

---

### 2.1 Was sind Stoffe?

In dem Begriff Werkstoff erkennen wir einen anderen Begriff, den „Stoff“. Der Stoff ist einer der Grundbegriffe der Naturwissenschaften. Er lässt sich nicht definieren, sondern kann nur beschrieben werden. Stoffe bestehen aus Teilchen (sie sind korpuskular) und jeder Stoff hat eine Dichte, die als Quotient aus Masse und Volumen definiert und in  $\text{kg}/\text{dm}^3$  bzw. in  $\text{g}/\text{cm}^3$  angegeben wird.

#### 2.1.1 Einteilung von Stoffen

Grundsätzlich werden Stoffe in reine Stoffe und Stoffgemische eingeteilt. Der Hauptunterschied zwischen den beiden großen Stoffgruppen bezieht sich auf das Mengenverhältnis der Bestandteile. Bei den reinen Stoffen ist es definiert, bei den Stoffgemischen kann das Mengenverhältnis beliebig sein bzw. in bestimmten Grenzen variieren.

Zu den reinen Stoffen gehören chemische Elemente und chemische Verbindungen. Chemische Elemente sind Grundstoffe, die im Periodensystem der Elemente angeordnet sind. In dem Periodensystem zählen wir heute 112 Elemente, von denen 90 natürlich auf der Erde vorkommen.

Bei chemischen Verbindungen werden organische Verbindungen, die auf Kohlenstoff basieren, und anorganische Verbindungen, die auf allen übrigen Elementen basieren, unterschieden.

Bei den Stoffgemischen interessiert uns, ob sich ihre Bestandteile erkennen lassen. Homogene Stoffgemische sind einheitlich aufgebaut, ihre Bestandteile sind bis in die Bereiche atomarer Größenordnung nicht zu erkennen. Heterogene Stoffgemische sind dagegen uneinheitlich aufgebaut. Sie bestehen aus Bereichen (Phasen), die durch Trennflä-

chen voneinander abgegrenzt sind. Diese Bereiche können wir, ggf. mithilfe mikroskopischer Verfahren, erkennen und beschreiben.

► Hauptarten von Stoffen sind:

- Reine Stoffe (chemische Elemente und chemische Verbindungen)
- Stoffgemische (homogen und heterogen)

Die Anzahl der Stoffe ist unerschöpflich. Ständig werden neue Stoffe entdeckt oder künstlich erzeugt.

### **2.1.2 Wann wird ein Stoff zum Werkstoff?**

Einen Stoff können wir als Werkstoff erst dann verwenden, wenn er:

- bei Raumtemperatur  $RT=20\text{ °C}$  im festen Aggregatzustand ist,
- technisch verwertbare Eigenschaften hat,
- sich gut ver- und bearbeiten lässt,
- sich wirtschaftlich und umweltverträglich einsetzen lässt.

Nur wenige von uns verwendete Werkstoffe sind reine Stoffe. So verwenden wir chemische Elemente wie Rein-Kupfer für Kabel, Rein-Wolfram für Glühlampen sowie chemische Verbindungen wie Polyvinylidendifluorid (Abschn. 10.2.4) als Kunststoff und Aluminiumoxid (Abschn. 12.5.1) als technische Keramik. Die Mehrheit der Werkstoffe gehört zur Gruppe der Stoffgemische. Ein Beispiel eines homogenen Stoffgemisches ist Messing, eine gut bekannte Kupfer-Zink-Legierung (Abschn. 7.2.2). Alle Baustähle (Abschn. 5.7) können wir als heterogene Stoffgemische betrachten.

---

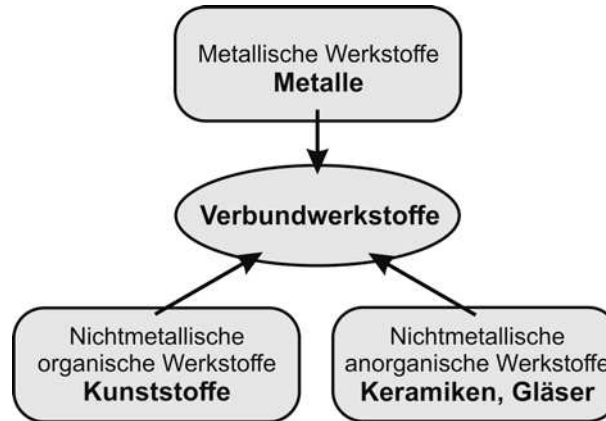
## **2.2 Werkstoffe und ihre Einteilung**

Werkstoffe können nach verschiedenen Kriterien eingeteilt werden. Dabei bemerken wir, dass die Vorgehensweise etwas „einzuteilen“, „zu gliedern“ oder „zu systematisieren“, menschlich ist, und wir sie gerne bei der Erkundung verschiedener Gebiete einsetzen. Jede Einteilung bedeutet aber, dass wir ein Kriterium definieren müssen. Dadurch entstehen bestimmte Grenzen, die aber nie zu scharf verstanden werden sollen.

### **2.2.1 Einteilung von Werkstoffen nach ihrer Art**

Die wichtigste und gängigste Einteilung von Werkstoffen erfolgt nach ihrer Art (Abb. 2.1). Dabei werden auch strukturelle Merkmale berücksichtigt, die wir in weiteren Abschnitten besprechen werden.

**Abb. 2.1** Einteilung von Werkstoffen nach ihrer Art



Entsprechend ihrem chemischen Grundcharakter teilen wir die Werkstoffe zunächst in die drei großen Gruppen der metallischen, nichtmetallisch-organischen und nichtmetallisch-anorganischen Werkstoffe ein.

Metalle sind nach wie vor die wichtigsten Werkstoffe der Technik. Sie zeichnen sich vor allem durch elektrische Leitfähigkeit aus, die mit steigender Temperatur geringer wird. In der Elektrotechnik bezeichnet man sie daher als Kaltleiter. Als Beispiele nennen wir hier Stähle (Kap. 5) und Aluminiumwerkstoffe (Kap. 6).

Im Gegensatz zu Metallen können nichtmetallische Werkstoffe den Strom sehr schlecht leiten. Bei diesen Werkstoffen unterscheiden wir weiter, ob sie auf der Basis von Kohlenstoff oder auf der Basis anderer Elemente aufgebaut sind.

Die nichtmetallischen, organischen Werkstoffe nennen wir Kunststoffe (Kap. 10) und verwenden sie sehr häufig (z. B. Polyethylen, Styropor, PET).

Nichtmetallische, anorganische Werkstoffe bilden eine sehr vielfältige Gruppe. Für die Technik sind vor allem die keramischen Werkstoffe und einige Gläser (Kap. 12) von Bedeutung.

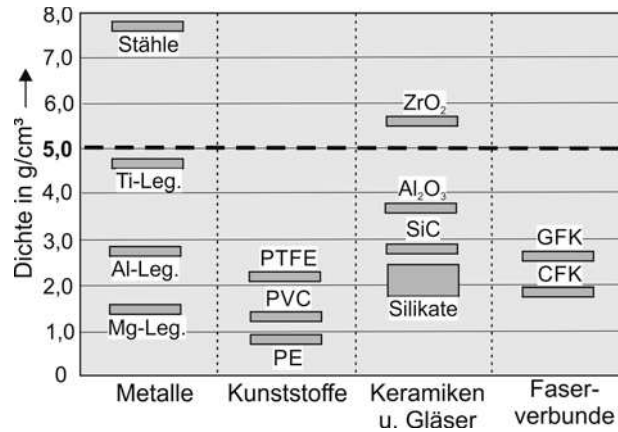
Zur Herstellung von Verbundwerkstoffen (Kap. 13) werden verschiedenartige Werkstoffe miteinander kombiniert. Vor allem Faserverbundwerkstoffe (Abschn. 13.4) sind bekannt und werden oft verwendet.

► **Wichtige Werkstoffgruppen: Metalle, Kunststoffe, Keramiken, Verbundwerkstoffe**

Wir verwenden noch andere Werkstoffe, die in Abb. 2.1 nicht dargestellt sind, da sie nicht zu den großen Gruppen gehören. Eine Übergangsstellung zwischen Metallen und Keramik nehmen die Halbleiter (Abschn. 14.1) ein. Halbmetallische Werkstoffe zeichnen sich durch geringe, bei steigender Temperatur zunehmende elektrische Leitfähigkeit aus. In der Elektrotechnik bezeichnet man sie daher als Heißleiter. Als Halbleiter dient uns am häufigsten Silizium.

Natürliche Werkstoffe sind vor allem aus ökologischen Gründen von Bedeutung. Zu dieser Gruppe gehören u. a. nachwachsende Rohstoffe wie Holz oder Hanf, biologisch

**Abb. 2.2** Vergleich der Dichte unterschiedlicher Werkstoffe



abbaubare Stoffe wie Papier sowie direkt verwendbare anorganische Stoffe wie z. B. Kies. Die Verwendung natürlicher Werkstoffe in der Technik ist selten und somit werden wir uns mit ihnen nicht weiter beschäftigen.

### 2.2.2 Einteilung der Werkstoffe nach Dichte

Bei der Einteilung der Werkstoffe nach ihrer Dichte unterscheiden wir leichte und schwere Werkstoffe. Die Grenze zwischen den beiden Gruppen liegt bei einer Dichte von  $5 \text{ g/cm}^3$ . Abb. 2.2 zeigt die Dichte unterschiedlicher Werkstoffe im Vergleich zueinander. Viele Werkstoffe sind leicht. Sie ermöglichen den sogenannten Leichtbau und werden daher gerne von uns eingesetzt.

- ▶ Leichte Werkstoffe haben eine Dichte, die kleiner ist als  $5 \text{ g/cm}^3$ .
- ▶ Schwere Werkstoffe haben eine Dichte, die größer ist als  $5 \text{ g/cm}^3$ .

In der Technik werden Eigenschaften von Werkstoffen gerne gewichtsbezogen betrachtet (Abschn. 3.7.2). Die Verringerung der Dichte ist oft ein Leitgedanke bei der Entwicklung neuer Werkstoffe.

### 2.2.3 Einteilung von Werkstoffen nach weiteren Kriterien

Eine Einteilung bekannter Werkstoffe können wir nach ihrer vorgesehenen Verwendung vornehmen. Zwar lässt sich das Kriterium „Verwendung“ nicht ganz eindeutig definieren, dennoch können wir von folgenden Gruppen sprechen.

Konstruktionswerkstoffe (Strukturwerkstoffe) geben einem Bauteil seine geometrische Form und leisten Widerstand gegen angreifende Kräfte sowie ggf. gegen andere Beanspruchungen. Die wichtigsten Konstruktionswerkstoffe sind Baustähle (Abschn. 5.7).

Funktionswerkstoffe übernehmen, meist örtlich begrenzt, spezielle Aufgaben aufgrund ihrer besonderen chemisch-physikalischen Eigenschaften. Ein gutes Beispiel sind verschiedene Beschichtungstoffe. Auch viele Keramiken (Kap. 12) dienen uns oft als Funktionswerkstoffe.

Neben diesen zwei genannten und typischen Gruppen unterscheiden wir heute auch Smart Materials. Diese intelligenten Werkstoffe reagieren auf äußere Reize mit bestimmten Änderungen ihres Zustandes. Zu dieser Gruppe gehören Formgedächtnislegierungen (Abschn. 14.2) sowie piezoelektrische Werkstoffe (Abschn. 14.3).

Nanowerkstoffe und biomimetische Werkstoffe werden als Werkstoffe der Zukunft genannt. Nanowerkstoffe haben Strukturen mit mindestens einer Dimension unterhalb von 100 Nanometer. Durch das große Verhältnis der Oberfläche zum Volumen ergeben sich neue Phänomene, die eine andere Betrachtungsweise dieser Werkstoffe erfordern. Die ersten Nanowerkstoffe, die bereits verwendet werden, sind Kohlenstoffnanoröhrchen (Carbon Nano Tubes), eine ganz spezielle Form des Kohlenstoffs.

Biomimetische Werkstoffe funktionieren nach dem Vorbild lebender Materie. Ein Beispiel dafür sind Textil-Materialien mit der sogenannten Haifisch-Oberfläche.

---

#### **Aus welchen Werkstoffen besteht ein Auto?**

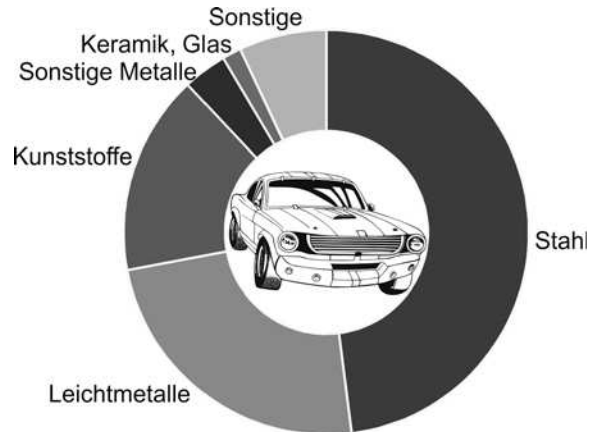
Ein modernes Auto besteht aus rund 10.000 Einzelteilen aus unterschiedlichsten Werkstoffen. Daher reden wir bei ihnen von einer Mischbauweise – einer Kombination verschiedener Werkstoffe wie Stahl, Aluminium, Magnesium und Kunststoff. Abb. 2.3 zeigt schematisch diese Werkstoff-Mischung.

Der Hauptwerkstoff ist Stahl. Neben den „normalen“ Stahlsorten werden immer öfter spezielle höherfeste Stähle (Mehrphasenstähle) verwendet, aus denen leichte Bauteile angefertigt werden.

Aluminiumwerkstoffe haben inzwischen ihren festen Platz im Automobilbau. Einige Automodelle besitzen sogar eine komplette Aluminiumkarosserie. Aus Magnesium, das noch leichter als Aluminium ist, werden komplexe Bauteile gießtechnisch hergestellt.

Ohne Einsatz von Kunststoffen könnte ein modernes Auto kaum mehr hergestellt werden. In einem Durchschnittsauto sind bis zu 2.000 unterschiedliche Kunststoffbauteile enthalten. Damit besteht ein Auto schon heute zu etwa 15 % aus Kunststoff und dieser Anteil wird zukünftig ansteigen. Der Einsatz von faserverstärkten Kunststoffen ist aufgrund der hohen Herstellungskosten noch beschränkt. In der Zukunft werden aber auch diese Werkstoffe im Automobilbau häufiger Verwendung finden.

**Abb. 2.3** Einsatz von Werkstoffen in einem Auto



## 2.3 Betrachtung der Zusammensetzung und der Struktur von Werkstoffen

Jeder Werkstoff hat eine chemische Zusammensetzung und eine Struktur (einen inneren Aufbau). Das oft sehr komplexe Zusammenspiel von Zusammensetzung und Struktur entscheidet ausschlaggebend die Eigenschaften eines Werkstoffes.

### 2.3.1 Zusammensetzung von Werkstoffen

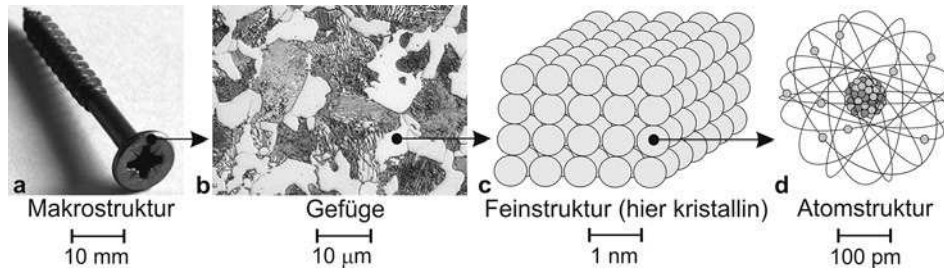
Die Zusammensetzung eines Werkstoffes ist die Grundinformation, die wir immer wissen müssen. Durch die Zusammensetzung hat der Werkstoff einen bestimmten Bindungszustand. Wenn die Zusammensetzung verändert wird, bedeutet dies, dass wir einen anderen Werkstoff haben.

#### a. Wie wird die Zusammensetzung angegeben?

Bei der Zusammensetzung denken wir oft, dass es um die Information geht, welche chemischen Elemente und in welchen Mengen vorhanden sind. Eine elementbezogene Information ist aber nicht immer sinnvoll und hilfreich. Somit ist die Angabe der Zusammensetzung bei Werkstoffen unterschiedlich und werkstoffspezifisch.

Bei Metallen geben wir als Zusammensetzung die Anteile chemischer Elemente an. Das können wir direkt tun oder es werden spezielle Kurznamen gebildet. Beispiel: Stahl-Kurzname X5CrNi18-10 gibt an, dass die Zusammensetzung des Stahls wie folgt ist: 0,05% Kohlenstoff + 18% Chrom + 10% Nickel + Rest Eisen.

Bei keramischen Werkstoffen benennen wir die chemische Verbindung (bzw. mehrere Verbindungen). Somit besteht der Werkstoff Aluminiumoxid aus der Verbindung von Aluminium und Sauerstoff.



**Abb. 2.4** Verschiedene Ebenen der Struktur abhängig von der Dimension

Bei Kunststoffen wäre die Angabe der chemischen Elemente keine brauchbare Information. Erst durch die Benennung des Polymers (des Makromoleküls) wissen wir, welchen Kunststoff wir verwenden. So nennen wir z. B. einen Kunststoff Polytetrafluorethylen (Handelsname Teflon) und erkennen daraus seinen chemischen Bau und seine Eigenschaften (Abschn. 10.2.4), die sich aus dem Bau ergeben.

#### *b. Bestimmung der Zusammensetzung*

Die Zusammensetzung von Werkstoffen, insbesondere von Metallen und Kunststoffen, wird meist mithilfe geeigneter spektroskopischer Verfahren bestimmt (Abschn. 3.8.5).

### 2.3.2 Strukturebenen

Der Strukturbegriff ist das Fundament der Lehre über Werkstoffe. Durch das – oft sehr komplexe – Zusammenspiel der Zusammensetzung und der Struktur lassen sich die unterschiedlichen Eigenschaften der Werkstoffe erklären.

- Die Zusammenwirkung der chemischen Zusammensetzung und der Struktur eines Werkstoffes ergibt seine Gebrauchseigenschaften.

Die Struktur kann auf verschiedenen Ebenen betrachtet werden. Diese Ebenen sind verschiedene Dimensionen (Maßstäbe), die wir technisch mit unterschiedlichen Methoden erfassen können. In Abb. 2.4 werden diese Ebenen schematisch am Beispiel eines Metalls gezeigt.

Die Änderung der Struktur (auf einer bestimmten Ebene) kann – bei gleich bleibender Zusammensetzung – eine Veränderung der Eigenschaften des Werkstoffes bewirken. Somit ist die Strukturveränderung das Hauptwerkzeug der Werkstofftechnik. Eigenschaften, die von der Struktur abhängen, sind Festigkeit, Härte, Zähigkeit, Korrosionsbeständigkeit, Schweißbarkeit und viele andere. Es gibt auch strukturunabhängige Eigenschaften, wie z. B. Dichte, E-Modul und Wärmeausdehnung.

Ohne Vergrößerung erscheinen Werkstoffe einheitlich, ohne Untergliederung. Durch immer stärkere Vergrößerung können wir die Gesamtstruktur unterteilen und gedanklich

zu den kleinsten Materialteilchen gelangen. Jede Strukturebene hat eigene Strukturbausteine, die für ihre Beschreibung notwendig sind.

Betrachten wir ein Metall mit immer stärker werdender Vergrößerung. Ohne Vergrößerung sehen wir eine typische Metalloberfläche (Abb. 2.4a). Der Zustand der Oberfläche – rau oder glatt – wird vom Bearbeitungsverfahren geprägt. Diese Oberflächenbeschaffenheit kann als die Makrostruktur des Werkstoffes bezeichnet werden. Dimensionsbezogen liegt sie in Millimeterbereich. Jeder Werkstoff hat diese Makrostruktur und ihre Änderung ist möglich. Durch eine Änderung können einige Eigenschaften beeinflusst werden. So verbessert z. B. eine glatte Metalloberfläche die Korrosionsbeständigkeit des Metalls.

Die Oberflächenbeschaffenheit ist jedoch noch kein richtiger Einblick in die Werkstoffstruktur. Erst nach einer speziellen Vorbereitung der Oberfläche (Schliffpräparation) wird unter einem Lichtmikroskop (Abschn. 3.8.4) die erste strukturelle Ebene sichtbar, die als Gefüge (Abb. 2.4b) oder auch als Mikrostruktur bezeichnet wird. Sie liegt im Mikrometerbereich und hat ein körniges Aussehen. Das Gefüge ist nicht für alle Werkstoffe typisch. Ob ein Gefüge erkennbar ist oder nicht, wird auf einer noch tieferen Ebene des Werkstoffes entschieden. Alle Metalle, viele keramische Werkstoffe und Halbleiter haben ein Gefüge. Die Bausteine des Gefüges bezeichnen wir als Gefügebestandteile, die sich stofflich voneinander unterscheiden. Eine Änderung des Gefüges ist bei vielen Werkstoffen möglich und hat immer veränderte bzw. neue Eigenschaften zur Folge. Da das Gefüge und seine Merkmale sehr werkstoffabhängig sind, werden entsprechende Informationen bei den konkreten Werkstoffgruppen genannt, vor allem bei Metallen (Abschn. 4.3).

Betrachten wir nun einen kleinen Ausschnitt des Gefüges bei noch stärkerer Vergrößerung. Hierbei wird die Feinstruktur sichtbar (Abb. 2.4c), die bei Dimensionen im Nanometerbereich liegt. Die Feinstruktur ist die eigentliche Struktur und ihre möglichen Bausteine können Atome, Ionen oder auch Moleküle sein. Jeder Werkstoff hat eine bestimmte Feinstruktur. Sie wird von der Anordnung ihrer Bausteine bestimmt. Eine Änderung der Feinstruktur ist aber nicht immer möglich. Wenn wir die Feinstruktur beeinflussen, führt dies zur Änderung der Eigenschaften. Die Feinstruktur des Metalls aus unserem Beispiel in Abb. 2.4 besteht aus Atomen, die eine regelmäßige räumliche Anordnung aufweisen. In Metallen, Halbleitern und vielen Nichtmetallen sind die Atome regelmäßig angeordnet, sie bilden eine kristalline Struktur (Abschn. 2.4.2). Nur kristalline (bzw. teilkristalline) Stoffe haben ein lichtmikroskopisch erkennbares Gefüge in der Mikroebene.

- Technologisch wichtige Strukturebenen von Werkstoffen sind das Gefüge (körnige Struktur) und die Feinstruktur.

Könnten wir einen kleinen Ausschnitt der Feinstruktur vergrößern, so wären die Atome und ihr Bau sichtbar (Abb. 2.4d). Alle Werkstoffe bauen sich aus Atomen zusammen. Diese Struktur entspricht der chemischen Zusammensetzung des Werkstoffes und aus ihr ergibt sich das Bindungsverhalten der Atome. Dieses Wissen gehört zum Bereich der Physik.



## 2.4 Feinstruktur von Werkstoffen

Die Feinstruktur wird durch den Zusammenhalt der Strukturbausteine sowie durch deren Ordnungszustand charakterisiert. Was wir als Strukturbausteine betrachten, hängt von der Werkstoffart ab.

Bei Metallen ist die Feinstruktur aus Atomen aufgebaut. Deswegen benennen wir metallische Werkstoffe nach ihren chemischen Komponenten wie z. B. Eisenwerkstoffe oder Aluminiumwerkstoffe.

Bei Kunststoffen und Keramiken ist die Feinstruktur aus Molekülen bzw. Makromolekülen aufgebaut. Hierbei weisen die Moleküle ihre chemische Struktur auf. Somit werden diese Werkstoffe nach der Molekülart benannt, z. B. Aluminiumoxid oder Polyethylen.

### 2.4.1 Zusammenhalt der Feinstruktur

Der Zusammenhalt von Bausteinen der Feinstruktur erfolgt mithilfe chemischer Bindungen. Dieses Wissen gehört zum Bereich der Chemie und die Werkstofftechnik übernimmt diese Erkenntnisse.

#### *a. Arten der chemischen Bindung*

Chemische Bindung bedeutet eine Vereinigung zweier oder mehrerer Atome. Dadurch erreichen die Atome einen Zustand mit einem geringeren Energiegehalt als die Summe der Energiegehalte, die in den einzelnen Komponenten enthalten sind, sowie eine stabile Elektronenanordnung.

Dieser angestrebte energiearme Zustand kann durch acht Elektronen auf der äußersten Schale (sog. Edelgaskonfiguration) oder auch durch eine völlig leere äußerste Elektronenschale verwirklicht werden.

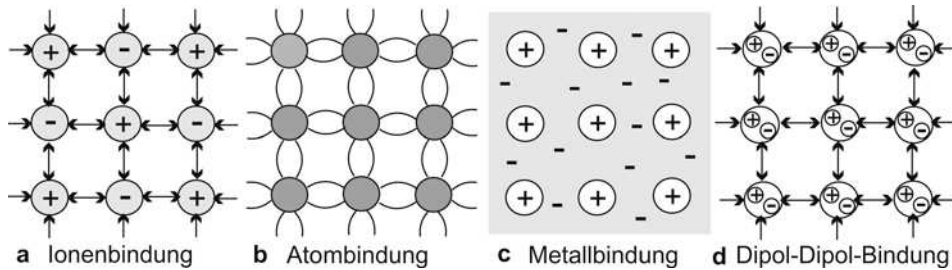
Wir unterscheiden grundlegend Hauptvalenzbindungen und Nebenvalenzbindungen. Die Hauptvalenzbindungen entstehen unter Beteiligung von Valenzelektronen (diese Elektronen halten sich in den äußersten Atomshalen auf) und sind stark. Zu dieser Gruppe gehören: Ionenbindung, Atombindung und Metallbindung. Nebenvalenzbindungen (z. B. Dipol-Dipol-Bindung) beruhen auf physikalischen Kräften und sind viel schwächer als die Hauptvalenzbindungen.

Abb. 2.5 zeigt schematisch die genannten Bindungsarten, die nachfolgend kurz erläutert werden.

In den meisten Stoffen kommen Mischungen von zwei oder mehreren Bindungstypen vor. Ausführliche Informationen zu chemischen Bindungen sind in der weiterführenden Literatur zu finden.

#### *b. Ionenbindung*

Die Ionenbindung ist schematisch in Abb. 2.5a dargestellt. Sie wird von Metall- und Nichtmetallatomen gebildet. Zwischen diesen zwei unterschiedlichen Atomarten kommt es zu einem Elektronenübergang. Ein Atom gibt seine Außenelektronen vollständig ab und



**Abb. 2.5** Chemische Bindungen

erreicht dadurch die Edelgaskonfiguration des im Periodensystem vor ihm stehenden Edelgases. Ein anderes Atom nimmt die Elektronen auf und erreicht ebenfalls die Elektronenkonfiguration eines Edelgases. Durch den Elektronenübergang wandeln sich die beiden Atome in elektrisch geladene Ionen um. Der Zusammenhalt erfolgt durch die elektrostatische Anziehung der gegensätzlich geladenen Ionen. Da die elektrostatischen Kräfte richtungsunabhängig sind, entstehen zwangsläufig Kristallgitter (Abschn. 4.2.1), in denen jedes Ion von einer bestimmten Anzahl entgegengesetzt geladener Ionen umgeben ist.

Stoffe mit Ionenbindung haben eine geringe elektrische und thermische Leitfähigkeit. Werkstoffe mit Ionenbindung sind z. B. Oxidkeramiken (Abschn. 12.5).

#### c. Atombindung

Die Atombindung ist schematisch in Abb. 2.5b dargestellt. Sie trägt auch die Namen kovalente Bindung, homöopolare Bindung oder Elektronenpaarbindung. Gleiche oder unterschiedliche Atome von Nichtmetallen teilen sich zwei oder mehrere Elektronen mit ihren Bindungspartnern und bilden gemeinsame Elektronenpaare (in Abb. 2.5b als gebogene Linien dargestellt). Bei gleichartigen Atomen kann (je nach Wertigkeit der Atome) eine einfache Bindung, Doppelbindung oder Dreifachbindung entstehen. Zwischen unterschiedlichen Atomen bildet sich meist eine polare Atombindung. Eine Atombindung ist richtungsabhängig und besteht nur zwischen den beiden beteiligten Atomen. Diese Richtungsabhängigkeit bedeutet, dass Atome eine bestimmte Anordnung zueinander (Nachordnung) einnehmen.

Stoffe mit Atombindung haben eine geringe elektrische und thermische Leitfähigkeit, meist ein gutes Wärmedämmvermögen (bei amorphen Stoffen) und häufig eine geringe Verformbarkeit. Werkstoffe mit Atombindung sind z. B. Nichtoxidkeramiken (Abschn. 12.6) und Halbleiter (Abschn. 14.1).

#### d. Metallbindung

Die Metallbindung ist schematisch in Abb. 2.5c dargestellt. Ihrem Namen entsprechend wird sie zwischen Metallatomen gebildet. Metalle haben wenige Valenzelektronen und die Entfernung der Valenzelektronen vom Kern ist groß. Dadurch ist die Wirkungskraft des Atomkerns gering. Die Valenzelektronen werden wie bei Ionenbindung abgegeben, aber nicht an ein benachbartes Atom, sondern an alle Atome. Sie machen sich vielmehr

„selbstständig“ und bilden ein sogenanntes Elektronengas, das den Raum zwischen den Atomen ausfüllt. Die Valenzelektronen sind zwischen sämtlichen Atomrümpfen (so werden die Atomkerne mit den übrigen Elektronen genannt) leicht beweglich. Die Atomrümpfe sind elektrisch geladene Teilchen aber doch keine echten Metallionen. Ihnen fehlt ein entscheidendes Merkmal der Ionen, nämlich die Beweglichkeit. Die Ionen wandern in einem elektrischen Feld, die Atomrümpfe nicht. Die Atomrümpfe lassen sich jedoch ohne wesentliche Änderung der elektrostatischen Kräfte verschieben. Dies bedeutet eine gewisse Elastizität der Bindung. Der Zusammenhalt erfolgt durch gegenseitige Anziehung zwischen den negativ geladenen Elektronen und den positiv geladenen Atomrümpfen. Zwangsläufig (bedingt durch die elektrostatischen Kräfte) entstehen geordnete Strukturen mit hoher Packungsdichte, sogenannte Metallgitter (Abschn. 4.2.2), mit guten Gleitmöglichkeiten bestimmter Gitterebenen.

Stoffe mit Metallbindung haben eine gute elektrische und thermische Leitfähigkeit sowie eine gute Verformbarkeit. Werkstoffe mit Metallbindung sind Metalle (Kap. 4) und Hartstoffe (Abschn. 12.6.2). Da die Metalle die wichtigsten Werkstoffe der Technik sind, spielt die Metallbindung auch in der Werkstofftechnik eine wichtige Rolle.

#### *e. Nebenvalenzbindung*

Unter dem Namen Nebenvalenzbindungen werden physikalische Kräfte verstanden, die sich zwischen Molekülen oder Atomgruppen ausbilden können. Diese Sekundärbindungen können unterschiedlichen Ursprungs sein. In Abb. 2.5d ist schematisch die Dipol-Dipol-Bindung dargestellt, die zwischen polarisierten Molekülen mit getrennten Mittelpunkten der positiven und negativen Ladungen entsteht. Moleküle vieler Stoffe sind permanent polarisiert, d. h. in ihnen liegt eine räumliche Trennung positiver und negativer Ladung vor. Dadurch können sich schwache elektrostatische Anziehungskräfte ausbilden. Neben der Dipol-Dipol-Bindung sind auch andere Arten von Nebenvalenzbindungen möglich, so z. B. die Van-der-Waals-Bindung, die zwischen nicht polaren Gruppen entsteht, Dispersions- und Induktionskräfte, sowie die Wasserstoffbrückenbindung. Werkstoffe mit Nebenvalenzbindungen sind z. B. Kunststoffe (Abschn. 9.1.3).

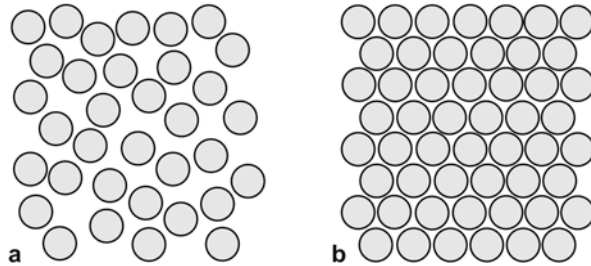
► Grundlegende Arten der chemischen Bindung sind:

- Hauptvalenzbindungen mit hoher Bindungsenergie (Ionenbindung, Atombindung und Metallbindung),
- Nebenvalenzbindungen mit niedriger Bindungsenergie (z. B. Dipol-Dipol-Bindung).

### **2.4.2 Ordnungszustand der Feinstruktur**

Die räumliche Anordnung von Bausteinen der Feinstruktur kann mit unterschiedlichem Ordnungsgrad erfolgen. Dabei unterscheiden wir zwei extreme Fälle, die amorphe und die kristalline Struktur, welche schematisch in Abb. 2.6 dargestellt sind.

**Abb. 2.6** Ordnungszustände der Struktur. **a** amorphe Struktur, **b** kristalline Struktur



Welcher Ordnungszustand sich einstellt, ist von den Bausteinen abhängig – sind es Atome, Ionen oder Moleküle.

Bei der amorphen Struktur (Abb. 2.6a), die sich durch eine minimale Ordnung (nur Nahordnung) auszeichnet, beschränkt sich die räumliche Anordnung der Atome auf die unmittelbaren Nachbaratome. Typische amorphe Stoffe sind Gläser, aber auch viele Kunststoffe zählen zu dieser Gruppe.

Die kristalline Struktur (Abb. 2.6b) zeichnet sich durch eine maximale Ordnung (Fernordnung) aus. Dabei erstreckt sich die räumliche Anordnung von Atomen durch das gesamte Material und es entsteht ein Raumgitter. Dieser Ordnungszustand wird von der Natur bevorzugt. Das Wort „Kristall“ ist aus dem griechischen Wort für Eis entstanden. Sehr viele Materialien sind kristallin. Vor allem denken wir hier an Mineralien und Edelsteine. Aber auch viele Werkstoffe, wie z. B. alle Metalle, haben eine kristalline Struktur (Abschn. 4.2). Bei keramischen Werkstoffen kommen beide Ordnungszustände, der amorphe und der kristalline, vor.

- ▶ Mögliche Ordnungszustände der Feinstruktur sind amorphe und kristalline Struktur.

Auch ein „Zwischen-Zustand“ ist möglich, d. h. eine nur teilweise Anordnung der Strukturbausteine. Dies beobachten wir insbesondere bei großen Molekülen und bezeichnen sie als teilkristalline Struktur. Sie kommt oft bei Kunststoffen vor (Abschn. 9.1.3).

#### Feinstruktur entscheidet über die Lichtdurchlässigkeit von Werkstoffen

Der Ordnungszustand der Feinstruktur kann einige Eigenschaften von Werkstoffen ausschlaggebend entscheiden. Ein gutes Beispiel dafür ist die Lichtdurchlässigkeit. Nur ein amorphes Material kann gut lichtdurchlässig sein. Die ungeordnete Struktur lässt den überwiegenden Teil des Lichtes hindurch, nur ein geringer Teil wird absorbiert und gestreut.

Die Lichtdurchlässigkeit ist z. B. bei Getränkeflaschen (Abb. 2.7) wichtig. Sie können aus Glas hergestellt werden, das ein typisches amorphes Material ist, oder aus Kunststoff.

**Abb. 2.7** Transparente Flaschen aus Glas und Kunststoff



Einige Kunststoffe wie z. B. Polyethylenterephthalat (PET) (Abschn. 10.2.3) verfügen auf der Strukturebene über eine Molekülstruktur, die als eine amorphe oder auch als eine teilkristalline herstellbar ist. So verhält sich das amorphe PET optisch transparent, während das kristalline PET nur noch sehr diffus lichtdurchlässig ist. Aus der amorphen Sorte werden lichtdurchlässige und uns gut bekannte Getränkeflaschen hergestellt. Nebenbei können wir feststellen, dass die dargestellte Glasflasche ein Fassungsvermögen von 0,33 l hat und 300 g wiegt. Dagegen wiegt die PET-Flasche, bei einem Volumen von 0,5 l, nur 18 g.

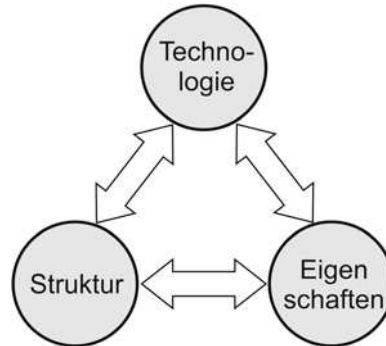
---

## 2.5 Zusammenhang Technologie/Struktur/Eigenschaften

In der Technik sollen wir immer in dem oben genannten Dreieck denken und handeln: Technologie beeinflusst die Struktur des Werkstoffs und die Struktur beeinflusst die Eigenschaften (Abb. 2.8).

Unter Technologie verstehen wir das, was wir mit einem Werkstoff machen, wie wir ihn behandeln, was wir aus ihm anfertigen. Eine bestimmte Behandlung kann, und zwar sehr oft, die Struktur des Werkstoffes verändern. Und wenn die Struktur verändert wird, dann verändern sich auch einige Eigenschaften (nicht nur in die positive Richtung). Wiederum können die veränderten Eigenschaften unsere technologischen Handlungen beeinflussen und so schließt sich der Kreis (oder besser gesagt das Dreieck). In den folgenden Kapiteln werden wir viele Informationen und Erkenntnisse zu diesem Zusammenhang kennenlernen.

**Abb. 2.8** Zusammenhang Technologie/Struktur/Eigenschaften



### Weiterführende Literatur

- Ashby M, Jones D (2006) Werkstoffe 1: Eigenschaften, Mechanismen und Anwendungen. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg
- Askeland D (2010) Materialwissenschaften. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg
- Bargel H-J, Schulze G (2008) Werkstoffkunde. Springer, Berlin, Heidelberg
- Fuhrmann E (2008) Einführung in die Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung Band 1: Werkstoffe: Aufbau-Behandlung-Eigenschaften. expert verlag, Renningen
- Hornbogen E, Eggeler G, Werner E (2012) Werkstoffe: Aufbau und Eigenschaften von Keramik-, Metall-, Polymer- und Verbundwerkstoffen. Springer, Heidelberg
- Ilshner B, Singer R (2010) Werkstoffwissenschaften und Fertigungstechnik. Springer Heidelberg
- Jacobs O (2009) Werkstoffkunde. Vogel-Buchverlag, Würzburg
- Kalpakjian S, Schmid S, Werner E (2011). Werkstofftechnik. Pearson Education, München
- Läpple V, Drübe B, Wittke G, Kammer C (2010) Werkstofftechnik Maschinenbau. Europa-Lehrmittel, Haan-Gruiten
- Reissner J (2010) Werkstoffkunde für Bachelors. Carl Hanser Verlag, München
- Riehle M, Simmchen E (2000) Grundlagen der Werkstofftechnik. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Stuttgart
- Schatt W, Worch H, Pompe W (2011) Werkstoffwissenschaft. Wiley-VCH, Weinheim
- Seidel W, Hahn F (2012) Werkstofftechnik: Werkstoffe-Eigenschaften-Prüfung-Anwendung. Carl Hanser Verlag, München
- Thomas K-H, Merkel M (2008) Taschenbuch der Werkstoffe. Carl Hanser Verlag, München
- Weißbach W, Dahms M (2012) Werkstoffkunde: Strukturen, Eigenschaften, Prüfung. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden