

Werkstoffe

H. Czichos
B. Skrotzki
F.-G. Simon

1 Übersicht

1.1 Der Materialkreislauf

Die Prozesse und Produkte der Technik erfordern zu ihrer Realisierung eine geeignete materielle Basis. *Material* ist die zusammenfassende Bezeichnung für alle natürlichen und synthetischen Stoffe, Materialforschung, Materialwissenschaft und Materialtechnik sind die sich mit den Stoffen befassenden Gebiete der Forschung, Wissenschaft und Technik.

Werkstoffe im engeren Sinne nennt man Materialien im festen Aggregatzustand, aus denen Bauteile und Konstruktionen hergestellt werden können [1]. Bei den *Konstruktionswerkstoffen* stehen die mechanisch-technologischen Eigenschaften im Vordergrund. *Funktionswerkstoffe* sind Materialien, die besondere

funktionelle Eigenschaften, z. B. physikalischer und chemischer Art oder spezielle technisch nutzbare Effekte realisieren, z. B. optische Gläser, Halbleiter, Dauermagnetwerkstoffe [2].

Die *Energieträger*, wie Kraftstoffe, Brennstoffe, Explosivstoffe gehören im strengen Sinne nicht zu den genannten Gruppen, d. h. sie sind als Materialien, aber nicht als Werkstoffe zu bezeichnen. Den stofflichen Grundprozess der gesamten Technik fasst der im Bild 1-1 skizzierte Materialkreislauf zusammen. Er stellt den Weg der (späteren) Materialien von den natürlichen Vorräten über Rohstoffe, Werkstoffe zu technischen Produkten dar und ist durch die Aufeinanderfolge unterschiedlichster Technologien gekennzeichnet:

- Rohstofftechnologien zur Ausnutzung der natürlichen Ressourcen,

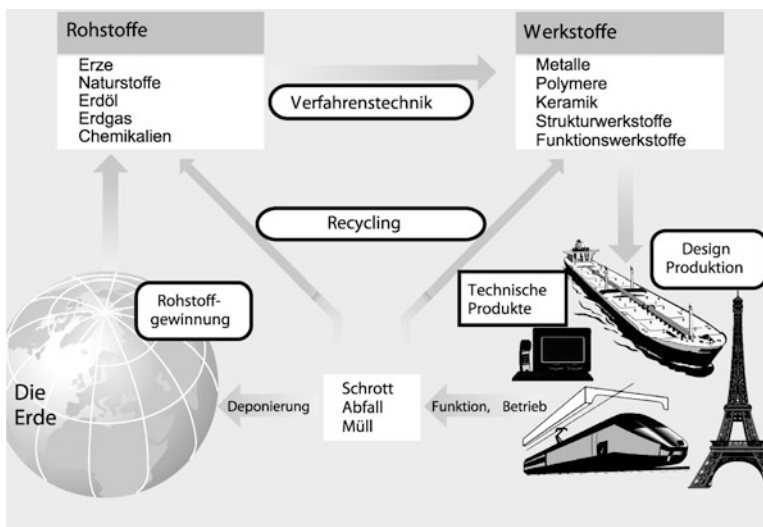


Bild 1-1. Der Materialkreislauf

- Werkstofftechnologien zur Erzeugung von Werkstoffen und Halbzeugen aus den Rohstoffen,
- Konstruktionsmethoden und Produktionstechnologien für Entwurf und Fertigung von Bauteilen und technischen Produkten,
- Betriebs-, Wartungs- und Reparaturtechnologien zur Gewährleistung von Funktionsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit des Betriebs,
- Wiederaufbereitungs- und Rückgewinnungstechnologien zur Schließung des Materialkreislaufs durch Recycling oder – falls dies nicht möglich ist – durch Deponierung.

Unter wirtschaftlichen Aspekten ist der Materialkreislauf auch als Wertschöpfungskette zu betrachten. Die für technische Produkte benötigten Konstruktions- und Funktionswerkstoffe müssen dem jeweiligen Anwendungsprofil entsprechen und gezielt bezüglich Material- und Energieverbrauch, Qualität, Zuverlässigkeit, Wirtschaftlichkeit, Gebrauchsdauer, Umweltschutzerfordernissen usw. optimiert werden.

1.2 Werkstoffe in Kultur, Wirtschaft, Technik und Umwelt

Kultur- und Technikgeschichte der Werkstoffe

Werkstoffe bilden die stoffliche Basis aller von Menschen geschaffenen Erzeugnisse: von den Gebrauchsgegenständen der Kupfer-, Bronze- und Eisenzeit bis zu den heutigen „High-Tech-Produkten“. Materialeigenschaften prägen damit nicht nur das Erscheinungsbild und die Originalität von Kulturgütern und Kunstwerken [3], sondern auch die Funktionalität technischer Bauteile und Konstruktionen. Die folgenden Stichworte geben eine kurze Übersicht über kulturelle und technische Entwicklungen:

Kulturgeschichte

- Altsteinzeit vor etwa 10 000 Jahren
 - Jungsteinzeit, 8000 bis 7000 v. Chr.
 - Kupferzeit, 7000 bis 3000 v. Chr.
 - Bronzezeit, 3000 bis 1000 v. Chr.
 - Eisenzeit seit Mitte 2. Jahrtausend v. Chr.
- „Eiserne Engel“
- Maschinen von der Antike bis zur industriellen Revolution (Walter Kiaulehn)

Werkstoffe im 20. Jahrhundert:

Basis für Technologien und Industrien [4]

- Aluminiumlegierungen seit den 20ern → Flugzeugbau, Luftfahrtindustrie
- Hartmetalle seit den 30ern → Fertigungs-, Produktionstechnik
- Polymere seit den 40ern → Kunststoffe, Chemische Industrie
- Superlegierungen seit den 50ern → Düsentrriebwerke, Turbinenbau
- Halbleiter seit den 60ern → Transistortechnik, Elektronikindustrie
- Neue Keramiken seit den 70ern → „High-Tech-Industrien“
- Bio-Materialien seit den 80ern → Biotechnologien, Medizintechnik
- Nano-Materialien seit den 90ern → Mikro- und Nanotechnik

Wirtschaftliche Bedeutung

„Leistungsfähigkeit, Wirtschaftlichkeit und Akzeptanz industrieller Produkte und Systeme hängen entscheidend von den eingesetzten Materialien ab. Die zentrale Rolle von Materialien und maßgeschneiderten Werkstoffen für die Entwicklung zukunftsorientierter Technologien ist einer breiteren Öffentlichkeit jedoch kaum bewusst und wird oft verkannt, da die eingesetzten Materialien vielfach hinter das fertige System oder das Endprodukt zurücktreten. Die technologische und volkswirtschaftliche Bedeutung von Materialien liegt vor allem in den Produkt- und Systeminnovationen, die sie ermöglichen.“ (Wissenschaftsrat, 1996 [5]).

Die wirtschaftliche Bedeutung des Produktionsfaktors Material geht z. B. aus Tabelle 1-1 hervor.

Ressourcen für Werkstoffe

Die Erzeugung von Metallen, Baustoffen und Kunststoffen basiert naturgemäß auf der Welt-Rohstoffförderung. Tabelle 1-2 gibt einen Überblick über die Weltproduktion in den Jahren 2000 und 2009 von zahlreichen Rohstoffen. Für die meisten Rohstoffe ist ein deutlicher Anstieg zu verzeichnen. Die Energierohstoffe Kohle, Erdöl und Erdgas sind ebenfalls aufgeführt. Als Ressource für die Herstellung

Tabelle 1-1. Materialien als Produktionsfaktor der Wirtschaft (Quelle: Statist. Jahrbuch für die Bundesrepublik Deutschland 2008)

– Kraftfahrzeugbau	
Bruttoproduktionswert	344,0 Mrd. €, davon
– Materialverbrauch	55,9%
– Personalkosten	14,8%
– Sonstiges	29,3%
– Maschinenbau	
Bruttoproduktionswert	237,8 Mrd. €, davon
– Materialverbrauch	44,1%
– Personalkosten	24,2%
– Sonstiges	31,7%
– Chemische Industrie	
Bruttoproduktionswert	137,6 Mrd. €, davon
– Materialverbrauch	44,6%
– Personalkosten	14,8%
– Sonstiges	40,6%
– Elektrische Ausrüstungen	
Bruttoproduktionswert	106,8 Mrd. €, davon
– Materialverbrauch	39,6%
– Personalkosten	26,2%
– Sonstiges	34,2%
– Datenverarbeitungsgeräte, elektrische und optische Erzeugnisse	
Bruttoproduktionswert	80,6 Mrd. €, davon
– Materialverbrauch	40,3%
– Personalkosten	22,0%
– Sonstiges	37,7%

von Werkstoffen und anderen Chemieprodukten werden nur etwa 8% des Erdöls genutzt. Der Anteil von Kohle, Erdöl und Erdgas am Primärenergieverbrauch betrug 2010 in Deutschland 23, 34 bzw. 22%.

Die derzeit bekannten Vorräte führen unter den jetzigen Verbrauchsbedingungen zu geschätzten Nutzungsdauern von etwa 200, 40 bzw. 60 Jahren. Die statische Nutzungsdauer der Metalle (Momentaufnahme eines dynamischen Systems) variiert zwischen 20 und 40 Jahren; sie liegt bei Aluminium (Bauxit) und Eisenerz bei über 100 Jahren.

Der spezifische Energiebedarf für die Erzeugung von Stahl, Kunststoffen und Aluminium ist in Tabelle 1-3 dargestellt [6, 7]. Die Analyse des Energieverbrauchs für ein technisches Produkt hat den kumulierten Energiebedarf im Materialkreislauf zu berücksichtigen, der sich als Summe des Energieverbrauchs für die Herstellung, bei der Nutzung und für die Entsorgung des Produktes ergibt.

Tabelle 1-2. Weltproduktion von mineralischen Rohstoffen und *Energierohstoffen*. Bei den Metallen beziehen sich die Zahlenwerte auf den Metallgehalt, wenn nicht ausdrücklich das Erz genannt wird

Rohstoff	Weltjahresproduktion (1000 t, Erdgas in 10 ⁶ m ³)	
	2000	2009
Kohle	4 310 000	6 938 000
Rohöl	3 583 000	3 714 000
Erdgas	2 509 000	3 093 000
Eisenerz	1 083 000	2 248 000
Salz	211 400	266 700
Bauxit	139 000	199 000
Phosphat	133 000	159 000
Gips	98 100	132 700
Schwefel	52 000	64 200
Pottasche	26 900	20 700
Aluminium	24 600	36 900
Kaolin	22 400	21 000
Magnesit	20 100	24 300
Chromerze	14 700	18 700
Feldspat	13 000	20 171
Kupfer	13 200	18 300
Bentonit	11 400	14 200
Zink	8800	11 400
Talk	7700	8600
Baryt	6000	7100
Titanoxid	4900	5300
Flussspat	4300	5800
Blei	3100	3900
Nickel	1227	1412
Zirkon	1016	1320
Brom	544	520
Zinn	249	279
Molybdän	136	231
Antimon	118	179
Vanadium	62	58
Wolfram	30,6	62,3
Kobalt	34	59
Uran	34,8	50,7
Jod	18,9	29,2
Silber	18,2	22,2
Cadmium	19,4	20,1
Wismut	4,2	3,7
Gold	2,56	2,46
Quecksilber	1,4	1,7
Platin-Metalle	0,45	0,429
Diamanten	0,022	0,024

Quelle: British Geological Survey, World Mineral Production, Keyworth, Nottingham, UK

Tabelle 1–3. Abschätzung des spezifischen Energiebedarfs für die Erzeugung von Werkstoffen

Werkstoff	spezifischer Energiebedarf MJ/kg
Aluminium (Halbzeug)	
Primäraluminium (aus Bauxit)	160 ... 240
Sekundäraluminium (auf Schrottbasis)	12 ... 20
Kunststoffe (Granulat)	
Polyvinylchlorid	48
Polyethylen	68
Polystyrol	75
Stahl (Halbzeug)	
Oxygenstahl (auf Erzbasis)	16 ... 27
Elektrostahl (auf Schrottbasis)	10 ... 18

Werkstoffe und die Eigenschaften technischer Produkte

Wie ebenfalls aus dem Materialkreislauf, Bild 1–1, abgelesen werden kann, werden Werkstoffe durch Konstruktion und Fertigung in technische Produkte „transformiert“, formelartig geschrieben:

Werkstoff $\xrightarrow[\text{Fertigung}]{\text{Konstruktion}}$ technisches Produkt

Informationsbezogen kann das heißen: Kenntnis der Beschaffenheit und des Verhaltens der Werkstoffe ist Voraussetzung einer erfolgreichen Konstruktion. Stoffbezogen: Die Verfügbarkeit und Verwendung von technologisch und funktionell geeigneten Stoffen ist Voraussetzung guter Produktionsqualität. Auch drückt die Formel die Tatsache aus, dass durch ingenieure Konstruktion und Fertigung die Werkstoffeigenschaften in eine Fülle von Produkteigenschaften aufgefächert und übersetzt werden können.

Ein besonders für Erwerber und Benutzer wichtiges Merkmal technischer Produkte ist deren Qualität, sie ist eng mit den Merkmalen Zuverlässigkeit und Sicherheit verknüpft. *Qualität* ist die Beschaffenheit einer Betrachtungseinheit bezüglich ihrer Eignung, festgelegte und vorausgesetzte Erfordernisse und Funktionen zu erfüllen. *Zuverlässigkeit* ist die Eigenschaft, funktionstüchtig zu bleiben. Sie ist definiert als die Wahrscheinlichkeit, dass ein Werkstoff,

Bauteil oder System seine bestimmungsgemäße Funktion für eine bestimmte *Gebrauchsdauer* unter den gegebenen Funktions- und Beanspruchungsbedingungen ausfallfrei, d. h. ohne Versagen, erfüllt. *Sicherheit* ist die Wahrscheinlichkeit, dass von einer Betrachtungseinheit während einer bestimmten Zeitspanne keine Gefahr ausgeht, bzw. dass das Risiko – gekennzeichnet durch Schadenswahrscheinlichkeit und Schadensausmaß – unter einem vertretbaren Grenzkrisiko bleibt.

Die Beurteilung der Qualität, Zuverlässigkeit und Sicherheit von Werkstoffen, Bauteilen oder Systemen geschieht mit den Mitteln der Materialprüfung, siehe Kap. 11. Dabei ist insbesondere auch festzustellen, inwieweit oder auf welche Weise die Ergebnisse von Werkstoffprüfungen auf Bauteile oder Systeme übertragen werden können.

Werkstoffe und die Umwelt

Bild 1–1 erinnert daran, dass Werkstoffe als Bestandteile technischer Produkte bei deren technischer Funktion in Wechselwirkung mit ihrer Umwelt stehen. Die Wechselwirkungen beschreibt man allgemein als den einen oder anderen von zwei komplementären Prozessen:

- *Immission*, die Einwirkung von Stoffen oder Strahlung auf einen Werkstoff, die z. B. zur Korrosion führen kann.
- *Emission*, der Austritt von Stoffen oder Strahlung (auch Schall). Eine Emission aus einem Werkstoff ist in der Regel gleichzeitig eine Immission in die Umwelt.

Auf Umweltbeanspruchung und Umweltsimulation wird in Kap. 8.4 näher eingegangen.

Zum Schutz der Umwelt – und damit des Menschen – bestehen gesetzliche Regelungen für den Emissions- und Immissionsschutz mit Verfahrensregelungen und Grenzwerten für schädliche Stoffe und Strahlungen. Hinsichtlich des Umweltschutzes sind an die Werkstoffe selbst hauptsächlich die folgenden Forderungen zu stellen:

- *Umweltverträglichkeit*, die Eigenschaft, bei ihrer technischen Funktion die Umwelt nicht zu beeinträchtigen (und andererseits von der jeweiligen Umwelt nicht beeinträchtigt zu werden).

Tabelle 1–4. Recyclingquoten von Werkstoffen bezogen auf den Verbrauch

Werkstoff	Recyclingquote %
Aluminium	35
Blei	59
Kupfer	54
Eisen	55
Zink	41

Quelle: BGR, Rohstoffwissenschaftliche Steckbriefe, 2006

- *Recyclierbarkeit* (siehe auch Kap. 7.2), die Möglichkeit der Rückgewinnung und Wiederaufbereitung nach dem bestimmungsgemäßen Gebrauch. Einen Eindruck von den gegenwärtig erzielbaren Recyclingquoten von Metallen in Deutschland gibt Tabelle 1–4.
- *Abfallbeseitigung*, die Möglichkeit der Entsorgung von Material, wenn ein Recycling nicht möglich ist [9].

Nach dem Vorbild der Stoffkreisläufe in der belebten Natur sind heute auch für die Materialien der Technik im Prinzip stets geschlossene Kreisläufe anzustreben und ggf. durch „Ökobilanzen“ zu kennzeichnen. Auf die Wechselwirkungen von Material und Umwelt wird in Kap. 7 näher eingegangen.

1.3 Gliederung des Werkstoffgebietes

Für die fachliche Gliederung des Werkstoffgebietes gibt es mehrere Aspekte, die mit den Methoden der Systemtechnik kombiniert werden können. Werkstoffe sind bestimmungsgemäß Bestandteil von Gegenständen oder technischen Systemen. Jedes technische System ist durch die beiden Merkmale *Funktion* und *Struktur* gekennzeichnet, vgl. K 2. Entwicklung und Anwendung technischer Systeme erfordern neben der Kennzeichnung struktureller und funktioneller Eigenschaften Mess- und Prüftechniken zur Beurteilung des Systemverhaltens sowie Auswahl- und Gestaltungsmethoden für ihre Bauelemente.

Für das Werkstoffgebiet ist ein mehrdimensionales Gliederungsschema mit folgenden Schwerpunkten zweckmäßig:

- a) *Aufbau der Werkstoffe*: Stoffliche Natur, unterschiedlich hinsichtlich chemischer Zusammensetzung, Bindungsart und Mikrostruktur.
- b) *Beanspruchung*: Einflüsse, die auf Werkstoffe bei der Anwendung einwirken, deren Parameter und zeitlicher Verlauf.
- c) *Eigenschaften*: Kenngrößen und Systemdaten, die das Verhalten von Werkstoffen gegenüber den verschiedenen Beanspruchungen und in ihren technisch-funktionellen Anwendungen beschreiben.
- d) *Schädigungsmechanismen*: Veränderungen der Stoff- oder Formeigenschaften von Werkstoffen bzw. Bauteilen, die deren Funktion beeinträchtigen können.
- e) *Materialprüfung*: Techniken und Methoden zur Untersuchung und Beurteilung von Materialien, Bauteilen und Konstruktionen.
- f) *Materialauswahl*: Techniken und Methoden zur anwendungsbezogenen Auswahl von Materialien.
- g) *Referenzmaterialien und Referenzverfahren* zur Qualitätssicherung des Materialverhaltens in technischen Anwendungen.

2 Aufbau der Werkstoffe

Der Aufbau eines Werkstoffs ist durch folgende Merkmale bestimmt:

- a) Die chemische Natur seiner atomaren oder molekularen Bausteine.
- b) Die Art der Bindungskräfte (Bindungsart) zwischen den Atomen bzw. Molekülen.
- c) Die atomare Struktur, das ist die räumliche Anordnung der Atome bzw. Moleküle zu elementaren kristallinen, molekularen oder amorphen Strukturen, diese bilden bei kristallinen Stoffen *Elementarzellen*, die als eigentliche Grundbausteine des Stoffs angesehen werden können.
- d) Die *Kristallite* oder *Körner*, das sind einheitlich aufgebaute Bereiche eines polykristallinen Stoffs, die durch sog. Korngrenzen voneinander getrennt sind.
- e) Die *Phasen* der Werkstoffe, das sind Bereiche mit einheitlicher atomarer Struktur und chemischer Zusammensetzung, die durch Grenzflächen (Phasengrenzen) von ihrer Umgebung abgegrenzt sind.
- f) Die *Gitterbaufehler*, das sind Abweichungen von der idealen Kristallstruktur:
 - Punktfehler: Fremdatome, Leerstellen, Zwischengitteratome, Frenkel-Defekte

- Linienfehler: Versetzungen
- Flächenfehler: Stapelfehler, Korngrenzen, Phasengrenzen

g) Die Mikrostruktur oder das *Gefüge*, das ist der mikroskopische Verbund der Kristallite, Phasen und Gitterbaufehler.

2.1 Aufbauprinzipien von Festkörpern

Alle Materie ist aus den im Periodensystem der Elemente zusammengefassten Atomen aufgebaut (siehe C 2 und C 4). Die Bindung zwischen je zwei Atomen eines Festkörpers resultiert aus elektrischen Wechselwirkungen zwischen den beiden Partnern, siehe Bild 2-1. Die Überlagerung der Abstoßungs- und Anziehungsenergien (oder Potenziale) führt zu einem Potenzialminimum, dessen Tiefe die Bindungsenergie U_B und dessen Lage den Gleichgewichtsabstand r_0 (Größenordnung 0,1 nm) angibt.

Die chemischen Bindungen zwischen den Elementarbausteinen fester Körper werden eingeteilt in (starke) Hauptvalenzbindungen (Ionenbindung, Atombindung, metallische Bindung) und (schwache) Nebenvalenzbindungen:

Ionenbindung (heteropolare Bindung): Jedes Kation gibt ein oder mehrere Valenzelektronen an ein oder mehrere Anionen ab. Bindung durch ungerichtete elektrostatische (Coulomb-)Kräfte zwischen den Ionen.

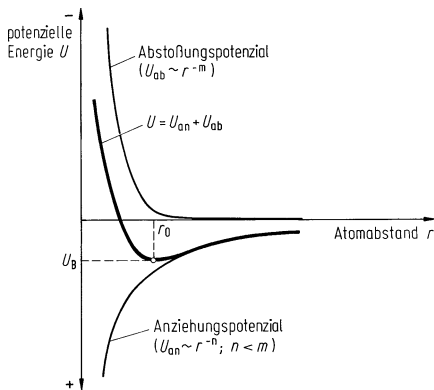


Bild 2-1. Wechselwirkungsenergien zwischen zwei isolierten Atomen (U_B Bindungsenergie; r_0 Gleichgewichtsabstand)

Atombindung (homöopolare oder kovalente Bindung): Gemeinsame (Valenz-)Elektronenpaare zwischen nächsten Nachbarn; gerichtete Bindung mit räumlicher Lokalisierung der bindenden Elektronenpaare.

Metallische Bindung: Gemeinsame Valenzelektronen aller beteiligten Atome (Elektronengas); ungerichtete Bindung zwischen dem Elektronengas und den positiv geladenen Atomrümpfen.

Van-der-Waals-Bindung: Interne Ladungspolarisation (Dipolbildung) benachbarter Atome oder Moleküle; schwache elektrostatische Dipoladsorptionsbindung. Aus der Bindungsart und den Atomabständen (bzw. den Molekülformen) der Elementarbausteine ergeben sich die elementaren Kristallstrukturen fester Stoffe. Die atomaren Bestandteile von Kristallen sind wie die Knoten eines räumlichen Punktgitters (Raumgitters) angeordnet, das entsteht, wenn drei Scharen paralleler Ebenen (Netzebenen) sich kreuzend durchdringen. Das kleinste Raumelement, durch dessen wiederholte Verschiebung um die jeweilige Kantenlänge in jeder der drei Achsrichtungen man sich ein Raumgitter aufgebaut denken kann, wird als *Elementarzelle* bezeichnet. Die möglichen Raumgitter der Kristalle werden durch 7 Koordinatensysteme bzw. 14 Bravais-Gittertypen gekennzeichnet, siehe Bild 2-2.

Die Lage eines Atoms in der Elementarzelle eines Kristalls wird durch den Ortsvektor

$$\mathbf{r} = x\mathbf{a} + y\mathbf{b} + z\mathbf{c} \quad (0 \leq x, y, z < 1)$$

beschrieben, wobei \mathbf{a} , \mathbf{b} , \mathbf{c} die Einheitsvektoren auf den drei kristallographischen Achsen a , b , c eines Kristallgitters und x , y , z die Koordinaten des Atoms darstellen. Ein Gitterpunkt mit den Koordinaten uvw wird gefunden, indem vom Koordinatenursprung aus der Vektor $u\mathbf{a}$ in a -Richtung, $v\mathbf{b}$ in b -Richtung und $w\mathbf{c}$ in c -Richtung zurückgelegt wird. Mit der Verbindungsgeraden vom Koordinatenursprung zum Gitterpunkt uvw kann auch eine *Richtung* im Gitter beschrieben werden: $[uvw]$. Damit ist gleichzeitig auch eine *Fläche* charakterisiert, nämlich diejenige Fläche, deren Flächennormale die Richtung vom Koordinatenursprung zum Punkt uvw hat. Zur Bezeichnung einer Kristallfläche oder einer Schar von parallelen Gitterebenen dienen Miller'sche Indizes: die durch Multiplikation mit dem Hauptnenner

ganzzahlig gemachten reziproken Achsabschnitte der betreffenden Fläche. In Bild 2-3 ist die Koordinatenschreibweise am Beispiel eines kubischen Gitters illustriert.

Während ideale Kristalle durch eine regelmäßige Anordnung ihrer Elementarbausteine gekennzeichnet sind (Fernordnung), besteht bei *amorphen* Festkörpern nur eine strukturelle Nahordnung im Bereich der nächsten Nachbaratome. Sie ähneln Schmelzen und werden daher auch als *Gläser*, d. h. als unterkühlte,

in den festen Zustand eingefrorene Flüssigkeiten bezeichnet.

Als *einphasige* Festkörper werden feste Stoffe mit einheitlicher chemischer Zusammensetzung und atomarer Struktur bezeichnet. Die unterschiedlichen Zustände mehrphasiger Festkörper werden – in Abhängigkeit von der chemischen Zusammensetzung und der Temperatur – durch *Zustandsdiagramme* beschrieben (s. 2.7).


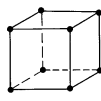
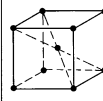
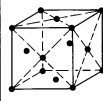
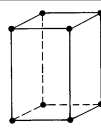
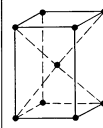
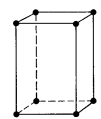
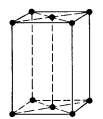
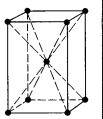
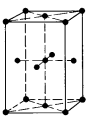
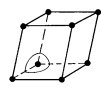
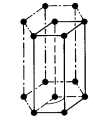
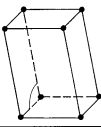
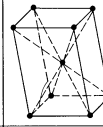
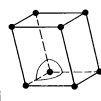
Kristallsystem	einfach	basisflächen-zentriert	raum-zentriert	flächen-zentriert
kubisch  $a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$				
tetragonal $a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$				
orthorhombisch $a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$				
rhomboedrisch $a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$				
hexagonal $a = b \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ$ $\gamma = 120^\circ$				
monoklin $a \neq b \neq c$ $\alpha = \gamma = 90^\circ$ $\beta \neq 90^\circ$				
triklin $a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma$				

Bild 2-2. Die 7 Kristallsysteme und die 14 Bravais-Gitter

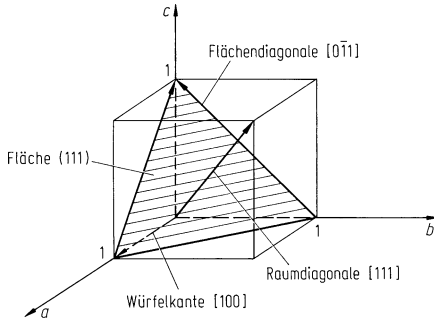


Bild 2-3. Indizierung von Richtungen und Ebenen in einem kubischen Gitter

2.2 Mikrostruktur

Der mikrostrukturelle Aufbau technischer Werkstoffe unterscheidet sich von der idealer Festkörper durch Gitterbaufehler, die für die Werkstoffeigenschaften von grundlegender Bedeutung sind. Nach ihrer Geometrie ist folgende Klassifizierung üblich:

a) Nulldimensionale Gitterbaufehler (Punktfehler), siehe Bild 2-4:

Es werden neben der Substitution von Gitterbausteinen durch Fremdatome die folgenden Grundformen unterschieden:

- Leerstellen: Jeder Kristall enthält eine mit der Gittertemperatur zunehmende Anzahl von Leerstellen. Der Anteil der Leerstellen bezogen auf die Zahl der Gitterbausteine in einem fehlerfreien Kristall beträgt bei Raumtemperatur ca. 10^{-12} . Die Bildungsenergie für Leerstellen ist in Metallen etwa der Verdampfungsenthalpie proportional. Durch Punktfehler in Kristallen mit Ionenbindung entsteht im Gitter örtlich eine positive oder negative Polarisation.
- Zwischengitteratome: In zahlreichen Kristallgittern können, besonders kleine, Gitteratome, wie z.B. H, C, N, auf Zwischengitterplätze abwandern. Die Kombination einer Leerstelle mit einem entsprechenden Zwischengitteratom heißt Frenkel-Paar oder Frenkel-Defekt.

b) Eindimensionale Gitterbaufehler (Linienfehler), siehe Bild 2-5:

Eindimensionale Gitterbaufehler stellen eine linienförmige Störung des Gitters dar und werden als

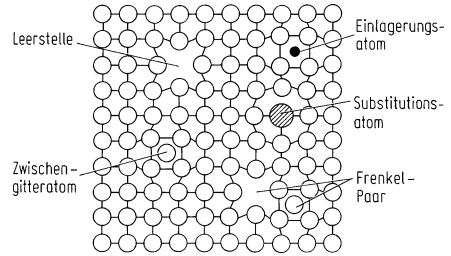


Bild 2-4. Nulldimensionale Gitterbaufehler (Punktfehler)

Versetzungen bezeichnet. Eine Versetzung lässt sich als Randlinie eines zusätzlich in das Gitter eingefügten (oder aus ihm herausgenommenen) Ebenenstückes A–B darstellen. Das Maß für die Größe der Verzerrung eines Kristallgitters durch eine Versetzung ist der Burgers-Vektor \mathbf{b} . Bei einer *Stufenversetzung* liegen Burgers-Vektor und Versetzungslinie rechtwinklig, bei einer *Schraubenversetzung* parallel zueinander. Eine Versetzungslinie muss im Gitter stets in sich geschlossen sein oder an einer Grenzfläche oder Oberfläche enden. Versetzungen ermöglichen den energetisch günstigen Elementarschritt der plastischen Deformation, bei

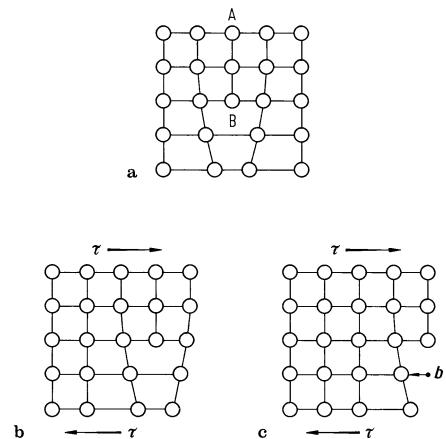


Bild 2-5. Eindimensionale Gitterbaufehler: **a** Stufenversetzung in einem kubischen Kristall, **b** Versetzungsbewegung (Abgleitung) unter Schubspannung, **c** Resultierende Gleitstufe; **b** Burgers-Vektor

dem durch eine Schubspannung τ ein Gitterblock gegenüber einem anderen stufenweise um den Betrag des Burgers-Vektors verschoben wird. Die Abgleitung erfolgt bei reinen Metallen längs bestimmter kristallographischer Ebenen (Gleitebenen) in definierten Gleitrichtungen. Das aus Gleitebene und Gleitrichtung bestehende Gleitsystem ist für Gittertyp und Bindungsart charakteristisch (siehe 9.2.3).

c) Zweidimensionale Gitterbaufehler (Flächenfehler):

Zweidimensionale Gitterbaufehler kennzeichnen diskontinuierliche Änderungen der Gitterorientierung oder der Gitterabstände. Man unterscheidet:

- Stapelfehler: Das sind Störungen der Stapelfolge von Gitterebenen. Sie erschweren die Versetzungsbewegung und beeinflussen die Verfestigung der Metalle bei plastischer Verformung.
- Korngrenzen: Grenzflächen zwischen Kristalliten gleicher Phase mit unterschiedlicher Gitterorientierung. Sie sind Übergangszonen mit gestörtem Gitteraufbau. Nach der Größe des Orientierungsunterschieds benachbarter Kristallite unterscheidet man Kleinwinkelkorngrenzen (aufgebaut aus flächig angeordneten Versetzungen) und Großwinkelkorngrenzen mit (amorphen) Grenzbereichen von etwa zwei bis drei Atomabständen.
- Phasengrenzen: Grenzflächen zwischen Gitterbereichen mit unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung oder Gitterstruktur.

Als Gefüge eines Werkstoffs bezeichnet man den kennzeichnenden mikroskopischen Verbund der Kristallite (Körner), Phasen und Gitterbaufehler. Mittlerer Korndurchmesser (beeinflussbar durch Wärmebehandlung und Umformung): wenige μm bis mehrere cm. Ein- oder mehrphasige Polykristalle mit einem Kristallitdurchmesser zwischen 5 und 15 nm und etwa gleichen Atomanteilen in Kristalliten und Grenzflächen werden als *nanokristalline Materialien* bezeichnet. Sie können nach der herkömmlichen Terminologie weder den Kristallen (ferngeordnet) noch den Gläsern (nahgeordnet) zugerechnet werden.

2.3 Werkstoffoberflächen

Gegenüber dem Werkstoffinnern weisen Oberflächen folgende Unterschiede auf:

- Veränderte Mikrostruktur;
- Veränderung der Oberflächenzusammensetzung durch Einbau von Bestandteilen des Umgebungsmediums (Physisorption, Chemisorption, Oxidation, Deckfilmbildung);
- Änderung von Werkstoffeigenschaften.

Bei technischen Oberflächen ist außerdem noch der Einfluss der Fertigung zu beachten. Spanend bearbeitete und umgeformte Oberflächen zeigen in der Oberflächenzone folgende Veränderungen:

- Unterschiedliche Verfestigung durch plastische Verformungen,
- Aufbau von Eigenspannungen infolge Oberflächenverformung,
- Ausbildung von Texturinhomogenitäten zwischen Randzone und Werkstoffinnerem.

Der Schichtaufbau technischer Oberflächen ist in Bild 2-6 wiedergegeben [1]. Die innere Grenzschicht besteht aus einer an den Grundwerkstoff anschließenden Verformungs- oder Verfestigungszone. Die äußere Grenzschicht besitzt meist eine vom Grundwerkstoff abweichende Zusammensetzung und besteht aus Oxidschicht, Adsorptionsschicht und Verunreinigungen.

Die Mikrogeometrie von Oberflächen (Oberflächenrauheit) wird durch verschiedene „Rauheitskenngrößen“ gekennzeichnet (siehe 11.3.2).

2.4 Werkstoffgruppen

Nach der dominierenden Bindungsart und der Mikrostruktur lassen sich die folgenden hauptsächlichen Werkstoffgruppen unterscheiden, siehe Bild 2-7.

Metalle

Die Atomrümpfe werden durch das Elektronengas zusammengehalten. Die freien Valenzelektronen des Elektronengases sind die Ursache für die hohe elektrische und thermische Leitfähigkeit sowie den Glanz der Metalle. Die metallische Bindung – als Wechselwirkung zwischen der Gesamtheit der Atomrümpfe und dem Elektronengas – wird durch eine Verschiebung der Atomrümpfe nicht wesentlich beeinflusst. Hierauf beruht die gute Verformbarkeit der Metalle. Die Metalle bilden die wichtigste Gruppe der

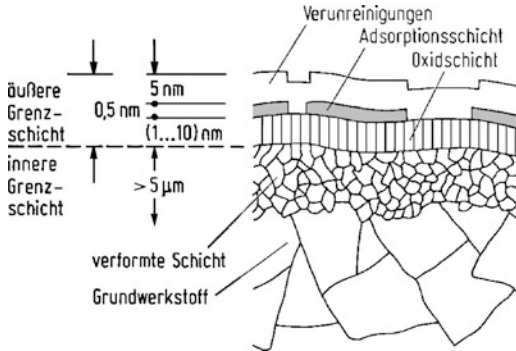


Bild 2-6. Werkstoffoberflächen-Schichtaufbau: schematische Darstellung des Querschnitts einer Metalloberfläche

Konstruktions- oder Strukturwerkstoffe, bei denen es vor allem auf die mechanischen Eigenschaften ankommt.

Halbleiter

Eine Übergangsstellung zwischen den Metallen und den anorganisch-nichtmetallischen Stoffen nehmen die Halbleiter ein. Ihre wichtigsten Vertreter sind die Elemente Silicium und Germanium mit kovalenter Bindung und Diamantstruktur sowie die ähnlich

strukturierten sog. III-V-Verbindungen, wie z. B. Galliumarsenid (GaAs) und Indiumantimonid (InSb). In den am absoluten Nullpunkt nichtleitenden Halbleitern können durch thermische Energie oder durch Dotierung mit Fremdatomen einzelne Bindungselektronen freigesetzt werden und als Leitungselektronen zur elektrischen Leitfähigkeit beitragen. Halbleiter stellen wichtige Funktionswerkstoffe für die Elektronik dar.

Anorganisch-nichtmetallische Stoffe

Die Atome werden durch kovalente Bindung und Ionenbindung zusammengehalten. Aufgrund fehlender freier Valenzelektronen sind sie grundsätzlich schlechte Leiter für Elektrizität und Wärme. Da die Bindungsenergien erheblich höher sind als bei der metallischen Bindung, zeichnen sich anorganisch-nichtmetallische Stoffe, wie z. B. Keramik, durch hohe Härten und Schmelztemperaturen aus. Eine plastische Verformung wie bei Metallen ist analog nicht begründbar, da bereits bei der Verschiebung der atomaren Bestandteile um einen Gitterabstand theoretisch eine Kation-Anion-Bindung in eine Kation-Kation- oder Anion-Anion-Abstoßung umgewandelt oder eine gerichtete kovalente Bindung aufgebrochen werden muss.

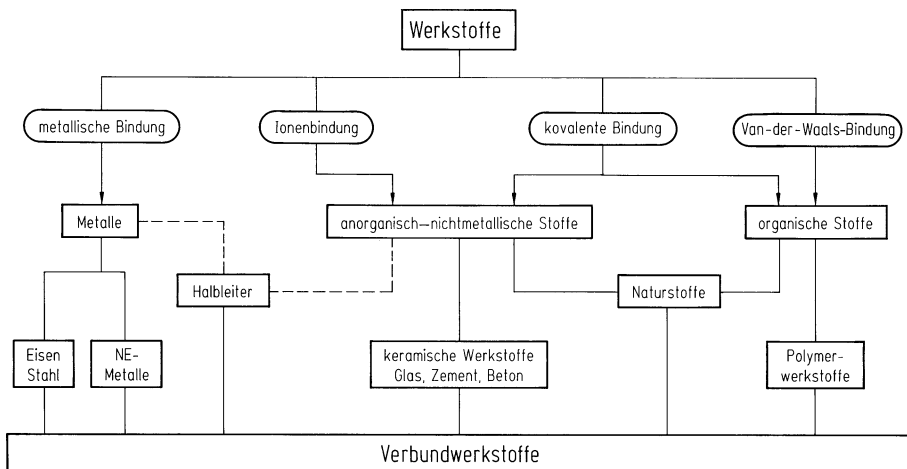


Bild 2-7. Klassifikation der Werkstoffgruppen

Das Ingenieurwissen: Werkstoffe

Czichos, H.; Skrotzki, B.; Simon, F.-G.

2014, IX, 110 S. 55 Abb., Softcover

ISBN: 978-3-642-41125-0