

HANSER



Leseprobe

Josef Reissner

Werkstoffkunde für Bachelors

ISBN: 978-3-446-42012-0

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser.de/978-3-446-42012-0>

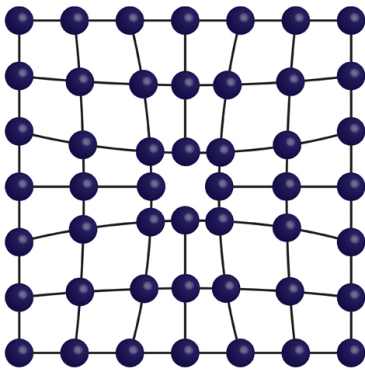
sowie im Buchhandel.

1.2.1 Nulldimensionale Gitterfehler

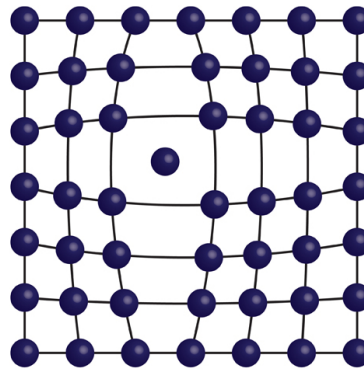
Leerstellen (auch Gitterlücken oder Schottky-Defekte genannt)

Die Entstehung einer Leerstelle kann man so beschreiben, dass ein Atom aus einem Gitterplatz entfernt und in der freien Oberfläche des Kristalls wieder eingebaut wird (Bild 1.19a).

Diese Fehler sind im thermischen Gleichgewicht, z. B. ist für Al die Leerstellenkonzentration, d. h. das Verhältnis der Leerstellen zu den Gitterplätzen, bei $500^\circ\text{C} = 10^{-4}$, am Schmelzpunkt (660°C) = 10^{-1} .



a) Leerstelle



b) Zwischengitteratom

Bild 1.19
Nulldimensionale
Gitterbaufehler

Mechanismen zur Erzeugung von Fehlstellen (aus dem thermischen Gleichgewicht)

1. Abschrecken von höheren Temperaturen
2. Verformung bei tiefen Temperaturen (oberhalb ca. $0,2 T_s$ Ausheilung! T_s = Schmelzpunkt in Kelvin)
3. Bestrahlung mit energiereichen Teilchen

Erzeugen von
Gitterfehlern

Zwischengitteratome entstehen dadurch, dass innerhalb des Gitters ein Atom von einem normalen Gitterplatz auf einen Zwischengitterplatz springt, d. h. auf einen Platz im Gitter, der normalerweise nicht von einem Atom besetzt ist (Bild 1.19b). Ein Fehlstellenpaar, Leerstelle-Zwischengitteratom, wird Frenkel-Defekt genannt.

Zwischengitteratom

Leerstellen- und Zwischengitteratome lassen sich durch Temperaturerhöhung erzeugen und durch Temperaturniedrigung vernichten (thermische Gitterfehler).

Thermische
Gitterfehler

1.2.2 Eindimensionale Gitterfehler (Versetzungen)

Lange vor dem experimentellen Nachweis wurde der rein hypothetische Begriff einer Versetzung eingeführt, um die Diskrepanz zwischen der theoretischen Schubspannung bei starrem Abgleiten von Netzebenen und der gemessenen Schubspannung zu erklären.

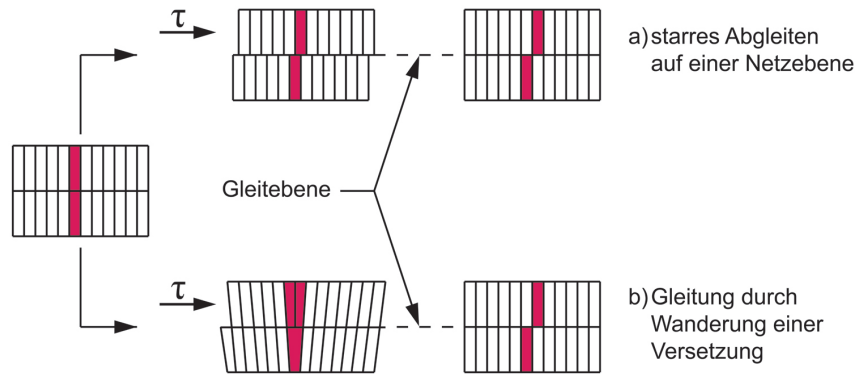


Bild 1.20
Abgleitung in einem Kristall

Bewegung mit geringem Kraftaufwand

Die Versetzungen erlauben es, dass sich eine Gleitung schrittweise über die Netzebenen fortsetzt. Die Atome überschreiten nacheinander die Energieschwelle. Das Gleiten geht in Teilschritten vor sich (Bild 1.20). Geometrisch lässt sich eine Stufenversetzung durch Einfügen oder Herausnehmen einer Halbebene darstellen. Die Versetzungslinie – die räumliche Fortsetzung der Störung – läuft senkrecht zur Zeichenebene (Bild 1.21).

Stufenversetzung

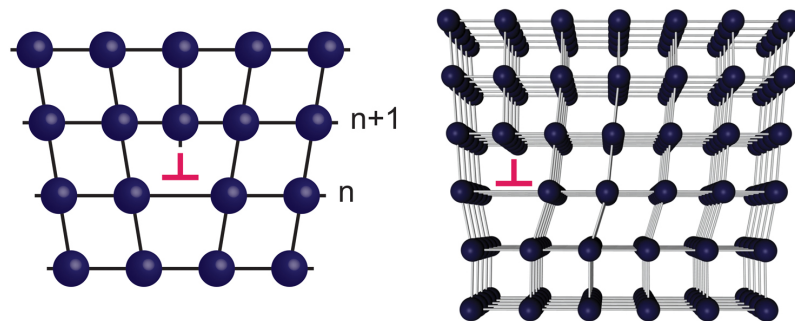


Bild 1.21
Versetzung

Positive oder negative Versetzung

Eindimensionale Gitterfehler besitzen eine linienförmige Ausdehnung. Sie sind gestörte Gitterbereiche, bei denen die Atomabstände in zwei benachbarten Gittergeraden bzw. -ebenen nicht übereinstimmen. Je nachdem, ob einem Gitterbereich mit n normalen Atomabständen $n + 1$ oder $n - 1$ Atome gegenüberstehen, spricht man von einer positiven oder negativen Versetzung.

Die Bewegung ist mit geringem Kraftaufwand möglich, da die Energie, die zur Verringerung des Abstandes der vor der Versetzung liegenden Atome benötigt wird, durch das Auseinanderdrücken der hinter der Versetzung liegenden Atome kompensiert wird (Bild 1.22).

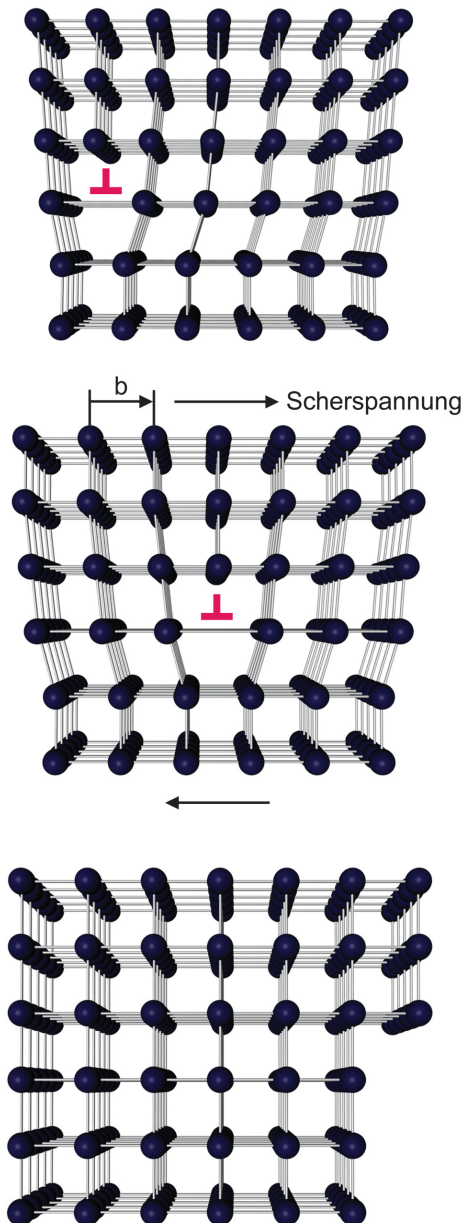


Bild 1.22
Bewegung einer
Stufenversetzung

1 Kristallzustand der Metalle

Schraubenversetzung

Es gibt noch eine zweite Möglichkeit, den unteren Teil des Kristalls gegenüber dem oberen zu verschieben. Es werden benachbarte Gitterbereiche um kleine Winkelbeiträge gegeneinander verschoben, sodass die Gitterebenen Schraubenflächen bilden (Bild 1.23).

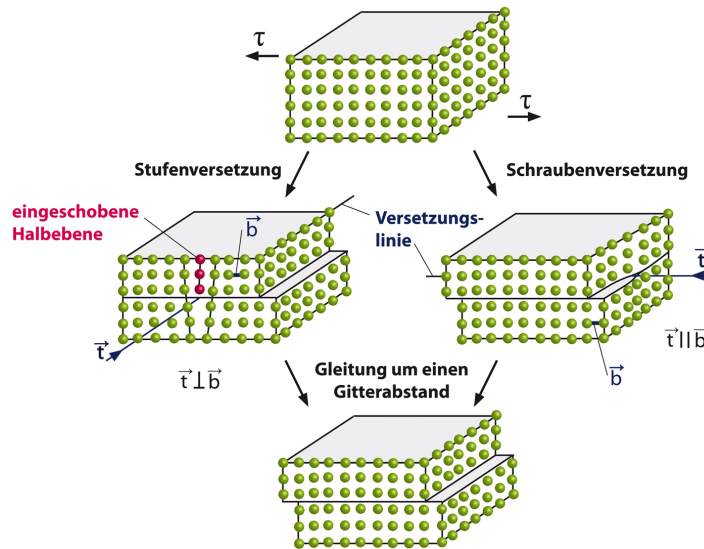


Bild 1.23
Zwischenschritte bei Versetzungsbewegungen

Die Schraubenversetzung ist dadurch gekennzeichnet, dass der Burgersvektor parallel zur Versetzungslinie liegt. Die Gitterebenen schrauben sich wendelförmig um die Versetzungslinie (Bild 1.24).

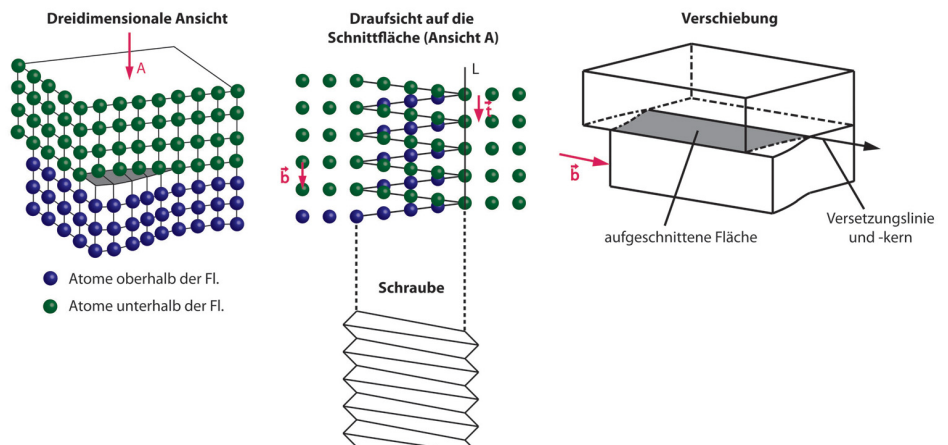


Bild 1.24
Schraubenversetzung

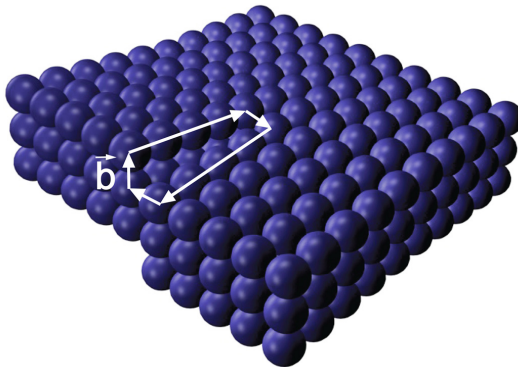
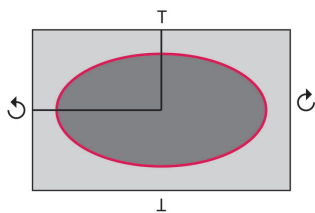


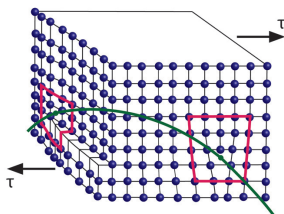
Bild 1.25
Bewegung einer
Schraubenversetzung

Kristallflächen werden durch eine Schraubenversetzung zu Schraubenflächen mit der Ganghöhe b . Beim Vorrücken einer Versetzung entsteht eine Stufe mit der Breite b (Bild 1.25). Jede weitere Versetzung, die in der derselben Ebene durch den Kristall gleitet, verbreitert die Stufe um b .



Für jede Versetzungslinie gilt:

Die Versetzungslinie muss in sich im Gitter geschlossen sein oder an einer Grenzfläche (z. B. Korn- oder Phasengrenze) enden.



Zwischen den beiden Grenzfällen können, je nachdem welchen Winkel der Burgersvektor mit der Versetzungslinie bildet, alle möglichen Übergänge auftreten.

Gemischte
Versetzungen

Wie aus Bild 1.26 ersichtlich, besitzen gemischte Versetzungen sowohl Stufen- als auch Schraubenkomponenten. Der Burgersvektor bleibt jedoch für alle Bereiche der Versetzungslinie gleich.

Die Schraubenversetzungen links und rechts gehen in Stufenversetzungen oben und unten über.

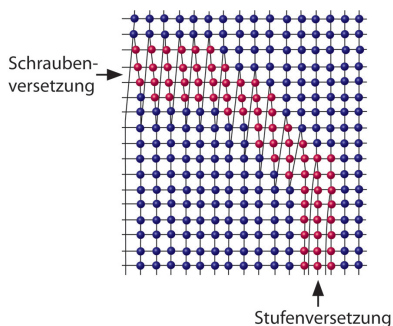


Bild 1.26
Versetzungsring

1 Kristallzustand der Metalle

Position der
Versetzungslinie

Zur vollständigen Beschreibung einer Versetzung gehört die Angabe der Position der Versetzungslinie (Bild 1.27).

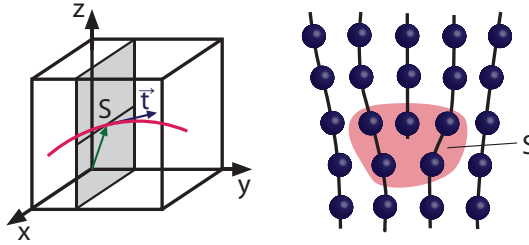


Bild 1.27
Versetzungslinie

s: Ort der Versetzungslinie
 \vec{t} : Tangentialeinheitsvektor (1.2)

$$\vec{t} = \frac{d\vec{r}}{ds} \quad (1.2)$$

Jede Versetzung ist durch 2 Vektoren charakterisiert:

Einheitsvektor

Einheitsvektor \vec{t} : In jedem Punkt tangential zu seiner Achse gerichtet, die Richtung kann sich ändern.

Burgersvektor

Burgersvektor \vec{b} : Ein von der Kristallstruktur abhängiger Verzerrungsvektor

Stufenversetzung

Stufenversetzung (1.3): Der Burgersvektor steht senkrecht auf der Versetzungslinie.

$$\vec{b} \perp \vec{t} \rightarrow \vec{b} \cdot \vec{t} = 0 \quad (1.3)$$

Schraubenversetzung

Schraubenversetzung (1.4): Der Burgersvektor läuft parallel zur Versetzungslinie und entspricht in seiner Größe der Ganghöhe der Schraubenfläche (Bild 1.25).

$$\vec{b} \parallel \vec{t} \rightarrow \vec{b} \cdot \vec{t} = \max. \quad (1.4)$$

Der Burgersvektor steht in ganz bestimmter Beziehung zur Kristallstruktur (1.5, 1.6):

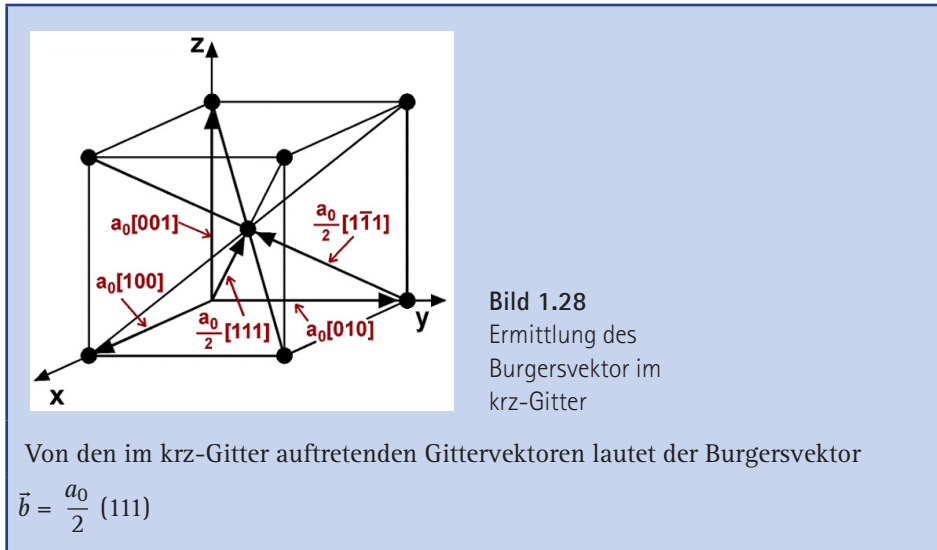
$$\vec{b} = \frac{a_0}{n} \langle uvw \rangle \quad (1.5)$$

$$|\vec{b}| = \frac{a_0}{n} \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \quad (1.6)$$

Da die Energie der Versetzung mit dem Quadrat des Betrages des Burgersvektors zunimmt, ist der kleinstmögliche Gittervektor der wahrscheinlichste Burgersvektor (1.7).

$$\text{Versetzungsenergie} \sim |\vec{b}|^2 \quad (1.7)$$

Eine vollständige Versetzung hat einen Burgersvektor, der gleichzeitig Gittervektor ist (Bild 1.28).



Gittervektor,
Burgersvektor

Die hohe Verzerrungsenergie (6-7 eV) pro Atom der Versetzungslinie ist die Ursache dafür, dass Versetzungen nicht im thermodynamischen Gleichgewicht sind. Durch Änderung der Temperatur allein können also keine Versetzungen erzeugt oder zum Verschwinden gebracht werden.

Da alle Metalle mit niedrigen Streckgrenzenwerten eine gewisse Anzahl von Versetzungen enthalten, müssen sich diese schon bei der Erstarrung bilden.

Weich gegläute Metalle weisen eine Versetzungsdichte von 10^6 bis 10^8 Durchstoßpunkten von Versetzungslinien pro cm^2 Querschnitt auf.

Eine Ausnahme machen die Whiskers (haarförmige Kristalle), die nahezu versetzungsfrei sind.

Versetzungsdichte

Ursprung von Versetzungen

1. Zufällige Missorientierung beim Wachstum von Kristallen
2. Ausscheiden von überschüssigen Leerstellen (Bildung von Versetzungsringen)
3. Abbau von Spannungen durch Bildung von Versetzungen

Erzeugen von
Versetzungen

Der Quantencharakter der Wärmeschwingungen hat zur Folge, dass diese nicht nur als elastische Wellen, sondern auch als ein System sich im Gitter bewegendes Teilchen betrachtet werden können. Diese Quasiteilchen bezeichnet man als Phononen.

17.2 Molwärme und spezifische Wärmekapazität

Phononen

Am absoluten Nullpunkt befinden sich die Atome einer Substanz in Zuständen minimaler Energie. Mit steigender Temperatur nimmt ihre Energie zu und sie führen Schwingungen um ihre Gleichgewichtslagen aus. Zwischen den schwingenden Atomen erfolgt ständig ein quantenhafter Energieaustausch durch Phononen, deren Energie E in folgender Weise von Frequenz ν und Wellenlänge λ abhängt (17.1):

$$E = \frac{hc}{\lambda} = h\nu \quad (17.1)$$

Wird einer Substanz Wärmeenergie zugeführt oder entzogen, ändert sich Anzahl und Frequenzverteilung der Phononen. Von praktischem Interesse ist die Wärmemenge, die benötigt wird, um die Temperatur einer bestimmten Stoffmenge um ein Grad (K oder °C) zu erhöhen.

Molwärme

Die zur Erwärmung eines Mols einer Substanz um ein Grad erforderliche Energiemenge wird als molare Wärmekapazität oder als Molwärme bezeichnet.

Sie kann bei konstantem Druck (C_p) oder bei konstantem Volumen (C_v) gemessen werden. Für Festkörper sind die Unterschiede beider Werte meist zu vernachlässigen. Bei hohen Temperaturen nähern sich die Molwärmen aller Stoffe dem Wert (17.2):

$$C_p = 3R = 25 \text{ J/mol} \cdot \text{K} \quad (17.2)$$

R ist die Gaskonstante (8,31 J/mol · K). Bild 17.2 zeigt die Temperaturabhängigkeit der Molwärme von Metallen und keramischen Stoffen.

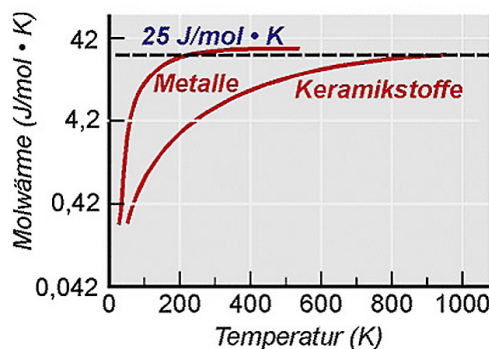


Bild 17.2
Temperaturabhängigkeit der Molwärme von Metallen und keramischen Stoffen

17.2 Molwärme und spezifische Wärmekapazität

Der Wert $25 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$ wird von Metallen bereits bei Raumtemperatur erreicht, von keramischen Stoffen erst bei etwa $1000 \text{ }^\circ\text{C}$.

Als spezifische Wärmekapazität C_p bezeichnet man die Wärmemenge, die zur Erwärmung eines Gramms einer Substanz um ein Grad erforderlich ist (Tab.17.1).

Spezifische Wärmekapazität

Zur Molwärme besteht folgender Zusammenhang (17.3):

$$C_p = \frac{\text{Molwärme}}{\text{Molmasse}} \quad (17.3)$$

Tabelle 17.1 Spezifische Wärmekapazität

| Metall | C_p [J/kgK] |
|--------|---------------|
| Fe | 460 |
| Al | 920 |
| Cu | 380 |
| Ti | 530 |
| Ni | 440 |
| Mg | 1005 |

Spezifische Wärmekapazität $C_p(T)$ und freie Enthalpie $G(T)$

Die Thermodynamik gibt an, wie stabil bei einer bestimmten Temperatur eine Phase im Vergleich zu einer anderen Phase ist, z.B. die feste Phase eines reinen Metalls mit bestimmter Gitterstruktur verglichen mit der flüssigen Phase.

Dieser Vergleich wird mithilfe einer temperaturabhängigen Funktion durchgeführt, der sogenannten freien Enthalpie G (Gibbsche Energie), die sich zusammensetzt aus der Enthalpie H und der Entropie S (17.4):

$$G(T) = H(T) - T \cdot S(T) \quad (17.4)$$

Thermodynamische Grundgleichung

Um den genannten Vergleich durchführen zu können, ist es wünschenswert, $G(T)$ möglichst für jede in Betracht kommende Phase im ganzen Temperaturbereich T zu kennen.

Um die Funktion $G(T)$ auch experimentell erfassen zu können, wird ihre Abhängigkeit von der spezifischen Wärme $C_p(T)$ der zu untersuchenden Phase betrachtet. Siehe (17.5):

$$dH = C_p(T) \cdot dT \text{ und } dS = \frac{C_p(T)}{T} \quad (17.5)$$

17 Thermische Eigenschaften

Daraus folgt (17.6) und (17.7)

$$H(T) = H(0) + \int_0^T C_p(T) \cdot dT \quad (17.6)$$

$$S(T) = S(0) + \int_0^T \frac{C_p}{T} \cdot dT \quad (17.7)$$

Die Funktion $G(T)$ ist für eine Phase P vollständig gegeben, wenn die Größen $H(0)$, $S(0)$, $C_p(T)$ bekannt sind. Allerdings ist eine Bestimmung oft nicht direkt durch Messungen möglich. Dann werden geeignete Abschätzungen durch Extra- oder/und Interpolationen angewendet, wobei physikalische Modelle eine wichtige Hilfe bieten.

Die in (17.4) bis (17.7) enthaltenen Zusammenhänge zwischen $C_p(T)$ und den thermodynamischen Funktionen sind in Bild 17.3 schematisch dargestellt.

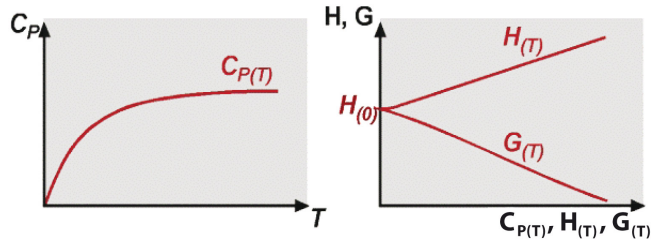


Bild 17.3
 $C_p(T)$, $H(T)$, $G(T)$ eines
reinen nichtmagne-
tischen Metalls
(schematisch)

17.3 Wärmeausdehnung

Asymmetrischer Potentialverlauf

Das Volumen fester Stoffe nimmt im Allgemeinen mit zunehmender Temperatur zu. Die Wärmeausdehnung ist ebenfalls mit den thermischen Gitterschwingungen verbunden. Ihr Charakter wird durch die Abhängigkeit der Wechselwirkungsenergie zwischen den Atomen bestimmt.

Nimmt bei Annäherung der Atome ihre Wechselwirkungsenergie stärker zu als beim Auseinanderrücken, dann muss sich der Festkörper ausdehnen.

Bei unsymmetrischem Verlauf verschiebt sich der Schwingungsmittelpunkt mit wachsender Energie zu größeren Abständen (Bild 17.4a). Bei symmetrischem Verlauf ändert sich die Lage nicht (Bild 17.4b).

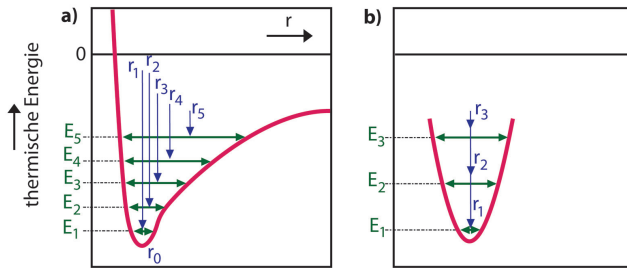


Bild 17.4
Potentialverlauf:
a) asymmetrisch,
b) symmetrisch

Die temperaturabhängige Längenzunahme wird durch die lineare Beziehung beschrieben (17.8):

$$\Delta l = \alpha l_0 \Delta T \quad (17.8)$$

α : linearer Ausdehnungskoeffizient, l_0 : Ausgangslänge und ΔT : Temperaturdifferenz, α hat die Einheit:

$$\alpha \left[\frac{\text{m} \cdot 10^{-6}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$$

Der Wert von α nimmt mit steigender Temperatur zu, sodass die lineare Beziehung nur in einem kleineren Temperaturbereich angewendet werden darf (Bild 17.5).

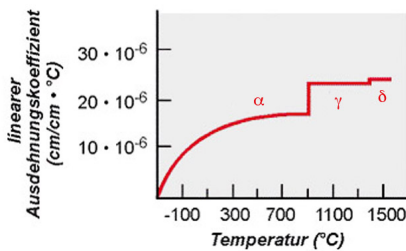
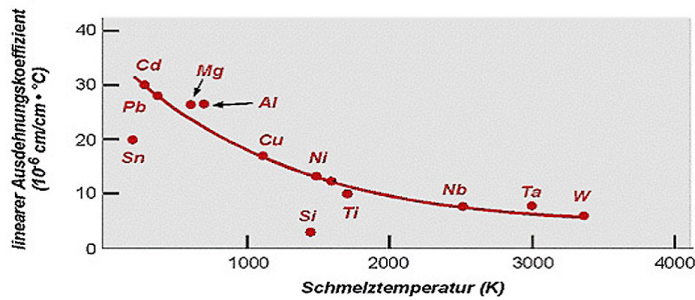


Bild 17.5
Temperatureinfluss
auf Ausdehnungs-
koeffizienten

Der Grund liegt darin, dass ein Werkstoff mit schwächerer Bindung bei einer bestimmten Temperatur mit größerer Amplitude schwingt als ein Stoff mit höherer Temperatur. Die Besonderheiten bei den Fe-Ni-Legierungen werden in Kap. 24 behandelt.

17 Thermische Eigenschaften

Bild. 17.6
Zusammenhang zwischen Schmelztemperatur und Ausdehnungskoeffizient



Als allgemeine Regel gilt, dass der Wert von α umso größer ist, je niedriger die Schmelztemperatur eines Werkstoffs ist (Bild 17.6).

Schmelztemperatur legt Ausdehnungskoeffizienten fest

In Tabelle 17.2 sind lineare thermische Ausdehnungskoeffizienten zusammengestellt.

Tab. 17.2 Lineare thermische Ausdehnungskoeffizienten

| Metall | α [10 ⁻⁶ m/m K] |
|-------------|-----------------------------------|
| Mg | 24,6 |
| Al | 23,8 |
| Ti | 18,8 |
| X5CrNi18-10 | 16,0 |
| Cu | 16,2 |
| Ni | 13,3 |
| Fe | 11,7 |

Ein fest eingespannter Messingbolzen ist bei 20 °C spannungsfrei. Auf welche Temperatur darf der Bolzen erhitzt werden, ohne die Druckspannung von 170 MPa zu überschreiten (17.9)?

E-Modul = 100 GPa, $\alpha = 20 \cdot 10^{-6} \text{ [}^\circ\text{C}^{-1}\text{]}$

$$T = T_0 - \frac{\sigma}{E \cdot \alpha} \quad (17.9)$$

$$= 20 - \frac{-170 \text{ MPa}}{(100 \cdot 10^3 \text{ MPa}) [20 \cdot 10^{-6}] \text{ (}^\circ\text{C}^{-1}\text{)}} = 20 \text{ }^\circ\text{C} + 85 \text{ }^\circ\text{C} = 105 \text{ }^\circ\text{C}$$