

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,

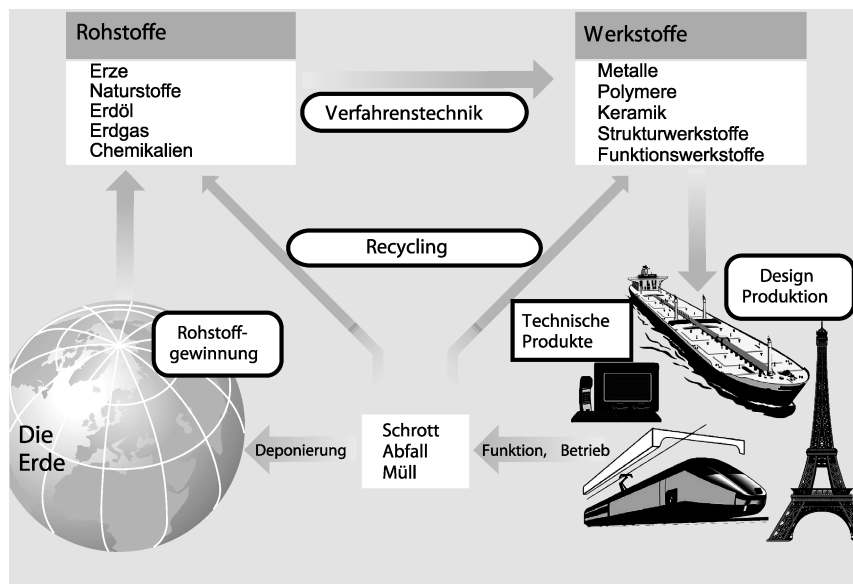


Bild 1-1. Der Materialkreislauf

- 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 → Düsentriebwerke, 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 zahlreicher Rohstoffe. Die Energierohstoffe Kohle, Erdöl und Erdgas sind ebenfalls aufgeführt. Als Ressource für die Herstellung von Werkstoffen und anderen Chemieprodukten werden nur etwa 8% des Erdöls genutzt. Der Anteil von

Tabelle 1-1. Materialien als Produktionsfaktor der Wirtschaft (Quelle: Statist. Jahrbuch für die Bundesrepublik Deutschland 2005)

– Kraftfahrzeugbau	
Bruttoproduktionswert 280,2 Mrd. €, davon	
– Materialverbrauch	50,8%
– Personalkosten	18,3%
– Sonstiges	30,9%
– Maschinenbau	
Bruttoproduktionswert 162,8 Mrd. €, davon	
– Materialverbrauch	40,2%
– Personalkosten	30,9%
– Sonstiges	28,9%
– Chemische Industrie	
Bruttoproduktionswert 140,1 Mrd. €, davon	
– Materialverbrauch	35,1%
– Personalkosten	20,6%
– Sonstiges	44,3%
– Elektrizitätserzeugung, Gerätetechnik	
Bruttoproduktionswert 85,1 Mrd. €, davon	
– Materialverbrauch	41,4%
– Personalkosten	28,6%
– Sonstiges	30,3%
– Rundfunk- u. Nachrichtentechnik	
Bruttoproduktionswert 41,1 Mrd. €, davon	
– Materialverbrauch	35,1%
– Personalkosten	19,4%
– Sonstiges	45,5%

Kohle, Erdöl und Erdgas am Primärenergieverbrauch betrug 2001 in Deutschland 24, 39 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)
<i>Kohle</i>	5 535 000
<i>Rohöl</i>	3 826 000
<i>Erdgas</i>	2 785 000
Eisenerz	1 363 000
Salz	230 300
Bauxit	163 000
Phosphat	146 000
Gips	111 600
Schwefel	58 500
Pottasche	32 100
Aluminium	29 900
Kaolin	22 600
Magnesit	22 300
Chromerze	18 300
Feldspat	15 500
Kupfer	14 500
Bentonit	13 000
Zink	9 400
Baryt	7 200
Titanoxid	5 000
Blei	3 100
Nickel	1 358
Zirkon	1 187
Brom	499
Zinn	275
Molybdän	153
Antimon	148
Vanadium	64
Wolfram	51,3
Kobalt	48
Uran	42,8
Jod	23,5
Silber	19,7
Cadmium	18,6
Wismut	3,7
Gold	2,49
Quecksilber	1,2
Platin-Metalle	0,514
Diamanten	0,032

Stand 2004, Quelle: British Geological Survey, World Mineral Production 2000 – 04, 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:

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

Informationsbezogen kann das heißen: Kenntnis der Beschaffenheit und des Verhaltens der Materialien 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 Materialeigenschaften 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 Grenzniveau 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 Potentiale) 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.

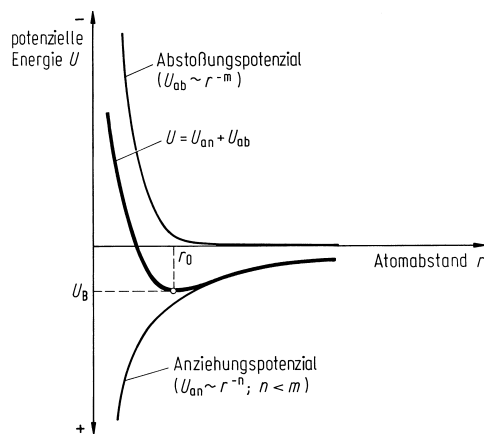


Bild 2-1. Wechselwirkungsenergien zwischen zwei isolierten Atomen (U_B Bindungsenergie; r_0 Gleichgewichtsabstand)

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).

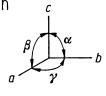
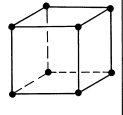
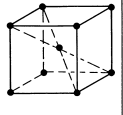
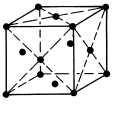
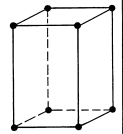
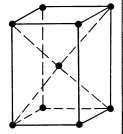
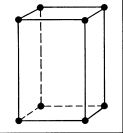
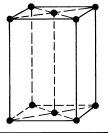
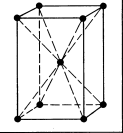
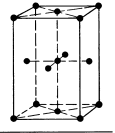
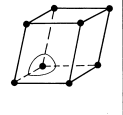
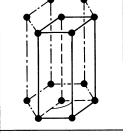
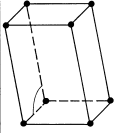
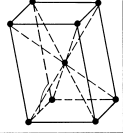
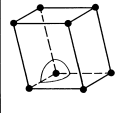
Kristallsystem	einfach	basisflächen-zentriert	raum-zentriert	flächen-zentriert
kubisch  $a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$				
tetragonal $a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$				
orthorhombisch $a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$				
rhomboedrisch $a =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

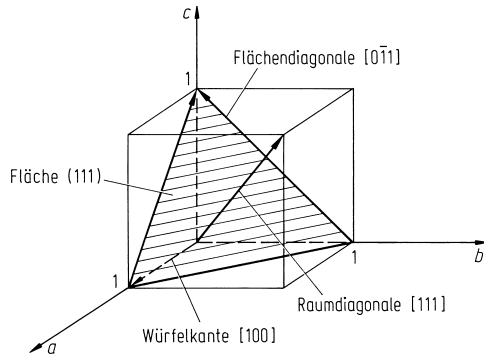


Bild 2-3. Indizierung von Richtungen und Ebenen in einem kubischen Gitter

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

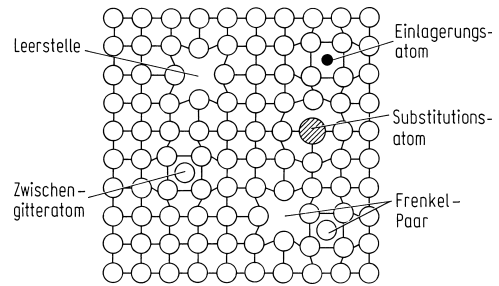


Bild 2-4. Nulldimensionale Gitterbaufehler (Punktfehler)

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 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

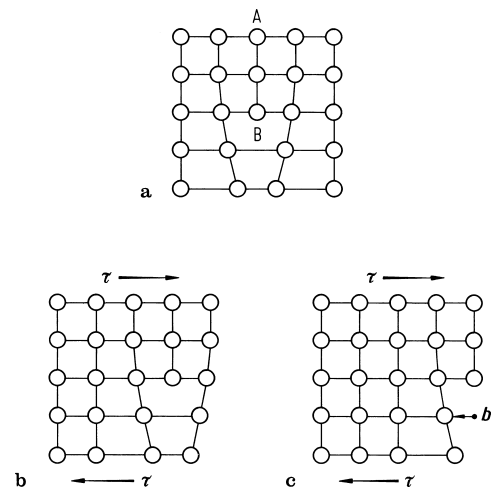


Bild 2-5. Eindimensionale Gitterbaufehler: **a** Stufenversetzung in einem kubischen Kristall, **b** Versetzungsbewegung (Ableitung) unter Schubspannung, **c** Resultierende Gleitstufe; b Burgers-Vektor

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

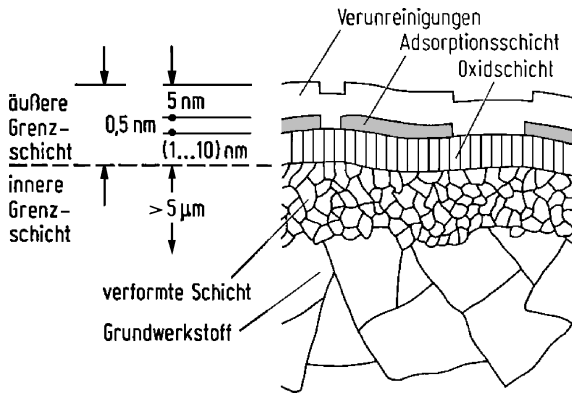


Bild 2-6. Werkstoffoberflächen-Schichtaufbau: schematische Darstellung des Querschnitts einer Metalloberfläche

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

Halbleiter

Eine Übergangstellung 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.

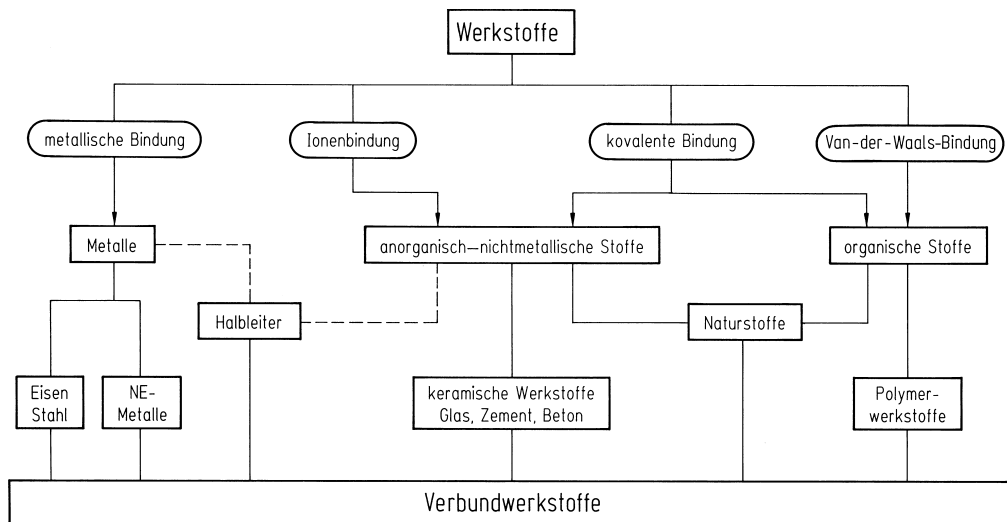


Bild 2-7. Klassifikation der Werkstoffgruppen

Organische Stoffe

Organische Stoffe, deren technisch wichtigste Vertreter die Polymerwerkstoffe sind, bestehen aus Makromolekülen, die im Allgemeinen Kohlenstoff in kovalenter Bindung mit sich selbst und einigen Elementen niedriger Ordnungszahl enthalten. Deren Kettenmoleküle sind untereinander durch (schwache) zwischenmolekulare Bindungen verknüpft, woraus niedrige Schmelztemperaturen resultieren (Thermoplaste). Sie können auch chemisch miteinander vernetzt sein und sind dann unlöslich und unschmelzbar (Elastomere, Duroplaste).

Naturstoffe

Bei den als Werkstoff verwendeten Naturstoffen wird unterschieden zwischen mineralischen Naturstoffen (z. B. Marmor, Granit, Sandstein; Glimmer, Saphir, Rubin, Diamant) und organischen Naturstoffen (z. B. Holz, Kautschuk, Naturfasern). Die Eigenschaften vieler mineralischer Naturstoffe, z. B. hohe Härte und gute chemische Beständigkeit, werden geprägt durch starke Hauptvalenzbindungen und stabile Kristallgitterstrukturen. Die organischen Naturstoffe weisen meist komplexe Strukturen mit richtungsabhängigen Eigenschaften auf.

Verbundwerkstoffe, Werkstoffverbunde

Verbundwerkstoffe werden mit dem Ziel, Struktur- oder Funktionswerkstoffe mit besonderen Eigenschaften zu erhalten, als Kombination mehrerer Phasen oder Werkstoffkomponenten in bestimmter

geometrisch abgrenzbarer Form aufgebaut, z. B. in Form von Dispersionen oder Faserverbundwerkstoffen. Werkstoffverbunde vereinen unterschiedliche Werkstoffe mit verschiedenen Aufgaben, z. B. bei Email.

2.5 Mischkristalle und Phasengemische

Strukturwerkstoffe bestehen eigentlich nie aus nur einer Atomart, da reine Stoffe keine ausreichenden mechanischen Eigenschaften für technische Anwendungen aufweisen. Daher werden Atome einer anderen Art zugefügt (Legieren). Wenn es gelingt, diese in der festen Phase zu lösen, dann spricht man von Mischkristallen. In idealen Mischkristallen sind die zugefügten Atome stochastisch verteilt (Bild 2-8a). Die Fremdatome ersetzen entweder die Atome auf den Gitterplätzen oder sie nehmen Zwischengitterplätze ein (Bild 2-4).

Die Mischbarkeit von Kristallen ist gewöhnlich begrenzt, sie ist bei hoher Temperatur größer als bei niedriger Temperatur. Voraussetzung für eine vollständige Mischbarkeit von Kristallen ist die gleiche Kristallstruktur beider Komponenten. Unterscheiden sich die Gitterkonstanten oder Atomradien um mehr als 15%, so ist die Mischbarkeit meist begrenzt. Ein Sonderfall sind interstitielle Atome, die sehr klein sind und in Gitterlücken eingebaut werden. Ein bestimmtes Verhältnis der Atomradien darf dabei allerdings nicht überschritten werden. Chemische Voraussetzungen bestimmen ebenfalls die Löslichkeit, denn die äußeren Elektronen beider Atomarten treten in Wechselwirkung miteinander.

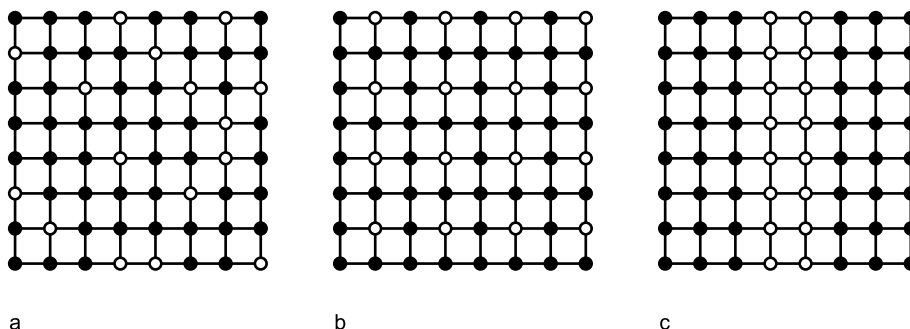


Bild 2-8. **a** Regellose Verteilung der Legierungsatome. **b** In einer Ordnungsstruktur nehmen beide Atomarten bestimmte Gitterplätze ein. **c** Entmischung beider Atomarten

Die Zusammensetzung der Mischphasen wird als Stoffmengengehalt x (in Atomprozent oder Molprozent) oder als Massegehalt c (in Gewichtsprozent) angegeben. Letzterer hat den Vorteil, dass er direkt mit der Einwaage der Elemente in Zusammenhang steht. Folgende Beziehungen erlauben die Umrechnung:

$$c_A = \frac{x_A \cdot A_A \cdot 100}{x_A \cdot A_A + x_B \cdot A_B} = \frac{m_A}{m_A + m_B} \cdot 100 \quad [\text{Gew.}\%] \quad (2-1)$$

$$x_A = \frac{\frac{c_A}{A_A} \cdot 100}{\frac{c_A}{A_A} + \frac{c_B}{A_B}} = \frac{n_A}{n_A + n_B} \cdot 100 \quad [\text{Atom.}\%] \quad (2-2)$$

Die Umrechnung von Massegehalt in Volumengehalt erfolgt mit:

$$V_A = \frac{100}{1 + \frac{c_B \rho_A}{c_A \rho_B}} = \frac{100}{1 + \frac{x_B A_B \rho_A}{\rho_B x_A A_A}} \quad [\text{Vol.}\%] \quad (2-3)$$

A_A und A_B sind die Atomgewichte, m_A und m_B entsprechen der Masse und n_A und n_B der Anzahl der Atome. ρ_A und ρ_B sind die Dichten der Komponenten A und B. Für die Masse gilt $m_A = n_A A_A$ bzw. $m_B = n_B A_B$ und $x_A = n_A / (n_A + n_B)$. Es gilt immer, dass

$$\sum_{n=1}^i x_n = 100\% \quad (2-4)$$

ist. Die Anzahl der Elemente ist i . Häufig werden diese Gehalte nicht in Prozent, sondern in Bruchteile von 1 angegeben.

In realen Mischkristallen sind die gelösten Atome nicht immer stochastisch verteilt. Wenn sich die beiden Atomarten anziehen, besteht eine Neigung zur Bildung einer chemischen Verbindung. Ist die Anziehung sehr groß, so bilden sich Ordnungsstrukturen (Bild 2-8b). Ist die Anziehung zwischen gleichen Nachbarn groß, so gibt es eine Tendenz zur Trennung in A-reiche und B-reiche Bereiche. Dieser Vorgang wird als Entmischung bezeichnet (Bild 2-8c).

Oftmals sind Werkstoffe nicht nur aus einer Kristallart, sondern aus zwei oder mehr Kristallarten zusammengesetzt. Bereiche mit konstanter Atomstruktur und chemischer Zusammensetzung werden als Phase bezeichnet. Die Grenze zwischen zwei Phasen wird als Phasengrenze bezeichnet. Diese kann zwischen zwei verschiedenen Kristallarten verlaufen, aber auch zwischen einem Glas und einem Kristall

(z. B. in Keramiken und Kunststoffen). Technische Werkstoffe bestehen vornehmlich aus Phasengemischen. Beispiele dafür sind Stahl, aushärtbare Aluminiumlegierungen, Verbundwerkstoffe.

2.6 Gleichgewichte

Analog zum mechanischen Gleichgewicht wird auch in der Thermodynamik nach labilen, metastabilen und stabilen Gleichgewichten unterschieden. Im stabilen Gleichgewicht weist die Energie ein Minimum auf, während im metastabilen Gleichgewicht die Energie nach Aktivierung noch weiter erniedrigt werden kann. Im labilen Gleichgewicht genügen hingegen kleinste Schwankungen zur Erniedrigung der Energie. Das thermodynamische Gleichgewicht umfasst das mechanische, thermische (kein Temperaturgradient) und chemische (keine chemische Reaktion) Gleichgewicht. Befindet sich ein Stoff im thermodynamischen Gleichgewicht, so ändert sich sein Druck, seine Temperatur, sein Volumen und seine Zusammensetzung mit der Zeit nicht mehr. In diesem Zustand weist die Freie Energie bzw. die Freie Enthalpie ihr Minimum auf.

Häufig sind Werkstoffe im Zustand ihrer Anwendung nicht im thermodynamischen Gleichgewicht. Dies hat zur Folge, dass sie während ihres Einsatzes eine Tendenz zeigen, ihren Zustand z. B. durch Kristallisation oder Entmischung oder Bildung einer chemischen Verbindung zu ändern, wenn man ihnen Gelegenheit dazu gibt. Dies ist in der Regel mit einer Änderung ihrer Eigenschaften (Festigkeit, Härte) verbunden. Mischphasen und Phasengemische, die sich im Gleichgewicht befinden, bleiben jedoch unverändert. Folglich sind Kenntnisse über Gleichgewichte und Ungleichgewichte sehr nützlich, sowohl für die Herstellung von Werkstoffen, als auch zur Einschätzung ihres Verhaltens im Einsatz. Es wird zwischen homogenen und heterogenen Gleichgewichten unterschieden. Letzere betreffen Stoffe mit mehr als einer Phase. Jedem Stoff kann in seinem vorliegenden Zustand eine charakteristische Freie Enthalpie $G = H - TS$ zugeschrieben werden. H bezeichnet die Enthalpie, S die Entropie und T die Temperatur. Die Änderung der Freien Enthalpie $dG = dH - TdS$, die eine Zustandsänderung begleitet, stellt die treibende Kraft für diesen Prozess dar. Alle spontan ablaufenden

Zustandsänderungen müssen mit einer Erniedrigung der gesamten Freien Enthalpie des Systems verbunden sein, d.h. ΔG muss negativ sein. Im Gleichgewichtszustand, in dem keine treibende Kraft für eine Zustandsänderungen vorhanden ist, muss folglich $\Delta G = 0$ gelten. Jede Phase in einem System, ob stabil oder instabil, besitzt ihre Funktion $G(T)$. Dies sei am Beispiel der technisch bedeutenden Umwandlung des (reinen) Eisens verdeutlicht (Bild 2-9a). Bei tiefer Temperatur ist das krz α -Eisen stabil, oberhalb von 911°C ($= T_{\alpha\gamma}$) jedoch das krz γ -Eisen. Bei 1392°C ($= T_{\gamma\delta}$) tritt eine weitere Umwandlung in das ebenfalls krz δ -Eisen ein und bei 1536°C ($= T_{\delta L}$) beginnt das Eisen zu schmelzen. Die $\gamma \rightarrow \alpha$ Umwandlung tritt bei $T < 911^\circ\text{C}$ ein, da dann $G_\alpha < G_\gamma$ und daher eine treibende Kraft für die Umwandlung vorhanden ist (Bild 2-9b). Diese Umwandlung ist entscheidende Voraussetzung für die Stahlhärtung (siehe 3.3).

Ähnliche Überlegungen können für Mehrstoffsysteme angestellt werden. Für die Betrachtung eines Zweistoffsystems wird ein zweidimensionales Temperatur-Konzentrations-Diagramm benötigt. Bild 2-10a zeigt einen Mischkristall γ , der sich bei tiefen Temperaturen in einen α -Kristall (reich an A) und einen β -Kristall (reich an B) entmischt: das System weist eine Mischungslücke auf. Die isothermen $G(x)$ -Kurven sind ebenfalls in Bild 2-10 für 3 verschiedene Temperaturen T_1 bis T_3 gezeigt. Die Konzentration der Phasen, die sich bei einer bestimmten Temperatur im Gleichgewicht befinden, wird durch die gemeinsame Tangente an die $G(x)$ -Kurve ermittelt.

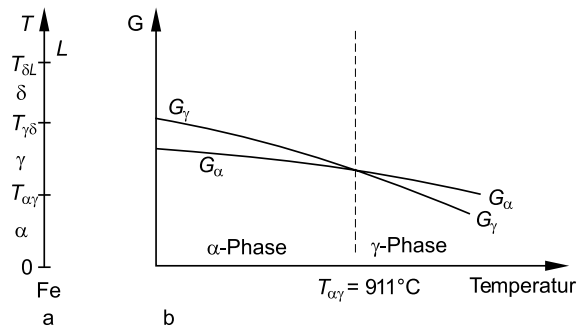


Bild 2-9. a Zustandsdiagramm des reinen Eisens mit zwei Phasenumwandlungen ($\alpha \rightarrow \gamma$ und $\gamma \rightarrow \delta$) im festen Zustand. b Freies Enthalpie-Temperatur-Diagramm für Eisen mit $\gamma \rightarrow \alpha$ -Umwandlung bei 911°C und $G_\gamma = G_\alpha$

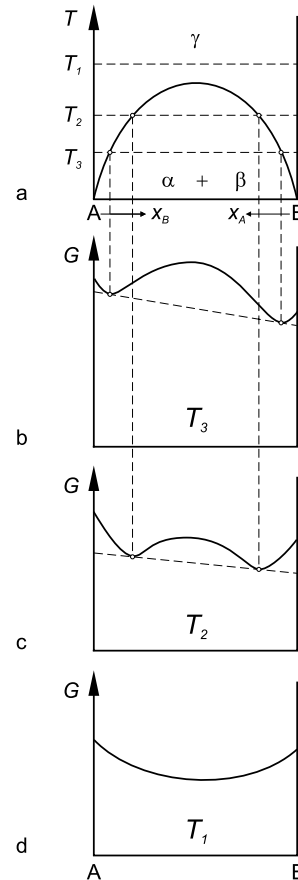


Bild 2-10. a Zustandsdiagramm eines Zweistoffsystems mit Mischungslücke. Der Mischkristall γ entmischt sich in α - und β -Kristalle. Der stabile Zustand ist der mit der niedrigsten Freien Enthalpie: b bei T_3 und c T_2 : Phasengemische aus α - und β -Kristallen mit bestimmten Zusammensetzungen. d Bei T_1 ist die Mischphase γ stabil

2.7 Zustandsdiagramme

Phasendiagramme erweisen sich bei der Interpretation metallischer oder keramischer Gefüge als sehr nützlich. Sie zeigen auf, welche Phasen vermutlich vorliegen und geben Daten zu ihrer chemischen Zusammensetzungen. Leider geben Phasendiagramme keine Hinweise darauf, in welcher Form und Verteilung die Phasen vorliegen, ob sie sich z. B. lamellar, globular oder intergranular ausbilden. Dies ist aber für die mechanischen Eigenschaften entscheidend. Eine weitere Einschränkung besteht darin, dass Zustands-

diagramme lediglich Gleichgewichtszustände repräsentieren, die sich nur bei langsamer Abkühlung bzw. Aufheizung einstellen. Abschrecken, also schnelles Abkühlen, wie es z. B. für die Härtung von Stählen erforderlich ist, erzeugt metastabile Zustände, die in Zustandsdiagrammen nicht dargestellt werden. Auch in diesem Fall gibt aber das Zustandsdiagramm darüber Auskunft, welchen Zustand ein Stoff im Gleichgewicht anstrebt.

Zustandsdiagramme geben z. B. an, bei welcher Zusammensetzung die höchste oder geringste Schmelztemperatur vorliegt; die Anzahl von Phasen und deren Volumenanteile bei einer bestimmten Zusammensetzung; die günstigste Zusammensetzung einer ausscheidungshärtbaren Legierung; die Temperatur, bis zu der aufgeheizt werden darf, ohne dass eine Umwandlung in eine andere Kristallstruktur oder Auflösung oder Entmischung eintritt.

Die Gibbs'sche Phasenregel gibt den Zusammenhang zwischen der Anzahl der Phasen P eines Systems mit K Komponenten und dem äußeren Druck sowie Temperatur und der chemischen Zusammensetzung an. Die Freiheitsgrade F des Systems ergeben sich zu:

$$F = K - P + 2 \quad (2-5)$$

In der Praxis ist der Druck meist konstant, sodass sich die Zahl der Freiheitsgrade um 1 reduziert:

$$F = K - P + 1 \quad (2-6)$$

Wenden wir dies auf das System mit der Mischungslücke (Bild 2-10) an, so erhalten wir $K = 2$ (Komponenten A und B), $P = 1$ im Gebiet des homogenen Mischkristalls γ , $P = 2$ im heterogenen Gebiet ($\alpha + \beta$). Somit ergibt sich $F = 2$ im homogenen und $F = 1$ im heterogenen Gebiet. Dies bedeutet, dass im homogenen Gebiet die Freiheitsgrade Temperatur und Konzentration geändert werden können, ohne dass eine Zustandsänderung eintritt. Im Zweiphasengebiet ($\alpha + \beta$) existiert jedoch nur ein Freiheitsgrad, d. h. bei Temperaturänderung ändert sich notwendigerweise auch die Zusammensetzung und umgekehrt.

Es gibt vielfältige Ausbildungen von Zustandsdiagrammen. Im Folgenden werden einige wichtige binäre Grundtypen vorgestellt. Kompliziertere Systeme setzen sich aus diesen zusammen (Bild 2-11).

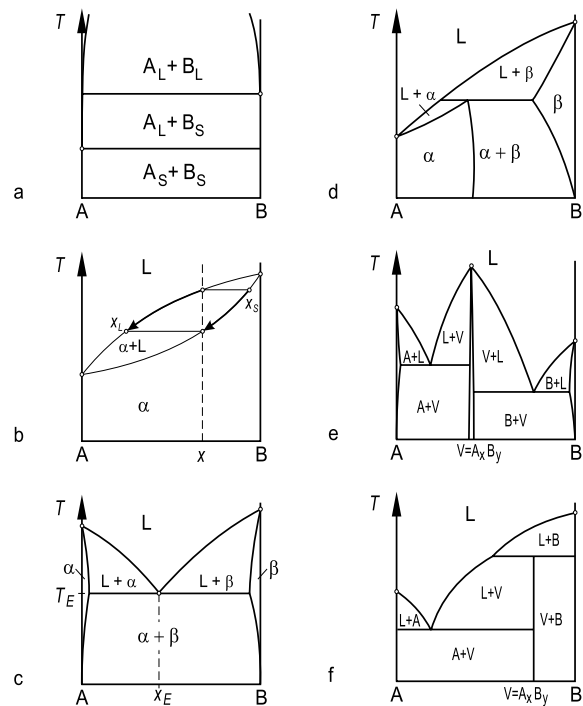


Bild 2-11. Grundtypen einiger wichtiger binärer Zustandsdiagramme. **a** Nahezu vollständige Unmischbarkeit im flüssigen (L) und festen (S) Zustand. Beispiel: Fe-Mg, Fe-Pb. **b** Vollständige Mischbarkeit im flüssigen und festen Zustand. x_L = Konzentration der Schmelze, x_S = Konzentration des Kristalls beim Erstarren. Beispiel: Cu-Au. **c** Eutektisches System mit vollständiger Mischbarkeit im flüssigen und begrenzter Mischbarkeit im festen Zustand. Beispiel: Al-Si. **d** Peritektisches System vollständiger Mischbarkeit im flüssigen und begrenzter Mischbarkeit im festen Zustand. Niedrig schmelzende Komponente A und hoch schmelzende Komponente B. Beispiel: Cu-Zn (Messing). **e** Verbindung V bildet mit den Elementen A und B eutektische Teilsysteme. **f** Verbindung V mit stöchiometrischer Zusammensetzung A_xB_y , zersetzt sich beim Schmelzen in $L + B$

- (Fast) völlige Unmischbarkeit der Komponenten A und B im flüssigen und festen Zustand (Bild 2-11a): Es gibt im Diagramm lediglich horizontale Linien bei den Schmelz- und Siedetemperaturen. Mischbarkeit liegt erst im Gaszustand vor. Stoffe, die nicht miteinander reagieren dürfen, sollten dieses Zustandsdiagramm besitzen. Beispiel: Schmelzen von Blei in Eisentiegeln.

- ▶ Völlige Mischbarkeit im festen und flüssigen Zustand (Bild 2-11b): Die jeweiligen reinen Komponenten A und B besitzen einen Schmelzpunkt, die Gemische jedoch ein Schmelzintervall. Beim Abkühlen einer Schmelze mit der Konzentration x bildet sich zuerst ein Kristall der Zusammensetzung x_S . Bei weiterer Abkühlung ändert sich diese bis zu x . Parallel dazu ändert sich die Zusammensetzung der Schmelze von x nach x_L . Beispiele für Mischkristallsysteme sind Al-Mg-Legierungen und α -Messing.
- ▶ Vollständige Mischbarkeit im flüssigen Zustand bei begrenzter Mischbarkeit im festen Zustand: Die Komponenten A und B weisen ähnliche Schmelztemperatur auf. Zumischen von B in A (sowie A in B) erniedrigt den Schmelzpunkt (Bild 2-11c). Der Schnittpunkt der beiden Löslichkeitslinien flüssig \rightarrow kristallin ist der eutektische Punkt. Bei dieser Temperatur sind drei Phasen im Gleichgewicht, nämlich die Mischkristalle α und β sowie die Schmelze. Beim Abkühlen einer Schmelze mit Zusammensetzung x_E tritt bei T_E die Reaktion $L \rightarrow \alpha + \beta$ ein, wobei sich α und β gleichzeitig bilden. Gusslegierungen sind häufig eutektische Systeme, da ihre Schmelztemperatur niedrig und die Gefügeausbildung fein ist. Beispiele sind Al-Si-Gusslegierungen sowie Gusseisen, aber auch Lote. Sind die Schmelztemperaturen der beiden Komponenten sehr verschieden, so kann sich ein Dreiphasengleichgewicht einstellen, das als peritektisches System bezeichnet wird (Bild 2-11d). Beim Abkühlen aus der Schmelze entsteht zuerst ein Mischkristall entsprechend dem Zweiphasengleichgewicht $L + \beta$. Bei T_P tritt die Reaktion $L + \beta = \alpha$ ein, bei der α -Mischkristalle gebildet werden. Beispiele dafür sind Mischkristalle in Messing- und Bronzelegierungen.
- ▶ Bildung einer Verbindung: Die Komponenten A und B reagieren miteinander und bilden eine neue Phase V mit der Zusammensetzung A_xB_y (Bild 2-11e). Diese hat eine andere Kristallstruktur als die Komponenten A und B. Manchmal besitzt die Verbindung ein definiertes stöchiometrisches Verhältnis von A und B und erscheint als vertikale Linie im Diagramm (Bild 2-11f).

Häufig existiert sie aber über einen gewissen Bereich der Zusammensetzung, sodass der Begriff Verbindung dann nicht ganz korrekt ist. Der Schmelzpunkt der Phase V kann höher oder niedriger sein als der der Komponenten. Dies gibt erste Hinweise auf die Stabilität der Verbindung. Weist die Verbindung nur eine geringe Mischbarkeit mit A und B auf, so ergibt sich ein einfaches Zustandsdiagramm, das sich auf $A + A_xB_y$ sowie $A_xB_y + B$ zurückführen lässt. Ein Beispiel für ein solches Zustandsdiagramm findet sich im System Mg-Si mit der Verbindung Mg_2Si . Häufig sind Verbindungen hart und spröde und weisen eine komplexe Kristallstruktur auf (z. B. Fe_3C , Al_2Cu).

Systeme mit drei und mehr Komponenten können ebenfalls dargestellt werden. Dies erfordert jedoch eine räumliche Darstellung, auf die hier nicht weiter eingegangen werden soll. Zusammenfassende Darstellungen binärer und ternärer Zustandsdiagramme lassen sich in der Literatur z. B. in [4] finden.

Abschließend bleibt die Frage zu beantworten, wie die sich bildenden Mengenanteile für eine bestimmte Zusammensetzung ermittelt werden kann. Hierzu wendet man die Hebelregel an, was im Folgenden mit Bild 2-12 erläutert werden soll. Man denke sich bei einer bestimmten Temperatur im Zweiphasengebiet einen zweiarmigen Hebel mit Drehpunkt bei c und den Gewichten m_L (Schmelze) und m_S (Kristall). Dann ergeben sich die Mengenanteile zu:

$$m_L \cdot (c - c_L) = m_S \cdot (c_S - c) \quad (2-7)$$

Anschaulich ausgedrückt: kurzer Hebelarm in Richtung A bedeutet viel Schmelze, langer Hebelarm in Richtung B bedeutet wenig Kristall. Die Hebelregel kann immer im Zweiphasengebiet angewendet werden, also auch um z. B. die Menge an α - und β -Mischkristall im Gebiet ($\alpha + \beta$) zu bestimmen (vgl. Bild 2-11).

2.8 Diffusionsprozesse

Diffusionsvorgänge sind in der Werkstofftechnik von großer Bedeutung, denn sie kontrollieren z. B. die Wärmebehandlung, Phasenumwandlungen, Hochtemperaturkorrosionsprozesse, Erholung und Rekristallisation und die Hochtemperaturverformung.

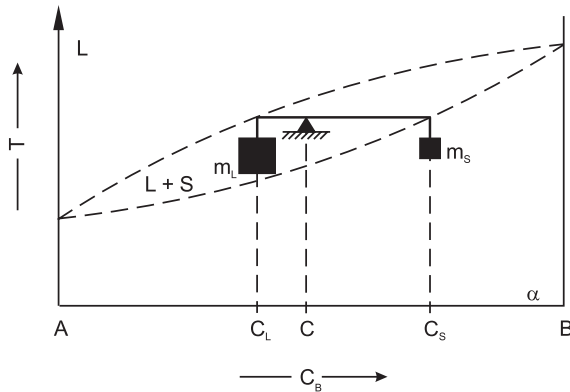


Bild 2-12. Bestimmung der Mengenanteile von Schmelze und Mischkristall aus dem Zustandsdiagramm mit Hilfe der Hebelregel

Der Begriff Diffusion beschreibt thermisch aktivierte Stofftransportvorgänge, die mit der Wanderung einzelner Atome verbunden ist. Diffusion kann in Gasen, Flüssigkeiten und Festkörpern stattfinden. Im Folgenden wird die Diffusion in Festkörpern beschrieben. Dafür gibt es verschiedene Mechanismen. Zwischengitteratome besitzen eine geringe Löslichkeit, daher stehen ihnen meistens alle benachbarten Zwischengitterplätze frei. Die Diffusion von Zwischengitteratomen tritt häufig in Legierungen auf, die H, C oder N enthalten, z. B. Diffusion von Kohlenstoff im Stahl. Gitteratome (Selbstdiffusion) und Substitutionsatome (Fremddiffusion) benötigen für Platzwechsel Leerstellen, deren Konzentration ist erheblich geringer. Daher hängen diese Prozesse von der Leerstellenkonzentration und deren Temperaturabhängigkeit ab. Leerstellen liegen immer auch im Gleichgewicht vor, im Ungleichgewicht (z. B. nach Abschrecken von hoher Temperatur, nach plastischer Verformung) ist ihre Konzentration höher als im Gleichgewicht. Diffusionsprozesse machen sich bemerkbar bei Temperaturen, die etwa 0,3 bis 0,5 mal der Schmelztemperatur in Kelvin entsprechen. Liegen verschiedene Atomarten vor und ist im Mischkristall oder in Phasengemischen ein Konzentrationsunterschied vorhanden, so streben Diffusionsvorgänge zur Einstellung der Gleichgewichtskonzentration. Dies wird durch das 1. Fick'sche Gesetz beschrieben:

$$j = -D \left(\frac{c_1 - c_2}{x_1 - x_2} \right) = -D \left(\frac{\Delta c}{\Delta x} \right) = -D \frac{\partial c}{\partial x} \quad (2-8)$$

Über eine Entfernung Δx im Gitter besteht ein (negativer) Konzentrationsgradient $\partial c / \partial x$, sodass sich aufgrund der Diffusion ein (positiver) Stofftransportstrom j einstellt. j beschreibt die transportierte Masse pro Flächen- und Zeiteinheit und ist dem Konzentrationsgradienten $\partial c / \partial x$ proportional. Das 2. Fick'sche Gesetz beschreibt die zeitlichen Konzentrationsänderungen:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\frac{dj}{dx} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (2-9)$$

Die expliziten Lösungsformen des 2. Fick'schen Gesetzes hängen von den Anfangsbedingungen des jeweils betrachteten Diffusionsproblems ab und haben die Form $c(x, t)$. Der Diffusionskoeffizient D ist ein Maß für die Beweglichkeit der diffundierenden Atome und wird durch den folgenden Zusammenhang beschrieben:

$$D = D_0 \cdot \exp\left(-\frac{Q_D}{RT}\right) \quad (2-10)$$

Q_D ist die Aktivierungsenergie für Diffusion und wird durch die Bildungs- und Wanderungsenergie der Leerstellen bestimmt. Die Temperaturabhängigkeit des Diffusionskoeffizienten ist in Bild 2-13 als Arrhenius-Diagramm dargestellt. Häufig genügt die Näherungsformel

$$\bar{x} = 2\sqrt{Dt}, \quad (2-11)$$

um den mittleren Weg \bar{x} anzugeben, den ein Atom mit einem Diffusionskoeffizienten $D(T)$ bei einer Temperatur T nach einer Zeit t zurückgelegt hat. Dies ermöglicht z. B. die Abschätzung, welche Zeit für den Konzentrationsausgleich einer Probe mit Konzentrationsunterschieden bei einer Glühung bei einer konstanten Temperatur erforderlich ist.

Die vorangegangenen Beschreibungen (Volumendiffusion) setzen voraus, dass abgesehen von den Leerstellen keine Gitterbaufehler vorliegen. Im realen Gitter sind aber Versetzungen, Korngrenzen und freie Oberflächen vorhanden, die die Diffusion beeinflussen, denn sie sind Pfade bevorzugter Diffusion (Versetzungsdiffusion, Korngrenzendiffusion). In der Umgebung dieser Defekte können sich die Atome einfacher bewegen und die Platzwechselfrequenz ist daher höher. Beispiele für die Folge dieser Prozesse sind das bevorzugte Wachstum von Ausscheidungen entlang von Versetzungen und Korngrenzen oder

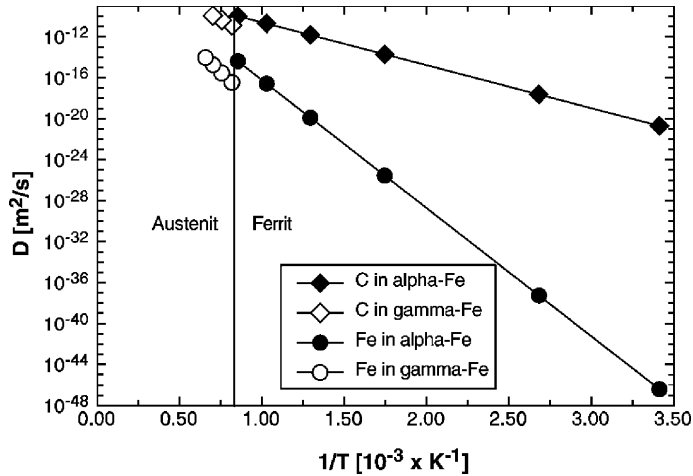


Bild 2-13. Temperaturabhängigkeit des Diffusionskoeffizienten D für Kohlenstoff und Eisen (Selbstdiffusion) im Ferrit- und Austenitkristallgitter (unter Verwendung von Daten aus [5])

auch das Diffusionskriechen bei tieferen Temperaturen. Bei tiefen Temperaturen ist Diffusion über Gitterfehler sehr viel größer als die Volumendiffusion, während bei hoher Temperatur die Volumendiffusion schneller abläuft als über Gitterfehler.

2.9 Keimbildung von Phasenumwandlungen

Die Keimbildung als Startvorgang von Phasenumwandlungen ist für verschiedene Prozesse in der Werkstofftechnik von Bedeutung. Beispiele sind die Erstarrung beim Gießen (Übergang flüssig-fest) oder das Vergüten von Stahl (Übergang fest-fest). Keimbildung im flüssigen und festen Zustand kann analog behandelt werden. Bei der Keimbildung im flüssigen Zustand entfällt der Term für die Verzerrungsenergie. Im Folgenden wird die Keimbildung im festen Zustand beschrieben.

Unter der Annahme, dass sich Ausscheidungen (= Keime) im festen Zustand durch homogene Keimbildung bilden, kann die folgende Energiebilanz aufgestellt werden:

$$\Delta G = V\Delta g_v + A\gamma + V\Delta g_s \quad (2-12)$$

Δg_v ist der Gewinn an Freier Enthalpie pro Volumen gebildeter Ausscheidung (also ist Δg_v negativ), γ die aufzubringende Grenzflächenenergie durch die neu zu bildende Oberfläche der Ausscheidung und Δg_s die aufzubringende Verzerrungsenergie, da das

Teilchen aufgrund der Volumendifferenz nicht ganz genau in das Matrixgitter passt. Unter der Annahme kugelförmiger Keime ergibt sich:

$$\Delta G = \frac{4}{3}\pi r^3 (\Delta g_v + \Delta g_s) + 4\pi r^2 \gamma \quad (2-13)$$

Die in (2-13) auftretenden Terme sind schematisch in Bild 2-14 dargestellt. Durch die Umwandlung wird Energie gewonnen. Die frei werdende Freie Enthalpie ist proportional r^3 . Die Kurve für ΔG hat ein Maximum bei ΔG^* und r^* . Nach Nullsetzen der ersten Ableitung von (2-13) erhält man den kritischen Teilchenradius:

$$r^* = -\frac{2\gamma}{(\Delta g_v + \Delta g_s)} \quad (2-14)$$

Ist der Radius des Teilchens größer als r^* , so kann es wachsen. Wird diese Beziehung in (2-13) eingesetzt, so erhält man:

$$\Delta G^* = \frac{16\pi\gamma^3}{3(\Delta g_v + \Delta g_s)^2} \quad (2-15)$$

Die Keimbildungsrate N ist die Anzahl der Keime, die pro Zeit- und Volumeneinheit überkritisch werden. Sie ist proportional zur Oberfläche des Keims und zur Platzwechselfrequenz an der Oberfläche.

$$N = C \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right) \exp\left(-\frac{\Delta G^*}{kT}\right) \quad (2-16)$$

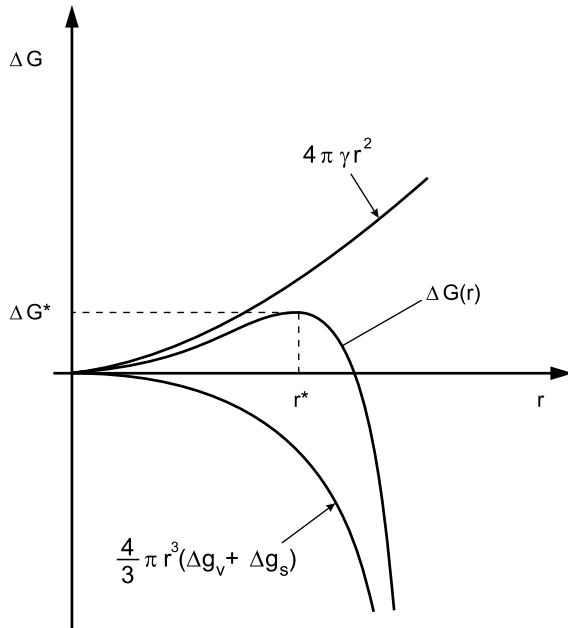


Bild 2-14. Schematische Darstellung der Energiebilanz für homogene Ausscheidung im festen Zustand

Dabei ist C die Anzahl der Keimbildungsorte pro Volumen, Q die Aktivierungsenergie für Diffusion, k die Boltzmann-Konstante und T die absolute Temperatur. Ausscheidungen werden nach der Natur ihrer Grenzfläche unterschieden: kohärent ohne Verzerrung, kohärent mit Verzerrung, teilkohärent und inkohärent. Kohärente Ausscheidungen haben eine geringe Grenzflächenenergie ($0\text{--}200\text{ mJ m}^{-2}$), aber die Verzerrung kann groß sein. Teilkohärente Ausscheidungen haben eine höhere Grenzflächenenergie ($200\text{--}500\text{ mJ m}^{-2}$). Inkohärente Ausscheidungen besitzen die höchste Grenzflächenenergie ($500\text{--}1000\text{ mJ m}^{-2}$) aber keine Kohärenzspannungen.

Bei der heterogenen Keimbildung wirken Gitterdefekte als bevorzugte Keimbildungsorte, zum Beispiel (mit steigender Wirksamkeit):

- ▶ homogene Orte
- ▶ Leerstellen
- ▶ Versetzungen
- ▶ Korngrenzen und Phasengrenzen
- ▶ freie Oberflächen.

2.10 Metastabile Zustände

In 2.6 wurde das thermodynamische Gleichgewicht als Zustand niedrigster Freier Enthalpie definiert. Häufig begegnen uns allerdings Zustände, die diese Voraussetzung nicht erfüllen und trotzdem für relativ lange Zeit stabil sind. Strukturwerkstoffe wie z. B. gehärteter Stahl, ausscheidungsgehärtete Aluminiumlegierungen oder Kunststoffe befinden sich während ihres Einsatzes im metastabilen Gleichgewicht. Diese Zustände treten auf, wenn die Keimbildung einer stabileren Phase aufgrund der dafür erforderlichen Aktivierungsenergie (z. B. aufgrund von hoher Grenzflächen- und Verzerrungsenergie) weniger wahrscheinlich ist. Dies ist z. B. in dem technisch wichtigen Kohlenstoffstahl der Fall. Eisen bildet ein stabiles Gleichgewicht mit Graphit. Das Carbid Fe_3C ist weniger stabil, trotzdem bildet sich fast ausschließlich Carbid im Stahl, der auch nach langer Zeit nicht in Graphit umwandelt. Es gibt also im Zustandsdiagramm Fe-C ein stabiles System Eisen-Graphit und ein metastabiles System Fe- Fe_3C , die häufig gemeinsam dargestellt werden. Die Gleichgewichtskonzentrationen und -temperaturen sind darin etwas verschieden.

Die Ausscheidungshärtbarkeit von Aluminiumlegierungen (2.12) basiert ebenfalls auf der Bildung verschiedener metastabiler Phasen. Sie treten in der Reihenfolge zunehmender Aktivierungsenergie auf.

Die Struktur stark verformte Metalle ist ebenfalls metastabil und kann durch Erholung und Rekristallisation (siehe 2.11) in einen Zustand geringerer Energie gelangen.

Die Tatsache, dass sich nahezu kein Strukturwerkstoff im thermodynamischen Gleichgewicht befindet, hat Folgen für die Stabilität von Gefügen, da diese sich mehr oder weniger stark mit den entsprechenden Konsequenzen für die Eigenschaften während des Einsatzes von Werkstoffen ändern kann. Dies wird von Martin, Doherty und Cantor [6] ausführlich behandelt.

2.11 Erholung und Rekristallisation

Erholungsprozesse erfordern thermisch aktivierte Prozesse, also Platzwechsel im Gitter bei Temperaturen, die dieses ermöglichen. Die Erholung plastisch verformter und verfestigter Kristalle besteht aus der

Umordnung von Versetzungen durch Annihilation (Auslöschung von Versetzungen mit gegensätzlichem Vorzeichen, wenn diese auf verschiedenen Gleitebenen aufeinander zuklettern) oder durch Bildung von Kleinwinkelkorngrenzen, eine Anordnung, die niedrigere Energie besitzt als die homogene Verteilung von Versetzungen (Bild 2-15). Die Versetzungsdichte wird dabei nur teilweise abgebaut. Bei Wechselwirkung der Versetzungen mit Leerstellen können die Versetzungen klettern, wobei die Leerstellen in den Bereich der Druckspannungen der Versetzung diffundiert und sich dort anlagert. Dadurch wandert ein Atom von der Versetzung fort und die Versetzungslinie wird normal zum Burgers-Vektor verschoben. Ein erholt Gefüge ist durch ein Subkorngefüge mit Kleinwinkelkorngrenzen gekennzeichnet. Während des Erholungsprozesses nehmen innere Spannungen und die Streckgrenze ab. Während der Erholung bewegen sich die Korngrenzen nicht.

Bei Temperaturen oberhalb von 0,5 mal der Schmelztemperatur (in Kelvin) tritt in stark verformten Metallen Rekristallisation ein. Dieser Begriff umfasst alle Prozesse, die mit Neubildung und Wachstum von weitgehend versetzungsfreien Körnern verbunden sind (Bild 2-15). Treibende Kraft dafür ist die gesamte Versetzungsenergie, die in den durch die Verformung eingebrachten Versetzungen steckt. Die Neubildung kann durch Keimbildung und -wachstum

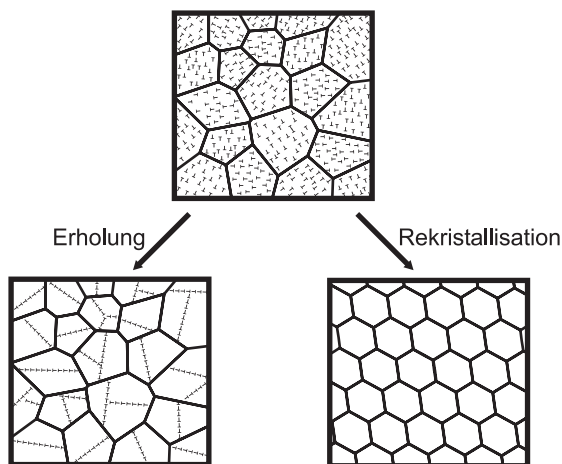


Bild 2-15. Schematische Darstellung von Erholungs- und Rekristallisationsprozessen

bestimmt sein (diskontinuierliche Rekristallisation) oder durch Vergrößerung der Subkörner des Erholungsgefüges, verbunden mit einer Zunahme des Orientierungsunterschieds (kontinuierliche Rekristallisation). Der auftretende Mechanismus hängt u. a. vom Werkstoff, von der Verformung, vom Temperatur-Zeit-Verlauf der Wärmebehandlung ab. Nach der Rekristallisation weist der Werkstoff Eigenschaften (Streckgrenze, Bruchdehnung, Härte) auf, wie sie auch für den unverformten Zustand vorliegen. Einen guten und umfassenden Überblick über dieses Gebiet geben Humphreys und Hatherly [7].

2.12 Ausscheidungs- und Umwandlungsprozesse

Voraussetzung für die Ausscheidungshärtung ist eine mit sinkender Temperatur abnehmende Löslichkeit im Mischkristall, wie es schematisch in Bild 2-16a gezeigt ist. Ein wichtiges Beispiel dafür ist das System Aluminium-Kupfer, an dem die Aushärtbarkeit von Aluminiumlegierungen von Alfred Wilm 1906 entdeckt wurde. Zur Ausscheidungshärtung von Legierungen müssen folgende Schritte eingeleitet werden (Bild 2-16b):

- ▶ Lösungsglühen zur Auflösung löslicher Phasen und Maximierung der Gehalte gelöster Atome und Leerstellen
- ▶ Abschrecken zur Erhaltung der Übersättigung gelöster Atome und Leerstellen
- ▶ Kaltauslagerung (bei Raumtemperatur) oder
- ▶ Warmauslagerung (bei erhöhter Temperatur).

Nach dem Abschrecken wird die Übersättigung abgebaut durch:

- ▶ homogene Keimbildung (ohne Hilfe von bereits existierenden Keimbildungsstellen),
- ▶ heterogene Keimbildung (Keimbildung an Heterogenitäten wie Versetzungen, Korngrenzen) oder
- ▶ spinodale Entmischung (keine Barriere für den Entmischungsprozess).

Die Keimbildung im festen Zustand basiert auf den gleichen Einflussgrößen wie bei der Erstarrung.

Die Stadien während des Ausscheidungsprozesses (beim Kalt- oder Warmauslagern) sind in der Regel

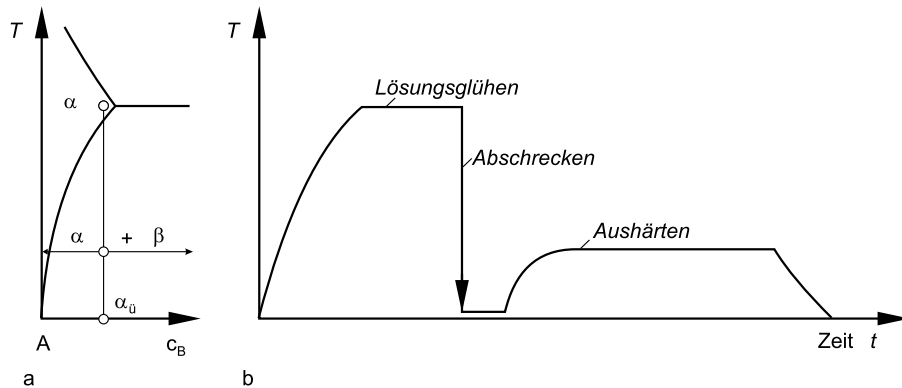


Bild 2-16. a Voraussetzung für eine Ausscheidungshärtung ist eine mit sinkender Temperatur abnehmende Löslichkeit. b Wärmebehandlung zum Herbeiführen einer Ausscheidungshärtung: Aufheizen auf Lösungsglühtemperatur und Halten bei dieser Temperatur, Abschrecken, Aushärten bei Raumtemperatur oder erhöhter Temperatur

Keimbildung, Wachstum der Ausscheidungen unter Zunahme ihres Volumenbruchteils und schließlich Vergrößerung, wobei sich der ausgeschiedene Volumenbruchteil nicht mehr ändert.

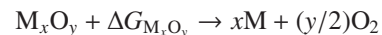
3 Metallische Werkstoffe

3.1 Herstellung metallischer Werkstoffe

Metallische Werkstoffe werden aus metallhaltigen Mineralien (Erzen) in den Verfahrensstufen Rohstoffgewinnung, Aufbereitung und Metallurgie gewonnen. Die Technologien zur Gewinnung von Rohstoffen gehören zum Bereich der Bergbautechniken. Sie umfassen das *Erkunden*, *Erschließen*, *Gewinnen*, *Fördern* und *Aufbereiten* von abbauwürdigen Lagerstätten mineralischer Rohstoffe und Erze. Die Erze enthalten das gewünschte Metall nicht in metallischer Form, sondern in Form chemischer Verbindungen: Oxide, Sulfide, Oxidhydrate, Carbonate, Silicate. Bei der Aufbereitung, der Vorstufe der Umwandlung von Rohstoffen in Werkstoffe wird das gefördertete Erz zunächst durch Brechen und Mahlen der Zerkleinerung unterworfen und dann Trennprozessen zugeführt, welche die metalltragenden Komponenten separieren, z. B. Trennung durch (a) unterschiedliche magnetische Eigenschaften, (b) Schwerkraft, (c) unterschiedliche Löslichkeit in Säuren oder Laugen, (d) unterschiedliches Benetzungsverhalten in organischen Flüssigkeiten (Flotation). Eisenerze, die Sulfide, aber auch Oxidhydrate oder Carbonate enthalten, werden durch Erhitzen an Luft („Rösten“)

in Oxide überführt, wobei SO_2 bzw. H_2O oder CO_2 frei werden; SO_2 wird abgebunden oder verwertet.

Die Herstellung metallischer Werkstoffe aus den aufbereiteten Erzen oder metallhaltigen Rückständen, ihre Raffination und Weiterverarbeitung (insbesondere zu Legierungen) erfolgt mit Methoden der Metallurgie (Hüttenwesen). Ein grundlegender metallurgischer Prozess besteht darin, die in Erzen z. B. in Form von Metalloxiden gebundenen Metallbestandteile durch Aufbrechen der Bindung zwischen Metall (M) und Sauerstoff (O) freizusetzen. Der Reduktionsvorgang



erfordert die Zufuhr der Bildungsenthalpie ΔG_{M} des Oxids.

Kennzeichnend für die verschiedenen metallurgischen Verfahren sind sowohl die Prozesstechnologie als auch der für die Erzreduktion erforderliche Einsatz an chemischen Reduktionsmitteln und elektrischer Energie.

3.2 Einteilung der Metalle

Die Einteilung der Metalle kann nach verschiedenen Merkmalen, wie z. B. Stellung im Periodensystem, Dichte, Schmelztemperatur, sowie physikalischen oder technologischen Eigenschaften erfolgen.

Knapp 70 der 90 natürlichen Elemente sind Metalle, wobei je nach Stellung im Periodensystem die folgende Einteilung üblich ist:

- Alkali- (oder A-)Metalle: Gruppe Ia (ohne H)
- Edle Metalle: Gruppe Ib
- B-Metalle: Gruppe II, Gruppe IIIa (ohne B), Gruppe IVa (ohne C), Gruppe Va (ohne N, P)
- Übergangsmetalle: Gruppe IIIb bis Gruppe VIIIb
- Lanthanoide
- Actinoide

Nach der Dichte werden unterschieden (vgl. Tabelle 9-1):

- Leichtmetalle: Dichte $< 4,5 \text{ kg/dm}^3$
- Schwermetalle: Dichte $> 4,5 \text{ kg/dm}^3$.

Das Kriterium Schmelztemperatur führt zu folgender Einteilung (vgl. Tabelle 9-8, Abschnitt 9.3.3):

- Niedrigschmelzende Metalle:
Schmelztemperatur $< 1000 \text{ }^\circ\text{C}$
- Mittelschmelzende Metalle:
 $\sim 1000 \text{ }^\circ\text{C} < \text{Schmelztemperatur} < 2000 \text{ }^\circ\text{C}$
- Hochschmelzende Metalle:
Schmelztemperatur $> 2000 \text{ }^\circ\text{C}$.

Die metallischen Werkstoffe sind nach wie vor die wichtigsten Konstruktions- oder Strukturwerkstoffe. Sie werden in die beiden großen Gruppen der Eisenwerkstoffe und der Nichteisenmetalle (NE-Metalle) eingeteilt.

„Hartmetalle“ kennzeichnen eine Übergangsgruppe zu den „Keramiken“ (siehe 4.3.4).

3.3 Eisenwerkstoffe

Als Eisenwerkstoffe werden Metallegierungen bezeichnet, bei denen der Massenanteil des Eisens höher ist als der jedes anderen Legierungselements. Reines Eisen ist wegen seiner geringen Festigkeit nicht als Konstruktionswerkstoff geeignet; seine besonderen magnetischen Eigenschaften sind jedoch für die Elektrotechnik von Bedeutung. Das wichtigste Legierungselement des Eisens ist Kohlenstoff. Abhängig vom Kohlenstoffgehalt und von der Wärmebehandlung erhält man verschiedene Stähle und Gusseisen, für deren Verständnis das Eisen-Kohlenstoff-Zustandsdiagramm eine wesentliche Basis darstellt [1]. (Eigenschaften und technische Daten der Eisenwerkstoffe: siehe 9.)

3.3.1 Eisen-Kohlenstoff-Diagramm

Im thermodynamischen Gleichgewicht liegen in einem Eisen-Kohlenstoff-System Eisen und Kohlenstoff als Graphit nebeneinander vor (stabiles System). In der Praxis häufiger benutzt wird das metastabile Eisen-Zementit-Diagramm. Zementit ist das Eisenkarbid, Fe_3C , das bei langen Glühzeiten in eine Eisenphase und Graphit zerfällt. Aus dem Eisen-Kohlenstoff-Zustandsdiagramm, Bild 3-1, lassen sich die verschiedenen Gefügestände als Funktion von Kohlenstoffgehalt und Temperatur entnehmen. Die Zustandsfelder der einzelnen Phasen werden von Linien begrenzt, die durch die Buchstaben ihrer Endpunkte bezeichnet werden. Diese Linien können als Verbindungslinien der Haltepunkte, die als Verzögerungen bei Erwärmung oder Abkühlung infolge Gefügeumwandlung auftreten, angesehen werden. Bei Temperaturen oberhalb der Liquiduslinie ABCD liegen Eisen-Kohlenstoff-Lösungen als Schmelze vor. Sie erstarrten in Temperaturbereichen, die zwischen der Liquiduslinie ABCD und der Soliduslinie AHIECF liegen. Mit abnehmender Temperatur nimmt der Anteil der ausgeschiedenen Kristalle in der Schmelze zu, bis an der Soliduslinie die Schmelze vollständig erstarrt ist. Das am niedrigsten Erstarrungspunkt aller Schmelzen (Punkt C) einheitlich erstarrende Gefüge wird Eutektikum genannt.

Im erstarrten Zustand ergeben sich für verschiedene Bereiche von C-Gehalt und Temperatur unterschiedliche Phasen und Gefüge. Beim reinen Eisen treten Modifikationen mit kubisch raumzentriertem (krz) oder dem dichteren kubisch flächenzentriertem (kfz) Gitter auf, die sich an den Haltepunkten A_r , A_c (r refroidissement: Abkühlung; c chauffage: Erwärmung) umwandeln. Man unterscheidet:

- α -Fe (Ferrit); krz; $\vartheta < 911 \text{ }^\circ\text{C}$ (A_3) (unter $\vartheta = 769 \text{ }^\circ\text{C}$, Curie-Temperatur, ist α -Fe ohne Gitterumwandlung ferromagnetisch)
- γ -Fe (Austenit); kfz; $911 \text{ }^\circ\text{C} < \vartheta < 1392 \text{ }^\circ\text{C}$ (A_4)
- δ -Fe (δ -Eisen); krz; $1392 \text{ }^\circ\text{C} < \vartheta < 1536 \text{ }^\circ\text{C}$

Bei C-Gehalten > 0 wird Kohlenstoff im α -, γ - und δ -Eisen in Zwischengitterplätzen eingelagert, wobei Mischkristalle (MK) bis zu den folgenden maximalen Löslichkeiten des Kohlenstoffs in Eisen entstehen:

- α -Mischkristall; 0,02 Gew.-% C bei 723 °C (A_1)
- γ -Mischkristall (Austenit); 2,06 Gew.-% C bei 1147 °C
- δ -Mischkristall; 0,1 Gew.-% C bei 1493 °C

Wird der maximal lösliche C-Gehalt überschritten, so werden im stabilen System Kohlenstoff (Graphit) oder im technisch wichtigeren metastabilen System Zementit Fe_3C ausgeschieden. Das metastabile System beschreibt dann die Reaktionen zwischen Eisen und Zementit. Ein Gehalt von 100% Zementit entspricht 6,69 Gew.-% C. Fe_3C weist eine relativ hohe Härte (1400 HV) auf und besitzt ein kompliziertes Gitter (orthorhombisch) mit 12 Fe-Atomen und 4 eingelagerten C-Atomen je Elementarzelle. Eisen-Kohlenstoff-Legierungen mit einem C-Gehalt $> 6,69$ Gew.-% besitzen keine technische Bedeutung. Die am niedrigsten Liquiduspunkt C bei 4,3 Gew.-% C vorliegende Schmelze zerfällt bei Erstarrung im festen Zustand in ein als Eutektikum bezeichnetes feinverteiltes Gemenge von γ -Mischkristallen (Auste-

nit) mit 2,06 Gew.-% C und Fe_3C -Kristallen (Zementit) mit 6,69 Gew.-% C. Im übereutektischen Bereich ($> 4,3$ Gew.-% C) bilden sich Gefüge aus Ledeburit und Primärzementit, im untereutektischen Bereich ($< 4,3$ Gew.-% C) Gefüge aus Austenit, Ledeburit und Sekundärzementit. (Sekundärzementit entsteht durch Ausscheidung von Eisenkarbid aus Austenit).

Das bei der Abkühlung von homogenem Austenit (γ -Mischkristalle) bei einem C-Gehalt von 0,8 Gew.-% entstehende Eutektoid Perlit besteht aus nebeneinanderliegendem lamellenförmigem Ferrit (α -Mischkristalle) und Zementit. Bei untereutektoiden Legierungen ($< 0,8$ Gew.-% C) scheiden sich vor Erreichen des Perlitpunktes (S) Ferritkristalle aus, bei übereutektoiden Legierungen ($> 0,8$ Gew.-% C) bildet sich Sekundärzementit.

Die im Eisen-Kohlenstoff-Zustandsdiagramm angegebenen Zustandsfelder gelten nur dann, wenn für die Einstellung der Gleichgewichte und die erforderlichen Diffusionsvorgänge genügend Zeit zur Verfügung steht.

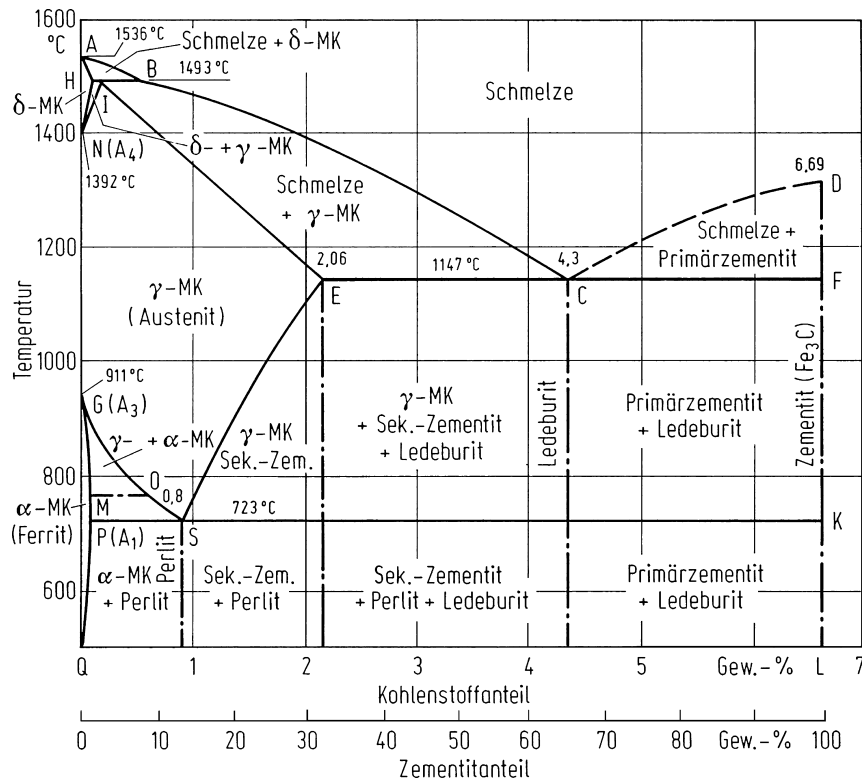


Bild 3-1. Eisen-Kohlenstoff-Diagramm (metastabiles System)

3.3.2 Wärmebehandlung

Die zur Erzeugung bestimmter Gefügestände oder Werkstoffeigenschaften eingesetzten Verfahren der Wärmebehandlung bestehen aus den Verfahrensschritten Erwärmen, Halten und Abkühlen und umfassen das Härten und die Glühbehandlungen.

a) Härten

Beim Härten werden durch rasches Abkühlen aus dem Austenitfeld des Fe-C-Zustandsdiagramms Gefügestände mit höherer Härte und Festigkeit erzeugt.

Die Kinetik der Umwandlung des Austenits in andere Phasen wird durch ein Zeit-Temperatur-Umwandlungsdiagramm (ZTU-Diagramm) beschrieben (Bild 3-2). In einem Zeit-Temperatur-Koordinatensystem werden Kurven gleichen Umwandlungsgrades eingetragen (0%: Beginn, 100%: Ende der Umwandlung). Die Umwandlungsmechanismen und die Gefügeausbildung der Umwandlungsprodukte (Austenit, Perlit, Bainit und Martensit) hängen von der Abkühlgeschwindigkeit ab. In Abhängigkeit von der Abkühlgeschwindigkeit lässt sich Austenit diffusionsgesteuert in Perlit oder in ein als Bainit bezeichnetes feines Gemenge von Ferrit und Carbid umwandeln. Durch sehr rasche Abkühlung (Abschrecken) kann die diffusionsgesteuerte Umwandlung in die beiden Gleichgewichtsphasen unterdrückt und nach Unterschreiten der sog. Martensit-Starttemperatur

(M_s) eine diffusionslose Umwandlung (Umklappen) der kfz Elementarzellen des Austenits in die tetragonal verzerrten Gefügestrukturen des Martensits bewirkt werden. Infolge der hohen Übersättigung an Zwischengitter-C-Atomen und einer durch die Gitterverzerrungen erhöhten Versetzungsdichte zeichnet sich das aus latten- und plattenförmigen Strukturen bestehende Martensitgefüge durch hohe Härte aus.

Das beim Härten entstehende hart-spröde Martensitgefüge wird meist angelassen oder vergütet: Erwärmen auf 200 bis 600 °C, um spröden Martensit durch Abbau von Spannungen und Ausscheidung von Carbiden in einen duktileren Zustand zu überführen. Eine auf die Oberflächen beschränkte Härtung (Randschichthärten) ist mit Flammenhärten, Laserhärten und dem Induktionshärten möglich. Bei zu geringem C-Gehalt eines Bauteils kann durch Aufkohlen (Einsetzen in C-abgebende Mittel) eine C-Anreicherung erreicht und durch das Einsatzhärten eine hohe Oberflächenhärte bei hoher Zähigkeit des Kern erzielt werden. Eine Oberflächenhärtung kann auch durch thermochemische Behandlungen unter Eindiffundieren bestimmter Elemente, wie z. B. Stickstoff, Bor oder Vanadium, vorgenommen werden. Von besonderer technischer Bedeutung ist das Nitrieren, das im Ammoniakstrom (Gasnitrieren), in Salzbadern (Badnitrieren) oder unter Ionisation des Stickstoffs durch Glimmentladung (Plasmanitrieren) durchgeführt werden kann.

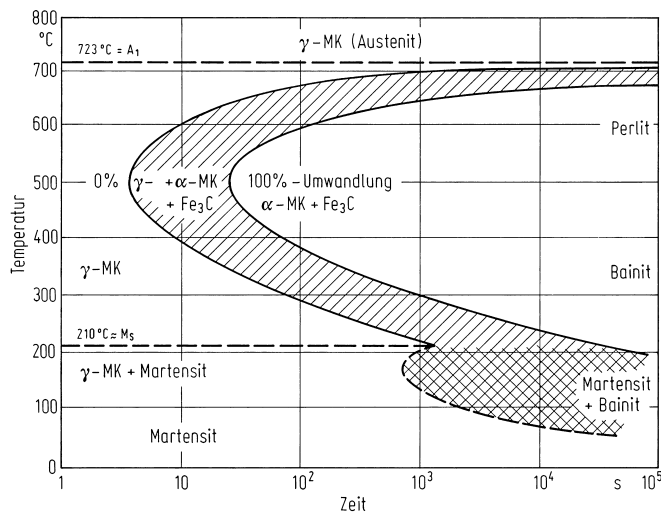


Bild 3-2. Isothermes Zeit-Temperatur-Umwandlungsschaubild (ZTU-Schaubild): schematische Darstellung für eutektoiden Stahl

b) Glühbehandlungen

Durch Glühbehandlungen bei einer bestimmten Temperatur und Haltedauer sowie nachfolgendem Abkühlen werden bestimmte Gefügestände und Werkstoffeigenschaften erreicht. Wichtige Verfahren sind:

- *Normalglühen*, (*Normalisieren*). Erwärmen kurz über die Gleichgewichtslinie (GOS) im Austenitgebiet und anschließendes Abkühlen an Luft führt zur völligen Umkristallisation und Ausbildung eines feinkörnigen perlitisch ferritischen Gefüges.
- *Weichglühen*. Verbesserung des Formänderungsvermögens durch längeres Pendelglühen im Temperaturbereich der Perlitumwandlung, wobei sich die im streifigen Perlit vorliegenden Zementitlamellen in die energieärmere rundliche Carbiddform umwandeln.
- *Rekristallisationsglühen*. Glühen kaltverformter Werkstoffe unterhalb der Temperatur der Perlitreaktion, sodass Versetzungen durch Erholung oder Rekristallisation ausheilen können und die Verformbarkeit wieder hergestellt wird. Die Korngröße ist verformungsabhängig.
- *Spannungsarmglühen*. Beseitigung von Eigenspannungen durch Erwärmen unterhalb der Temperatur beginnender Rekristallisation und langsames Abkühlen.

3.3.3 Stahl

Eisen-Kohlenstoff-Legierungen mit einem Kohlenstoffanteil i. Allg. unter 2 Gew.-%, die kalt oder warm umformbar (schmiedbar) sind, werden als Stähle, nichtschmiedbare Eisenwerkstoffe, C-Anteil über 2 Gew.-%, als Gusseisen bezeichnet [1].

Die gezielt zur Herstellung der verschiedenen Stähle zugefügten Legierungselemente bilden mit Eisen meist Mischkristalle. Die Elemente

Cr, Al, Ti, Ta, Si, Mo, V, W

lösen sich bevorzugt in Ferrit (Ferritbildner); die Elemente

Ni, C, Co, Mn, N, Cu

vorwiegend in Austenit. Sie erweitern das γ -Gebiet und machen den Stahl austenitisch. Stähle mit hohen Ni- oder Mn-Gehalten sind bis zur Raumtemperatur austenitisch. Neben Mischkristallen können sich in Stählen Verbindungen bilden, wenn zwischen min-

destens zwei Legierungselementen starke Bindungskräfte vorhanden sind, wodurch sich komplizierte, harte Kristallgitter bilden können. Wichtig sind dabei Carbide, Nitride und Carbonitride. Wichtige Carbiddbildner sind:

Mn, Cr, Mo, W, Ta, V, Nb, Ti.

Schwache Carbiddbildner (Mn, Cr) lagern sich z. B. in Fe_3C als Mischkristalle ein, z. B. $(\text{Fe, Cr})_3\text{C}$, $(\text{Fe, Mn})_3\text{C}$; starke Carbiddbildner (Ti, V) bilden Sonderkarbide mit einer von der des Fe_3C abweichenden Gitterstruktur, z. B. Mo_2C , TiC, VC.

Durch die Nitritbildner

Al, Cr, Zr, Nb, Ti, V

werden harte Nitride (bis 1200 HV) gebildet und beim Nitrierhärten technisch genutzt. Carbonitridausscheidungen erzeugen ein sehr feinkörniges Umwandlungsgefüge (Feinkornbaustähle).

Bei den Stählen werden nach der Verwendung Bereiche mit den folgenden Hauptsymbolen unterschieden [2]:

- S Stähle für den allgemeinen Stahlbau
- P Stähle für den Druckbehälterbau
- L Stähle für den Rohrleitungsbau
- E Maschinenbaustähle
- B Betonstahl
- Y Spannstahl
- R Stähle für oder in Form von Schienen
- H Kaltgewalzte Flacherzeugnisse in höherfesten Ziehgüten
- D Flacherzeugnisse aus weichen Stählen zum Kaltumformen
- T Verpackungsblech- und -band
- M Elektroblech und -band [mit besonderen magnetischen Eigenschaften]

Bei entsprechenden Gusswerkstoffen wird dem Kurznamen z. B. G- vorangestellt.

Für die systematische Bezeichnung von Stahlwerkstoffen gibt es nach DIN EN 10027-1 (Bezeichnungssysteme für Stähle), die folgenden Möglichkeiten:

- a. Kurznamen, beruhend auf der Verwendung, mit dem Aufbau
 - *Hauptsymbol* (siehe oben)

- *Kennwert* der charakteristischen mechanischen (oder physikalischen) Eigenschaft, z. B. Streckgrenze in MPa, Zugfestigkeit in MPa, Ummagnetisierungsverlust in $0,01 \times W/kg$ bei 1,5 Tesla.
- *Zusatzsymbole* gemäß DIN V 17006-100: Bezeichnungssysteme für Stähle bzgl. Kerbschlagarbeit bei unterschiedlicher Prüftemperatur sowie besonderer Eigenschafts-, Einsatz- oder Erzeugnisbereiche, z. B. „F“ zum Schmieden geeignet, „L“ für tiefe Temperaturen, „Q“ vergütet.

Beispiel: S690Q bedeutet Stahl für den Stahlbau mit einer Streckgrenze von 690 MPa, vergütet.

b. Kurznamen, basierend auf der chemischen Zusammensetzung, mit vier Typen:

1. *Unlegierte Stähle*: Hauptsymbol C (Kohlenstoff) und Zahlenwert des 100fachen mittleren C-Gehaltes in Gew.-% für unlegierte Stähle mit Mangan-Gehalt < 1 Gew.-% (Beispiel: C 15)
2. *Unlegierte Stähle* mit Mn-Gehalt > 1 Gew.-%, unlegierte Automatenstähle und legierte Stähle (außer Schnellarbeitsstähle) mit Gehalten der einzelnen Legierungselemente < 5 Gew.-%: Hauptsymbol 100facher mittlerer C-Gehalt in Gew.-% dazu Nennung der charakteristischen Legierungselemente und ganzzahlige Angabe ihrer mit folgenden Faktoren multiplizierten Massenanteile

Legierungselemente	Faktor
Cr, Co, Mn, Ni, Si, W	4
Al, Be, Cu, Mo, Nb, Pb, Ta, Ti, V, Zr	10
C, N, P, S, Ca	100
B	1000

Beispiel: 13 CrMo4-4 ist legierter Stahl mit 0,13% C, 1% Cr und 0,4% Mo;

3. *Hochlegierte Stähle*: Hauptsymbol X, dazu Angabe 100fachen mittleren C-Gehaltes in Gew.-% sowie der charakteristischen Legierungselemente (chem. Symbole und Anteile in Gew.-%) für legierte Stähle, wenn für mindestens ein Legierungselement der Gehalt 5 Gew.-% übersteigt.

Beispiel: X5CrNiMo18-10 ist hochlegierter Stahl mit 0,05% C, 18% Cr, 10% Ni sowie auch Mo;

4. *Schnellarbeitsstähle*: Hauptsymbol HS und Zahlen, die in gleichbleibender Reihenfolge den Massenanteil folgender Legierungselemente angeben: W, Mo, V, Co.

Beispiel: HS 2-9-1-8.

c. Werkstoffnummern, die durch die Europäische Stahlregistratur vergeben werden, mit folgendem Aufbau:

- Bei Stählen steht an erster Stelle der Werkstoffnummer eine 1.
- Nach einem Punkt folgt eine zweistellige Stahlgruppennummer, z. B. 00 für Grundstähle oder 01 bis 09 für Qualitätsstähle. Bei den legierten Edelmetallen gelten die Gruppennummern 20 bis 28 für Werkzeugstähle, 40 bis 49 für chemisch beständige Stähle, sowie die vier Dekaden 50 bis 89 für Bau-, Maschinen- und Behälterstähle.

- Es folgt eine zweistellige Zählnummer für die einzelne Stahlsorte.

Beispiel: 1.2312 bedeutet: 1 für Stahl, 23 für molybdänhaltige Werkzeugstähle, Zählnummer 12.

Stähle stellen nach wie vor die wichtigsten und vielfältigsten Konstruktions- sowie auch Funktionswerkstoffe dar. Eine kurze Zusammenstellung technisch wichtiger Stähle mit stichwortartigen Angaben über Aufbau, Eigenschaften und Verwendungszweck sowie Sortenbeispielen und zugehörigen Normbezeichnungen gibt Tabelle 3-1.

3.3.4 Gusseisen

Gebräuchliche Gusseisenwerkstoffe haben C-Anteile zwischen 2 und ca. 4 Gew.-% und sind im Allgemeinen nicht schmiedbar. Die Legierungselemente Kohlenstoff und Silicium bestimmen in Verbindung mit der Erstarrungsgeschwindigkeit das Gefüge bezüglich der entstehenden Kohlenstoffphasen, siehe Bild 3-3.

Mit zunehmendem C- und Si-Gehalt werden die folgenden hauptsächlich Felder unterschieden:

- I. Weißes Gusseisen (Hartguss, metastabiles System),
- II. Graues Gusseisen (Grauguss, stabiles System),
- III. Graues Gusseisen (Grauguss, stabiles System), ferritisches Gefüge: Graphit und Ferrit;

Tabelle 3-1. Technische Stahlsorten (Übersicht)

Stahlsorten	Merkmale, Beispiele
• Baustähle für Hoch-, Tief-, Brückenbau, Fahrzeug-, Behälter- und Maschinenbau	
Allgemeine Baustähle (DIN EN 10 025-1, -2)	Unlegierte und niedriglegierte ferritisch-perlitische Gefüge; Mindeststreckgrenzen 180 bis 360 MPa
Hochfeste Baustähle (DIN EN 10 113-1/3)	Mikrolegierte (TiC-NbC-VC-Dispersionen), schweißgeeignete Feinkornbaustähle, z. B. S460N
Baustähle für spezielle Erzeugnisse	Blankstahl nach DIN 1652-1/4; Feibleche, DIN 1623; Band und Blech aus unlegiertem Stahl, DIN 1614, kaltgewalzte Flacherzeugnisse aus weichen Stählen zum Kaltumformen nach DIN EN 10130; warmgewalzte Flacherzeugnisse aus Stählen mit hoher Streckgrenze zum Kaltumformen nach DIN EN 10 149-1/3
• Stähle für eine Wärmebehandlung	
Vergütungsstähle (DIN EN 10083-1/3)	Mn/Cr/Mo/Ni/V-legiert; 0,2 bis 0,6% C, für dynamisch beanspruchte Bauteile hoher Festigkeit; z. B. C45E, 42CrMo4
Stähle für das Randschichthärten (DIN 17 212)	Vergütungsstähle für kernzähe, oberflächenharte Bauteile durch Flamm- und Induktionshärten, z. B. 45Cr2 (55 HRC)
Einsatzstähle (DIN EN 10084)	Mn/Cr/Mo/Ni-legiert, niedr. C-Gehalt; kernzäh und oberflächenhart durch Aufkohlen und Härten, z. B. C10, 20MoCrS4
Nitrierstähle (DIN EN 10 085)	Vergütungsstähle mit perlitisch-martensitischem Gefüge und Nitridbildnern (Cr, Mo, Al); z. B. 31CrMo12, 34CrAlMo5
• Stähle für besondere Fertigungsverfahren	
Automatenstähle (DIN EN 10 087)	Durch S- und Pb-Zusätze gut zerspanbar und spanbrüchig bei hohen Schnittgeschwindigkeiten; einsetzhärtbar (z. B. 10S20), vergütbar (z. B. 45S20)
Stahlguss	Fe-C-Legierungen mit < 2% C; allg. Stahlguss (z. B. GS-60) DIN EN 10293; warmfester Stahlguss (z. B. G17CrMo 5-5), DIN EN 10 213-2
• Stähle mit besonderen technologischen Eigenschaften	
Kaltzähe Stähle (DIN EN 10 028-4)	Ni-legierte Stähle mit ausreichender Zähigkeit bei -60 bis 195 °C; z. B. X8Ni9
Hochwarmfeste austenitische Stähle (DIN EN 10 028-7, DIN EN 10 222-5, DIN EN 10 302)	Ferritisch perlitisches Gefüge; z. B. X3CrNiMoN17-13 ($T < 800$ °C), X8NiCrAlTi32-21 ($T < 1000$ °C)
Nichtrostende Stähle (DIN EN 10 088-1/3)	ferritisch, z. B. X6Cr17, martensitisch, z. B. X39Cr13; austenitisch, z. B. X2CrNi19-11; austenitisch-ferritisch, z. B. X2CrNiMoCuWN25-7-4
• Stähle für Konstruktionsteile	
Federstähle (DIN EN 10 089)	Si/Mn/Cr/Mo/V-legiert, z. B. 38Si7, 60SiCr7
Stähle für Schrauben und Muttern	unlegierte Stähle, DIN EN 10 263-2; Einsatzstähle, DIN EN 10 263-3; Vergütungsstähle, DIN 1654-4; nichtrostende Stähle, DIN 1654-5; warmfeste und hochwarmfeste Stähle, DIN EN 10 269
Ventilstähle (DIN EN 10 090)	Beständig gegen mechanische, thermische, korrosive und tribologische Beanspruchung, z. B. X45CrSi9-3, X45CrNiW18-9
Wälzlagerstähle (DIN EN ISO 683-17)	Zug-druck-wechselbeständig, hochhart; maßbeständig, z. B. 100Cr6, 17MnCr5, X102CrMo17
• Werkzeugstähle (DIN EN ISO 4957)	
Kaltarbeitsstähle	Unlegiert und legiert (Cr/Mo/V/Mn/Ni/W) für $T < 200$ °C; z. B. C105W1 (Handwerkzeug), 90MnCrV8 (Schneidwerkzeug)
Warmarbeitsstähle	Warmfest, Cr/Mo/V/Ni-legiert für $T > 200$ °C (z. B. X40CrMoV5-1); anlassbeständig
Schnellarbeitsstähle	für hohe Schnittgeschwindigkeiten und -temperaturen (bis 600 °C), höchste Warmhärte und Anlassbeständigkeit, hoher W/Cr/Mo/V-Carbidanteil (C > 0,75%); z. B. S10-4-3-10

Gusseisen wird in folgende Gruppen eingeteilt:

- Gusseisen mit Lamellengraphit (GJL, DIN EN 1561). Eisengusswerkstoff mit lamellarem Graphit im Gefüge, geringe Verformbarkeit durch heterogenes Gefüge, steigende (Zug-)Festigkeit (100 bis 400 MPa) mit feiner werdender Graphitverteilung, gute Dämpfungseigenschaften, Druckfestigkeit etwa viermal so hoch wie Zugfestigkeit.
- Gusseisen mit Kugelgraphit (GJS, DIN EN 1563) Kugelige (globulitische) Ausbildung des Graphits durch Zusatz geringer Mengen von Magnesium, Cer und Calcium, Festigkeit erheblich höher als bei GJL bei erheblich erhöhter Duktilität.
- Temperguss (GJM, DIN EN 1562): Fe-C-Legierungen, die zunächst graphitfrei erstarren und durch anschließende Glühbehandlung in weißen Temperguss (entkohlend gegläht) oder schwarzen Temperguss (nichtentkohlend gegläht) mit ferritisch perlitischem Gefüge und Temperkohle umgewandelt werden. Temperguss vereinigt gute Gusseigenschaften des Graugusses mit nahezu stahlähnlicher Zähigkeit, er ist schweißbar und gut zerspanbar.
- Hartguss (GJH): Zementitbildung durch schnelles Abkühlen und Manganzusatz zur Schmelze, durch sog. Schalenhartguss Erzielung von Bauteilen mit weißem (sehr harten) Gusseisen in der Oberflächenschicht und Grauguss im Kern, dadurch Kombination hochbeanspruchbarer Oberflächen mit verbesserter Kernzähigkeit. Es gibt auch hochlegiertes Gusseisen mit Cr und Mo und somit harten Carbiden.

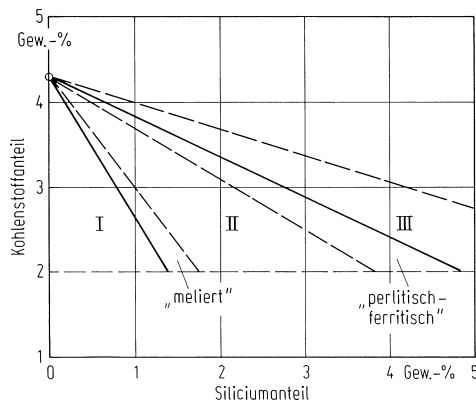


Bild 3-3. Gusseisendiagramm nach Maurer

3.4 Nichteisenmetalle und ihre Legierungen

Die als Werkstoffe genutzten Nichteisenmetalle (NE-Metalle) werden traditionell eingeteilt in

- Leichtmetalle (Dichte $\leq 4,5 \text{ kg/dm}^3$): Al, Mg, Ti; [3]
- Schwermetalle (Dichte $\geq 4,5 \text{ kg/dm}^3$): Cu, Ni, Zn, Sn, Pb;
- Edelmetalle: Au, Ag, Pt-Metalle.

Im Folgenden sind Gewinnung, Eigenschaften und Anwendungen der technisch wichtigsten Leichtmetalle und Schwermetalle stichwortartig beschrieben. Eigenschaftswerte und technische Daten der NE-Metalle sind im Kap. 9 zusammengestellt; eine Übersicht über die wichtigsten DIN-Normen gibt Tabelle 3-2.

3.4.1 Aluminium

Gewinnung durch Schmelzflusselektrolyse von aufbereitetem Bauxit bei 950 bis 970 °C; 4 t Bauxit liefern 1 t Hütten-Al mit 99,5 bis 99,9% Al.

Aluminium hat einen kfz Gitteraufbau und ist ausgezeichnet warm- und kaltverformbar (Walzen, Ziehen, Pressen, Strangpressen, Fließpressen, Kaltverformen). Es besitzt günstige Festigkeits-Dichte- und Leitfähigkeits-Dichte-Verhältnisse sowie eine gute Korrosionsbeständigkeit gegenüber Witterungseinflüssen in sauren wie schwach alkalischen Lösungen durch Bildung von (ca. 0,01 μm dicken) Oxid-Oberflächenschichten, die vor der Herstellung von Schweißverbindungen entfernt werden müssen („Schutzgasschweißen“ unter Argon oder Helium). Wichtige Legierungselemente für Aluminium sind Cu, Mg, Zn und Si. Durch geeignete Wärmebehandlung (Lösungsglühen, Abschrecken, Auslagern) kann eine Ausscheidungshärtung erzielt werden: feindisperse Ausscheidungen und die von ihnen bewirkten Matrixgitterverzerrungen behindern die Versetzungsbeweglichkeit und erhöhen damit die Festigkeit. Wichtig sind besonders die Knetlegierungen AlCuMg, AlMgSi, AlZnMg, AlZnMgCu und die Gusslegierung AlSi. Die Hauptanwendungsgebiete liegen in der Luft- und Raumfahrt, im Bauwesen und Fahrzeugbau (z. B. Profilsätze, Motorenblöcke, Gleitlager, Aufbauten), im Behälter- und Gerätebau (z. B. Leichtbaukonstruktionen), in der chemischen

Tabelle 3–2. Normen über Nichteisenmetalle und ihre Legierungen (Übersicht, Kurzbegriffe)

Metall	Normen	Gegenstand
Aluminium (Al)	DIN EN 576,	Al rein, Masseln; Halbzeug
	DIN EN 573-3, -4	
	DIN EN 573-3, -4;	Al, Knetlegierungen (T1), Gusslegierungen (T2)
	DIN EN 1706	
	DIN EN 485-2,	Al-Halbzeug (Bleche, Rohre, Profile), Festigkeit
	DIN EN 546-2	
Magnesium (Mg)	DIN 17611	Anodisch oxidiertes Al (Eloxal), Lieferbedingungen
	DIN EN 14 121-1, DIN EN 40 501-2	Al für die Elektrotechnik, DIN EN 1715-1, -2
	ISO 8287	Hüttenmagnesium
Titan (Ti)	DIN 1729-1, DIN EN 1753	Mg, Knetlegierungen (T1), Gusslegierungen
	DIN 9715	Mg-Halbzeug, Festigkeit
	DIN 17 850/51	Ti/Ti-Knetlegierungen, Zusammensetzung
Kupfer (Cu)	DIN 17 860	Bleche und Bänder aus Ti und Ti-Knetlegierungen
	DIN 17 862/64	Halbzeug aus Ti und Ti-Legierungen (Stangen, Drähte, Schmiedestücke)
	DIN EN 1976, DIN EN 1978	Cu rein, Sorten; Halbzeuge
	DIN EN 1652,	Cu-Halbzeug (Bleche, Rohre, Profile), Festigkeit
	DIN EN 12 163/65	
	DIN EN 1982	CuSn-Legierungen (Zinnbronze; Guss-Zinnbronze)
Nickel (Ni)	DIN EN 1982	CuZn-Legierungen (Messing; Guss-Messing)
	DIN EN 1982	CuAl-Legierungen (Al-Bronze; Guss-Al-Bronze)
	DIN 1701	Hüttennickel
	DIN 17 740	Nickel in Halbzeug; Zusammensetzung
Zinn (Sn)	DIN 17 741/43	Ni-Knetlegierungen, mit Cr, mit Cu; Zusammensetzung
	DIN EN 610	Sn, Sorten und Lieferformen
	DIN 1742	Sn-Druckgusslegierungen, Verwendungsrichtlinien
Zink (Zn)	DIN EN 611-1	Zinngerät, Zusammensetzung der Sn-Legierungen
	DIN EN 1179	Zn, Feinzink, Hüttenzink
	DIN EN 1774, DIN EN 12844	Feinzink-Gusslegierungen
	DIN EN 988	Zn-Halbzeug für das Bauwesen (Bleche, Bänder)
Blei (Pb)	DIN 17640-1	Pb-Druckgusslegierungen
	DIN 17 640-1	Pb und Pb-Legierungen; allgemeine Verwendung (T1)
		Kabelmäntel (T2), Akkumulatoren (T3)

Industrie (z. B. Behälter, Rohrleitungen), im Verpackungswesen (z. B. Folien) und in der Elektrotechnik (z. B. Schienen, Kabel und Freileitungsseile).

3.4.2 Magnesium

Gewinnung durch Schmelzflusselektrolyse von aufbereitetem Magnesiumchlorid bei 700 °C (70 bis 80% der Mg-Weltproduktion) oder direkter Reduktion von

Magnesiumoxid durch karbothermische oder silicothermische Verfahren.

Magnesium kristallisiert in hexagonal dichtester Kugelpackung, ist leicht zerspanbar und hat bei mittleren Festigkeitseigenschaften die niedrigste Dichte aller metallischen Werkstoffe (1,74 kg/dm³). Die hohe Affinität zum Sauerstoff macht trotz Bildung von Oxid-Oberflächenschichten Korrosionsschutzmaßnahmen erforderlich.

Die wichtigsten Legierungselemente (Al, Zn, Mn) verbessern die Festigkeit, vermindern die hohe Kerbempfindlichkeit und erhöhen die Korrosionsbeständigkeit (Mn). Die bei Raumtemperatur mehrphasigen Legierungen (Mischkristalle, intermetallische Phasen) lassen sich durch Wärmebehandlung bezüglich Zähigkeit (Lösungsglühen, Abschrecken) oder Festigkeit (Lösungsglühen, langsames Abkühlen) beeinflussen. Umformung der Knetlegierungen geschieht durch Strangpressen, Warmpressen, Schmieden, Walzen und Ziehen oberhalb 200 °C. Hauptanwendungsgebiete der Legierungen sind der Flugzeugbau (z. B. Türen, Cockpitkomponenten), der Automobilbau (z. B. Getriebegehäuse) sowie der Instrumenten- und Gerätebau (z. B. Kameragehäuse, Büromaschinen).

3.4.3 Titan

Herstellung kompakten Titans durch Vakuumschmelzen von porösem Titan, das aus Rutil bzw. Ilmenit über die Zwischenstufen Titandioxid und Titantrichlorid durch Aufschließen, Fällung und Reduktion gewonnen wird.

Titan hat bei Raumtemperatur eine hexagonale (verformungsungünstige) Gitterstruktur (α -Phase), die sich oberhalb von 882 °C in die kubisch raumzentrierte β -Phase umwandelt. Es hat eine hohe Festigkeit, relativ geringe Dichte, sowie eine ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit durch Oxidschichtbildung infolge hoher Sauerstoffaffinität und kann unter Schutzgas und im Vakuum geschweißt werden.

Legierungszusätze von Al, Sn oder O begünstigen die hexagonale α -Phase, solche von V, Cr und Fe die kubisch raumzentrierte β -Phase mit besserer Kaltumformbarkeit und höherer Festigkeit. Ähnlich wie bei Stahl können durch geeignete Wärmebehandlung (z. B. Ausscheidungshärtung, Martensithärtung) die mechanischen Eigenschaften beeinflusst und zweiphasige ($\alpha + \beta$)-Legierungen mit günstigem Festigkeits-Dichte-Verhältnis hergestellt werden.

Hauptanwendungsgebiete sind die Flugzeug- und Raketentechnik (z. B. Leichtbauteile hoher Festigkeit), Chemieanlagen (z. B. Wärmetauscher, Elektroden), Schiffsbau (z. B. seewasserbeständige Teile, wie Schiffsschrauben) und die Medizintechnik (biokompatible Implantate).

3.4.4 Kupfer

Gewinnung durch Pyrometallurgie (75% der Cu-Weltproduktion), Elektrometallurgie und Hydrometallurgie.

Kupfer hat ein kfz Gitter und eine Elektronenkonfiguration mit abgeschlossenen d-Niveaus der zweitäußersten Schale und einem s-Elektron in der äußersten Schale. Es besitzt gute Verformbarkeit, ausgezeichnete elektrische und thermische Leitfähigkeit sowie hohe Korrosionsbeständigkeit infolge des relativ hohen Lösungspotenzials und der Fähigkeit zur Deckschichtbildung in verschiedenen Medien. Es lässt sich gut schweißen und löten, ist jedoch gegen Erhitzung in reduzierender Atmosphäre empfindlich, sog. Wasserstoffkrankheit.

Geringe Legierungszusätze steigern die Festigkeit von Kupfer durch Mischkristallbildung (Ag, Mn, As) oder durch Aushärten (Cr, Zr, Cd, Fe, P). Wichtig sind folgende Kupferlegierungen:

- Messing: Kupfer-Zink-Legierungen mit den hauptsächlichlichen Gefügegruppen: α -Messing mit einem Zn-Anteil < 32 Gew.-% (gut kaltumformbar, schwieriger warmumformbar, schlecht zerspanbar), β -Messing mit 46% bis 50% Zn (schwierig kaltverformbar, gut warmverformbar, gut zerspanbar) und ($\alpha + \beta$)-Messing mit einem Zn-Gehalt von 32 bis 46%. Sondermessing enthält weitere Legierungsbestandteile, wie z. B. Ni oder Al, zur Erhöhung von Festigkeit, Härte, Feinkörnigkeit oder Mn, Sn zur Verbesserung von Warmfestigkeit und Seewasserbeständigkeit.
- Neusilber: Kupfer-Zink-Legierungen, bei denen ein Teil des Kupfers durch einen Nickelanteil (10 bis 25%) zur Verbesserung der Anlaufbeständigkeit ersetzt ist.
- Bronze: Kupfer-Legierungen mit einem Anteil von mehr als 60% Cu und den Hauptgruppen Zinnbronze (Knetlegierungen < 10% Sn, Gusslegierungen < 20% Sn), Aluminiumbronze (< 11% Al), Bleibronze für Lager (< 22% Pb), Nickelbronze (< 44% Ni), Manganbronze (< 5% Mn), Berylliumbronze (< 2% Be).

Hauptanwendungsgebiet von legiertem und unlegiertem Kupfer sowie von Mangan- und Berylliumbronze ist die Elektrotechnik (z. B. Kabel, Drähte; Wider-

standswerkstoffe, z. B. CuNi44 ‚Konstantan‘) und der (Elektro-)Maschinenbau (z. B. Kommutatorlamellen in Elektromotoren, Punktschweißelektroden). Messing eignet sich besonders für die spanende Bearbeitung (z. B. Drehteile, Bauprofile) und die spanlose Formgebung (z. B. extreme Tiefziehbeanspruchung bei 28% Zn möglich). Neusilber ist sowohl für Relaisfedern in der Nachrichtentechnik als auch für Tafelgeräte und Geräte der Feinwerktechnik geeignet. Bronze findet Anwendung in der Tribotechnik (z. B. Gleitlager, Schneckenräder, kavitations- und erosionsbeanspruchte Bauteile).

3.4.5 Nickel

Gewinnung aus sulfidischen oder silikatischen Erzen durch komplizierte metallurgische Prozesse: Flotationsaufbereitung, Rösten, Schmelzen im Schacht- oder Flammenofen, Verblasen im Konverter, Raffination.

Nickel hat wegen seines kubisch flächenzentrierten Gitters gute Umformbarkeit und Zähigkeit; es ist sehr korrosionsbeständig und bis zur Curietemperatur von 360 °C ferromagnetisch. Gegenüber Eindiffusion von Schwefel ist Nickel empfindlich und neigt dann zum Aufreißen bei der Kaltumformung, zur Warmrissigkeit beim Schweißen und bei der Warmumformung (sog. Korngrenzenbrüchigkeit).

Wichtige Legierungen sind:

- Nickel-Kupfer-Legierungen: Ni bildet eine lückenlose Mischkristallreihe und ist mit Cu durch Gießen, spanlose und spanende Formgebung sowie durch Lötten und Schweißen verarbeitbar. Legierungen mit 30% Cu (z. B. NiCu30Fe, ‚Monel‘) sind sehr korrosionsbeständig, Festigkeitssteigerung durch Aushärten (Zusatz von Al und Si).
- Nickel-Chrom-Legierungen: Massenanteile von 15 bis 35% Cr erhöhen die Zunderbeständigkeit und die Warmfestigkeit, z. B. bei Heizleitern mit hohem spezifischem Widerstand.
- Nickelbasis-Gusslegierungen, z. B. mit 0,1% C, 16% Cr, 9% Co, 1,7% Mo, 2% Ta, 3,5% Ti, 3,5% Al, 2,7% W (Inconel 738 LC) besitzen hohe Warmfestigkeit durch Ausscheidung eines hohen Volumenanteils der intermetallischen γ' -Phase Ni₃(Al, Ti) in die γ -Matrix (sog. Superlegierungen). Eine weitere Erhöhung der

Warmfestigkeit, besonders der Kriechfestigkeit und der Lebensdauer wird erzielt durch besondere Gießtechniken zur Vermeidung von Korngrenzen senkrecht zur Richtung maximaler Beanspruchung (gerichtete oder einkristalline Erstarrung). Superlegierungen dienen auch als Basis für oxid-dispersionsgehärtete (ODS) mechanisch legierte hochwarmfeste Werkstoffe, z. B. MA 6000.

- Nickel-Eisen-Legierungen: Weichmagnetische Werkstoffe (29 bis 75 Gew.-% Ni) mit hoher Permeabilität und Sättigungsinduktion sowie geringen Koerzitivfeldstärken und Ummagnetisierungsverlusten. Al, Co, Fe-Ni-Legierungen sind dagegen hartmagnetische Werkstoffe hoher, möglichst unveränderlicher Magnetisierung; FeNi36 (‚Invar‘) mit sehr kleinem thermischen Ausdehnungskoeffizienten.

Nickelbasis-Hochtemperaturwerkstoffe werden hauptsächlich in der Kraftfahrzeug- und Luftfahrttechnik (z. B. Verbrennungsmotorventile, Turbinenschaufeln) sowie in der chemischen Anlagentechnik (z. B. Reaktorwerkstoffe, Heizleiter) eingesetzt.

Nickel-Eisen-Legierungen sind im Bereich der Elektrotechnik unentbehrlich (z. B. als weich- und hartmagnetische Werkstoffe).

3.4.6 Zinn

Gewinnung durch Reduktion von Zinnstein (Zinndioxid) nach nassmechanischer Aufbereitung (z. B. Flotation) und Abrösten, anschließend Raffination durch Seigerung oder durch Elektrolyse.

Zinn hat ein tetragonales Gitter, das sich unterhalb von 13,2 °C (träge) in die kubische Modifikation umwandelt (‚Zinnpest‘ bei tiefen Temperaturen). Es ist gegen schwache Säuren und schwache Alkalien beständig. Infolge seiner niedrigen Rekristallisationstemperatur tritt bei der Umformung (Walzen, Pressen, Ziehen) bereits bei Raumtemperatur Rekristallisation ein, sodass die Kaltverfestigung ausbleibt (hohe Bruchdehnung). Wichtige Zinnlegierungen sind:

- Lagermetalle: Weißmetall-Legierungen, z. B. Gl-Sn80 (80% Sn, 12% Sb, 7% Cu, 1% Pb), dessen Gefüge aus harten intermetallischen Verbindungen (Cu₆Sn) sowie Sn-Sb-Mischkristallen besteht, die in ein weicheres bleihaltiges Eutektikum eingelagert sind.

- Weichlote: L-Sn60 (60% Sn, 40% Pb), erstarrt zu 95% eutektisch (dünnflüssig, für feine Lötarbeiten), L-Sn30 (30% Sn, 70% Pb), bei niedriger Arbeitstemperatur (190 °C dünnflüssig besitzt großes Erstarrungsintervall (für großflächige Lötarbeiten).

Hauptanwendungen der Zinnlegierungen betreffen die Tribotechnik (Lagermetalle), die Fügetechnik (Lote) und den Korrosionsschutz von Metallen durch Verzinnen (z. B. Weißblech).

3.4.7 Zink

Gewinnung aus (einheimischer) Zinkblende (Wurtzit, ZnS) durch Aufbereiten (Flotation) Rösten, Reduktion mit Kohle und Kondensation des zunächst als Metalldampf entstandenen Zn in der Ofenvorlage; alternativ durch Auslaugung des Erzes und Elektrolyse.

Zink ist ein Schwermetall mit hexagonaler Gitterstruktur, guten Gusseigenschaften, anisotropen Verformungseigenschaften. Durch Zinkhydrogenkarbonat-Deckschichtbildung ausgezeichnete Beständigkeit gegen atmosphärische Korrosion. Negatives Potenzial gegen Fe in wässrigen Lösungen begründet guten Korrosionsschutz auf Stahl (Feuerverzinkung, galvanische Verzinkung) als „Opferanode“ (Abtrag von Zn statt Fe).

Zinklegierungen mit technischer Bedeutung sind vor allem die aus Feinzink (99,9 bis 99,95% Zn) hergestellten Gusslegierungen, die 3,5 bis 6% Al sowie bis zu 1,6% Cu zur Erhöhung der Festigkeit durch Mischkristallbildung und 0,02 bis 0,05% Mg zur Verhinderung interkristalliner Korrosion enthalten.

Hauptanwendungsgebiete sind neben der Feuerverzinkung von Stahl (ca. 40% der Zinkproduktion) vor allem der allgemeine Maschinenbau (z. B. Zn-Druckguss für kleinere Maschinenteile und Gegenstände komplizierterer Gestaltung) sowie das Bauwesen (z. B. Bleche für Dacheindeckungen, Dachrinnen, Regenrohre). Zink ist toxisch: das Lebensmittelgesetz verbietet die Verwendung von Zinkgefäßen zum Zubereiten und Aufbewahren von Nahrungs- und Genussmitteln.

3.4.8 Blei

Gewinnung aus Bleiglanz (PbS) durch Aufbereiten (Flotation zur Pb-Anreicherung), Rösten, Schachtofenschmelzen und Raffination.

Blei lässt sich wegen seines kubisch flächenzentrierten Gitters gut verformen, sowie außerdem gut gießen, schweißen und löten. Da die Rekristallisationstemperatur bei Raumtemperatur liegt, ist die Festigkeit sehr gering und die Neigung zum Kriechen hoch. Blei ist gegen Schwefelsäure beständig, da es unlösliche Bleisulfate bildet, die weiteren Korrosionsangriff ausschließen. Wegen seiner hohen Massenzahl ist Blei ein wirksamer Strahlenschutz für Röntgengeräte und radioaktive Stoffe.

Zusatz von Legierungsbestandteilen (Sb, Sn, Cu) erhöht die Festigkeit durch Mischkristallbildung und Aushärtung und verbessert die Korrosionsbeständigkeit. Bei der Blei-Antimon-Legierung Hartblei sind bei Raumtemperatur 0,24% Sb im Mischkristall löslich, im Eutektikum ca. 3% Sb. Hauptanwendungsgebiete sind die Kraftfahrzeugtechnik (50% des Pb-Verbrauchs für Starterbatterien), die Elektrotechnik (z. B. Bleikabel), der chemische Apparatebau (Beschichtungslegierungen) und der Strahlenschutz. Blei und seine Verbindungen sind stark toxisch; die Verwendung von bleihaltigen Legierungen im Nahrungs- und Genussmittelwesen ist verboten.

4 Anorganisch-nichtmetallische Werkstoffe

4.1 Mineralische Naturstoffe

Die in technischen Anwendungen verwendeten anorganischen Naturstoffe sind Minerale oder zumeist Gesteine, d. h. Aggregate kristalliner oder amorpher Minerale aus der (zugänglichen) Erdkruste. Minerale werden nach ihrer chemischen Zusammensetzung in neun Mineralklassen klassifiziert und nach ihrer Härte gemäß der Mohs'schen Härteskala gekennzeichnet, siehe Tabelle 4-1. Nach Mohs liegt die Härte eines Minerals zwischen der Härte des Skalenminerals, von dem es geritzt wird und derjenigen des Minerals, das es selbst ritzt. Die qualitative Härteskala nach Mohs lässt sich durch quantitative Härtemessungen (siehe 11.5.3) ergänzen [1], deren Mittelwerte für die Minerale der Mohsskala annähernd eine geometrische Folge bilden. (Im Mittel Multiplikation der Härtewerte mit dem Faktor 1,6 beim Übergang von einer Mohs-Härtestufe zur nächsthöheren.)