

---

## Zusammenfassung

Beschrieben wird in knapper Darstellung der Aufbau konventioneller metallischer Werkstoffe mit ihren verschiedenartigen regelmäßigen Atomanordnungen in kleinen Bereichen, den Kristalliten oder Körnern, die mit variabler Größe, Gestalt und Ausrichtung das Gefüge eines Metalls ausmachen, wobei sowohl die Atomanordnungen innerhalb der Kristallite als auch die spezielle Gefügestruktur für seine Eigenschaften von Bedeutung sind. Kenntnisse darüber und über die ebenfalls skizzierten Vorgänge, die in atomaren Bereichen ablaufen können, sind eine wichtige Voraussetzung für das Verständnis der unterschiedlichen Werkstoffeigenschaften wie Festigkeit oder Verformbarkeit und für die Auswirkungen, die technologische Prozesse, wie zum Beispiel Wärmebehandlungen, auf das Werkstoffverhalten ausüben können.

---

## 2.1 Submikroskopische Betrachtung – kristalline und nichtkristalline Strukturen

Viele feste Körper, wie z. B. Metalle, besitzen eine kristalline Struktur.<sup>1</sup> Das bedeutet, dass regelmäßige, räumliche Atomanordnungen, so genannte *Kristall-* oder *Raumgitter*, den Aufbau bestimmen. Die kleinste Einheit der Atomanordnungen ist die Elementarzelle (EZ). Fügt man einer solchen Elementarzelle in den drei Richtungen des Raumes weitere hinzu, so erhält man das Raumgitter. Die Kantenlänge der Elementarzelle nennt man *Gitterkonstante*, fiktive Ebenen im Raumgitter, die in gleichmäßigen Abständen mit Atomen besetzt sind, *Netzebenen*.

Der Nachweis der kristallinen Struktur der Metalle gelang 1912 *Max von Laue* und seinen Mitarbeitern durch Röntgenstrahlinterferenzen. Dies war möglich, weil die Wellenlän-

---

<sup>1</sup> Für umfassendere Ausführungen zum Inhalt dieses Kapitels sei auf die grundlagenorientierten Lehrbücher der Werkstoffkunde und Werkstoffwissenschaften [2.1–2.25] verwiesen.

ge der Röntgenstrahlen um  $10^{-8}$  cm liegt und die Atomabstände einige  $10^{-8}$  cm betragen. Bei bekannter Wellenlänge  $\lambda$  der Röntgenstrahlen lassen sich Abstand und Anordnung der Atome im Gitter ermitteln.

Nichtkristalline Festkörper mit unregelmäßiger Atomanordnung bezeichnet man als *amorph*. Keramische Werkstoffe kommen mit regelmäßiger (kristalliner) oder mit unregelmäßiger (amorpher) räumlicher Atomanordnung vor. Glas besitzt zum Beispiel eine amorphe räumlicher Atomanordnung.

Die Kettenmoleküle der Polymerwerkstoffe liegen entweder ungeordnet, knäuelartig durcheinander (Wattebauschstruktur), oder bilden Strukturen miteinander vernetzter Molekülketten. In besonderen Fällen können in kleinen Bereichen durch parallel liegende Molekülketten geordnete Strukturen auftreten. In teilkristallinen Polymerwerkstoffen wechseln solche „kristallinen“ Bereiche mit „amorphen“ Bereichen ab.

### 2.1.1 Kristallisationsformen metallischer Werkstoffe [2.1–2.25]

Analog zu den verschiedenen *Kristallsystemen* kennt man Kristallgitter mit unterschiedlicher Atomanordnung. Den meisten Metallen liegen kubische oder hexagonale Gitter zugrunde, wobei die folgenden Unterscheidungen wichtig sind.

**Kubisch primitives Gitter** (Abb. 2.1, kommt in der Natur nicht vor!)

Zahl der Atome je EZ: 1

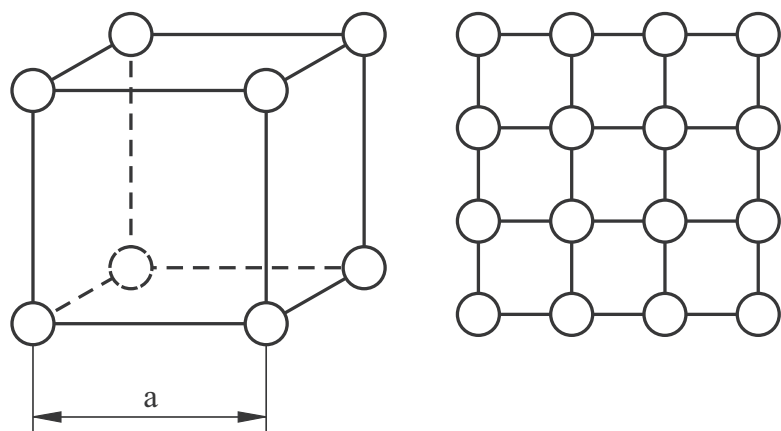
(8 Eckatome, die alle jeweils 8 Zellen gemeinsam angehören.)

Koordinationszahl: 6

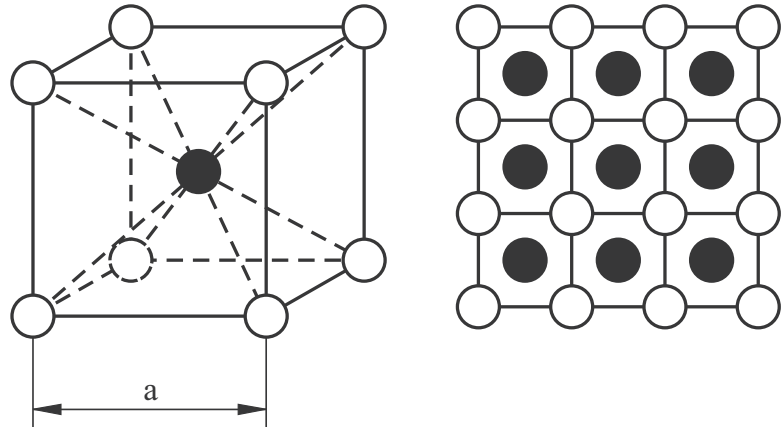
(Zahl der nächsten Nachbarn, d. h. Zahl der Atome, die von einem Atom den kürzesten, gleich großen Abstand aufweisen.)

Raumerfüllung: 52 %

**Abb. 2.1** Kubisch primitives Gitter und Darstellung einer Netzebene



**Abb. 2.2** Kubisch raumzentriertes Gitter und Darstellung von Netzebenen (übereinanderliegende Würfflächen-Ebenen, {100}-Ebenen gemäß Bezeichnung mit Miller'schen Indizes)



Die Raumerfüllung RE durch die Atome berechnet sich wie folgt:

$$V_{EZ} = a^3$$

$$V_{Kugel} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3$$

mit  $r = \frac{a}{2}$  wird

$$V_{Kugel} = \frac{\pi \cdot a^3}{6}$$

$$RE = \frac{V_{Kugel}}{V_{EZ}} \cdot 100 = \frac{\pi}{6} \cdot 100 = \underline{\underline{52\%}}.$$

Dabei wird angenommen, dass die Atome kugelförmige Gestalt besitzen und sich im Gitterverband gegenseitig berühren.

### Kubisch raumzentriertes Gitter (krz, Abb. 2.2)

Zahl der Atome je EZ:  $\frac{8}{8} + 1 = 2$

(8 Eckatome + 1 Atom in Würfelmittle)

Koordinationszahl: 8

Raumerfüllung: 68 %

### Beispiele

Metall	$\alpha$ -Eisen	Chrom	Tantal	Molybdän	Wolfram
Gitterkonstante in $10^{-8}$ cm	2,87	2,87	3,29	3,14	3,15

Der Atomdurchmesser bzw. Atomradius lässt sich über die Dichte bestimmen. Es sei  $N$  die spezifische Atomzahl (Avogadro Konstante) und  $A$  das Atom- bzw. Molekulargewicht. Dann gilt:

$$N = \frac{6 \cdot 10^{23}}{A} \quad \text{in} \quad \frac{1}{\text{g}}$$

Ein Atom hat dann das Volumen

$$V_{\text{at}} = \frac{\text{RE}}{\rho \cdot N} \quad \text{in} \quad \frac{\text{cm}^3}{\text{Atom}},$$

wenn man die Raumerfüllung RE berücksichtigt.

Geht man davon aus, dass das Atom Kugelform hat (Kugelradius =  $r$ ), dann ist

$$V_{\text{at}} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 = \frac{\text{RE}}{\rho \cdot N}$$

$$(2r)^3 = \frac{6}{\pi} \cdot \frac{\text{RE}}{\rho \cdot N} \quad \text{mit} \quad r = \frac{1}{2} \cdot \sqrt[3]{\frac{6}{\pi} \cdot \frac{\text{RE}}{\rho \cdot N}}$$

Wählt man als Beispiel kubisch raumzentriertes  $\alpha$ -Eisen mit dem Atomgewicht  $A = 55,85$ , der Dichte  $\rho = 7,86 \text{ g/cm}^3$  und der Raumerfüllung  $\text{RE} = 0,68$ , dann ergibt sich für den Atomradius

$$(2r)^3 = \frac{6 \cdot 0,68 \cdot 55,85}{\pi \cdot 7,86 \cdot 6 \cdot 10^{23}} = 15,38 \cdot 10^{-24}$$

und

$$r = 1,243 \cdot 10^{-8} \text{ cm}.$$

Da die Gitterkonstante von  $\alpha$ -Eisen bekannt ist (vgl. die Beispiele von Abschn. 2.1.1), lässt sich der gefundene Wert leicht kontrollieren. Aus den geometrischen Beziehungen der Elementarzelle kann man für die Länge der Raumdiagonalen entnehmen:

$$4r = a \cdot \sqrt{3}$$

also

$$a = \frac{4r}{\sqrt{3}} = \frac{4 \cdot 1,243}{\sqrt{3}} \cdot 10^{-8} \text{ cm} = 2,87 \cdot 10^{-8} \text{ cm}.$$

### Kubisch flächenzentriertes Gitter (kfz, Abb. 2.3)

Zahl der Atome je EZ:  $\frac{8}{8} + \frac{6}{2} = 4$

(8 Eckatome + 6 Atome auf den Würfel­flächen, die jeweils 2 Zellen gemeinsam angehören)

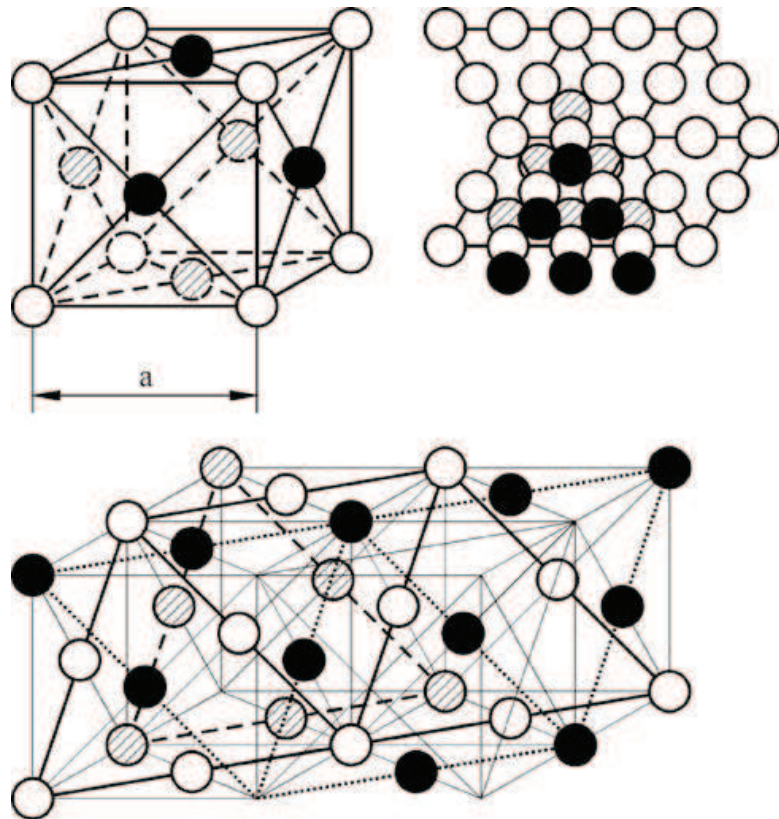
Koordinationszahl: 12

Raumerfüllung: 74 %,

es liegt die dichtest mögliche Kugelpackung vor.

Die hohe Koordinationszahl und die dichtest mögliche Kugelpackung sind Voraussetzung für eine große Kristallplastizität.

**Abb. 2.3** Kubisch flächenzentriertes Gitter und Darstellung von Netzebenen (drei übereinander liegende dichtest gepackte Ebenen, sog. {111}-Ebenen)<sup>2</sup>



### Beispiele

Metall	Aluminium	$\gamma$ -Eisen	Nickel	Kupfer	Silber	Gold	Blei
Gitterkonstante in $10^{-8}$ cm	4,04	3,65	3,52	3,61	4,08	4,07	4,90

### Hexagonales Gitter (Abb. 2.4)

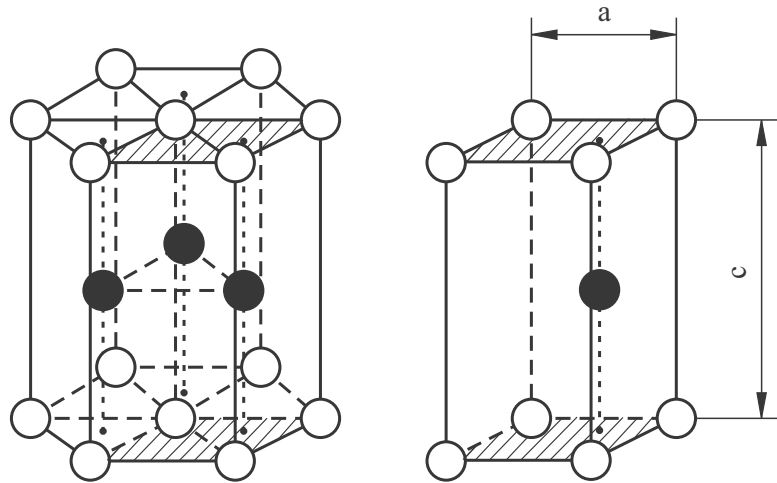
$$\left. \begin{array}{l} \text{Zahl der Atome je EZ: } 2 \cdot \left( \frac{6}{6} + \frac{1}{2} \right) + 3 = 6 \\ \phantom{\text{Zahl der Atome je EZ: }} 2 \cdot \frac{4}{8} + 1 = 2 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{gro\ss e bzw.} \\ \text{kleine EZ} \end{array}$$

Koordinationszahl: 12

Raumerfüllung: 74 %

Ein hexagonales Gitter besitzt ebenfalls die dichteste Kugelpackung, ist aber schlecht verformbar, da wenig Gleitebenen bzw. Gleitrichtungen zur Verfügung stehen.

**Abb. 2.4** Hexagonales Gitter  
(große und kleine EZ)



### Beispiele

Metall	Parameter	Magnesium	Kadmium	$\alpha$ -Titan	Zink	Zircon
Gitterkonstante in $10^{-8}$ cm	$a$	3,21	2,38	2,95	2,66	3,23
	$c$	5,21	5,62	4,69	4,95	5,15

**Allotrope Modifikationen** Manche Stoffe, darunter wichtige Metalle, können in zwei oder mehr Kristallarten kristallisieren. Solche Kristallarten bezeichnet man als allotrope Modifikationen des Stoffes.

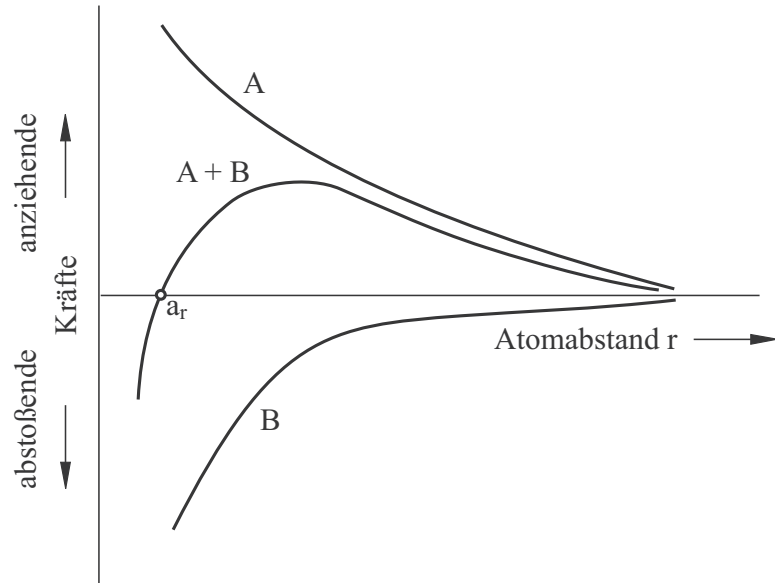
### 2.1.2 Bindekräfte [2.1, 2.2, 2.4, 2.6, 2.10, 2.20]

Um die Atome im Kristallgitter zusammenzuhalten, sind Bindekräfte erforderlich. Werden zwei Atome einander genähert, so zieht der Kern des einen die Elektronenwolke des anderen an. Diese Anziehungskraft wächst mit kleiner werdendem Abstand (Abb. 2.5), bis bei noch weiterer Annäherung Abstoßungskräfte wirksam werden. Zwischen Abstoßung und Anziehung besteht im Punkt kleinster potentieller Energie Gleichgewicht (Ruhelage).

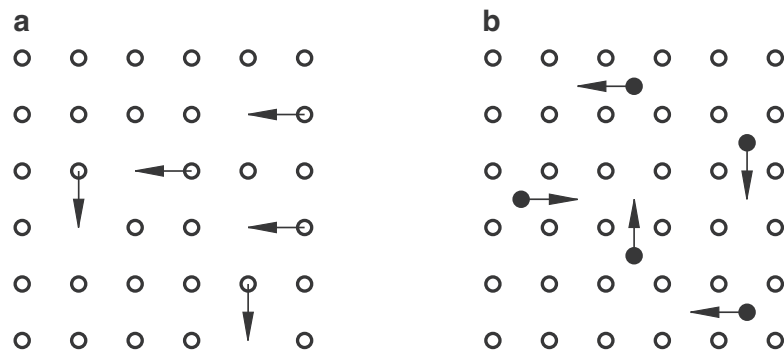
Um diese Ruhelage schwingen die Atome, wobei die Schwingungsamplitude mit der Temperatur zunimmt. Bei Erhöhung der Schwingungsamplitude verschiebt sich die Ruhelage, d. h. der mittlere Atomabstand vergrößert sich, weil die abstoßenden Kräfte bei Annäherung viel stärker zunehmen als die anziehenden Kräfte bei wachsender Entfernung abnehmen. Daraus lässt sich die Wärmedehnung erklären.

<sup>2</sup> Kennzeichnung der Ebenen durch Miller'sche Indizes siehe z. B. [2.1,2.2,2.4,2.6].

**Abb. 2.5** Schematische Darstellung des Verlaufs der Bindekräfte von Atomen,  $A$  anziehende Kraft zwischen Elektronengas und Atomkern,  $B$  abstoßende Kraft zwischen zwei Kernen,  $A + B$  resultierende Kraft,  $a_r$  Abstand nächster Nachbarn



**Abb. 2.6** Diffusionsmodelle  
**a** Modell der Leerstellendiffusion, **b** Modell der Zwischengitterdiffusion,  
 ○ Atom A, ● Atom B



### 2.1.3 Platzwechsel, Gitterstörungen, Diffusion [2.1, 2.2, 2.4, 2.6, 2.10, 2.20]

**Selbstdiffusion** Atome können ihren Platz im Gitter wechseln, und zwar im Austausch mit leeren Plätzen = Leerstellen (Abb. 2.6a). Ist  $U_{LW}$  die Energie, die zugeführt werden muss, damit ein Atom wandert, so ist die Wahrscheinlichkeit  $W$  eines Sprunges in die benachbarte Leerstelle

$$W = e^{\frac{-U_{LW}}{R \cdot T}}$$

mit:

$U_{LW}$ : Wanderungsenergie;

$R$ : Gaskonstante;

$T$ : Absolute Temperatur (in Kelvin)

Die Leerstellenkonzentration ist abhängig von der molaren Bildungsenergie der Leerstellen

$$c_L = \frac{n}{N} = e^{\frac{-U_{LB}}{R \cdot T}}$$

mit:

$n$ : Zahl der Leerstellen;

$N$ : Zahl der Atome;

$U_{LB}$ : Bildungsenergie der Leerstellen

Als Maßstab für den Massenfluss in der Zeiteinheit je Einheitsquerschnitt wählt man den Diffusionskoeffizienten  $D$ ,

$$D = D_0 \cdot e \cdot \frac{-(U_{LW} + U_{LB})}{R \cdot T} \quad \text{in} \quad \frac{\text{cm}^2}{\text{s}} \quad \text{mit} \quad D_0: \text{Diffusionskonstante}$$

mit der Aktivierungsenergie  $Q$  für Diffusion

$$Q = U_{LW} + U_{LB} \quad (\text{Energie auf 1 mol bezogen}) .$$

Ein Nachweis von Leerstellen kann z. B. durch Dichtebestimmungen erfolgen. Die tatsächliche Dichte wird beim Vorhandensein von Leerstellen kleiner als die aus Atomgewicht, Gitterkonstante und Struktur errechnete Dichte (Röntgendichte). Die Selbstdiffusion lässt sich durch radioaktive Markierung nachweisen.

**Fremddiffusion** Auch über Zwischengitterplätze (Abb. 2.6b) können Platzwechsel erfolgen, wenn eine kleinere Atomart vorliegt, die auf Zwischengitterplätzen Platz findet. Eine solche Fremddiffusion ist bereits bei niedrigeren Temperaturen möglich als die Selbstdiffusion.

Leerstellen und auf Zwischengitterplätzen eingebaute Einlagerungs- (Interstitials-) Atome sind ebenso wie Substitutionsatome (vgl. Abschn. 4.1.1) punktförmige Gitterstörungen, die das Grundgitter verzerren. Gitterstörungen verschiedener Art<sup>3</sup> bestimmen viele Werkstoffeigenschaften und sind die Grundvoraussetzung für werkstofftechnologische Prozesse, die z. B. auf der Diffusion beruhen.

---

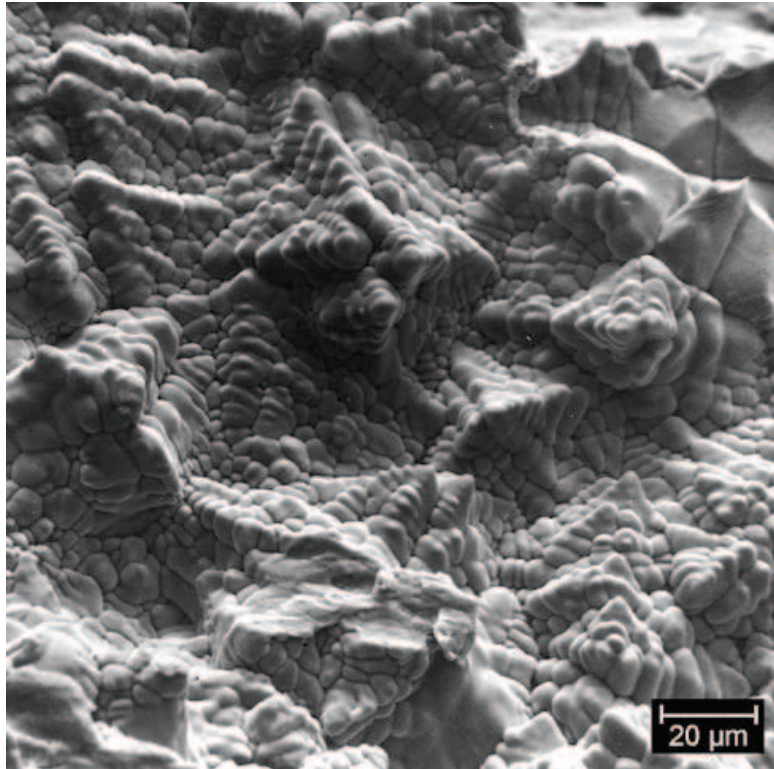
## 2.2 Mikroskopische Betrachtung – Entstehung von Kristallen und Kristallgefügen

In der Schmelze liegen die Atome in weitgehend ungeordnetem Zustand vor. Die Kristallisation beginnt an *Keimen*. Arteigene Keime können in Form von Kristallresten in nur wenig über den Schmelzpunkt hinaus erwärmten Metallen oder als Gruppen von zufällig geordnet vorliegenden Atomen auftreten, wofür eine gewisse Unterkühlung vorhanden sein muss. Artfremde Keime werden von Verunreinigungen gebildet.

---

<sup>3</sup> Wegen der verschiedenen Arten von Gitterstörungen siehe z. B. E. Macherauch, H.-W. Zoch: Praktikum in Werkstoffkunde. 11. Auflage. Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden 2011.

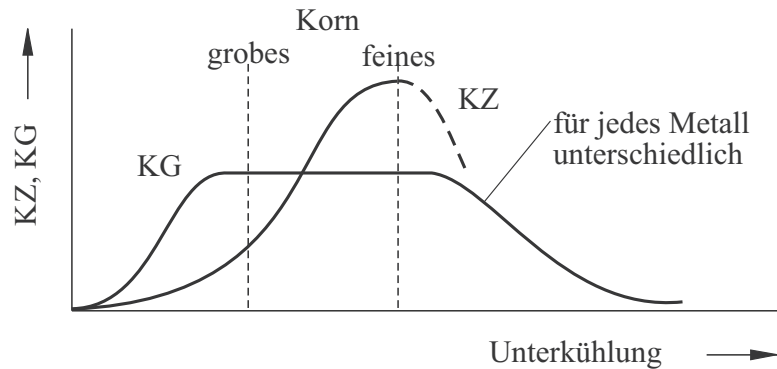


**Abb. 2.7** Tannenbamkristalle

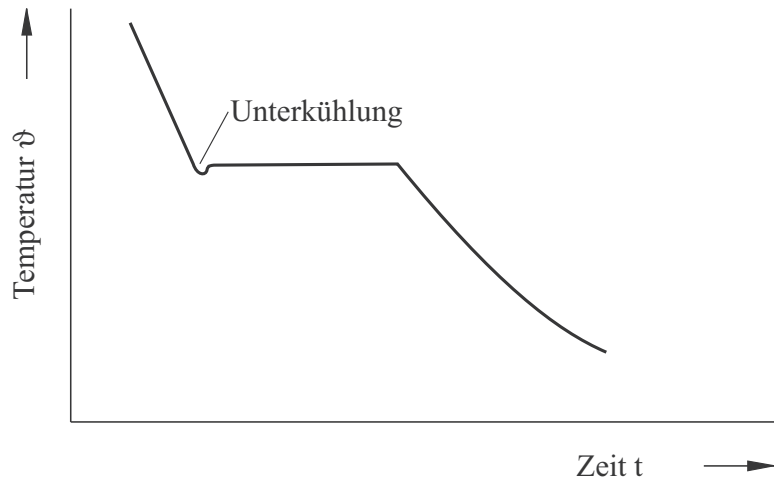
Bei der Erstarrung eines metallischen Festkörpers aus der Schmelze wachsen von den Keimen oder Keimstellen aus einzelne Kriställchen – Kristallite genannt – bis sie aneinander stoßen und schließlich die ganze Schmelze kristallisiert ist. Es entsteht so ein *Vielkristall* (*Polykristall*), in dem sich jeweils an den räumlichen Grenzen der einzelnen Kristallite oder Körner (*Korngrenzen*) die Ausrichtung der Kristallachsen (Orientierung der Körner) ändert. Die Bedingungen für das Kristallwachstum sind nicht nach allen Gitterrichtungen hin gleich günstig. Bei kubisch kristallisierenden Metallen findet z. B. die Kristallisation bevorzugt in Richtung der Oktaederecken statt. Dadurch entstehen als räumliche Kristallgebilde z. B. so genannte Tannenbaumkristalle (Dendriten), wie man sie bei unbehinderter Kristallisation in Hohlräumen (Lunkern) von Gusskörpern vorfindet (Abb. 2.7). Das Kristallwachstum verläuft außerdem vor allem entgegen der Richtung des stärksten Wärmeabflusses (Stängelkristallisation).

Abbildung 2.8 gibt den Zusammenhang zwischen Keimzahl und Kristallisationsgeschwindigkeit einerseits und Unterkühlung andererseits wieder. Bei geringer Unterkühlung, geringer Keimzahl und hoher Kristallisationsgeschwindigkeit ergibt sich ein grobes Korn mit ungünstigen mechanischen Eigenschaften (im Extremfall ein Einkristall). Bei stärkerer Unterkühlung und großer Keimzahl dagegen erhält man ein feines Korn (Kokillenguss). Bei sehr großen Abkühlungsgeschwindigkeiten (z. B.  $10^6$  K/s) lassen sich metallische Werkstoffe mit amorpher Struktur, d. h. regellosem Aufbau, herstellen, die als amorphe Metalle oder als metallische Gläser bezeichnet werden.

**Abb. 2.8** Keimzahl und Kristallisationsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Unterkühlung ( $KZ$  Keimzahl,  $KG$  Kristallisationsgeschwindigkeit)



**Abb. 2.9** Zeit-Temperatur-Diagramm für die Erstarrung reiner Metalle



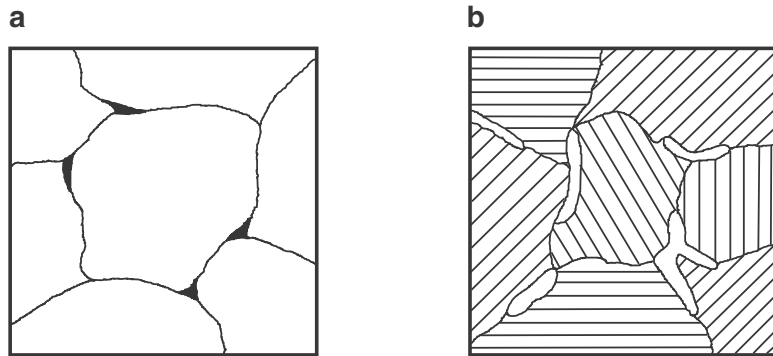
Der Verlauf der Erstarrung lässt sich anhand von Temperatur-Zeit-Kurven (Abb. 2.9) verfolgen (vgl. Abschn. 4.1.2). Bei reinen Metallen ergibt sich am Schmelzpunkt ein „Haltepunkt“ der Temperatur.

Als Konstruktionswerkstoffe verwendete Metalle liegen als Vielkristalle vor und weisen dann, wenn die Orientierungen der einzelnen Körner regellos verteilt sind, gleiche Eigenschaften in allen Raumrichtungen auf. Sie sind quasiisotrop, auch wenn viele Eigenschaften eigentlich von der Richtung im Kristallgitter abhängen (*Anisotropie*). Die Anätzbarkeit der Körner durch Säuren ist eine Eigenschaft, die von der Richtung in einem Kristallit abhängig ist. Deshalb werden die unterschiedlich orientierten Körner eines Vielkristalls beim Ätzen mit geeigneten Säuren unterschiedlich stark angegriffen und in einem geschliffenen, polierten und geätzten Metallstück unter dem Lichtmikroskop sichtbar und unterscheidbar. Man erkennt so z. B. das bei der Erstarrung entstehende *Primärgefüge*.

Gefüge können gemäß Abb. 2.10a als reine *Korngefüge* oder, gemäß Abb. 2.10b, mit netzartiger Anordnung einzelner Phasen (z. B. Zementitnetz um Perlitkörner, *Netzgefüge*) vorliegen.

Finden bei weiterer Abkühlung nach dem vollständigen Erstarren allotrope Umwandlungen statt, entstehen als *Sekundärgefüge* vielfach mehr oder weniger kugelige Körner (Globulite). Bei besonderen Behandlungen vielkristalliner Metalle, z. B. beim Kaltwalzen, bleibt die Orientierung der einzelnen Körner nicht mehr vollkommen regellos, sondern ein

**Abb. 2.10** Gefüge als **a** Korngefüge und **b** Netzgefüge



erhöhter Prozentsatz der Körner bekommt etwa die gleiche Orientierung (*Textur*). Die Eigenschaften derartiger texturbefahreter Metalle sind richtungsabhängig. Unter besonderen Umständen lassen sich auch Einkristalle mit einer einzigen Orientierung züchten (Körper aus einem einzigen Korn), an denen die Abhängigkeit verschiedener Eigenschaften von der Orientierung untersucht werden kann.

Die Darstellung und Dokumentation der Gefüge unterschiedlicher oder unterschiedlich behandelte, z. B. verformte oder wärmebehandelte Metalle (vgl. Gefügebilder in Kap. 4) ist Aufgabe der *Metallographie* [2.21, 2.22].

---

## Literatur

- [2.1] Macherauch, E., Zoch, H.-W.: *Praktikum in Werkstoffkunde*, 11. Aufl. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden (2011)
- [2.2] Ashby, M.F., Jones, D.R.H., Heinzlmann, M. (Hrsg.): *Werkstoffe 2: Metalle, Keramiken und Gläser, Kunststoffe und Verbundwerkstoffe*, 3. Aufl. Elsevier, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg (2007)
- [2.3] Ashby, M.F., Jones, D.R.H., Heinzlmann, M. (Hrsg.): *Werkstoffe 1: Eigenschaften, Mechanismen und Anwendungen*, 3. Aufl. Elsevier, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg (2006)
- [2.4] Hornbogen, Eggeler, E.G., Werner, E.: *Werkstoffe. Aufbau und Eigenschaften von Keramik-, Metall-, Polymer- und Verbundwerkstoffen*, 10. Aufl. Springer, Berlin-Heidelberg (2012)
- [2.5] Hornbogen, E., Jost, N., Eggeler, G.: *Fragen und Antworten zu Werkstoffen*, 7. Aufl. Springer-Verlag, Heidelberg, Berlin (2012)
- [2.6] Hornbogen, E., Warlimont, H.: *Metallkunde – Struktur und Eigenschaften von Metallen und Legierungen*, 5. Aufl. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg (2006)
- [2.7] Rösler, J., Harders, H., Bäker, M.: *Mechanisches Verhalten der Werkstoffe*, 4. Aufl. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden (2012)
- [2.8] Seidel, W., Hahn, F.: *Werkstofftechnik. Werkstoffe, Eigenschaften, Prüfung, Anwendung*, 9. Aufl. Hanser Verlag, München (2012)
- [2.9] Bargel, H.-J., Schulze, G. (Hrsg.): *Werkstoffkunde*, 11. Aufl. Springer-Verlag, Berlin (2013)
- [2.10] Weißbach, W.: *Werkstoffkunde. Strukturen, Eigenschaften, Prüfung*, 18. Aufl. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden (2012)

- [2.11] Weißbach, W., Dahms, M. (Hrsg.): Aufgabensammlung Werkstoffkunde. Fragen – Antworten, 9. Aufl. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden (2011)
- [2.12] Roos, E., Maile, K.: Werkstoffkunde für Ingenieure. Grundlagen, Anwendung, Prüfung, 4. Aufl. Springer-Verlag, Berlin (2011)
- [2.13] Worch, H., Pompe, W., Schütt, W. (Hrsg.): Werkstoffwissenschaft, 10. Aufl. Wiley-VCH Verlag, Weinheim (2011)
- [2.14] Ilschner, B., Singer, R.F.: Werkstoffwissenschaften und Fertigungstechnik. Eigenschaften, Vorgänge, Technologien, 5. Aufl. Springer-Verlag, Berlin (2010)
- [2.15] Jacobs, O.: Werkstoffkunde, 2. Aufl. Vogel Verlag, Würzburg (2009)
- [2.16] Bergmann, W.: Werkstofftechnik. Teil 1 Grundlagen, 6. Aufl. Hanser Verlag, München (2008)
- [2.17] Bergmann, W.: Werkstofftechnik. Teil 2 Anwendung, 4. Aufl. Hanser Verlag, München (2009)
- [2.18] Fuhrmann, E.: Einführung in die Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung, 2. Aufl. Werkstoffe: Aufbau – Behandlung – Eigenschaften, Bd. 1. Expert Verlag, Renningen (2008)
- [2.19] Merkel, M., Thomas, K.-H.: Taschenbuch der Werkstoffe, 7. Aufl. Fachbuchverlag Leipzig, Hanser Verlag, München (2008)
- [2.20] Gottstein, G.: Physikalische Grundlagen der Materialkunde, 3. Aufl. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg (2007)
- [2.21] Schumann, H., Oettel, H.: Metallografie, 15. Aufl. Wiley-VCH Verlag, Weinheim (2011)
- [2.22] Bramfitt, B.L., Bencoter, A.O.: Metallographer's guide: practices and procedures for iron and steels, 1. Aufl. ASM International, Materials Park Ohio (2002)
- [2.23] Callister, W.D., Rethwisch, D.G.: Materialwissenschaften und Werkstofftechnik, 1. Aufl. Wiley-VCH, Weinheim (2012)
- [2.24] Drube, B., Kammer, C., Wittke, G., Läßle, V.: Werkstofftechnik Maschinenbau. Theoretische Grundlagen und praktische Anwendungen, 3. Aufl. Verlag Europa-Lehrmittel, Haan (2011)
- [2.25] Shackelford, J.F.: Werkstofftechnologie für Ingenieure. Grundlagen – Prozesse – Anwendungen, 6. Aufl. Pearson Studium, München (2005)