1
Einführung und Grundlagen

Die Eigenschaften von Funktionswerkstoffen hängen eng mit ihrer chemischen Bindungsart und mit der atomaren oder molekularen Struktur zusammen. Daher liegt der Fokus zunächst auf den Bindungsarten und Strukturkonzepten von Metallen, Halbleitern, Keramiken und Polymeren. Aber auch die Begriffe der Tropie (Richtungsabhängigkeit der Eigenschaften), Polymorphie (Vielgestalt bzw. Wechsel der Kristallstruktur) und Phasen (homogenes und heterogene Gefüge) spielen für das Verständnis der Eigenschaften eine wichtige Rolle.

Werkstoffe werden aus Rohstoffen hergestellt. Deren Gewinnung, Handel, Verbrauch und Entsorgung stellen einen tiefen Eingriff in ökologische, ökonomische und soziale Systeme dar. Im Zeitalter von Globalisierung, Wirtschaftswachstum, übermäßigem Ressourcenverbrauch und Klimawandel ist es auch für die Werkstoffkunde an der Zeit, das Thema der ökologischen und sozialen Nachhaltigkeit in eine ganzheitliche Betrachtung aufzunehmen.

1.1 Bindungsarten

Die Art der chemischen Bindung zwischen den atomaren Bausteinen hat einen entscheidenden Einfluss auf die Eigenschaften von Funktionswerkstoffen. Eisenatome in metallischen Elektro- oder Stahlblechen tragen zur elektrischen Leitfähigkeit bei. Oxidkeramische Ferritmagneten hingegen enthalten Eisenionen und sind elektrische Isolatoren.

Die *Metallbindung* basiert auf einer Wolke frei beweglicher Außenelektronen. Sie umgibt die positiv geladenen Atomrümpfe des Kristallgitters und hält sie zusammen.

In einer *Atombindung* gehören gemeinsame Valenz-Elektronenpaare zu beiden Nachbaratomen zu gleichen Teilen, wenn die Bindung unpolar ist (z. B. in den reinen Halbleitern Silizium oder Diamant). Mit steigender Differenz der Elektronegativität beider Bindungspartner gehen die Valenz-Elektronen immer mehr zum Partner mit der höheren Elektronegativität über (polare Atombindung, z. B. in den Verbindungshalbleitern GaAs oder SiC).

Ist die Differenz der Elektronegativitäten in einer chemischen Verbindung aus Metallen und Nichtmetallen größer als 1.7 (siehe Periodensystem, Abb. 1.1), spricht

Grundlagen der Funktionswerkstoffe für Studium und Praxis, Janko Auerswald und Pius Portmann.
© 2022 Wiley-VCH GmbH. Published 2022 by Wiley-VCH GmbH.

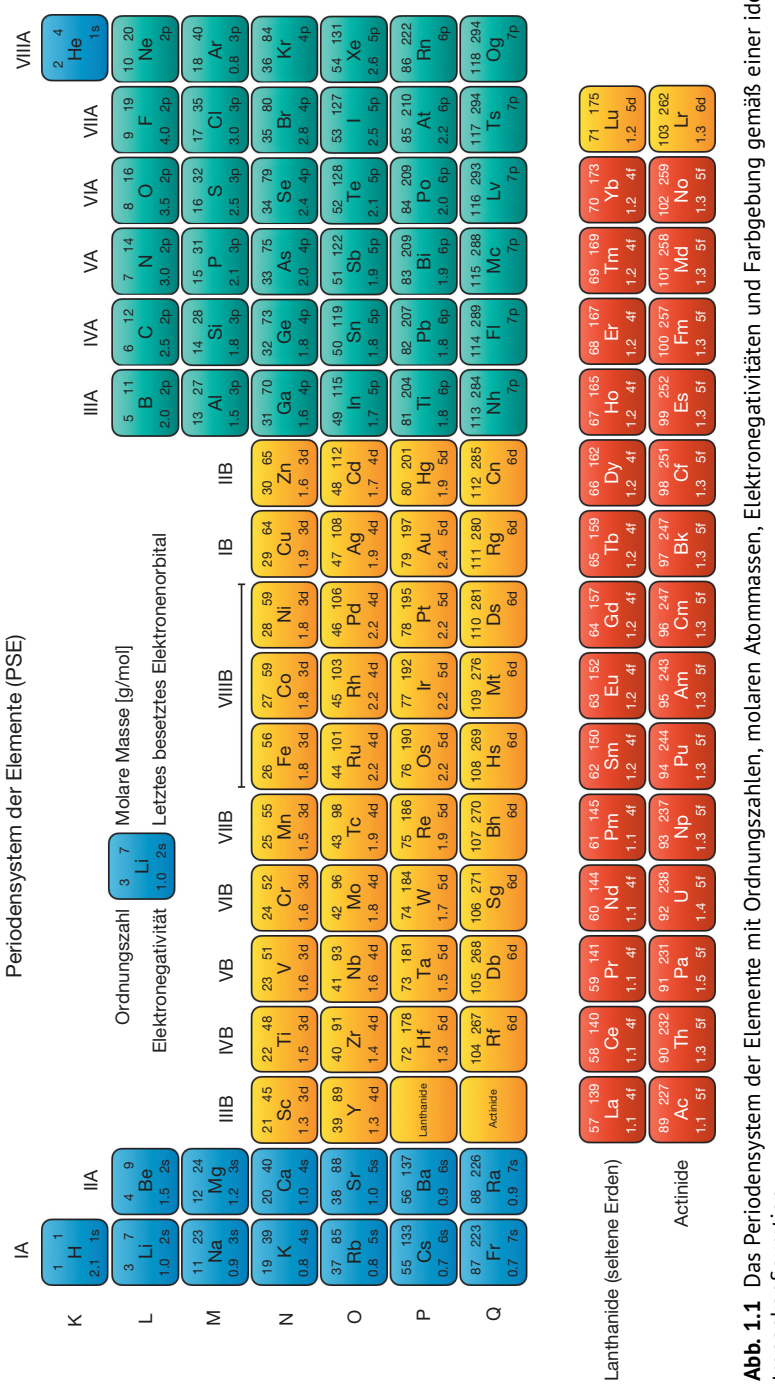


Abb. 1.1 Das Periodensystem der Elemente mit Ordnungszahlen, molaren Atommassen, Elektronegativitäten und Farbgebung gemäß einer idealen Elektronenkonfiguration.

man von *Ionenbindung*. Die Außenelektronen gehören dann komplett zum Partner mit der höheren Elektronegativität (z. B. zum Chlor in Natriumchlorid). Der Einfachheit halber kann man alle Oxidkeramiken und oxidischen Gläser dieser Gruppe zuordnen, auch wenn manche die Differenz der Elektronegativitäten von 1.7 nicht ganz erreichen.

Zwischenmolekulare Bindungen sind festigkeitsbestimmend in Werkstoffen, die aus Molekülen oder großen Makromolekülen bestehen. Dazu gehören die Kunststoffe und Silikone.

Abbildung 1.1 zeigt das Periodensystem der Elemente. Die Farben der Elemente-Tafeln korrelieren mit dem Typ des letzten besetzten Elektronenorbitals gemäß einer idealen Elektronenkonfiguration. Bei den blau markierten Elementen (I. und II. Hauptgruppe) wäre dies theoretisch ein s-Orbital, bei den türkisgrünen (III.–VIII. Hauptgruppe) ein p-, bei den gelben (Nebengruppenelemente) ein d- und bei den roten (Lanthanide bzw. seltene Erden, Actinide) ein f-Orbital. In der Praxis gibt es jedoch Abweichungen vor allem bei den Nebengruppenelementen (gelb) sowie den Lanthaniden und Actiniden (rot). So wird bei Lanthan (La) anstelle des $4f^1$-Orbitals zuerst der $5d^1$-Orbital besetzt, weshalb Lanthan häufig den gelb markierten Elementen der III. Nebengruppe statt den seltenen Erden zugerechnet wird. Das eigentlich an dieser Stelle stehende Lutetium (Lu) hat mit allen 14 besetzten 4f-Orbitalen und einem besetzten $5d^1$-Orbital die ideale Elektronenkonfiguration eines Elements der III. Nebengruppe in der 6. Periode, wird aber im Gegenzug häufig den rot markierten seltenen Erden bzw. Lanthaniden zugerechnet.

Nähere Erläuterungen zur Besetzung der Orbitale finden sich im Kapitel Magnetwerkstoffe. Die Besetzung der Orbitale mit Elektronen hat einen wichtigen Einfluss auf die magnetischen, aber auch auf die elektrischen und optischen Eigenschaften von Werkstoffen.

1.2 Werkstoffklassen und Strukturmodelle

Aufgrund der atomaren Bausteine und der chemischen Bindung lassen sich die Werkstoffe in verschiedene Klassen einteilen: Metalle, Halbleiter, Keramiken (sowie Gläser und anorganische Bindemittel wie Zement) und Kunststoffe. Die Kombination von Materialien aus verschiedenen Klassen führt zu den Verbundwerkstoffen.

Metalle werden durch die Metallbindung zusammengehalten. Sie kommen oft in Form von Legierungen zum Einsatz, seltener in ihrer reinen Form. Durch Legieren mit anderen chemischen Elementen werden die Eigenschaften gezielt verändert. Verglichen mit Kunststoffen ist ihre Bindungskraft (der Elastizitätsmodul oder E-Modul) hoch, jedoch in der Regel etwas kleiner als bei Keramiken. Sie sind gut plastisch verformbar. Reine Metalle sind elektrisch und thermisch gute Leiter. Viele Metalle und Legierungen sind korrosionsempfindlich.

Metalle haben relativ einfache, dichtgepackte Kristallgitterstrukturen, die durch Elementarzellen beschrieben werden (Abb. 1.2). Eine Elementarzelle ist eine kleine geometrische Einheit, die den gesamten Kristall komplett beschreibt. Metalle werden als Funktionswerkstoffe eingesetzt für mechanische Konstruktionsteile, für Lei-

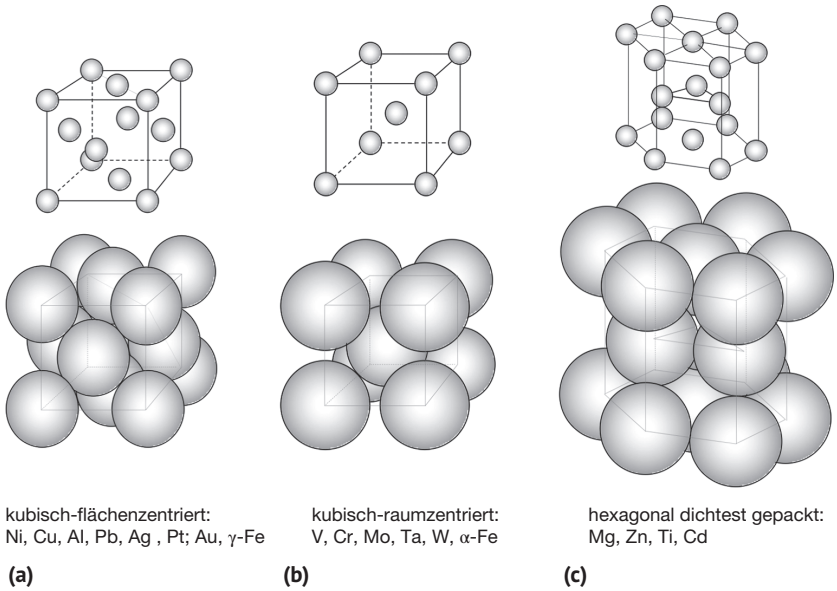


Abb. 1.2 Typische Gitterstrukturen von Metallen. (a) kubisch-flächenzentrierte Elementarzelle (kfz), (b) kubisch-raumzentrierte Elementarzelle (krz), (c) Elementarzelle der hexagonal dichtesten Packung (hdp)

ter (Kabel und Leiterbahnen), Widerstände, Kontaktwerkstoffe, Gehäuse und andere Konstruktionsbauteile, Lötlegierungen (Sn-Pb und bleifrei), Sensoren (Thermoelemente), Aktuatoren (Formgedächtnislegierungen), weichmagnetische Induktivitäten (Spulenkerne) oder (Bio-)Sensoroberflächen.

Anorganische *Halbleiter* bestehen aus Elementen der oberen IV. Hauptgruppe wie Silizium oder Germanium oder als Verbindungshalbleiter aus einer Kombination von Elementen aus verschiedenen Hauptgruppen (IV–IV, III–V, II–VI). Sie werden in der Regel dotiert und beruhen auf Atombindung (gemeinsame Elektronenpaare). Im Gegensatz zu Metallen (Kaltleiter) leiten Halbleiter besser bei höheren Temperaturen (Heißleiter). Sie sind spröde. Halbleiter der Hauptgruppen IV und III–V basieren auf der Diamant- bzw. Zinkblendestruktur (Abb. 1.3).

Halbleiter werden eingesetzt als Dioden (p-n-Übergang), Transistoren (mehrere p-n-Übergänge), Leuchtdioden (LED), Laserdioden, Photodioden und Solarzellen. Des Weiteren kommen sie als Sensoren und Aktuatoren zum Einsatz (Transducer, z. B. Peltier-Elemente).

Keramiken basieren auf Ionenbindungen (oder stark polarer Atombindung) zwischen Metallen und Nichtmetallen. Sie sind im undotierten Zustand Isolatoren. Sie zeichnen sich durch einen hohen E-Modul, einen kleinen thermischen Ausdehnungskoeffizienten, sehr gute Beständigkeit gegen hohe Temperaturen, Korrosion und Verschleiß sowie durch eine geringere Dichte als Metalle aus. Sie sind jedoch spröde und nicht verformbar. Ihre Kristallstruktur ist komplexer aufgebaut als die einfachen dichten Packungen von Metallen (Abb. 1.4). Im angelsächsischen Sprach-

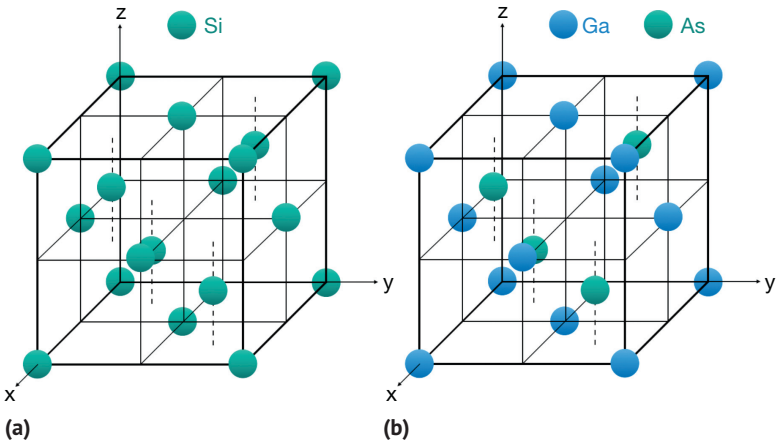


Abb. 1.3 Die Elementarzellen von Halbleitern der IV. Hauptgruppe (Si und Germanium in der Diamantstruktur (a)) und von III–V-Halbleitern (z. B. GaAs, eng verwandte Zinkblendestruktur (b)). Grundbaustein beider Strukturen ist ein kfz-Gitter, in das ein zweites kfz-Gitter im Abstand [1/4, 1/4, 1/4] eingeschoben wurde. Anders betrachtet kann man auch sagen, dass im ersten kfz-Gitter jede zweite Tetraederlücke (oder jeder zweite Achtelwürfel in seiner Mitte) mit einem weiteren Atom besetzt ist.

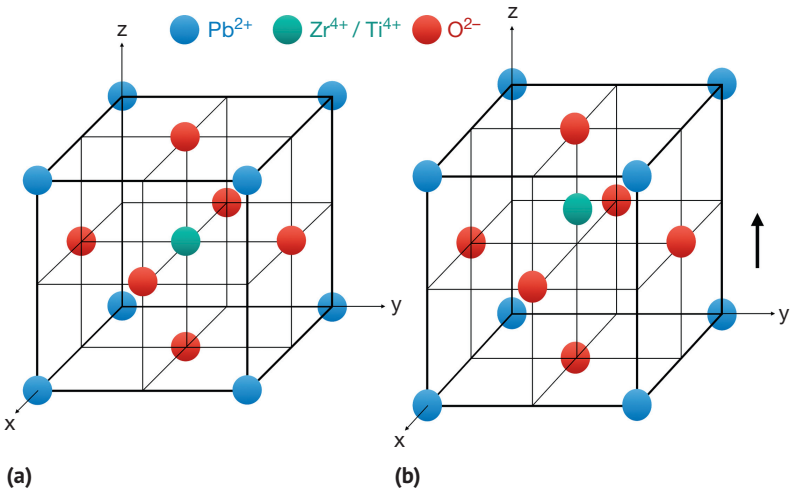


Abb. 1.4 Struktur von piezoelektrischen Keramiken auf Basis der Perowskit-Struktur. (a) Elementarzelle oberhalb der Curie-Temperatur; (b) Elementarzelle unterhalb der Curie-Temperatur, wo ferro- und piezoelektrische Eigenschaften vorliegen.

raum zählen auch die amorphen Gläser und anorganische Bindemittel (z. B. Zement) zur Klasse der Ceramics.

Keramiken werden eingesetzt als Kondensator-Dielektrika, Isolatoren, Sensoren und Aktuatoren (Piezos), Ionenleiter (Lambda-Sonde, Brennstoffzellen), Ferritmagnete, superparamagnetische Nanopartikel ohne Hysterese (Induktivitäten) in der

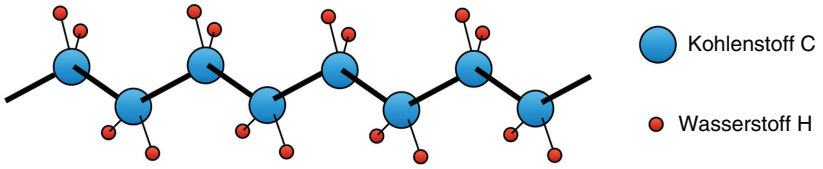


Abb. 1.5 Strukturmodell von Kunststoffen (Polyethylen). Kunststoffe bestehen aus kettenförmigen Makromolekülen mit Tausenden von Atomen. Der Kohlenstoff ist sp^3-hybridisiert, seine vier Bindungsarme zu den Nachbaratomen spannen einen Tetraeder auf.

Hochfrequenztechnik, als Hochtemperatur-Supraleiter oder als Laserkristalle (mit seltenen Erden dotiert). Der Einsatz von Keramik als Strukturwerkstoff erfolgt vor allem für Anwendungen bei hohen Temperaturen, bei starker Verschleißbeanspruchung oder in der Medizintechnik.

Polymere Werkstoffe (Kunststoffe) mit Tausenden von Atomen in den Molekülketten basieren auf einem eigenen Strukturmodell (Abb. 1.5). Sie bestehen aus sehr langen Makromolekülen, die chemisch vernetzt (Elastomere, Duroplaste, Photoresists) oder nicht vernetzt (Thermoplaste) sein können. Sind Segmente dieser langen Ketten regelmäßig angeordnet, z. B. abschnittsweise parallel, spricht man von teilkristallinen Polymeren, andernfalls von amorphen. Die Bindungen innerhalb der Kettenmoleküle (Primärbindungen) sind sehr starke Atombindungen. Der E-Modul und die Festigkeit werden jedoch definiert durch die schwachen zwischenmolekularen Bindungen. Produkte aus Kunststoff sind billig herstellbar, nicht sehr temperaturbeständig, leicht und besitzen im Normalzustand eine schlechte thermische und elektrische Leitfähigkeit.

Im Bereich der Funktionswerkstoffe werden Polymere eingesetzt als Isolatoren, Kondensator-Dielektrika, Sensoren und Aktuatoren (Polyvinylidenfluorid (PVDF) als Piezo), Polymere als Matrix für diffusionsgesteuerte Medikamentenabgabe über die Haut oder als Implantat, Substrate für Leiterplatten und Flexprints, Polymerhalbleiter oder als Ionenleiter (Ionenaustauschpolymere) in Brennstoffzellen.

Verbundwerkstoffe Durch Kombinationen verschiedener Werkstoffklassen entstehen Verbundwerkstoffe mit besonderen Eigenschaften, welche die Nachteile der einzelnen Komponenten kompensieren. So verleihen Fasern aus sprödem Glas dem Duroplast Epoxidharz eine höhere Temperaturbeständigkeit und Steifigkeit, ohne dass sich der Leiterplattenwerkstoff FR 4 spröde verhält. Ein offenes Thema ist aber das Recycling von Verbundwerkstoffen.

1.3 Nah- und Fernordnung

Amorphe Werkstoffe) besitzen eine Nah-, aber keine Fernordnung (Abb. 1.6). Die Abstände zwischen benachbarten Atomen oder Ionen entsprechen wegen der chemischen Bindung ungefähr denen der kristallinen Phase, d. h. zwischen 0.1 und 0.5 nm. Aber es gibt kein Kristallgitter, weil die Bindungswinkel variieren. Beispiele für amorphe Stoffe sind anorganische Gläser wie Fensterglas, Lichtwellenleiter

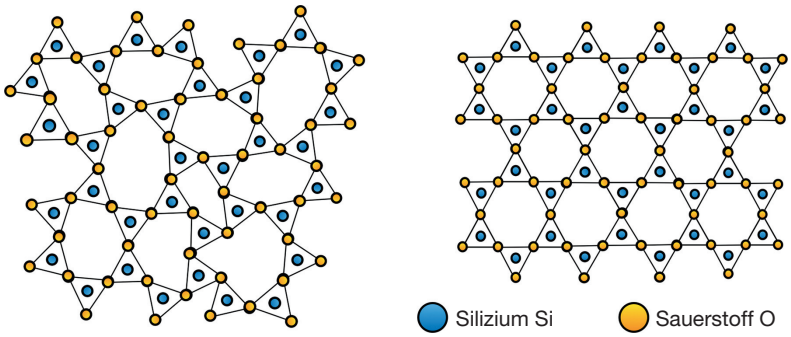


Abb. 1.6 (a) Amorphes Quarzglas mit Nahordnung. Innerhalb der SiO_4-Tetraeder gibt es definierte Abstände der Silizium- und Sauerstoffionen und damit eine Nahordnung. Es gibt aber keine Fernordnung wegen der unregelmäßigen Bindungswinkel benachbarter Tetraeder. (b) Vereinfachte zweidimensionale Struktur des regelmäßigen Quarzkristalls mit Nah- und Fernordnung. Die 3D-Strukturen der Tetraeder sind zur besseren Anschaulichkeit in einer Ebene dargestellt.

aus Quarzglas, thermoschockbeständiges Borosilikatglas oder chemisch gehärtetes Gorilla-Glas von Smartphones. Zu den amorphen Werkstoffen zählen ebenso die metallischen Gläser für Transformatoren ohne Ummagnetisierungsverluste oder amorphe Kunststoffe wie Polymethylmethacrylat (PMMA, Plexiglas).

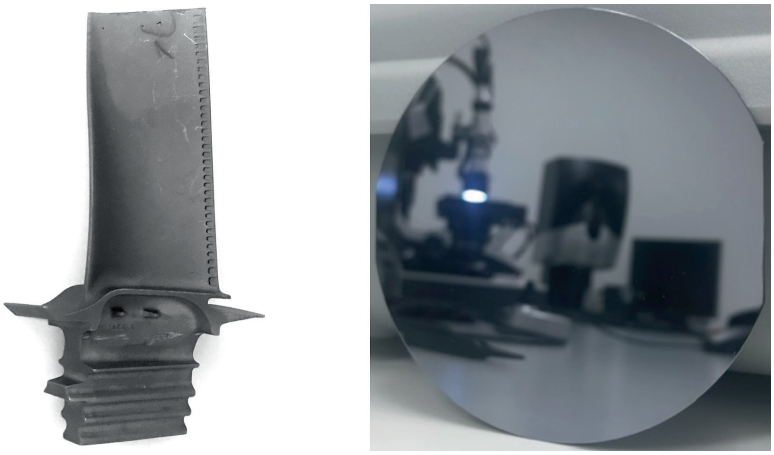
Einkristalline Bauteile sind teuer und erfüllen spezielle Aufgaben. Das ganze Bauteil besteht aus einem einzigen Kristall. Bekannte Beispiele sind die hochreinen Halbleiter für die Elektronik oder für MEMS (Micro Electro Mechanical Systems), einkristalline Turbinenschaufeln für den heißesten Bereich in Flugzeug- oder Gasturbinen hinter der Brennkammer, piezoelektrische Quarzkristalle als Taktgeber für die gleichnamigen Uhren, Einkristalle für Laser und andere optische Komponenten oder Saphir in Messfenstern und Uhrengläsern.

Die meisten Bauteile in der Praxis sind polykristallin. Sie bestehen aus unzähligen Kristallen, deren Größe zwischen einigen Nanometern und einigen Zentimetern variieren kann. Diese kleinen Kristallite werden auch als Körner bezeichnet. Typische Korngrößen liegen zwischen einigen zehn und einigen 100 µm. Die schmalen Bereiche geringerer Ordnung zwischen den Körnern heißen Korngrenzen und sind ca. 10–100 nm breit.

1.4 Die Richtungsabhängigkeit der Eigenschaften

Der Begriff der Tropie beschreibt die Richtungsabhängigkeit der Eigenschaften von Werkstoffen. Die physikalischen Eigenschaften eines Gases, einer Flüssigkeit (auch Schmelzen) oder eines amorphen Festkörpers verhalten sich in allen Richtungen des Raumes gleich. Man bezeichnet diese Stoffe als isotrop (griechisch: iso = gleich).

Die Eigenschaften amorpher Werkstoffe sind immer isotrop.



(a) (b)

Abb. 1.7 (a) Einkristalline Turbinenschaufel aus einem Flugzeugtriebwerk; (b) einkristalliner Silizium-Wafer für Halbleiter und MEMS. Der Wafer hat die kubische Diamantstruktur, wobei die Oberfläche eine {001}-Ebene (Würfelfläche) ist und die flachen Kanten rechts und links parallel zu einer ⟨110⟩-Richtung (Flächendiagonalen) verlaufen. Entlang dieser Richtungen kann Silizium am einfachsten gesägt werden (Spaltrichtungen).

In Einkristallen liegt eine Richtungsabhängigkeit bzw. Anisotropie der Kristalleigenschaften vor. Auch Faserverbundwerkstoffe mit einer Vorzugsorientierung der Fasern sind anisotrop.

Einkristalline Werkstoffe verhalten sich in der Regel anisotrop (Abb. 1.7).

Der E-Modul als Maß für die Bindungskraft ist in den meisten kubischen Kristallstrukturen von Metallen wie Gold, Kupfer, α-Eisen oder Aluminium bzw. von Halbleitern wie Silizium oder Germanium in Richtung der Raumdiagonalen der kubischen Elementarzelle am größten (Abb. 1.8). Es gibt aber auch Ausnahmen wie das kubische Wolfram, dessen E-Modul sich nahezu isotrop verhält. Ursache sind der Tensor der elastischen Konstanten und der daraus resultierende Anisotropiefaktor für kubische Kristalle, der im Kap. 2 bei der elastischen Verformung genauer erläutert wird. In Kap. 2 wird ebenfalls die Indizierung der Richtungen und Ebenen in Kristallen erklärt.

Ein polykristallines Gefüge ohne Vorzugsorientierung der Kristalle (ohne Textur) besteht aus vielen einzelnen anisotropen Körnern. Diese nehmen im Allgemeinen aber alle im Raum möglichen unterschiedlichen Orientierungen ein. Daher gleichen sich die Unterschiede der Eigenschaften in verschiedenen Richtungen der einzelnen Kristalle statistisch wieder aus. Der Werkstoff verhält sich als Ganzes nach außen *quasiisotrop* (Abb. 1.9).

Polykristalline Gefüge mit Textur hingegen zeigen anisotrope Eigenschaften, da die Körner herstellungsbedingt eine bestimmte Vorzugsorientierung besitzen. Ein

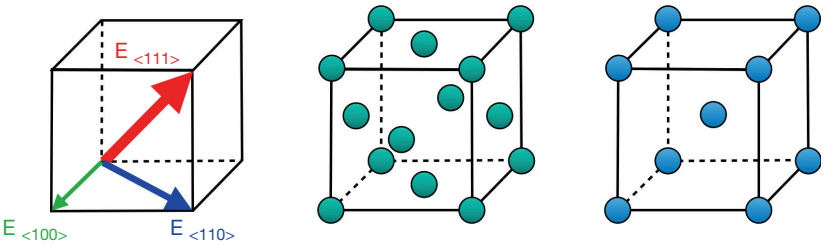


Abb. 1.8 (a) Anisotropie der meisten kubischen Einkristalle, dargestellt anhand des qualitativen Verlaufs der Größe des E-Moduls in verschiedenen Richtungen innerhalb der Elementarzelle. Eine große Pfeildicke symbolisiert einen großen E-Modul. In den meisten kubischen Metallen ist der E-Modul in den ⟨111⟩-Richtungen der Raumdiagonalen am größten, in den ⟨100⟩-Richtungen der Würfelkanten am kleinsten. Es gibt einige wenige Ausnahmen wie Wolfram, das sich nahezu isotrop verhält. (b) Kubisch-flächenzentrierte Elementarzelle (Cu, Ag, Au, Pt, Ni, γ-Fe); (c) kubisch-raumzentrierte Elementarzelle (α-Fe, Cr, Mo, W).

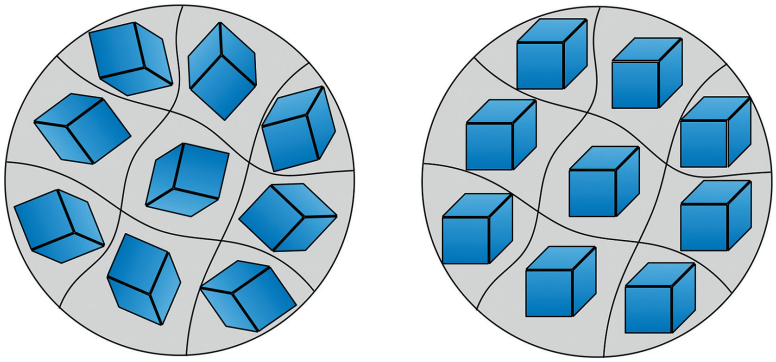


Abb. 1.9 (a) Quasiisotropes polykristallines Gefüge ohne Textur; (b) anisotropes polykristallines Gefüge mit Textur, d. h. mit einer Vorzugsorientierung der Kristalle.

Beispiel ist die Goss-Textur in Trafoblechen. In dieser Walz-Textur liegen die Eisenkristalle mit ihren Würfelkanten parallel zum äußeren magnetischen Feld und lassen sich so leichter ummagnetisieren.

Polykristalline Werkstoffe ***ohne*** *Textur verhalten sich quasiisotrop.* Obwohl jedes Korn für sich eigentlich anisotrop ist, wirkt der Werkstoff durch den Ausgleich der Eigenschaften wegen der statistisch zufälligen Kornorientierung nach außen isotrop.

Polykristalline Werkstoffe ***mit*** *Textur verhalten sich anisotrop.* Mit Textur ist eine Vorzugsorientierung der Körner gemeint, so dass sich die Eigenschaften in verschiedenen Richtungen nicht mehr statistisch ausgleichen.

1.5 Polymorphie: Die Vielgestalt von Werkstoffen

Werkstoffe wie Eisen (Stahl), Siliziumoxid, Zirkoniumoxid oder Kohlenstoff können je nach Temperatur und Herstellungsbedingungen verschiedene Strukturen einnehmen (Abb. 1.10). Diese Polymorphie („Vielgestaltigkeit“) wird zum Beispiel zum Härten von Stahl ausgenutzt. Reines Eisen ist von Raumtemperatur (20 °C) bis 911 °C kubisch-raumzentriert (krz Ferrit, α-Fe). Es nimmt zwischen 911 und 1392 °C eine kubisch-flächenzentrierte Struktur an (kfz Austenit, γ-Fe) und wechselt oberhalb 1392 °C bis zur Schmelztemperatur (1536 °C) wieder in eine kubisch-raumzentrierte Struktur (krz δ-Fe). Wenn Eisen viel Kohlenstoff enthält und schnell abgeschreckt wird, kann sich die austenitische Phase in die sehr harte metastabile tetragonal-innenzentrierte Phase Martensit umwandeln (Abb. 1.11). Ebenfalls metastabil ist das amorphe Eisen, das viele Fremdatome enthält. Als dünnes Band wird es sehr schnell abgeschreckt, so dass es beim Erstarren zu wenig Zeit hat zu kristallisieren.

Auch Kohlenstoff kann verschiedene Strukturen einnehmen, z. B. als Graphit, Diamant, fußballartiges Fulleren-Nanopartikel, Kohlenstoffnanoröhrchen, zweidimensionales Graphen oder als amorpher Ruß. Graphen und Fullerene ermöglichen neue Arten von Halbleitern und Polymerhalbleitern. Darauf wird in den entsprechenden Kapiteln dieses Buches noch genauer eingegangen.

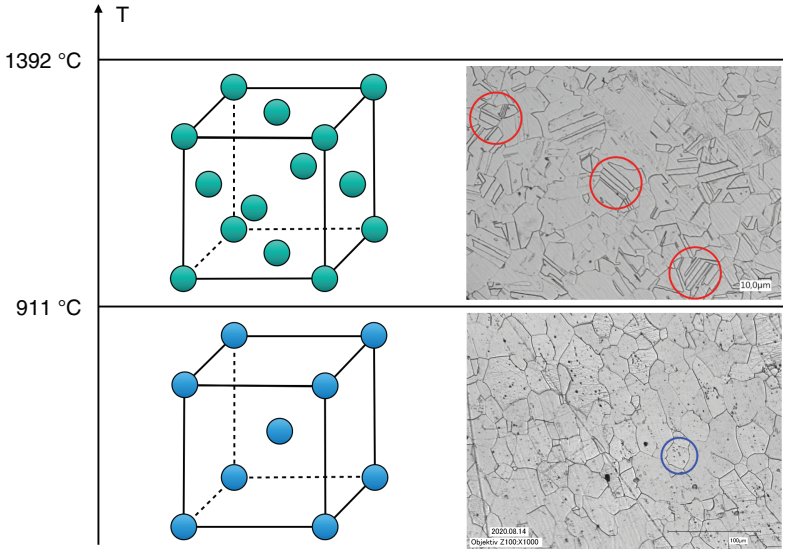
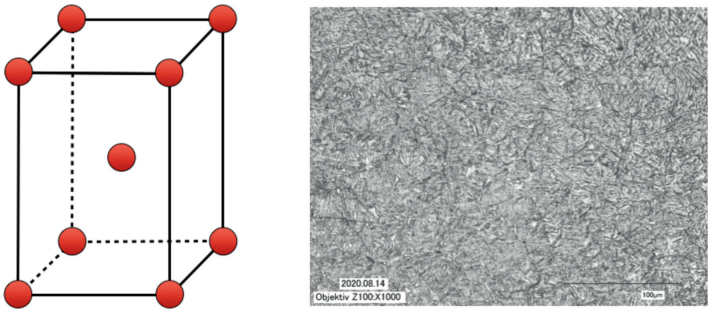


Abb. 1.10 Unten: Reines Eisen liegt von Raumtemperatur (20 °C) bis 911 °C als kubisch-raumzentrierter (krz) Ferrit vor. Gezeigt sind die krz Elementarzelle mit den Positionen der Eisenatome und ein typisches Gefügebild mit Körnern und Korngrenzen. Die blaue Markierung zeigt ein Korn mit seinen Korngrenzen. Oben: Zwischen 911 und 1392 °C liegt der kubisch-flächenzentrierte (kfz) Austenit vor. Neben der kfz Elementarzelle ist das Gefüge unter einem Lichtmikroskop gezeigt. Charakteristische Merkmale dieses Gefüges sind die eckigen Körner und die Zwillingsfehler, d. h. Störungen der Stapelfolge der dichtest gepackten Ebenen (rote Markierungen).



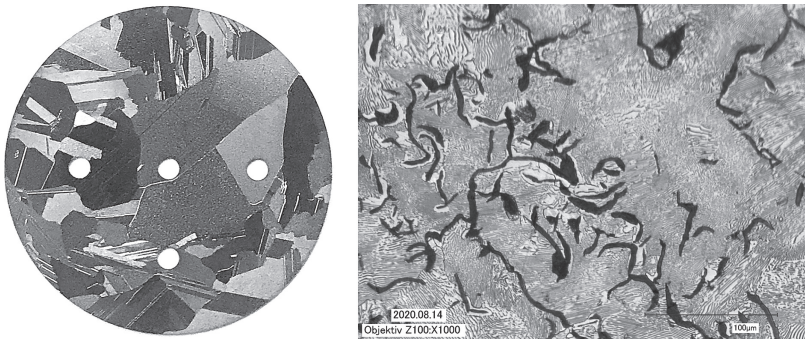
(a) (b)

Abb. 1.11 Wird dem Eisen mehr als 0.3 % Kohlenstoff zulegiert und es sehr schnell in Wasser abgekühlt (abgeschreckt), so kristallisiert der kfz Austenit nicht in krz Ferrit. In einem Umklappprozess entsteht Martensit mit seiner tetragonal-innenzentrierten Elementarzelle (a). Unter dem Mikroskop ist der extrem harte Martensit an seinem nadelförmigen Gefüge erkennbar (b).

Die Keramik Zirkoniumoxid ist ebenfalls polymorph. Bei Raumtemperatur liegt im thermodynamischen Gleichgewicht eine monokline Kristallstruktur mit geringer Symmetrie vor. Durch Stabilisierung mit anderen Oxiden, z. B. Yttriumoxid Y_2O_3, existiert bei Raumtemperatur auch noch eine tetragonale Phase, die eigentlich bei höheren Temperaturen vorkommt. Läuft ein Riss durch das Material, erfolgt an der Rissspitze eine Umwandlung der tetragonalen in die monokline Phase. Damit verbunden ist ein Volumensprung an der Rissspitze, der das Risswachstum und damit einen Sprödbruch stoppen kann. Das polymorphe Verhalten beim Stoppen von Rissen eröffnet dieser besonderen Keramik Anwendungsmöglichkeiten als Hüftgelenks- und Dentalimplantat, keramisches Messer oder Wälzkörper in Lagern. Y_2O_3-stabilisiertes Zirkoniumoxid weist Sauerstoff-Leerstellen im Ionengitter auf. Es dient bei Temperaturen um die 600 °C als Sauerstoffionenleiter in Lambda-Sonden, z. B. bei der Messung der Sauerstoffkonzentration in Abgasgemischen.

1.6 Phasen

Werkstoffe bestehen oft aus nicht nur einer Kristallsorte (homogenes Gefüge, eine Phase), sondern mehreren Kristallsorten (heterogenes Gefüge, mehrere Phasen). Abbildung 1.12 zeigt ein einphasiges Gefüge von polykristallinem Silizium und ein mehrphasiges Gefüge von Gusseisen. Phasen sind ein in sich homogener Teilbereich eines Werkstoffs mit gleicher chemischer Zusammensetzung, Struktur und Eigenschaften. Eine Phase kann kristallin oder amorph sein. An den Phasengrenzen tritt eine sprunghafte Änderung der chemischen Zusammensetzung, Struktur und Eigenschaften auf.



(a) (b)

Abb. 1.12 (a) Einphasiges polykristallines Siliziumgefüge (lasergeschnittene Zifferblattscheibe mit Bohrungen). Es enthält nur Siliziumkristalle, die schon von Auge erkennbar sind. Die unterschiedliche Orientierung der Kristalle führt zu unterschiedlichem Reflexionsverhalten, so dass einige Körner sehr hell und einige sehr dunkel erscheinen. (b) Mehrphasiges Gusseisengefüge mit lamellarem Graphit. Die Graphitkristalle (schwarz) sind von Eisenkristallen (hell) umgeben und nur unter dem Mikroskop erkennbar. Die feinen Streifen sind das eutektoide Gefüge aus Lamellen von Ferrit (hell, krz α-Eisen) und Zementit Fe_3C (dunkel).

1.7 Werkstoffe, Rohstoffe und Nachhaltigkeit

Werkstoffe werden aus Rohstoffen hergestellt. Diese stehen nicht in unendlicher Menge zur Verfügung. Deshalb ist eine ökologisch nachhaltige Nutzung inklusive Recycling sehr wichtig. Nicht immer ist das der Fall. Bei vielen Metallen und bei Glas funktioniert das Recycling und damit die Kreislaufwirtschaft bereits sehr gut. Kunststoff hingegen wird als Verpackung oft nur einmal benutzt und landet in großen Mengen in Gewässern und in den Weltmeeren [1]. Dort braucht er Jahrhunderte, um sich zu zersetzen. In diesem Prozess entsteht sehr viel Mikroplastik, das in die Nahrungskette von Tieren und Menschen gelangt.

Recycling bedeutet oft Downcycling, z. B. die Verarbeitung von gebrauchtem Kunststoff im Straßenbau – mit einem gewissen Risiko der Freisetzung von Mikroplastik. Verbundwerkstoffe wie Glasfaser-verstärkter Kunststoff lassen sich nur schwer bzw. gar nicht rezyklieren. Das Recycling von Elektroschrott und von Edelmetallen in elektronischen Geräten ist ein wichtiges Thema. Es wird in großen Mengen in der dritten Welt unter gesundheitsschädlichen Bedingungen betrieben [2]. Volkswirtschaftlich und ökologisch wäre ein systematisches Recycling von Elektro- und Elektronikabfall jedoch sehr wichtig, um die Metalle und Edelmetalle zurückzugewinnen, die dort bereits in reiner Form vorliegen.

Langlebige Produkte sind nachhaltig. Aus betriebswirtschaftlichen Überlegungen wird leider oft eine Gewinnmaximierung oder Kostensenkung angestrebt, z. B. durch den Einsatz billiger Materialien. Darunter leiden die Langlebigkeit, Qualität und Wiederverwertbarkeit.

Positiv ist das Bestreben vieler Firmen und Staaten, den Verbrauch fossiler Energien signifikant zu reduzieren. Dieses Ziel wird durch Energieeinsparungen, Wärmerückgewinnung oder den Einsatz regenerativer nichtfossiler Energien wie Wind- und Solarenergie erreicht. In modernen Fabriken und Gebäuden gibt es vielfältige innovative Ansätze. Trotzdem bedarf es noch großer Anstrengungen, um das Problem der Treibhausgase und des Klimawandels nachhaltig zu lösen.

Nachhaltigkeit hat aber auch eine soziale und ethische Komponente. Die Menschheit sieht sich zunehmend mit einigen unbequemen Wahrheiten konfrontiert. Unser Leben in den reichen Ländern des Westens ist seit vielen Jahrzehnten nicht mehr nachhaltig. Die reichen Länder dieser Welt verbrauchen jedes Jahr wesentlich mehr endliche Rohstoffe und Ressourcen, als ihnen nach ihrer Einwohnerzahl im Vergleich zum Rest der Welt eigentlich zustehen würde. Dieser exzessive Konsum hat Konsequenzen. Eine Frage sei in diesem Zusammenhang erlaubt: Woher kommen eigentlich viele dieser Rohstoffe, aus denen wir die Werkstoffe für unsere Produkte gewinnen?

Die Versorgung der produzierenden Industrie und der Infrastruktur unserer Zivilisation mit Rohstoffen ist eine sehr verantwortungsvolle Aufgabe. Rohstoffe, aus denen wir unsere Werkstoffe gewinnen, sind Bodenschätze. Sie sind die Schätze unserer Erde. Ihre Förderung stellt in der Regel einen tiefen Eingriff in ökologische und soziale Systeme dar. Riesige Investitionen sind für ihren Abbau und die Weiterverarbeitung nötig. Dafür winken der Rohstoffbranche und ihren Investoren am Ende aber auch große Gewinne.

Seit einigen Jahren rücken die gravierenden Probleme der Rohstoffbranche zunehmend stärker ins Zentrum des öffentlichen Interesses. Wenn Rohstoffkonzerne, von denen viele ihren Steuersitz in der Schweiz haben, ihren Reichtum in Ländern der Dritten Welt erwirtschaften, tun sie dies leider nicht immer unter Einhaltung von eigentlich selbstverständlichen ökologischen und sozialen Standards [3–5]. Diese hinreichend dokumentierten Missstände öffentlich zu machen und dagegen anzukämpfen kann für die lokale Bevölkerung, Hilfsorganisationen und Journalisten jedoch sehr gefährlich sein. Die Konzerne agieren dabei überaus geschickt. Sie haben zwar ihren Steuersitz in der Schweiz, in anderen Ländern Europas oder in den USA. Sie gründen in Drittweltländern mit schwachen Justizsystemen (oder korrupten Behörden) aber Tochterfirmen und arbeiten über diese mit einem Netzwerk abhängiger lokaler Unterlieferanten zusammen. So können sie an ihrem Steuersitz für die Verletzung ökologischer und sozialer Standards nicht belangt werden.

Ein anderes Problem ist die gerechte Verteilung des erwirtschafteten Reichtums. In Ländern der Dritten Welt weisen Rohstoffkonzerne und deren Töchter oft fiktive Kosten oder gar Verluste aus und versteuern die Gewinne in Steuerparadiesen [6]. In den Ländern der Dritten Welt, wo der Rohstoff abgebaut und die Wertschöpfung erbracht wurde, fehlen diese Steuereinnahmen für Investitionen in Schulen, Verkehrswege, Sanitäranlagen, Abfallentsorgung, die soziale Absicherung und das Gesundheitssystem. Dort leben und arbeiten aber Menschen, die Tag für Tag ihren Beitrag zu einer funktionierenden Weltwirtschaft leisten. Die in Steuerparadiese transferierten Gelder wären nötig, um auch die Drittweltstaaten am Ort der eigentlichen

Wertschöpfung zu befähigen, eine funktionierende Infrastruktur aufzubauen und verbindliche soziale und ökologische Rahmenbedingungen durchzusetzen.

Doch diese zweifelhaften Geschäftspraktiken einiger Rohstoffkonzerne stoßen zunehmend auf demokratischen Widerstand. Paradoxerweise sind in diesem Zusammenhang die politischen Entwicklungen in der rohstoffarmen Schweiz von zentraler Bedeutung, da viele Rohstoffkonzerne hier ihren Steuersitz haben. Die Schweizer Konzernverantwortungsinitiative (KVI) des Jahres 2020 hatte zum Ziel, international tätige Konzerne mit Steuersitz in der Schweiz und ihre Tochterfirmen im Ausland zu einer verbindlichen Einhaltung sozialer und ökologischer Standards zu verpflichten und sie für Verstöße gegen Umwelt- und Menschenrechtsstandards direkt haftbar zu machen. Eigentlich wurde damit nur eine Selbstverständlichkeit eingefordert. In Frankreich gibt es seit 2017 bereits ein solches Loi de Vigilance. Auch die deutsche Regierung arbeitete zeitgleich wie die KVI an einer sehr ähnlichen Gesetzesinitiative, dem Lieferkettengesetz. Dies wurde notwendig, nachdem freiwillige Verpflichtungen der Konzerne zur Einhaltung von sozialen und ökologischen Minimalstandards über Jahre kaum Ergebnisse brachten. Seit Mai 2020 gilt in Deutschland bereits das Mineralische-Rohstoffe-Sorgfaltspflichten-Gesetz für den Import von Zinn, Tantal, Wolfram und deren Erzen sowie von Gold aus Konflikt- und Hochrisikogebieten [7]. Vielleicht ist es mit der Einhaltung von Regeln etwa so wie mit dem Tragen der Corona-Maske in den öffentlichen Verkehrsmitteln: Solange es freiwillig ist, tut es kaum jemand. Existieren jedoch entsprechende Vorschriften, tun es (fast) alle.

Gemeinsam mit der Rohstoffbranche bekämpft traditionell auch die Finanzbranche Gesetzesinitiativen für mehr Konzernverantwortung in den Nationalstaaten. Dabei werden einzelne Länder als Steuersitze gegeneinander ausgespielt. Für die Finanzbranche ist der Rohstoffsektor ein lukratives Geschäft. Es umfasst den Handel mit Rohstoffen sowie mit Aktien und Obligationen von Rohstoffunternehmen, die Kreditvergabe an Rohstoffkonzerne, aber auch die Verwaltung riesiger Vermögen, die ihren Ursprung in der Rohstoffbranche haben. Auch die Finanzbranche ist in der Schweiz ein sehr wichtiger Wirtschaftsfaktor.

Die Schweizer Volksinitiative für mehr Konzernverantwortung wurde von einer mächtigen Gegenkampagne bekämpft. Diese Gegenkampagne wurde im Auftrag des nationalen Wirtschafts-Verbandes „Economiesuisse“ von der Lobbyisten-Agentur Furrerhugi geleitet – ein heikles Mandat. Furrerhugi vertritt gegen Geld auch die Interessen des Rohstoffkonzerns Glencore mit Steuersitz im Kanton Zug gegenüber der Schweizer Politik [8–10]. Furrerhugi steht ebenfalls hinter einem Verein namens „succèSuisse“, der von einer Reihe bürgerlicher Politiker sowie der Swiss-American Chamber of Commerce getragen wird.

Einflussreiche bürgerliche Politiker aus dem Umfeld von „succèSuisse“ und aus den ländlich geprägten Deutschschweizer Tiefsteuerkantonen sowie der Wirtschaftsverband „SwissHoldings“, der die multinationalen Konzerne mit Steuersitz in der Schweiz vertritt, schürten in der Kampagne gegen die KVI mangels stichhaltiger Argumente gezielt Ängste. Gegen die Einhaltung von Menschenrechten und ökologischen Standards ließ sich nichts einwenden. Sie verunglimpften daher die breit in der Gesellschaft verankerte Volksinitiative für mehr Konzernverantwortung

in populistischer Art und Weise als linksradikale Idee. Damit versuchten sie, in den konservativ-ländlich geprägten Kantonen der Deutschschweiz auf Stimmenfang zu gehen. Sie verwiesen auf potentielle Probleme bei der juristischen Umsetzung, ohne jedoch tragbare Kompromisse mit den gesprächsbereiten Initianten anzustreben. Im Gegenteil: Ein von der unteren Kammer des Parlaments und den Initianten bereits fertig ausgehandelter Kompromiss zur Umsetzung der Volksinitiative wurde durch ein Manöver bürgerlicher Politiker aus dem Umfeld von „succèSuisse" in letzter Minute in der oberen Parlamentskammer zu Fall gebracht. Sie argumentierten mit dem Wegfall von Steuereinnahmen, falls die Rohstoffkonzerne wegzögen [11]. Dies würde alle Steuerzahler treffen und den Wohlstand sowie Arbeitsplätze in der Schweiz gefährden. Diese Argumentation enthält einen starken ethischen Aspekt: Sind wir tatsächlich und wissentlich bereit, für unseren Wohlstand die grobe Verletzung sozialer und ökologischer Minimalstandards in ärmeren Ländern der Dritten Welt zu tolerieren?

Die Mehrheit der Schweizerinnen und Schweizer sagte am 29.11.2020 Ja zu mehr Unternehmensverantwortung und damit zu ökologischer und sozialer Nachhaltigkeit. Die Initiative scheiterte jedoch am sogenannten Ständemehr der vielen bevölkerungsarmen ländlichen Kantone. Die Schweiz bleibt (vorerst) ein sicheres Versteck für Rohstoffkonzerne, die in Ländern der Dritten Welt ein undurchschaubares Netz von Tochterfirmen und abhängigen Lieferanten betreiben. Die betroffenen Menschen, die unter den Folgen des Rohstoffabbaus in Form von Umwelt- und Gesundheitsschäden leiden, sind weiterhin auf das Engagement von Hilfsorganisationen angewiesen, um auf ihre Situation aufmerksam machen zu können und konkrete Hilfe zu erhalten.

Auch an der Verschiebung der Gewinne und Steuern vom Ort der eigentlichen Wertschöpfung aus Drittweltstaaten in sogenannte Steueroasen wird sich (vorerst) nichts ändern. Die Finanzbranche sowie eine große Anzahl von Politikern, Treuhändern, Anwälten, Immobilienmaklern, Unternehmern und einfachen Steuerzahlern in gewissen Tiefsteuerkantonen der Schweiz (und in anderen Steuerparadiesen) profitieren massiv von diesen riesigen Geldströmen und Vermögen sowie von den daraus resultierenden Unternehmens-, Einkommens- und Vermögenssteuern, Sponsorengeldern, Spenden und anderen Zuwendungen. Sie haben wenig Interesse, daran etwas zu ändern.

Veränderungen liegen jedoch in der Luft. Gerade ein zutiefst demokratisches Land wie die Schweiz hat es bisher immer geschafft, notwendige Korrekturen vorzunehmen und tragfähige Kompromisse zu finden. Den Dissens offen, aber respektvoll auszutragen und die Anliegen verschiedener Interessengruppen lösungsorientiert in einen nachhaltigen Konsens einzubinden braucht Zeit. Dafür sind die so herbeigeführten Veränderungen in der Regel nachhaltig und von breit abgestützt. Immerhin trat als Folge der KVI ein Gesetz in Kraft, das Konzerne mit Steuersitz in der Schweiz zu einer Selbstdeklaration bezüglich Einhaltung bestimmter Menschenrechte verpflichtet, allerdings ohne Haftungsklausel für Verstöße gegen Umwelt- und Menschenrechtsstandards im Ausland. Es bleibt zu hoffen, dass das Ergebnis mehr sein wird als weitere Hochglanzbroschüren der Konzerne ohne Substanz. Es bleibt zu hoffen, dass in Zukunft noch mehr Menschen und Unternehmen erken-

nen, dass ökologische und soziale Nachhaltigkeit für den sozialen Frieden und das Überleben der Menschheit auf unserem Planeten mindestens genauso wichtig ist wie der finanzielle Profit einzelner egoistisch agierender Personen und Konzerne. Die Privatisierung der unglaublich großen Gewinne in der Rohstoff- und Finanzbranche einerseits und die Verallgemeinerung der immensen Kosten für Schäden an Mensch und Umwelt andererseits sind nicht mehr zeitgemäß. Verantwortungsvolles wirtschaftliches Handeln wird zu Recht immer stärker eingefordert.

Viele verantwortungsvolle Unternehmen integrieren die Nachhaltigkeit bereits in ihre Zielesysteme. *Was können Ingenieurinnen und Ingenieure in ihrem konkreten Arbeitsumfeld tun*, damit Nachhaltigkeit tatsächlich immer mehr zur Normalität wird? *Hier sind ein paar Vorschläge.*

1. Entwickeln Sie langlebige Produkte, die sich reparieren lassen. Dies senkt in der Regel den Ressourcenverbrauch.
2. Beziehen Sie den Gedanken des Recyclings bzw. einer Kreislaufwirtschaft in Ihre Produktentwicklungen ein. Sortenreine Werkstoffe (keine Verbundwerkstoffe) erleichtern das Recycling.
3. Achten Sie darauf, dass Ihre Produktions- und Logistikprozesse möglichst wenig Treibhausgase erzeugen. Moderne Produktionsstätten nutzen bereits einen hohen Anteil regenerativer Energien und die Möglichkeiten der Wärmerückgewinnung.
4. Verschmutzen Sie die Umwelt nicht mit giftigen Abwässern, Abgasen, Plastikmüll oder Mikroplastik. Nutzen Sie die modernen Technologien der Abwasseraufbereitung, Luftfilterung oder zeitgemäße Verpackungskonzepte.
5. Achten Sie auf die Einhaltung ökologischer und sozialer Standards auch in den globalen Lieferketten Ihres Unternehmens.
6. Nehmen Sie ihre Verantwortung für ökologische und soziale Nachhaltigkeit auch als Konsumentin oder Konsument wahr. Das mit Abstand billigste Produkt ist in der Regel nicht das Nachhaltigste. Belohnen Sie nachhaltige Unternehmen mit Ihrem Kaufverhalten. In einer Marktwirtschaft überleben nur Unternehmen, deren Produkte und Dienstleistungen auch gekauft werden.

Werkstoffe werden aus Rohstoffen hergestellt. Und diese sind nicht unendlich verfügbar. Es ist ein Gebot der Vernunft, verantwortungsvoll und nachhaltig damit umzugehen. Nachhaltigkeit hat eine ökologische, aber auch eine ethische und soziale Komponente. Dafür tragen wir als Menschen, Konsumenten und Stimmbürger eine Verantwortung.

1.8 Aufgaben

Aufgabe 1.1 Ordnen Sie bitte die Begriffe der Gruppe 1 und der Gruppe 2 paarweise richtig zu.

Gruppe 1: Metallbindung, Atombindung, Ionenbindung, zwischenmolekulare Bindung.
Gruppe 2: Aluminiumoxid, Gold, Silizium, Polyethylen.

Aufgabe 1.2 Was ist der Unterschied zwischen Quarz und Quarzglas?

Aufgabe 1.3 Was ist eine Elementarzelle?

Aufgabe 1.4 In welchen drei Kristallstrukturen erstarren die meisten Metalle? Nennen Sie bitte je drei Beispiele für jede Kristallstruktur.

Aufgabe 1.5 Was sind typische Abstände von benachbarten Atomen oder Ionen in Kristallgittern? Was sind typische Korngrößen in polykristallinen Werkstoffen?

Aufgabe 1.6 Walzen und Ziehen von Blechen und Drähten können zu Texturen führen. Was ist ein Werkstoff mit einer Textur? Kreuzen Sie bitte die richtigen Antworten an.

☐ Ein Werkstoff, der nur aus einem Kristall besteht.
☐ Ein Werkstoff, der aus vielen Kristallen mit einer Vorzugsorientierung besteht.
☐ Ein Werkstoff, dessen Eigenschaften richtungsabhängig sind (Anisotropie).
☐ Ein Werkstoff, dessen Eigenschaften nicht richtungsabhängig sind (Isotropie).
☐ Ein amorpher Werkstoff.

Aufgabe 1.7 Ordnen Sie bitte folgende Werkstoffe richtig in die Kategorien anisotrop, isotrop und quasiisotrop ein, entsprechend der Richtungsabhängigkeit ihrer Eigenschaften: Fensterglas, einkristalliner Galliumarsenid-Wafer, Eisenblech mit Textur, Aluminiumblech ohne Textur, Saphir (einkristallines Aluminiumoxid), polykristallines Zirkoniumoxid für Zahnimplantate, amorphe Eisenlamellen für Transformatoren.

Aufgabe 1.8 Werkstoffe wie Eisen, Siliziumoxid, Kohlenstoff, Formgedächtnislegierungen Nitinol oder Zirkoniumoxid können je nach Temperatur oder Vorgeschichte bei der Herstellung verschiedene Kristallstrukturen aufweisen. Welcher Fachbegriff beschreibt dieses Verhalten?

☐ Enthalpie
☐ Polymorphie
☐ Isotropie
☐ Kristallographie

Aufgabe 1.9 Es gibt einphasige und mehrphasige Werkstoffe. Ordnen Sie bitte diesen beiden Kategorien richtig zu: Gusseisen mit Kugelgraphit, Gold, Glasfaser-verstärkter Kunststoff, homogenes Gefüge, heterogenes Gefüge, Fensterglas, verschiedene Kristallsorten im selben Werkstoff.

Aufgabe 1.10 Nennen Sie drei Möglichkeiten, wie Sie als zukünftige Ingenieurin oder Ingenieur in einer Produktentwicklung dazu beitragen können, ökologisch nachhaltige Produkte zu entwickeln.

Zusammenfassung
Die Art der Bindung übt einen wesentlichen Einfluss auf die Eigenschaften der verschiedenen Werkstoffklassen aus. Die Metallbindung mit ihrem „Elektronengas“ frei beweglicher Valenzelektronen führt zu einer guten thermischen und elektrischen Leitfähigkeit. Keramiken und anorganische Gläser basieren auf der Ionenbindung. Benachbarte Halbleiteratome bilden in der kovalenten Atombindung gemeinsame Elektronenpaare. Die primäre Bindung in den Makromolekülen von Kunststoffen ist ebenfalls kovalent. Festigkeitsbestimmend sind jedoch die schwächeren zwischenmolekularen Bindungen der Polymerketten.
Werkstoffe könne amorph oder kristallin sein. Amorphe Werkstoffe verhalten sich isotrop, d. h., es besteht keine Richtungsabhängigkeit der Eigenschaften. Die Eigenschaften einkristalliner Werkstoffe und polykristalliner Materialien mit Textur sind anisotrop. Polykristalline Werkstoffe ohne Textur verhalten sich quasiisotrop.
Werkstoffe wie Eisen und Stahl, Siliziumoxid, Zirkoniumoxid oder Nickel-Titan-Formgedächtnislegierungen können verschiedene Kristallstrukturen annehmen. Diese Polymorphie führt zu ganz besonderen Eigenschaften und Anwendungen.
Werkstoffe können aus einer oder aus mehreren Phasen bzw. Kristallsorten bestehen. In einphasigen Werkstoffen liegen homogene Gefüge mit einer Kristallsorte vor, in mehrphasigen handelt es sich um heterogene Gefüge mit mehreren Kristallsorten.
Werkstoffe werden aus Rohstoffen hergestellt. Die globalisierte Rohstoffbranche wird ihrer Verantwortung für nachhaltiges und faires Wirtschaften nicht immer gerecht. Verschiedene Industrienationen versuchen, international gültige ökologische und soziale Standards zum Schutz von Mensch und Umwelt einzuführen. Aber auch Ingenieurinnen und Ingenieure sowie Konsumentinnen und Konsumenten verfügen über Mittel, um zur Einhaltung ökologischer und sozialer Standards in globalen Wertschöpfungsketten und damit zu mehr Nachhaltigkeit beizutragen.