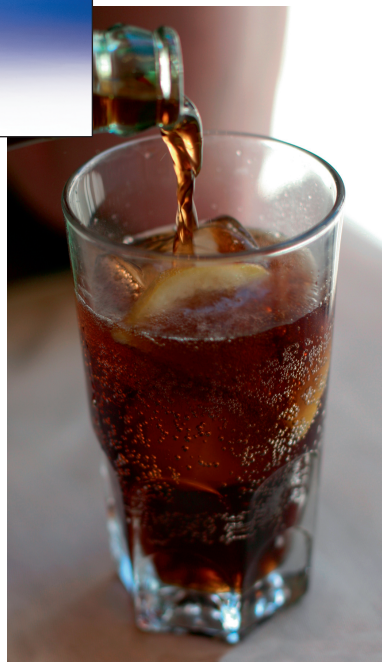


# Einführung



Getränkebehälter können aus Werkstoffen unterschiedlicher Klassen hergestellt werden. Üblich sind Aluminiumdosen (Metall, oben), Glasflaschen (Glas, Mitte) und Plastikflaschen (Polymer, unten). [Mit freundlicher Genehmigung der Coca-Cola Company; © klikk, Fotolia.com.]



## Lernziele

Nach dem Studium dieses Kapitels sollten Sie in der Lage sein,

1. sechs verschiedene Eigenschaften von Werkstoffen zu nennen, die über ihre Einsatzmöglichkeit entscheiden;
2. die vier Komponenten zu nennen, die für Entwicklung, Produktion und Anwendung eines Werkstoffs eine Rolle spielen, und die Zusammenhänge zwischen diesen Komponenten zu beschreiben;
3. drei wichtige Kriterien für die Werkstoffauswahl zu nennen;
4. die drei Grundklassen von festen Stoffen anzugeben und die jeweils wichtigen chemischen Besonderheiten aufzuzählen;
5. die vier Typen technischer Keramiken mit je einer spezifischen Eigenschaft zu nennen;
6. den Begriff „smarte/intelligente Werkstoffe/Systeme“ zu definieren;
7. den Begriff „Nanotechnologie“ im Kontext der Materialwissenschaft zu erläutern.

## 1.1 Historische Aspekte

Werkstoffe sind in unserer Kultur tief verankert. Transport, Unterkunft, Kleidung, Kommunikation, Erholung, Lebensmittelproduktion – jeder Bereich unseres täglichen Lebens wird auf die eine oder andere Art von Werkstoffen beeinflusst. Historisch gesehen war und ist die Entwicklung und Veränderung von Gesellschaften immer eng an die Fähigkeit ihrer Mitglieder gebunden, Werkstoffe herzustellen und zu verändern, um ihre Bedürfnisse zu befriedigen. Frühere Zivilisationen wurden deshalb sogar nach den vorherrschenden Werkstoffen benannt: Steinzeit, Bronzezeit, Eisenzeit<sup>1)</sup>.

Die Frühmenschen hatten nur Zugang zu einer begrenzten Anzahl natürlich vorkommender Werkstoffe wie Stein, Holz, Ton und Leder. Mit der Zeit entwickelten sie Verfahren zur Gewinnung von Werkstoffen, die bessere Eigenschaften besaßen als die natürlich verfügbaren Materialien. Dazu gehörten Keramiken, später verschiedene Metalle. Außerdem entdeckten sie, dass die Eigenschaften von Werkstoffen durch thermische Behandlung oder durch Zusatz weiterer Substanzen verändert werden können. Zu dieser Zeit war die Nutzung von Werkstoffen ein reiner Selektionsprozess: Man entschied, welches der wenigen zur Verfügung stehenden Materialien sich am besten für die beabsichtigte Anwendung eignete. Erst in jüngerer Zeit gelangten die Wissenschaftler zu der Erkenntnis, dass die Strukturelemente von Werkstoffen im Zusammenhang mit ihren Eigenschaften stehen. Dieses in den vergangenen etwa 100 Jahren angesammelte Wissen versetzte sie in die Lage, Eigenschaften immer gezielter zu verändern. Tausende von unterschiedlichen Werkstoffen wurden so entwickelt, die mit speziellen Eigenschaften die Anforderungen unserer modernen und komplexen Gesellschaft erfüllen. Dazu gehören die Werkstoffklassen Metalle, Kunststoffe, Gläser, Keramiken sowie Verbundwerkstoffe aus zwei oder mehr der vorgenannten Klassen, aber auch Strukturen wie Fasern, Schäume, Schichten usw.

Die Entwicklung vieler Technologien, die unser Leben komfortabler machen, ist eng an die Verfügbarkeit entsprechender Werkstoffe gebunden. Ein genaueres Verständnis von Struktur und Eigenschaften eines Werkstoffs ist oft der erste Schritt zur Verbesserung der Herstellungsverfahren. Kraftfahrzeuge z. B. wären nicht denkbar ohne die Verfügbarkeit von preiswertem Stahl; elektronische Geräte wie Computer und Mobiltelefone sind dem privaten Nutzer nur im gegenwärtigen Ausmaß zugänglich, weil Halbleiterwerkstoffe und -bauelemente preiswert hergestellt werden können.

1) Der ungefähre Beginn von Steinzeit, Bronzezeit und Eisenzeit wird auf 2,5 Mio v. Chr., 3500 v. Chr. bzw. 1000 v. Chr. datiert.



## 1.2 Materialwissenschaft und Werkstofftechnik

Mitunter ist es sinnvoll, den Bereich der Wissenschaft, der sich mit Werkstoffen beschäftigt, in *Materialwissenschaft* und *Werkstofftechnik* zu unterteilen. Dabei gehört zur Werkstoffwissenschaft die Untersuchung der Struktur-Eigenschafts-Beziehungen, während sich die Werkstofftechnik damit beschäftigt, unter Ausnutzung dieser Beziehungen Werkstoffe mit gewünschten Eigenschaften zu entwickeln und zu verarbeiten. Aus funktioneller Sicht hat der Materialwissenschaftler die Aufgabe, neue Werkstoffe zu entwickeln oder zu synthetisieren. Der Werkstofftechnologe hingegen entwickelt Produkte oder Systeme aus existierenden Werkstoffen und/oder neue Technologien zur Verarbeitung von bekannten Werkstoffen. Viele Absolventen materialwissenschaftlicher und werkstofftechnischer Studiengänge sind in beiderlei Hinsicht ausgebildet und auch in der Forschung lassen sich beide Aspekte selten voneinander trennen.

Der Terminus *Struktur* bedarf zunächst einer genaueren Klärung. Die Struktur eines Werkstoffs hängt, grob formuliert, mit der Anordnung seiner Bestandteile zusammen. Die subatomare Struktur umfasst die Elektronen der einzelnen Atome in ihrer Wechselwirkung untereinander und mit ihren Atomkernen. Auf atomarer Ebene ist die Struktur von der gegenseitigen Anordnung der Atome und Moleküle bestimmt. Die Erfassung dieser Strukturebene erfolgt hauptsächlich indirekt, z. B. mithilfe von Röntgendiffraktometrie oder diversen spektroskopischen Methoden.

Die nächsthöhere Strukturebene, jene der agglomerierten Gruppen von Atomen oder Molekülen, ist die *mikroskopische* Ebene. Sie lässt sich mit den verschiedenen mikroskopischen Verfahren untersuchen und abbilden. Strukturelemente schließlich, die dem bloßen Auge zugänglich sind, werden als *makroskopische* Ebene bezeichnet.

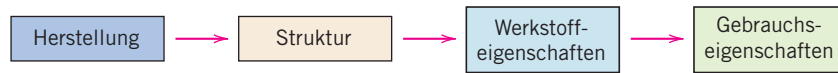
Was unter einer *Eigenschaft* zu verstehen ist, muss ebenfalls genauer erklärt werden. Werkstoffe sind äußeren Beanspruchungen oder Einflüssen ausgesetzt, die sie zu einer bestimmten Reaktion veranlassen: Eine Probe, die einer Kraft ausgesetzt wird, verformt sich; eine polierte Metalloberfläche reflektiert Licht. Eine Werkstoffeigenschaft ist also die Art und Weise, in der ein Material auf einen äußeren Einfluss antwortet, sowie das Ausmaß dieser Antwort. Eigenschaften werden allgemein unabhängig von der Größe und Form einer Werkstoffprobe definiert.

Nahezu alle wichtigen Eigenschaften von Feststoffen lassen sich in eine von sechs Kategorien einordnen: mechanische, elektrische, thermische, magnetische, optische und chemische Eigenschaften. Für jede Kategorie sind bestimmte Arten der Anregung, die eine Reaktion auslösen, spezifisch. Mechanische Eigenschaften verbinden eine Deformation mit dem Wirken einer Kraft. Beispiele sind der Elastizitätsmodul, die Bruch- und die Biegefestigkeit. Elektrische Eigenschaften wie elektrische Leitfähigkeit und Dielektrizitätskonstante benötigen ein elektrisches Feld. Das thermische Verhalten von Festkörpern kann durch Wärmekapazität und thermische Leitfähigkeit charakterisiert werden. Magnetische Eigenschaften beschreiben, wie sich ein Werkstoff im Magnetfeld verhält. Für optische Eigenschaften wie Brechungsindex oder Reflexionsvermögen ist die Anregung durch elektromagnetische Strahlung, z. B. sichtbares Licht, ausschlaggebend. Die chemischen Eigenschaften schließlich stehen in Bezug zur Reaktivität der Werkstoffe; Beispiele sind Korrosion, Degradation, und Oxidation. Alle diese Werkstoffeigenschaften werden von den Verarbeitungs- und Gebrauchseigenschaften abgegrenzt. Die in den folgenden Kapiteln behandelten Eigenschaften gehören jeweils zu einer der genannten sechs Gruppen.

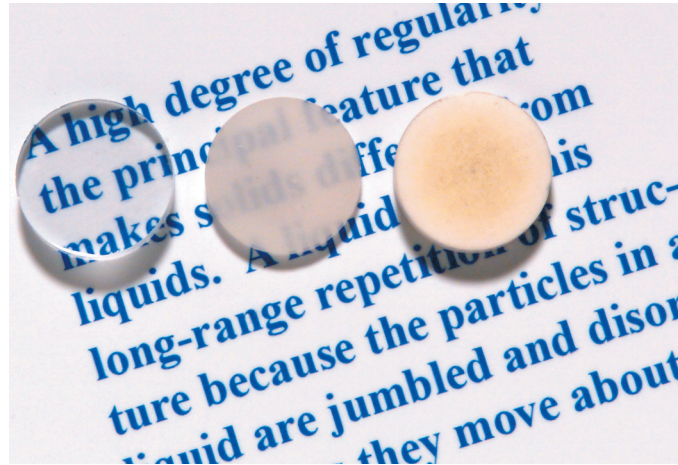
Neben der Struktur und den Eigenschaften von Werkstoffen gehören zwei weitere wichtige Gebiete zur Werkstoffwissenschaft: die *Ver-/Bearbeitung* und die *Anwendungseigenschaften*. Unter Berücksichtigung des Zusammenhangs zwischen diesen vier Teilbereichen hängt die Struktur eines Werkstoffs auch von seiner Verarbeitung ab, und die Anwendungseigenschaften sind eine Funktion der Werkstoffeigenschaften. Der Zusammenhang zwischen Verarbeitung, Struktur, Eigenschaften und Anwendungseigenschaften ist in Abbildung 1.1 dargestellt. In diesem Buch wird untersucht, wie sich dieser Zusammenhang bei der Gestaltung, Herstellung und Nutzung von Werkstoffen äußert.

Abbildung 1.2 zeigt ein Beispiel: Drei dünne Scheiben liegen auf einem gedruckten Text. Offensichtlich sind die optischen Eigenschaften (hier die Lichtdurchlässigkeit) der drei

**Abb. 1.1** Die vier Komponenten von Materialwissenschaft und Werkstofftechnik in ihrem Zusammenwirken.



**Abb. 1.2** Drei dünne Aluminiumoxid-scheiben auf einer bedruckten Seite demonstrieren Unterschiede in der Lichtdurchlässigkeit. Die linke Probe ist transparent, lässt also nahezu das gesamte von der bedruckten Seite reflektierte Licht durch. Die mittlere Probe ist durchscheinend, d. h. nur ein Teil des Lichtes wird durchgelassen. Die rechte Probe ist undurchsichtig, kein Licht gelangt hindurch. Die Unterschiede in den optischen Eigenschaften folgen aus der unterschiedlichen Mikrostruktur der Proben, die wiederum eine Folge unterschiedlicher Herstellungsverfahren ist. [Probenherstellung P. A. Lessing, Foto S. Tanner.]



Werkstoffe unterschiedlich. Die linke Probe ist transparent, nahezu das gesamte Licht wird durchgelassen. Die Proben in der Mitte und rechts sind durchscheinend bzw. undurchsichtig. Alle Proben sind aus dem gleichen Werkstoff, Aluminiumoxid. Die linke Probe ist jedoch einkristallin: Der hohe Grad der Fernordnung ist der Grund für die hohe Transparenz. Die mittlere Probe besteht aus vielen kleinen Kristallen, die miteinander verbunden sind. An den Grenzen zwischen diesen Kristallen wird ein Teil des Lichtes, das vom darunterliegenden Papier reflektiert wird, gestreut, wodurch sich die Probe durchscheinend verhält. Die Probe rechts ist nicht nur aus vielen kleinen miteinander verbundenen Kristallen aufgebaut, sondern enthält auch noch eine Vielzahl an kleinen Poren und Zwischenräumen. Diese Poren streuen das reflektierte Licht sehr effektiv und sind die Ursache dafür, dass die Probe undurchsichtig ist.

Während also die Kristallstruktur der Proben gleich ist, unterscheidet sich die Mikrostruktur hinsichtlich der Kristallgrenzen und Poren. Dies führt wiederum zu Unterschieden in der optischen Durchlässigkeit. Auch die Herstellungsprozesse unterscheiden sich und folglich sind auch die Anwendungseigenschaften verschieden, wenn es im fertigen Produkt um die optische Transparenz geht.

### 1.3 Warum beschäftigen wir uns mit Materialwissenschaft und Werkstofftechnik?

Warum untersuchen wir Werkstoffe? Viele Naturwissenschaftler und Ingenieure aus den unterschiedlichsten Fachgebieten sehen sich früher oder später mit Entwicklungsaufgaben konfrontiert, die Materialfragen beinhalten: mit Getriebeelementen, Gebäudeträgwerken, Komponenten von Raffinerien oder integrierten Schaltkreisen. Werkstoffwissenschaftler und Ingenieure sind Spezialisten, die sich mit Werkstoffforschung und -design auskennen.

Oft geht es darum, einen geeigneten Werkstoff aus einer Vielzahl von Möglichkeiten auszuwählen. Dabei richtet sich die endgültige Entscheidung nach verschiedenen Kriterien. Zunächst müssen die Einsatzbedingungen definiert werden, denn sie bestimmen die geforderten Eigenschaften. Nur selten besitzt ein Werkstoff eine optimale Kombination aller gewünschten Eigenschaften. Deshalb ist es oft notwendig, Kompromisse einzugehen. Ein klassisches Beispiel sind die Eigenschaften Festigkeit und Formbarkeit: Normalerweise hat ein sehr fester Werkstoff nur eine begrenzte Duktilität.

Ein zweites Auswahlkriterium ist die Beständigkeit des Werkstoffs unter Einsatzbedingungen. Erhöhte Einsatztemperaturen oder korrosive Umgebung können z. B. zu erheblichen Einbußen in der Festigkeit führen.

Oft geben ökonomische Überlegungen den entscheidenden Ausschlag. Was wird das fertige Produkt kosten? Vielleicht wird ein Werkstoff gefunden, der zwar alle gewünschten Eigenschaften zeigt, jedoch viel zu teuer ist. Wieder ist ein Kompromiss unumgänglich. Die Kosten eines Produktes enthalten auch immer alle Produktionskosten (z. B. zur Herstellung einer entsprechenden Form).

Je vertrauter ein Ingenieur oder Wissenschaftler mit den verschiedenen Eigenschaften, Struktur-Eigenschafts-Beziehungen und Verarbeitungstechnologien ist, umso effektiver und sicherer wird er eine Werkstoffauswahl auf Basis dieser Kriterien treffen können.

## 1.4 Klassifizierung von Werkstoffen

Feststoffe werden meistens in vier Hauptkategorien eingeteilt: Metalle, Keramiken, Gläser und Polymere. Die Einteilung beruht im Wesentlichen auf der chemischen Zusammensetzung und der atomaren Struktur der Werkstoffe. Die meisten Stoffe können eindeutig einer dieser Gruppen zugeordnet werden. Darüber hinaus gibt es die Komposite als Kombinationen aus zwei oder mehr unterschiedlichen Werkstoffen. Im Folgenden wird diese Klassifikation mit den spezifischen Eigenschaften jeder Werkstoffgruppe erläutert. Eine weitere Kategorie sind *Advanced Materials* (*innovative Werkstoffe*) für Hochtechnologie-Anwendungen wie Halbleiter, Biomaterialien, intelligente und nanostrukturierte Werkstoffe. Sie werden in Abschnitt 1.5 kurz behandelt.

### 1.4.1 Metallische Werkstoffe

Werkstoffe in dieser Gruppe bestehen aus einem oder mehreren metallischen Elementen (z. B. Eisen, Aluminium, Kupfer, Titan, Gold, Nickel) und oft auch aus geringeren Anteilen nichtmetallischer Elemente wie Kohlenstoff, Stickstoff oder Sauerstoff.<sup>2)</sup> In Metallen und Legierungen sind die Atome regelmäßig angeordnet (Kap. 3). Außerdem sind die Anordnungen im Vergleich zu Keramiken, Gläsern und Polymeren relativ dicht (Abb. 1.3).

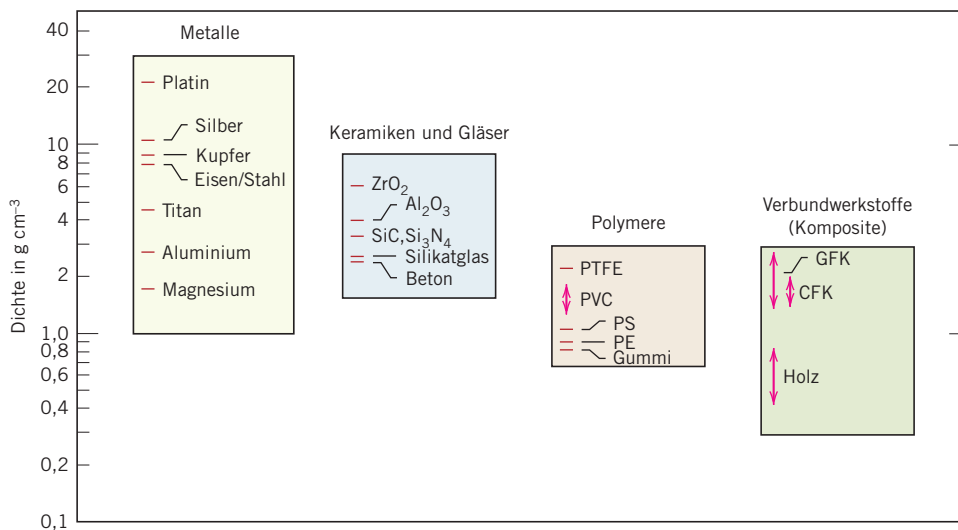
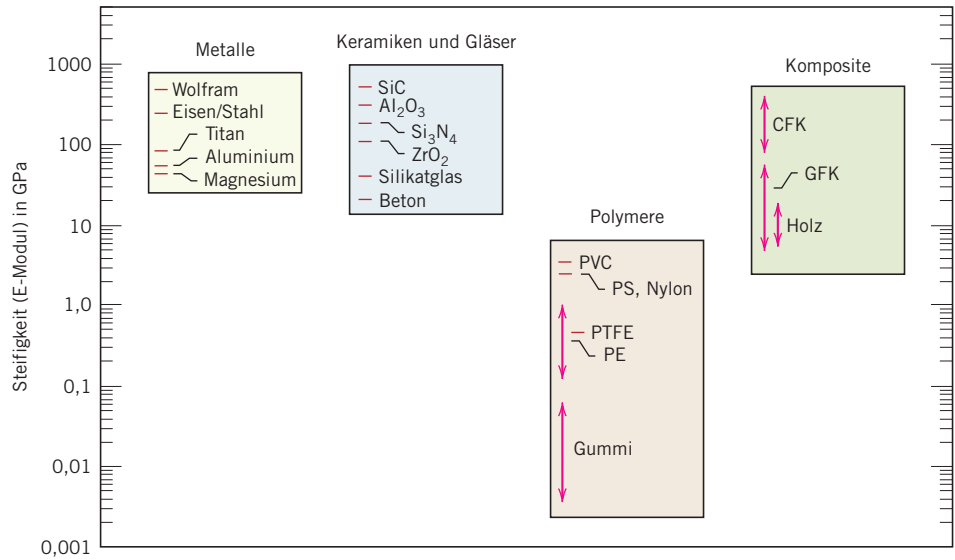


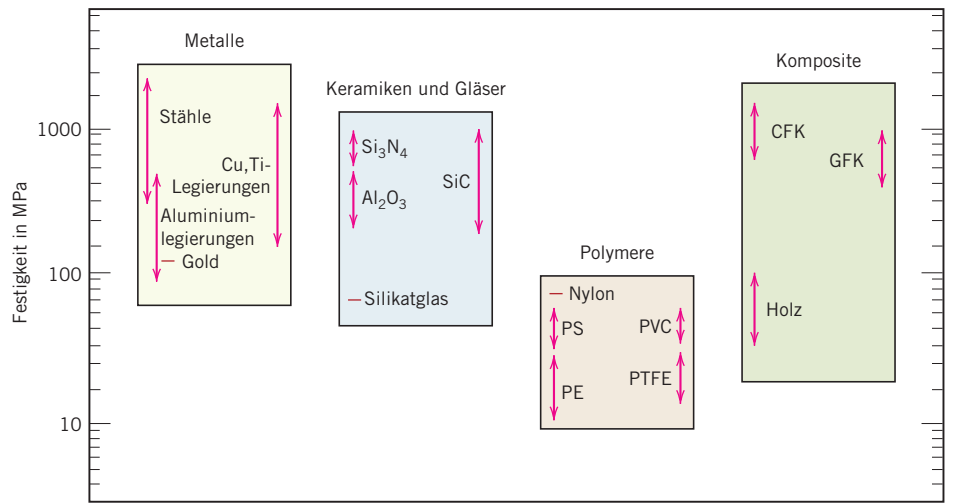
Abb. 1.3 Wertebereiche für die Dichte (bei Raumtemperatur) verschiedener Metalle, Keramiken, Gläser, Polymere und Komposite.

2) Die Bezeichnung Metalllegierung, kurz: Legierung, wird für eine metallische Substanz verwendet, die aus zwei oder mehr Elementen besteht.

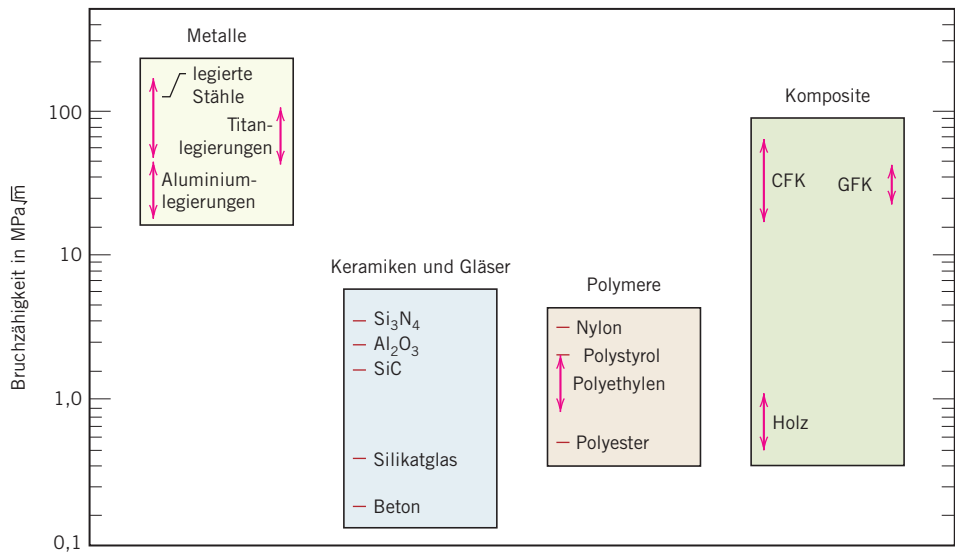
**Abb. 1.4** Wertebereiche für die Steifigkeit (E-Modul, bei Raumtemperatur) für verschiedene Metalle, Keramiken, Gläser, Polymere und Komposite.

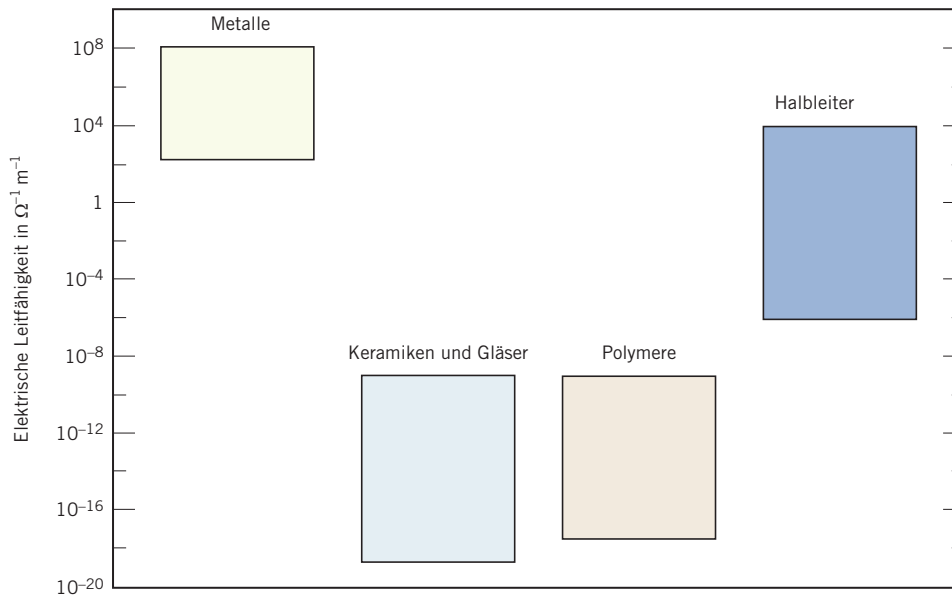


**Abb. 1.5** Wertebereiche für die Zugfestigkeit (bei Raumtemperatur) für verschiedene Metalle, Keramiken, Gläser, Polymere und Komposite. (für Keramiken u. Gläser: Biegefestigkeit)



**Abb. 1.6** Wertebereiche für die Bruchzähigkeit (bei Raumtemperatur) für verschiedene Metalle, Keramiken, Polymere und Komposite. [Aus: M. F. Ashby und D. R. H. Jones, *Engineering Materials 1: An Introduction to Properties, Applications and Design*, 3. Aufl., S. 177/178; © 2001. Mit freundlicher Genehmigung von Elsevier.]





**Abb. 1.7** Wertebereiche für die elektrische Leitfähigkeit (bei Raumtemperatur) für verschiedene Metalle, Keramiken, Gläser, Polymere und Halbleiterwerkstoffe.

Werden die mechanischen Eigenschaften betrachtet, so sind die metallischen Werkstoffe relativ steif (Abb. 1.4), fest (Abb. 1.5), duktil (d. h. fähig, eine große Deformation zu erleiden, ohne zu brechen) und bruchzäh (Abb. 1.6). Diese Eigenschaften ermöglichen einen vielfältigen Einsatz in der Bautechnik. Metalle verfügen über eine große Anzahl delokalisierte (keinem Atom zugeordnete) Elektronen, wodurch sich eine Reihe typischer Eigenschaften ergibt. So sind Metalle sehr gute elektrische und thermische Leiter (Abb. 1.7) und nicht durchlässig für sichtbares Licht. Eine polierte Metalloberfläche erscheint glänzend. Darüber hinaus sind einige Metalle (z. B. Fe, Co, Ni) magnetisch.

Abbildung 1.8 zeigt Gebrauchsgegenstände aus unterschiedlichen metallischen Werkstoffen. Typen und Anwendungen dieser Werkstoffe und ihren Legierungen werden in Kapitel 11 behandelt.



**Abb. 1.8** Bekannte Gebrauchsgegenstände aus metallischen Werkstoffen (v. l. n. r.) Silberbesteck, Schere, Münzen, Zahnrad, Trauring, Schraube mit Mutter.

## 1.4.2 Keramiken

Keramiken sind Verbindungen von Metallen und Nichtmetallen, zumeist Oxide, Nitride und Carbide. Zu den gebräuchlichen Keramiken gehören Aluminiumoxid (engl. *alumina*,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), Siliziumdioxid (engl. *silica*,  $\text{SiO}_2$ ), Siliziumkarbid ( $\text{SiC}$ ), Siliziumnitrid ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) und die oft als traditionelle Keramiken bezeichneten Werkstoffe aus Tonmineralien (z. B. Porzellan) sowie Betone. Im amerikanischen Raum werden Keramiken und Gläser gelegentlich noch als eine gemeinsame Werkstoffklasse betrachtet; die Unterschiede in der atomaren



**Abb. 1.9** Verschiedene Gebrauchsgegenstände aus Keramik und Glas: Schere, Teetasse, Ziegelstein, Keramikfliese und Glasvase.



und Mikrostruktur berücksichtigend, erfolgt im europäischen Raum eine Trennung beider Klassen. Mechanisch sind Keramiken und Gläser relativ steif und fest. Elastizitätsmodul und Zugfestigkeit sind vergleichbar mit denen von Metallen (Abb. 1.4 und 1.5). Keramiken und Gläser sind hart, spröde und sehr bruchanfällig (Abb. 1.6). In den vergangenen Jahren wurden jedoch auch Keramiken mit erhöhter Bruchzähigkeit entwickelt, die in Kochgeschirr, Essbesteck oder sogar in Verbrennungsmotoren zum Einsatz kommen. Die meisten Keramiken sind thermische und elektrische Isolatoren (d. h. sie besitzen eine geringe elektrische Leitfähigkeit, Abb. 1.7) und sie sind widerstandsfähiger gegen hohe Temperaturen und harsche Umgebungsbedingungen als metallische Werkstoffe und Polymere. Optisch können Keramiken transparent, durchscheinend oder undurchsichtig sein (Abb. 1.2). Einige oxidische Keramiken (z. B.  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) weisen magnetisches Verhalten auf. Gegenstände aus verschiedenen Keramiken und Gläsern zeigt Abbildung 1.9. Eigenschaften, Arten und Anwendungen beider Werkstoffklassen werden in den Kapiteln 11 und 12 näher diskutiert.

### 1.4.3 Polymere

Zu den Polymeren gehören die bekannten Plastik- und Elastikwerkstoffe (technisch korrekt: Plastomere und Elastomere). Viele von ihnen sind organische Verbindungen, d. h. chemisch gesehen bestehen sie aus Kohlenstoff, Wasserstoff und anderen Nichtmetallen (O, N und F). Außerdem bilden sie große, häufig kettenförmige Molekülstrukturen, deren Gerüst oft aus Kohlenstoffketten besteht. Zu den am häufigsten verwendeten und bekanntesten Polymeren gehören Polyethylen (PE), Nylon, Polyvinylchlorid (PVC), Polykarbonat (PC), Polystyrol (PS) und die Silikone. Diese Werkstoffe besitzen eine geringe Dichte (Abb. 1.3) und deutlich andere mechanische Eigenschaften als Metalle, Keramiken und Gläser – sie sind weniger steif und fest (Abb. 1.4 und 1.5). Wird jedoch ihre geringe Dichte berücksichtigt, erreichen E-Modul und Zugfestigkeit dieser Werkstoffe massebezogene Werte, die mit denen von Metallen und Keramiken vergleichbar sind. Viele Polymere sind äußerst duktil und formbar (z. B. Plastomere), d. h. sie können sehr leicht auch in komplexe Formen gebracht werden. Im Allgemeinen sind sie chemisch recht unempfindlich und umgebungsbeständig. Ein großer Nachteil der Polymere ist, dass sie bei vergleichsweise moderaten Temperaturerhöhungen sehr schnell erweichen oder zerstört werden. Das schränkt oft ihre Einsetzbarkeit ein. Polymere weisen geringe elektrische Leitfähigkeit auf (Abb. 1.7) und sind nicht magnetisch.

In Abbildung 1.10 sind einige gebräuchliche, aus Polymeren hergestellte Gegenstände dargestellt. Die Kapitel 14 und 15 sind der Struktur, den Eigenschaften und der Verarbeitung von Polymeren gewidmet.



**Abb. 1.10** Verschiedene Gebrauchsgegenstände aus polymeren Werkstoffen: Plastikbesteck, Billardkugeln, Fahrradhelm, Würfel, Rad eines Rasenmähers (Plastikfelge, Gummireifen) und Getränkeflasche.

#### 1.4.4 Verbundwerkstoffe

Ein Verbundwerkstoff (auch Komposit genannt) besteht aus zwei oder mehr verschiedenen Werkstoffen, die den bereits diskutierten Kategorien zugeordnet werden können – Metalle, Keramiken, Gläser und Polymere. Ziel bei der Entwicklung von Kompositen ist eine Kombi-

### Werkstoffe mit besonderer Bedeutung

#### Behälter für kohlendioxidhaltige Getränke

Gebrauchsgegenstände, an denen sich einige interessante Anforderungen an Werkstoffeigenschaften verdeutlichen lassen, sind Behälter für kohlendioxidhaltige Getränke. Der Werkstoff für diesen Einsatz muss folgenden Anforderungen genügen:

- Er soll verhindern, dass  $\text{CO}_2$  aus dem Behälter entweicht, der unter Druck steht;
- er darf nicht giftig sein, also keine Reaktionen mit den Getränken eingehen, und sollte vorzugsweise wiederverwendbar sein;
- er sollte relativ zugfest und ausreichend bruchzäh sein, um einen Fall aus einigen Metern Höhe zu überstehen;
- er soll preiswert sein, einschließlich der Kosten für die Herstellung der Form;
- falls er optisch transparent ist, sollte die Transparenz über lange Zeit erhalten bleiben;
- er sollte in verschiedenen Farben herstellbar oder durch Aufdruck/Aufkleber dekorierbar sein.

Drei Werkstofftypen kommen in Frage: Metalle (Aluminium), Gläser und Polymere (siehe die Abbildungen am Kapitelan-

fang). Diese Werkstoffe sind ungiftig und reagieren nicht mit den Getränken. Darüber hinaus hat jeder Werkstoff Vor- und Nachteile. Aluminium ist beispielsweise recht zugfest (aber leicht verformbar), stellt eine gute Diffusionsbarriere für  $\text{CO}_2$  dar, ist einfach zu recyceln, kühlt Getränke sehr schnell und kann gut bedruckt werden. Andererseits sind Aluminiumdosen nicht durchsichtig und relativ teuer in der Herstellung. Glas ist nicht durchlässig für  $\text{CO}_2$ , relativ billig und kann wiederverwendet werden. Aber es bricht recht schnell und Glasflaschen sind vergleichsweise schwer. Demgegenüber ist Plastik relativ fest, kann optisch transparent hergestellt werden, ist billig und leicht und kann wiederverwendet werden. Jedoch ist es durchlässiger für  $\text{CO}_2$  als Aluminium und Glas. Vielleicht haben Sie schon einmal bemerkt, dass Aluminium- und Glasbehälter das  $\text{CO}_2$  über Jahre hinweg bewahren können, während das Sprudeln einer 1,5-Liter-Plastikflasche innerhalb weniger Monate nachlässt.

nation von Eigenschaften, die keine der einzelnen Werkstoffkomponenten aufweist, also eine Vereinigung verschiedener Werkstoffe zu einem neuen Werkstoff mit neuen Eigenschaften. Es gibt eine große Zahl von Kompositen aus verschiedenen Kombinationen von Glas, Metallen, Keramiken und Polymeren. Auch einige natürlich vorkommende Materialien sind Komposite (Knochen, Granit, Holz). Die meisten hier betrachteten Komposite sind jedoch synthetischer Natur.

Einer der bekanntesten Kompositwerkstoffe ist Fiberglas, bei dem Glasfasern mit kleinem Durchmesser in ein Polymer (meist Epoxidharz oder Polyester) eingebettet sind.<sup>3)</sup> Die Glasfasern sind relativ fest und steif (aber auch spröde), während das Polymer sehr flexibel ist. So ist Fiberglas relativ steif, fest (Abb. 1.4 und 1.5) und biegsam. Außerdem hat es eine geringe Dichte (Abb. 1.3).

Ein weiterer technologisch wichtiger Kompositwerkstoff ist kohlenstofffaserverstärkter (auch: kohlefaserverstärkter) Kunststoff (CFK). Dabei sind Kohlefasern in ein Polymer eingebettet. Diese Werkstoffe sind steifer und zugfester als glasfaserverstärkte Werkstoffe (Abb. 1.4 und 1.5), aber auch deutlich teurer. CFK-Werkstoffe werden in Luft- und Raumfahrzeugen, in modernen Sportgeräten (z. B. Fahrrädern, Golf- und Tennisschlägern, Ski und Snowboards) und seit kurzem auch in Stoßstangen von Autos eingesetzt. Der Rumpf des neuen Airbus A 380 und der neuen Boeing 787 ist hauptsächlich aus CFK hergestellt. Gegenwärtig arbeitet die Automobilindustrie verstärkt an der Einführung von CFK-Werkstoffen in den Automobilbau. Ein aktuelles Beispiel aus dem Jahr 2012 ist das Dach des BMW i3.

Kapitel 16 ist diesen und anderen interessanten Kompositwerkstoffen gewidmet.

## 1.5 Hochleistungswerkstoffe/innovative Werkstoffe

Werkstoffe, die ihren Einsatz in Hochtechnologieanwendungen (Hightech-Anwendungen) finden, werden auch als *innovative Werkstoffe*, besser als Hochleistungswerkstoffe, bezeichnet. Unter Hochtechnologie werden Bauteile oder Produkte mit komplexer oder sehr ausgeklügelter Struktur oder Funktionsweise verstanden. Dazu gehören viele elektronische Geräte (Camcorder, CD/DVD/Blu-ray-Player, Smartphones usw.), Computer, Glasfaseroptiken, Raumfahrzeuge oder militärische Raketentechnik. Die hier verwendeten innovativen Werkstoffe sind ihrem Ursprung nach sowohl bekannte und bewährte Werkstoffe, deren Eigenschaften verbessert wurden, als auch neu entwickelte Hochleistungswerkstoffe. Sie können allen Werkstoffklassen entstammen und sind meist recht teuer. Zu den Hochleistungswerkstoffen zählen Halbleiter, Biomaterialien, „intelligente“ Werkstoffe (engl. *smart materials*) und nanostrukturierte Werkstoffe. Eigenschaften und Anwendungen dieser und einer Reihe anderer innovativer Werkstoffe (z. B. solche für Laser, integrierte Schaltkreise, Magnetspeicher, Flüssigkristallanzeigen und Glasfaseroptiken) werden im nachfolgenden Abschnitt näher behandelt.

### 1.5.1 Halbleiter

Halbleiter zeigen elektrische Eigenschaften, die zwischen denen von elektrischen Leitern (Metalle und metallische Legierungen) und Isolatoren (Keramiken, Gläser und Polymere) liegen – vgl. Abbildung 1.7. Darüber hinaus sind die elektrischen Eigenschaften dieser Werkstoffe schon durch das Vorhandensein geringer Konzentrationen an Fremdatomen beeinflussbar. Halbleiter haben die Einführung von integrierten Schaltkreisen erst möglich gemacht und so die Elektronik- und Computerindustrie und damit auch unser gesamtes Leben in den letzten drei Jahrzehnten revolutioniert.

3) Fiberglas wird oft auch als glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK) bezeichnet.

## 1.5.2 Biomaterialien

Biomaterialien können als Implantate im menschlichen Körper kranke oder zerstörte Körperteile und Organe ersetzen. Diese Werkstoffe dürfen keine giftigen Substanzen freisetzen oder produzieren und müssen kompatibel zum menschlichen Gewebe sein, d. h. sie dürfen keine Abstoßungsreaktionen hervorrufen. Spezielle Vertreter aller bisher genannten Werkstoffe – Metalle, Keramiken, Gläser, Polymere, Komposite und Halbleiter – können unter bestimmten Umständen auch als Biomaterialien genutzt werden. Einige der Biomaterialien, die als künstlicher Hüftgelenkersatz genutzt werden, werden im Online-Modul Biomaterialien genauer behandelt.

## 1.5.3 Intelligente Werkstoffe

Als *Intelligente Werkstoffe* wird eine Gruppe von neuen und bekannten Werkstoffen aller Klassen bezeichnet, die einen großen Einfluss auf viele moderne Technologien haben. Das Adjektiv intelligent impliziert, dass diese Werkstoffe Veränderungen in ihrer Umgebung erkennen und in vorherbestimmter Weise darauf reagieren können, sich also wie ein lebender Organismus verhalten. Als „intelligent“ gelten im erweiterten Sinne auch komplexere Systeme, die aus herkömmlichen und intelligenten Werkstoffen bestehen.

Zu den Bestandteilen solcher Werkstoffe (und Systeme) gehören Sensoren (die das eingehende Signal empfangen) und Aktoren (die die Antwort oder Reaktion verursachen). Aktoren können z. B. veranlasst werden, ihre Form, Position, Frequenz oder mechanischen Eigenschaften in Abhängigkeit von einer Änderung der Temperatur, des elektrischen oder magnetischen Feldes zu verändern.

Für Aktoren kommen vier verschiedene Arten von Werkstoffen zum Einsatz: Legierungen mit Formgedächtnis, piezoelektrische Keramiken, magnetostruktive Werkstoffe und elektro- bzw. magnetorheologische Fluide. Legierungen mit Formgedächtnis sind metallische Werkstoffe, die, nachdem sie verformt wurden, bei Temperaturerhöhung ihre ursprüngliche Form wieder annehmen (siehe „Werkstoffe mit besonderer Bedeutung“ in Abschn. 10.9). Piezoelektrische Keramiken antworten mit einer Expansion bzw. Kontraktion auf ein elektrisches Feld (oder eine angelegte elektrische Spannung). Umgekehrt generieren sie ein elektrisches Feld, wenn sie verformt werden (siehe Abschn. 18.25). Das Verhalten magnetostruktiver Werkstoffe ist analog zu dem der piezoelektrischen, allerdings als Reaktion auf ein magnetisches Feld. Elektrorheologische und magnetorheologische Fluide sind Flüssigkeiten, deren Viskosität sich stark verändert, wenn ein elektrisches bzw. magnetisches Feld angelegt wird.

Zu den Werkstoffen/Bauelementen, die als Sensoren eingesetzt werden, gehören optische Fasern (Abschn. 21.14), piezoelektrische Materialien (darunter bestimmte Polymere) und mikroelektromechanische Systeme (MEMS, Abschn. 13.8).

Als Beispiel sei ein intelligentes System genannt, das in Helikoptern genutzt wird, um das Rotorgeräusch im Cockpit zu reduzieren. Piezoelektrische Sensoren, die in die Rotorblätter eingebettet sind, dehnen sich. Die Deformation ist ein Signal für eine computergesteuerte Baueinheit, die durch Schallüberlagerung ein auslöschend wirkendes Gegengeräusch erzeugt.

## 1.5.4 Nanomaterialien

Eine neue Materialklasse mit faszinierenden Eigenschaften und vielversprechenden technologischen Aussichten sind *Nanomaterialien*. Nanomaterialien gibt es in allen der vier Basiswerkstoffklassen – Metalle, Keramiken, Gläser und Polymere – und folglich auch in ihren Verbundwerkstoffen (Kompositen). Nanomaterialien werden nicht nach ihrer chemischen Zusammensetzung, sondern nach der Größe unterschieden. Die Vorsilbe nano- bezeichnet strukturelle Einheiten in der Größenordnung von einigen Nanometern ( $10^{-9}$  m) bis etwa 100 nm (das entspricht etwa 500 Atomen im Durchmesser).

Vor dem Aufkommen von Nanomaterialien war es üblich, chemische und physikalische Eigenschaften von Werkstoffen zu ergründen, indem zunächst die makroskopischen Eigen-

schaften größerer und komplexerer Strukturen betrachtet wurden, um dann die deutlich kleineren, grundlegenden Struktureinheiten zu untersuchen. Diese Herangehensweise wird „top-down“-Ansatz genannt. Inzwischen ermöglichte die Entwicklung der Rasterelektronenmikroskopie und besonders der Transmissionselektronen- und der Rasterkraftmikroskopie (Abschn. 4.10), einzelne Atome oder Moleküle zu beobachten und neue Strukturen auf Basis ihrer atomaren Bestandteile zu gestalten. Wenn einzelne Atome oder Moleküle gezielt angeordnet werden können, können mechanische, elektrische, magnetische oder andere Eigenschaften herausgearbeitet werden, die anderweitig nicht zugänglich sind. Dieses Vorgehen wird „bottom-up“-Ansatz genannt und der Wissenschaftszweig, der sich damit beschäftigt, ist die *Nanotechnologie*. In Vorausschau auf die Möglichkeiten des Nanoengineerings von Werkstoffen hat Richard Feynman bereits 1959 vor der Amerikanischen Physikalischen Gesellschaft einen Vortrag mit dem Titel „There is Plenty of Room at the Bottom“ gehalten.

Bestimmte physikalische und chemische Eigenschaften der Materie ändern sich drastisch, wenn Partikelgrößen in atomarer Dimension erreicht werden. So können Werkstoffe, die im makroskopischen Bereich undurchsichtig sind, im Nanometerbereich transparent werden. Einige Feststoffe werden flüssig, chemisch stabile Materialien werden leicht entflammbar und elektrische Isolatoren werden leitfähig. Einige dieser Effekte sind quantenmechanischer Natur, andere werden durch Oberflächenphänomene verursacht, da der Anteil der Atome an der Oberfläche im Verhältnis zur Anzahl der Volumenatome dieser Partikel deutlich ansteigt, wenn sich die Partikelgröße verringert.

Aufgrund dieser einzigartigen und ungewöhnlichen Eigenschaften finden Nanomaterialien spezielle Anwendungen in Elektronik, Biomedizin, Sport, Energiewandlung und anderen industriellen Bereichen:

- Katalysatoren im Automobil- und Umweltbereich – Werkstoffe mit besonderer Bedeutung in Kapitel 4
- Kohlenstoffnanoröhren – Werkstoffe mit besonderer Bedeutung in Kapitel 12
- „Carbon black“ (Ruß) als Füllstoff in Autoreifen – Abschnitt 16.2
- Nanokomposite in Tennisbällen – Werkstoffe mit besonderer Bedeutung in Kapitel 16
- magnetische Nanopartikel in Computerlaufwerken – Abschnitt 20.11
- Magneteilchen als Datenspeicher in Magnetbändern – Abschnitt 20.11

Wenn ein neuer Werkstoff entwickelt wird, muss stets auch sein Gefährdungspotenzial, die Gefahr schädigender und toxischer Wirkung auf Mensch, Tier und Umwelt, in Betracht gezogen werden. Nanopartikel haben ein außerordentlich großes Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis, was zu sehr hoher chemischer Reaktivität führen kann. Obwohl bislang die Sicherheitsaspekte von Nanopartikeln noch nicht hinreichend untersucht sind, bestehen Bedenken, dass sie über die Haut, die Lunge oder den Verdauungstrakt in größeren Mengen vom Körper aufgenommen werden. Dort könnten sie in entsprechend hoher Konzentration Gesundheitsrisiken wie z. B. die Schädigung der DNA oder die Entstehung von Lungenkrebs darstellen, da sie mit ihrer Größe, die im Bereich der Zellaggregate liegt, in Zellen eindringen können.

## 1.6 Der Bedarf an neuen Werkstoffen

Ungeachtet der enormen Fortschritte, die in den vergangenen Jahren auf dem Gebiet der Materialwissenschaft und Werkstofftechnik gemacht wurden, gibt es nach wie vor eine Reihe technologischer Herausforderungen. Dazu gehört sowohl die Entwicklung weiter spezialisierter Materialien als auch die Berücksichtigung des Einflusses von Herstellung und Nutzung der Werkstoffe auf unsere Umwelt.

Die Nutzung von Kernenergie hatte ohne Zweifel gewisse Vorteile. Sie brachte jedoch auch eine Reihe von Problemen mit sich, die noch lange ungelöst bleiben werden. Dazu gehört der Brennstoff selbst, die entsprechenden Werkstoffe für Reaktorbehälter und Einrichtungen zur Aufbewahrung des radioaktiven Abfalls.

Erhebliche Energiemengen werden für Transportzwecke benötigt. Die Reduzierung der Masse der Fahrzeuge (Autos, Flugzeuge, Züge etc.) kann genauso zur effizienteren Energie-



nutzung beitragen, wie die Erhöhung der Betriebstemperatur von Verbrennungsmotoren und Turbinen. Neue hochfeste Konstruktionswerkstoffe mit geringerer Dichte sind deshalb ebenso Forschungsziel wie Werkstoffe mit verbesserter Temperaturstabilität.

Außerdem besteht die dringende Notwendigkeit, neue wirtschaftliche Energiequellen zu finden und unsere gegenwärtigen Ressourcen effizienter zu nutzen. Werkstoffe werden dabei zweifelsfrei eine wichtige Rolle spielen. Ein Beispiel dafür ist die direkte Umwandlung von Sonnenstrahlung in elektrischen Strom. In Solarzellen kommen recht komplexe und relativ teure Werkstoffe zum Einsatz. Um diese Technologie ökonomisch umsetzbar zu gestalten, müssen für Werkstoffe, die in diesem Prozess effizient sind, Herstellungsverfahren entwickelt werden, die weniger Kosten verursachen.

Brennstoffzellen, die mit Wasserstoff betrieben werden, stellen eine weitere attraktive Technologie zur Energiewandlung dar und sind darüber hinaus umweltfreundlich. Ihr Einsatz als Energiequelle in elektronischen Geräten hat gerade erst begonnen. Zukünftig verspricht man sich auch die Nutzung als Antriebsquelle in Kraftfahrzeugen. Hier werden neue Werkstoffe für effizientere Brennstoffzellen benötigt, ebenso wie bessere Katalysatoren für die Bereitstellung des Wasserstoffs und Werkstoffe, die die Herstellung von elektrischen Speichersystemen mit hoher Speicherdichte erlauben.

Die Qualität unserer Umwelt hängt davon ab, wie es uns gelingt, Wasser- und Luftverschmutzung zu kontrollieren und zu reduzieren. Dazu werden die verschiedensten Werkstoffe eingesetzt. Herstellungs- und Verarbeitungsprozesse müssen so verbessert werden, dass die Umwelt weniger beeinträchtigt wird – weniger Verschmutzung aber auch weniger Raubbau an der Landschaft bei der Rohstoffgewinnung. Bei der Herstellung bestimmter Werkstoffe entstehen Gifte, deren ökologische Wirkung berücksichtigt werden muss.

Viele unserer Werkstoffe werden aus Rohstoffquellen hergestellt, die nicht erneuerbar sind, sich nicht regenerieren können. Dazu gehören die meisten Polymere, für die der Hauptrohstoff Erdöl ist, sowie die Metalle. Diese nicht erneuerbaren Ressourcen erschöpfen sich mit der Zeit, was es erforderlich macht,

- zusätzliche Reserven zu entdecken,
- neue Materialien mit vergleichbaren Eigenschaften und einer geringeren Belastung der Umwelt zu entwickeln und/oder
- die Anstrengungen zur Wiederverwertung zu intensivieren, also neue Recyclingtechnologien zu entwickeln.

Als Konsequenz einer Ökonomie, die nicht nur die Produktion, sondern auch den Umwelteinfluss berücksichtigt, wird die Betrachtung des Lebenszyklus von Werkstoffen immer wichtiger.

Die Rolle, die Materialwissenschaftler, Werkstofftechniker und Ingenieure hierbei, aber auch bei weiteren Umwelt- und Sozialthemen spielen, wird in Kapitel 22 näher beleuchtet.

## 1.7 Die Beziehung zwischen Herstellung, Struktur, Eigenschaften und Anwendung

Wie bereits erwähnt (Abschn. 1.2), umfassen Materialwissenschaft und Werkstofftechnik vier miteinander in Beziehung stehende Komponenten: Herstellung, Struktur, (Werkstoff-)Eigenschaften und Anwendung (Gebrauchseigenschaften; Abb. 1.1). Da im weiteren Verlauf des Buches diese Komponenten für die unterschiedlichen Werkstoffklassen behandelt werden, soll an dieser Stelle die Aufmerksamkeit des Lesers auf ausgewählte Komponenten spezieller Werkstoffe gelenkt werden. Während einige dieser Themen in speziellen Kapiteln abgehandelt werden, gibt es auch die kapitelübergreifende Diskussion verschiedener Werkstoffe. Für Letztere und für weitere ausgewählte Werkstoffe wurde ein Schema erstellt, aus dem sich ablesen lässt, welche Aspekte des jeweiligen Werkstoffs wo behandelt werden. Abbildung 1.11 zeigt dieses Schema für Stahl, Glaskeramik, Polymerfasern und Siliziumhalbleiter. Werden Werkstoffe über mehrere Kapitel behandelt, so findet sich am Ende des Kapitels, in dem die letzte Komponente diskutiert wird, eine Zusammenfassung zur Beziehung von Herstellung, Struktur, Eigenschaft und Anwendung, z. B. in Kapitel 11 für Stahl, in Kapitel 13 für Glaskeramiken, in Kapitel 15 für Polymere und in Kapitel 18 für Siliziumhalbleiter.

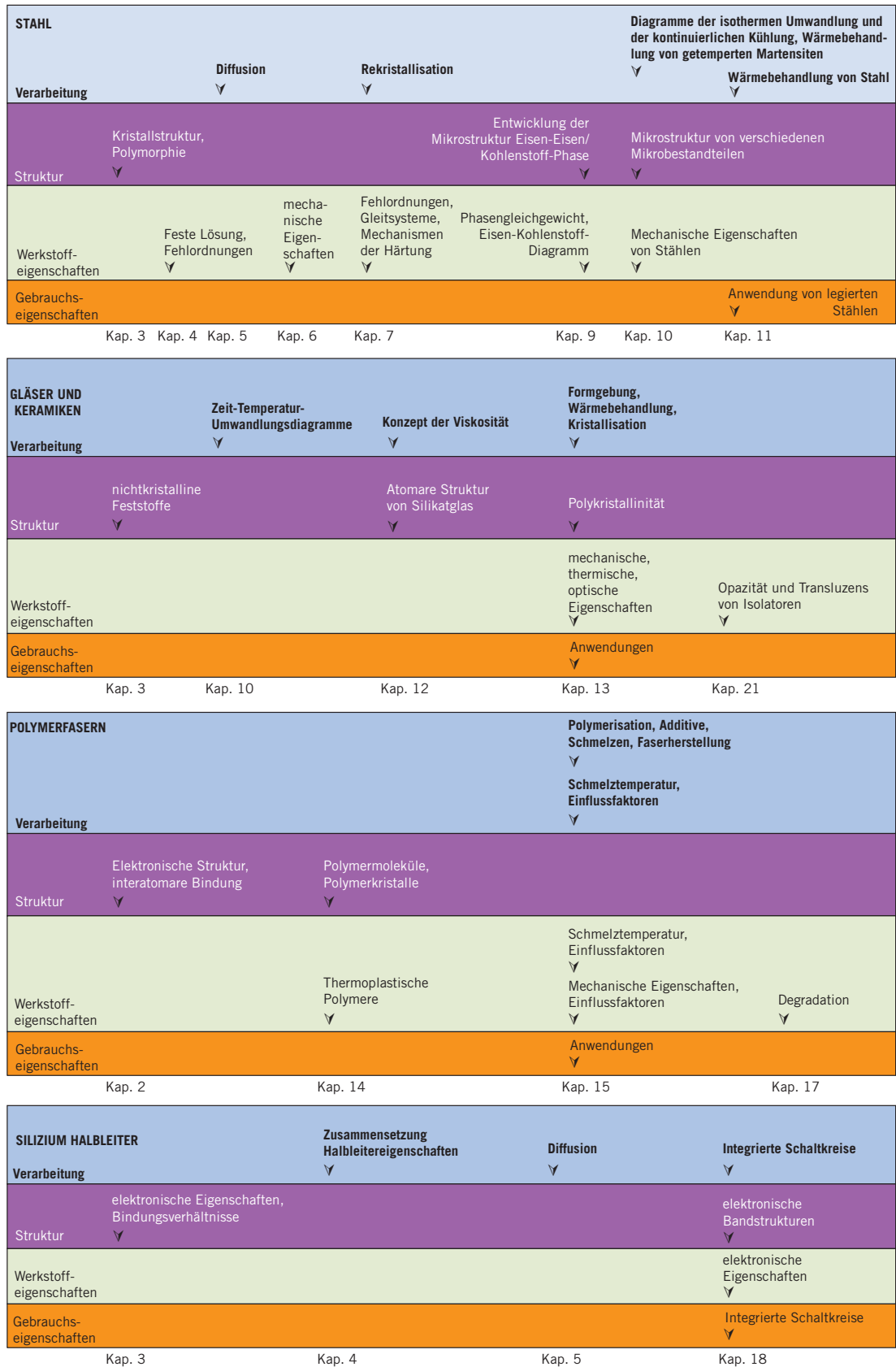


Abb. 1.11 Schema für die Behandlung von Herstellung, Struktur, Eigenschaft, Anwendung für (a) Stahl, (b) Glaskeramik, (c) Polymerfasern und (d) Siliziumhalbleiter.

# Zusammenfassung

---

## Materialwissenschaft und Werkstofftechnik

- Es gibt sechs verschiedene Eigenschaftsgruppen, die die Einsatzmöglichkeiten von Werkstoffen bestimmen: mechanische, thermische, elektrische, magnetische, optische und chemische.
- Ein Aspekt der Materialwissenschaften ist die Untersuchung der Beziehungen zwischen Struktur und Eigenschaften der Werkstoffe. Unter Struktur verstehen wir die Anordnung der inneren Bestandteile des Werkstoffs. Hinsichtlich ihrer Dimension (hier steigend) sind die strukturellen Elemente subatomar, atomar, mikroskopisch und makroskopisch.
- Bezüglich des Konzepts, der Herstellung und der Anwendung von Werkstoffen sind vier Teilbereiche zu beachten: Herstellung, Struktur, (Werkstoff-)Eigenschaften und (Gebrauchs-)Eigenschaften. Die Gebrauchseigenschaften eines Werkstoffes hängen von seinen Eigenschaften ab, die wiederum eine Funktion seiner Struktur sind. Darüber hinaus wird die Struktur eines Werkstoffs durch die Verarbeitung bestimmt.
- Drei wichtige Kriterien für die Werkstoffauswahl sind: die Einsatzbedingungen, die mögliche Veränderung von Eigenschaften während des Einsatzes und ökonomische Überlegungen bzw. Stückkosten.

## Klassifizierung von Werkstoffen

- Auf Basis ihrer chemischen Zusammensetzung und ihrer atomaren Struktur werden Werkstoffe in vier Kategorien eingeteilt: metallische Werkstoffe (metallische Elemente des PSE), Keramiken (Verbindungen zwischen metallischen und nichtmetallischen Elementen), Gläser (Zusammensetzung ähnlich wie Keramiken) und Polymere (chemische Verbindungen hauptsächlich aus Kohlenstoff, Wasserstoff und aus anderen Nichtmetallen). Darüber hinaus gibt es Verbundwerkstoffe (auch: Composite), die aus mindestens zwei verschiedenen Werkstoffen aufgebaut sind.

## Hochleistungswerkstoffe

- Eine weitere Kategorie sind die Hochleistungswerkstoffe, die in Hochtechnologieanwendungen eingesetzt werden. Dazu gehören Halbleiter (elektrische Leitfähigkeit zwischen der von Isolatoren und Leitern), Biomaterialien (kompatibel zu organischem Gewebe), intelligente Werkstoffe (erkennen Veränderungen in ihrer Umgebung und reagieren darauf in vorherbestimmter Weise) und Nanomaterialien (mit strukturellen Eigenschaften im Nanometerbereich, teils strukturierbar auf atomarer/molekularer Ebene).

## Literatur

---

- Ashby, M. F. und Jones, D. R., *Engineering Materials 1, An Introduction to Their Properties and Applications*, 3. Aufl., Butterworth-Heinemann, Woburn, UK, 2005.
- Ashby, M.F. und Jones, D. R., *Engineering Materials 2, An Introduction to Their Properties and Applications*, 3. Aufl., Butterworth-Heinemann, Woburn, UK, 2005.
- Ashby, M., Shercliff, H. und Cebon, D., *Materials, Engineering, Science, Processing and Design*, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2007.
- Askeland, D. R. und Phulé, P. P., *The Science and Engineering of Materials*, 5. Aufl., Nelson, Toronto, 2006.
- Baillie, C. und Vanasupa, L., *Navigation the Materials World*, Academic Press, San Diego, CA, 2003.
- Fischer, T., *Materials Science for Engineering Students*, Academic Press, San Diego, CA, 2009.
- Jacobs, J. A. und Kilduff, T. F., *Engineering Materials Technology*, 5. Aufl., Prentice Hall PTR, Paramus, NJ, 2005.
- McMahon, C. J., Jr., *Structural Materials*, Merion Books, Philadelphia, 2004.
- Murray, G. T., White, C. V. und Weise, W., *Introduction to Engineering Materials*, 2. Aufl., CRC Press, Boca Raton, FL, 2007.
- Schaffer, J. P., Saxena, A., Antolovich, S. D., Sanders, T. H., Jr. und Warner, S. B., *The Science and Design of Engineering Materials*, 2. Aufl., McGraw-Hill, New York, 1999.
- Shackelford, J. F., *Introduction to Materials Science for Engineers*, 7. Aufl., Prentice Hall PTR, Paramus, NJ, 2009.
- Smith, W. F. und Hashemi, J., *Foundation of Materials Science and Engineering*, 5. Aufl., McGraw-Hill, New York 2010.
- Van Vlack, L. H., *Elements of Materials Science and Engineering*, 6. Aufl., Addison-Wesley Longman, Boston, 1989.
- White, M. A., *Properties of Materials*, Oxford University Press, New York, 1999.

## Fragen und Aufgaben

---

- 1.1 Wählen Sie einen oder mehrere der folgenden Gegenstände aus! Ermitteln Sie durch eine Internetrecherche, aus welchen Werkstoffen sie bestehen und welche speziellen Eigenschaften diese Werkstoffe besitzen. Verfassen Sie zu den Ergebnissen einen kurzen Bericht.
- Batterien für Mobiltelefone/Digitalkameras
  - Mobiltelefon-Displays
  - Solarzellen
  - Rotorblätter von Windturbinen
  - Brennstoffzellen
  - Motorblöcke für Automobile (außer Gusseisen)
  - Karosserieteile (außer Stahlblech)
  - Spiegel von Weltraumteleskopen
  - militärische Körperschutzausrüstung
  - Sportausrüstung: Fußbälle, Basketbälle, Skistöcke, Skistiefel, Snowboards, Surfbretter, Golfschläger, Golfbälle, Kajaks, Fahrradrahmen (Leichtbau)