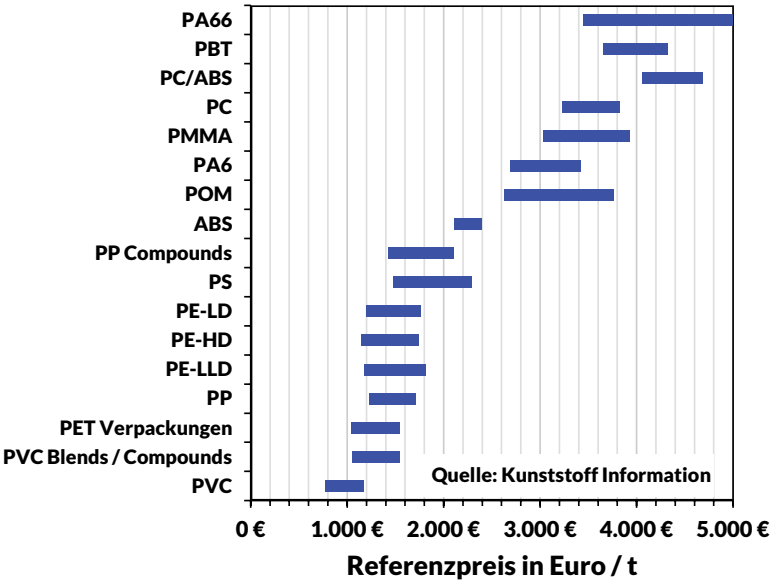


Bild 1.15 Preise der Jahre 2013–2019 für Kunststoffwerkstoffe (ohne Verstärkungsstoffe oder besondere Bestandteile) in Deutschland [31]

Man erkennt in Bild 1.15 die Unterschiede zwischen den Standardthermoplasten, die zwischen 800 Euro/t und 2200 Euro/t kosten, und den technischen Thermoplasten, bei denen die Preise zwischen 2100 Euro/t und 5000 Euro/t liegen.

Die Preise für die glasfaserverstärkten Typen liegen ungefähr 10–20 % über denen für die in Bild 1.15 aufgeführten Naturtypen [31].

Die *Preise für Rezyklate* liegen meist unter denen für die Primärkunststoffe. Dabei erzielen die glasklaren Rezyklate des z. B. für Flaschen verwendeten Polyethylenterephthalats (PET) in Granulatform fast die gleichen Preise wie primäres PET, während klare PET-Flakes bei 75 % und bunte PET-Flakes bei 55 % des Preises für die Primärkunststoffe liegen. Die Gründe sind, dass sich Flakes anders als Granulate nicht in jedem Prozess problemlos weiterverarbeiten lassen und dass ein Rezyklat nicht mehr universell anwendbar ist, wenn es Farbmittel enthält. Bei Polyamid 66 (PA 66) liegt der Preis des Rezyklats sowohl für verstärkte wie für unverstärkte Typen ca. 65 % unter dem des Primärkunststoffs. Die Preise schwarz eingefärbter Typen sind nochmal um 5–10 % geringer [31].

Es gibt also neben der grundsätzlichen Forderung nach nachhaltigem Handeln auch handfeste wirtschaftliche Gründe, vermehrt Rezyklate einzusetzen.

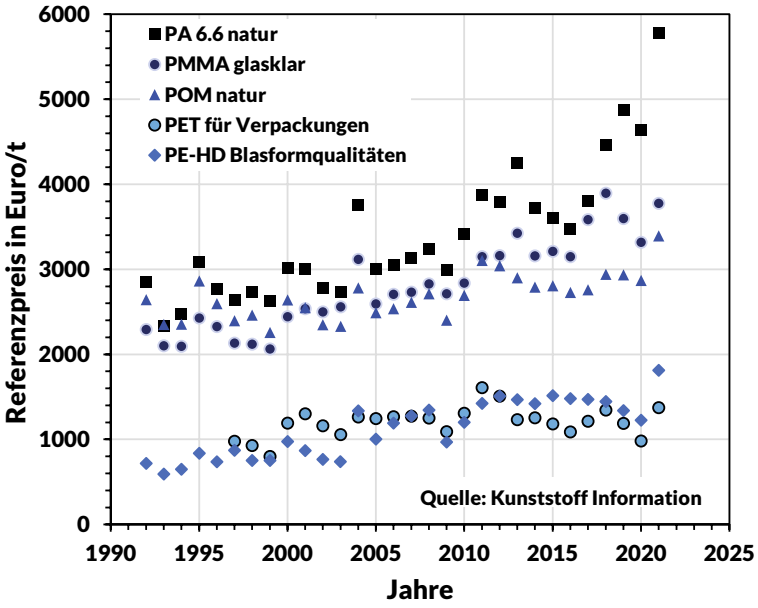


Bild 1.16 Zeitliche Entwicklung der Preise für ausgewählte Thermoplaste [31]

In Bild 1.16 ist der zeitliche Verlauf der Referenzpreise von fünf typischen und relevanten Thermoplasten in den 20 Jahren von 1999 bis 2019 dargestellt. In diesem Zeitraum stiegen die Preise im Mittel um ca. 60 %, mit 30 % am wenigsten für Polyoxymethylen (POM) und mit 85 % am meisten für Polyamid 66 (PA 66). Die Steigerung der Verbraucherpreise in Deutschland beträgt in diesem Zeitraum 34 %, was einer jährlichen Inflationsrate von 1,4 % entspricht [32]. Die Preis- und damit die Wertsteigerung der Kunststoffe ist also größer als die Inflationsrate.

Die zeitliche Entwicklung der Erzeugerpreise, vgl. Bild 1.17, zeigt eine starke Schwankung aber doch meist ähnliche Änderung der Preise für verschiedene Rohstoffe und Erzeugnisse aus diesen Rohstoffen. Eine starke Korrelation gibt es zwischen den Preisen für Erdöl und Primärkunststoffe nicht, weil weniger als ca. 5 % des Erdöls für die Herstellung von Kunststoffen verwendet werden.