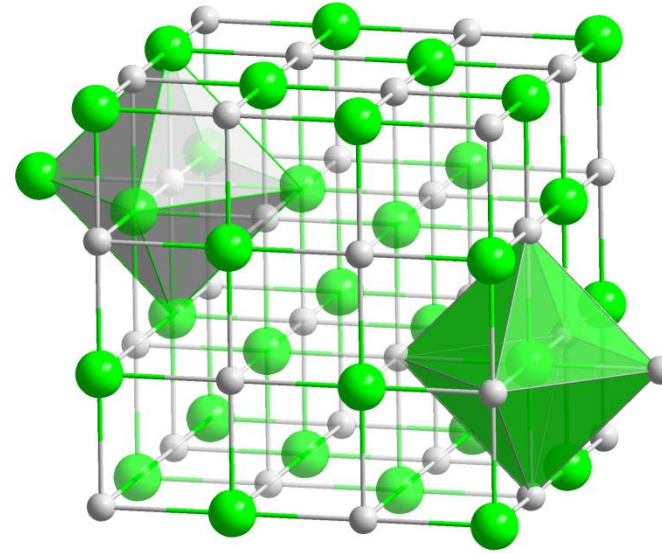


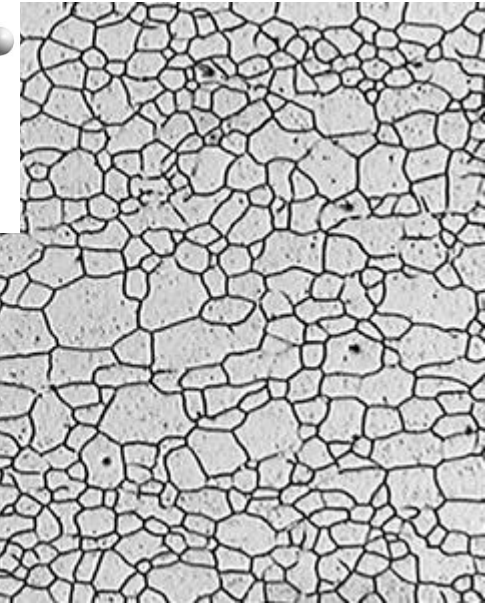
Werkstofftechnik

Aufbau metallischer Werkstoffe – Teil 2

Vorlesung



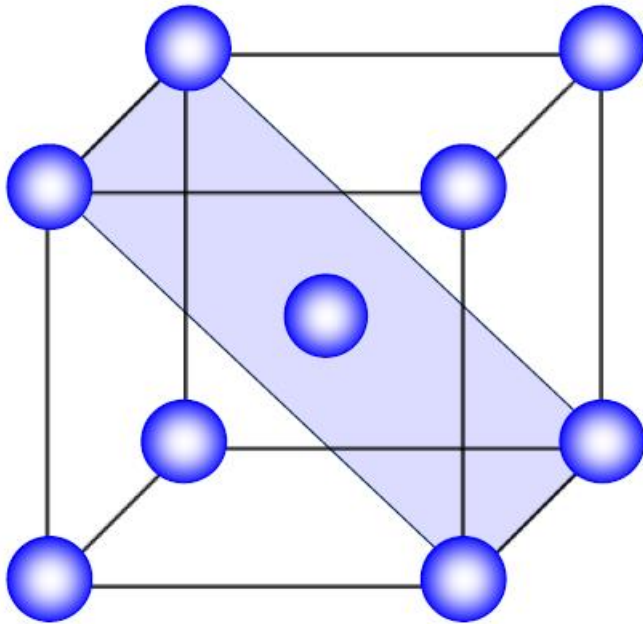
Quelle: De Academic



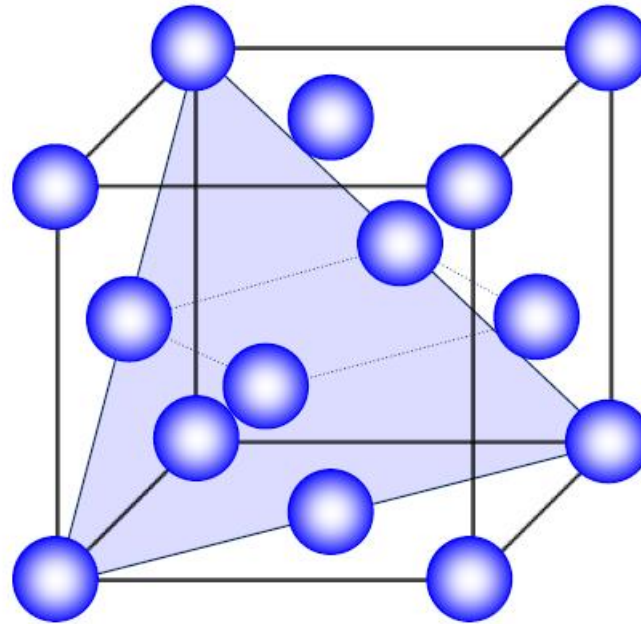
Quelle: Olympus

Aufbau metallischer Werkstoffe – Teil 2

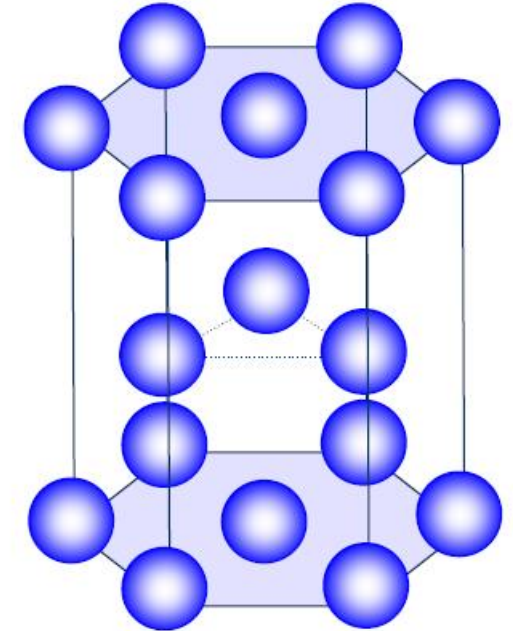
Die wesentlichen Kristallstrukturen bei metallischen Werkstoffen (Wiederholung)



kubisch-raumzentriertes
Gitter (krz)



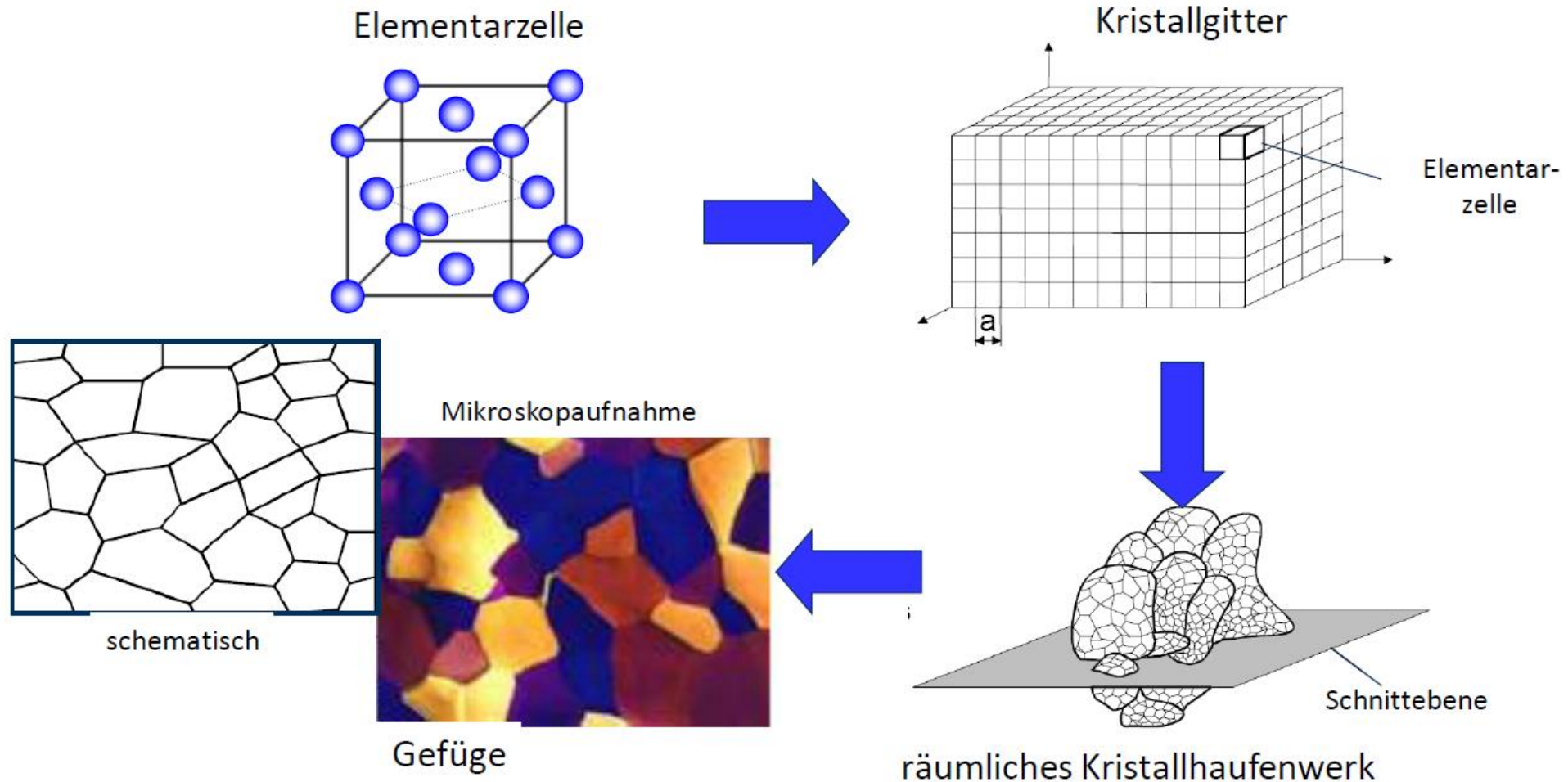
kubisch-flächenzentriertes
Gitter (kfz)



Hexagonal dichtest
gepacktes Gitter (hdp)

Aufbau metallischer Werkstoffe – Teil 2

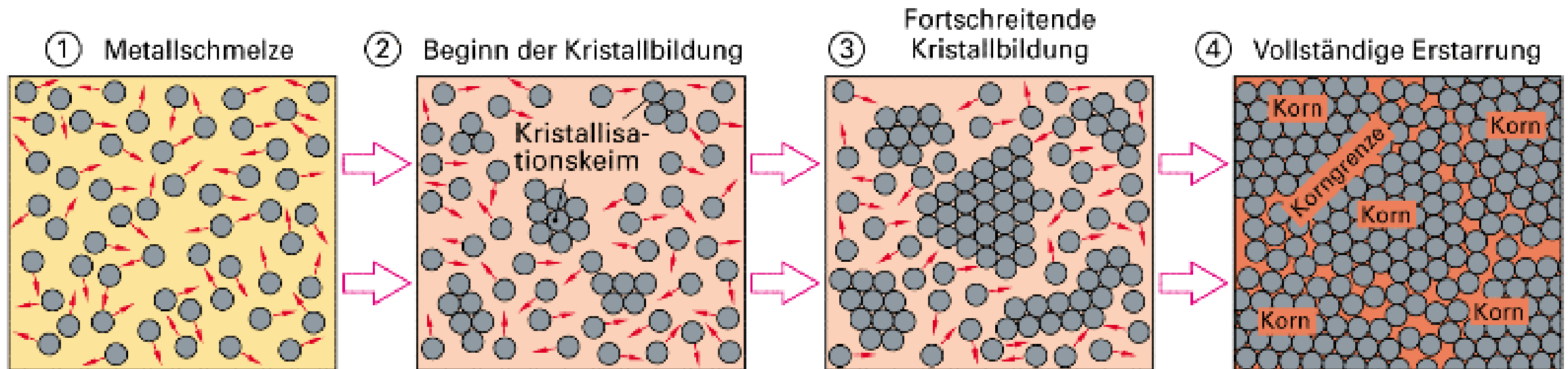
Elementarzelle, Kristallstruktur und Gefüge



Aufbau metallischer Werkstoffe – Teil 2

Erstarrung und Bildung des Metallgefüges

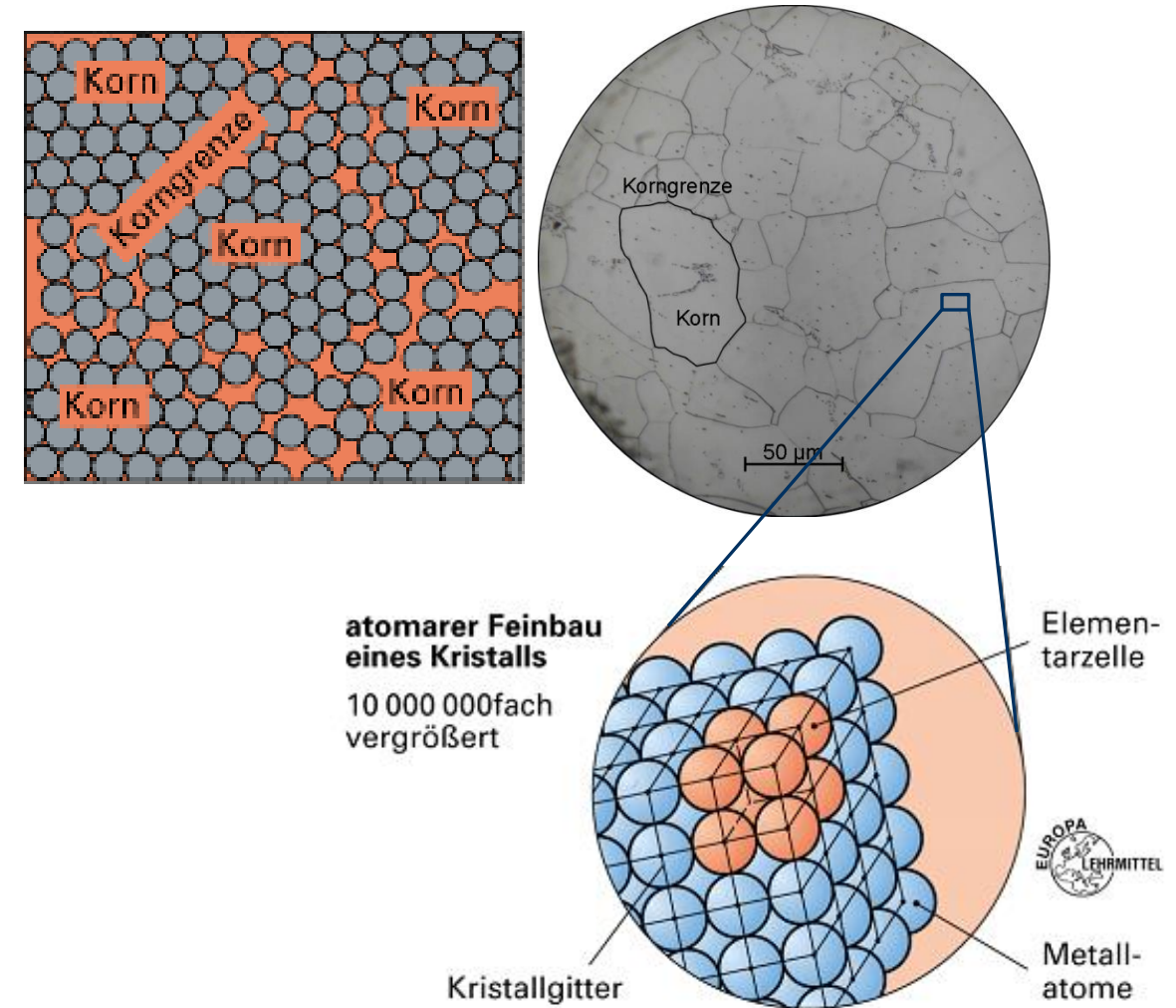
- In der Metallschmelze bewegen sich die Atome frei und regellos durcheinander.
- Kühlt die Schmelze auf die Erstarrungstemperatur ab, entstehen erste Kristallisationskeime.
- An den Kristallisationskeimen erstarren immer mehr Atome aus der Restschmelze. Es kommt zum Kristallwachstum.
- Schließlich kommt es zur gegenseitigen Berührung der wachsenden Kristalle. Zwischen den Kristallen (Körner) verbleibt ein schmaler Übergangsbereich aus ungeordneten Atomen und Verunreinigungen: die Korngrenzen.



Aufbau metallischer Werkstoffe – Teil 2

Mikrostruktur metallischer Werkstoffe

- Elementarzelle
Räumlich dichteste Anordnung der Atome innerhalb eines Kristalls. Die Metallatome sind in regelmäßigen Abständen und Winkeln zueinander angeordnet. Verbindet man die Mittelpunkte der Atome, ergibt sich ein räumliches Gitter, dass als Elementarzelle bezeichnet wird.
- Kristall
Anordnung der Atome auf Gitterplätzen, endliche Abmessung.
- Korn
Ein durch Korngrenzen begrenzter einzelner Kristall.
- Gefüge
Das Metall besteht aus kornförmigen Bereichen (Körner oder Kristallite mit Begrenzungen, d.h. Korngrenzen).



Aufbau metallischer Werkstoffe – Teil 2

Idealkristall versus Realkristall

Bisher wurden nur ideale Kristalle betrachtet. Bei technischen Anwendungen liegen jedoch grundsätzlich immer Realkristalle vor.

Idealkristall

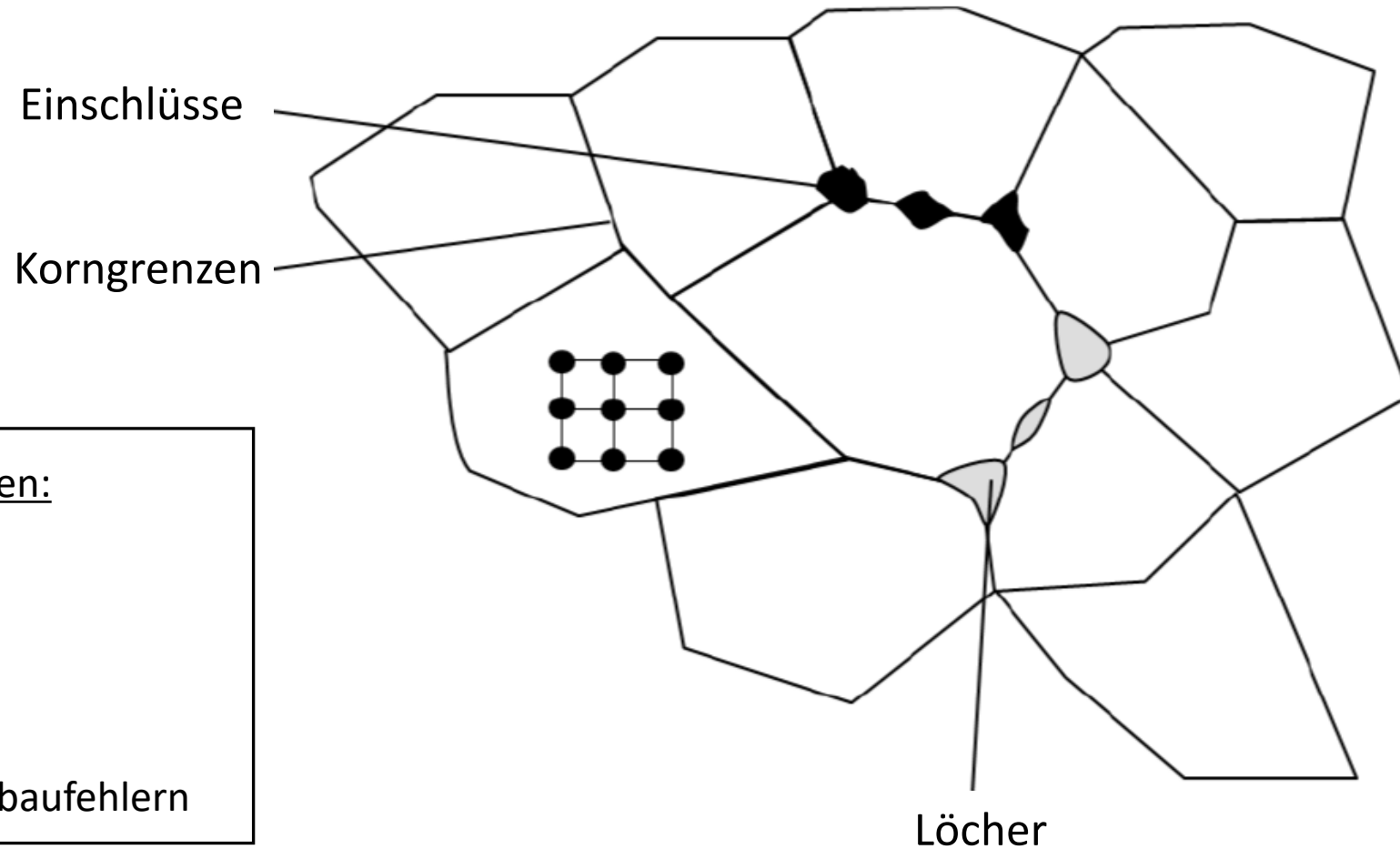
Ein Kristall mit einem exakt periodischen Aufbau von identischen Bausteinen. Der Aufbau des Gitters ist fehlerfrei.

Realkristall

Ein Kristall mit zahlreichen Gitterfehlern, die den exakten periodischen Aufbau stören. Gitterfehler können sich positiv oder negativ auf die Werkstoffeigenschaften auswirken.

Aufbau metallischer Werkstoffe – Teil 2

Realer Aufbau eines metallischen Gefüges



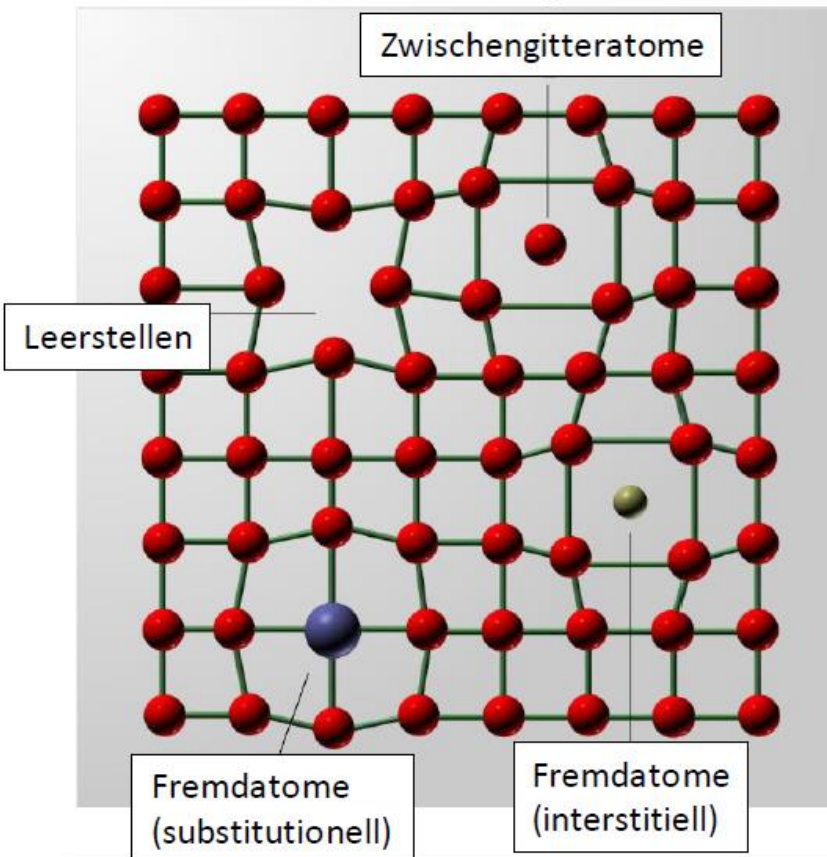
Man unterscheidet zwischen:

- 0-dimensionalen
- 1-dimensionalen
- 2-dimensionalen und
- 3-dimensionalen Gitterbaufehlern

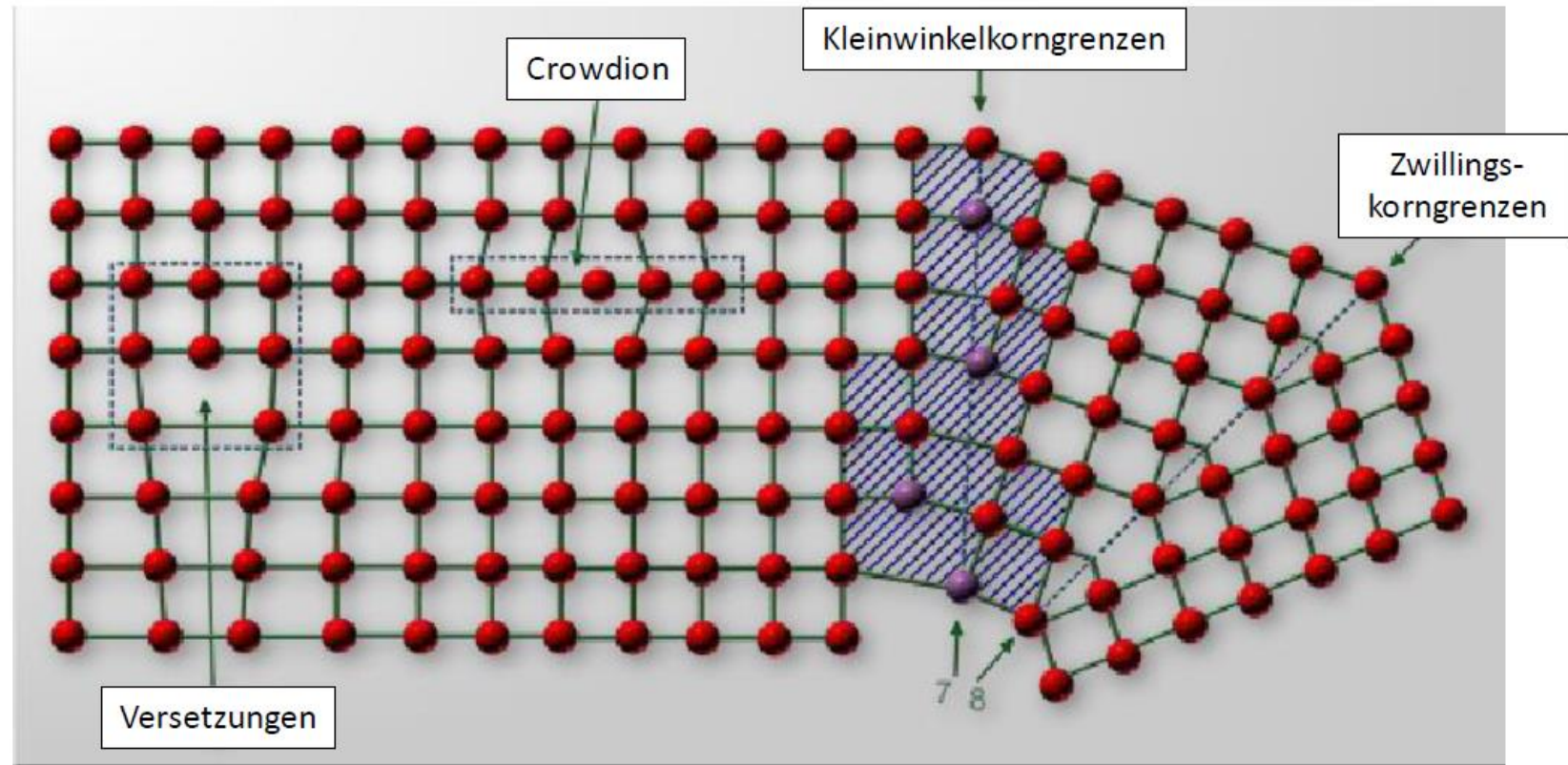
Aufbau metallischer Werkstoffe – Teil 2

Arten von Gitterbaufehler

0-dimensionale bzw. punktförmige Gitterstörungen



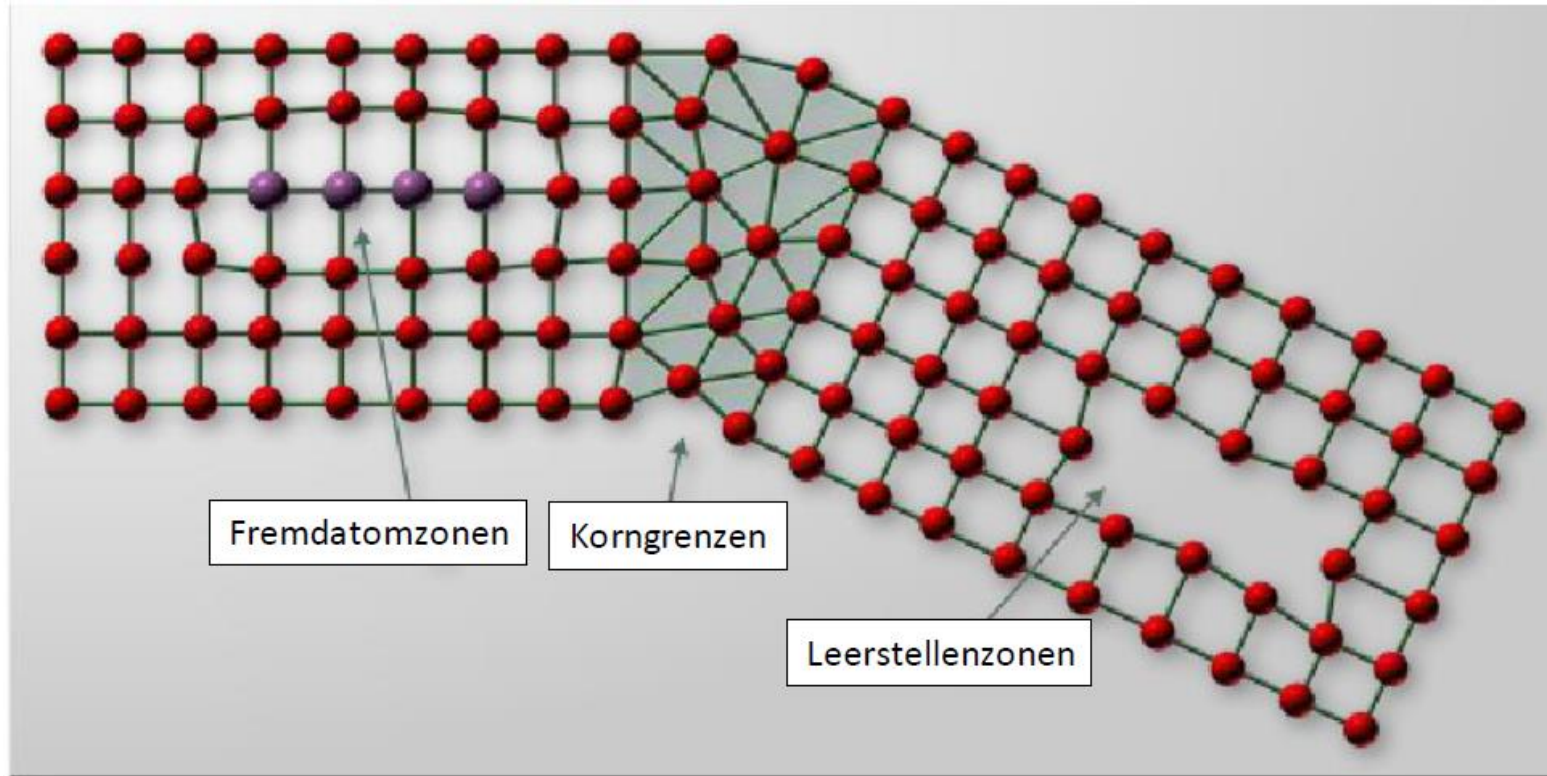
1-dimensionale bzw. linienförmige Gitterstörungen



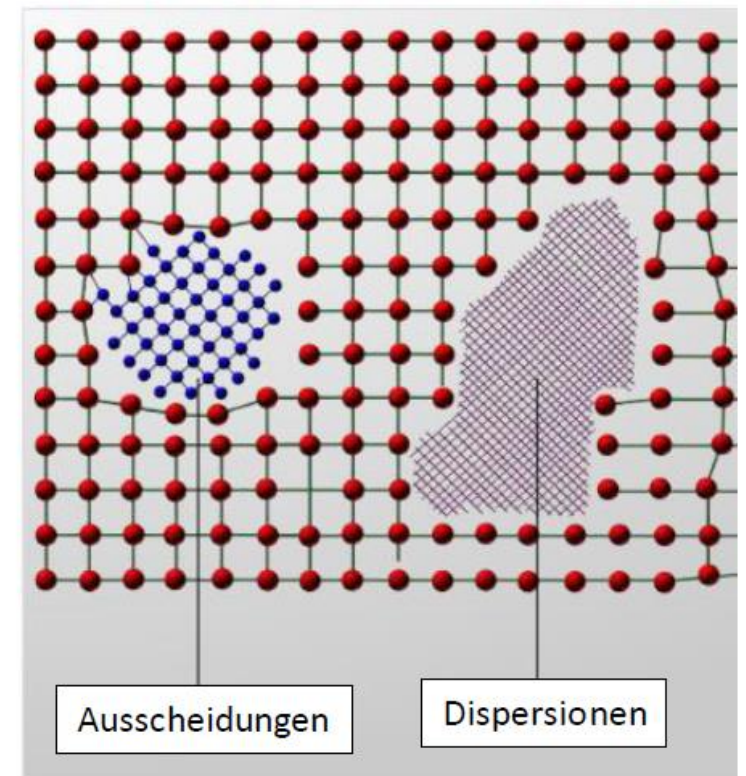
Aufbau metallischer Werkstoffe – Teil 2

Arten von Gitterbaufehler

*2-dimensionale bzw.
flächenförmige Gitterstörungen*



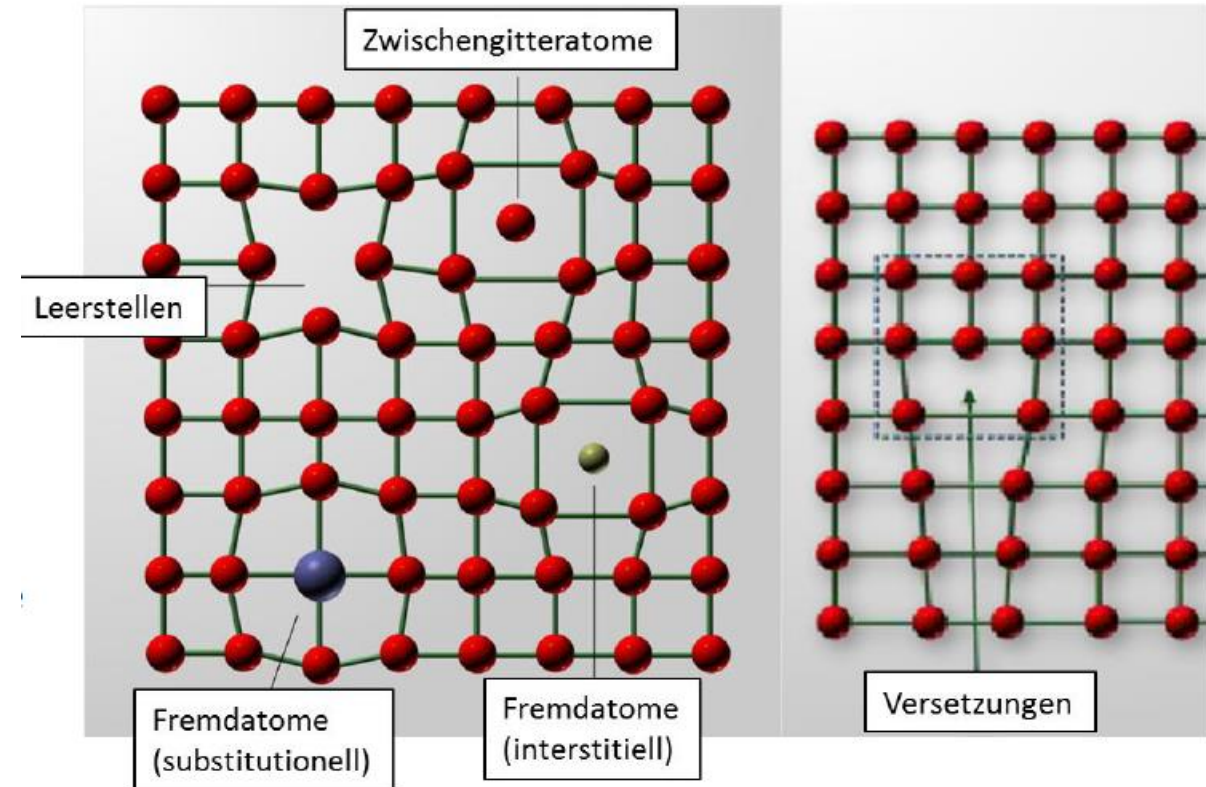
*3-dimensionale bzw.
ausgedehnte Gitterstörung*



Aufbau metallischer Werkstoffe – Teil 2

Arten von Gitterbaufehlern

- Leerstellen / 0-dimensional
Ein nicht besetzter Gitterplatz.
- Fremdatome (interstitiell gelöst) / 0-dimensional
Ein zwischen den Gitterplätzen befindliches Atom.
- Fremdatom (substitutionell gelöst) / 0-dimensional
Atome eines anderen Elements, die in das Kristallgitter des Grundmetalls eingefügt sind.
- Versetzen / 1-dimensional
Linienförmige Baufehler, bei denen eine ganze Lage von Metallionen im Gitter fehlt.



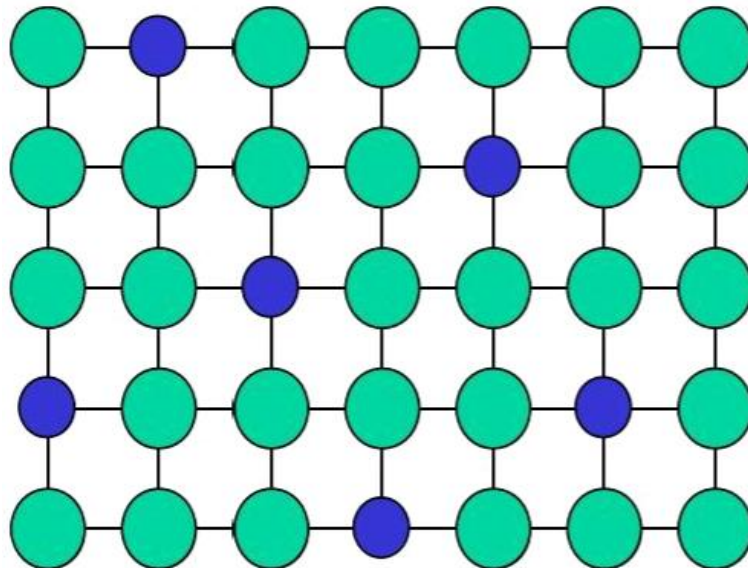
Bedeutung von Fremdatomen für die Festigkeit von metallischen Werkstoffen

Aufbau metallischer Werkstoffe – Teil 2

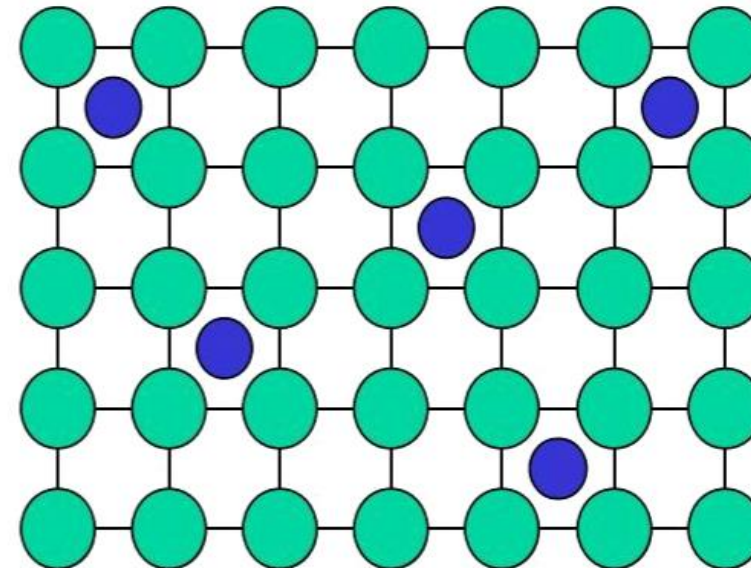
Bedeutung von Fremdatomen

Die meisten Metalle können in ihrem Gitterverband (Matrix) bestimmte Mengen anderer Atome aufnehmen, d.h. sie gehen in Lösung. Derartige Kristalle (mindestens zwei Atomsorten) werden Mischkristalle genannt. In Abhängigkeit vom Verhältnis der Atomdurchmesser unterscheidet man zwischen:

*Substitutionsdefekte
(z.B. Ni in Cu)*



*Zwischengitterdefekte
(z.B. C in Fe)*



Aufbau metallischer Werkstoffe – Teil 2

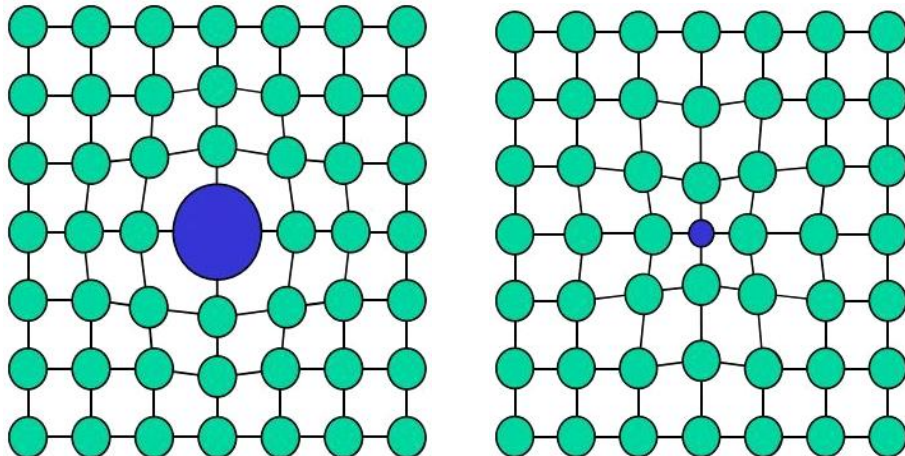
Bedeutung von Fremdatomen

Bedingungen für die Einlagerung substitutioneller Fremdatome sind:

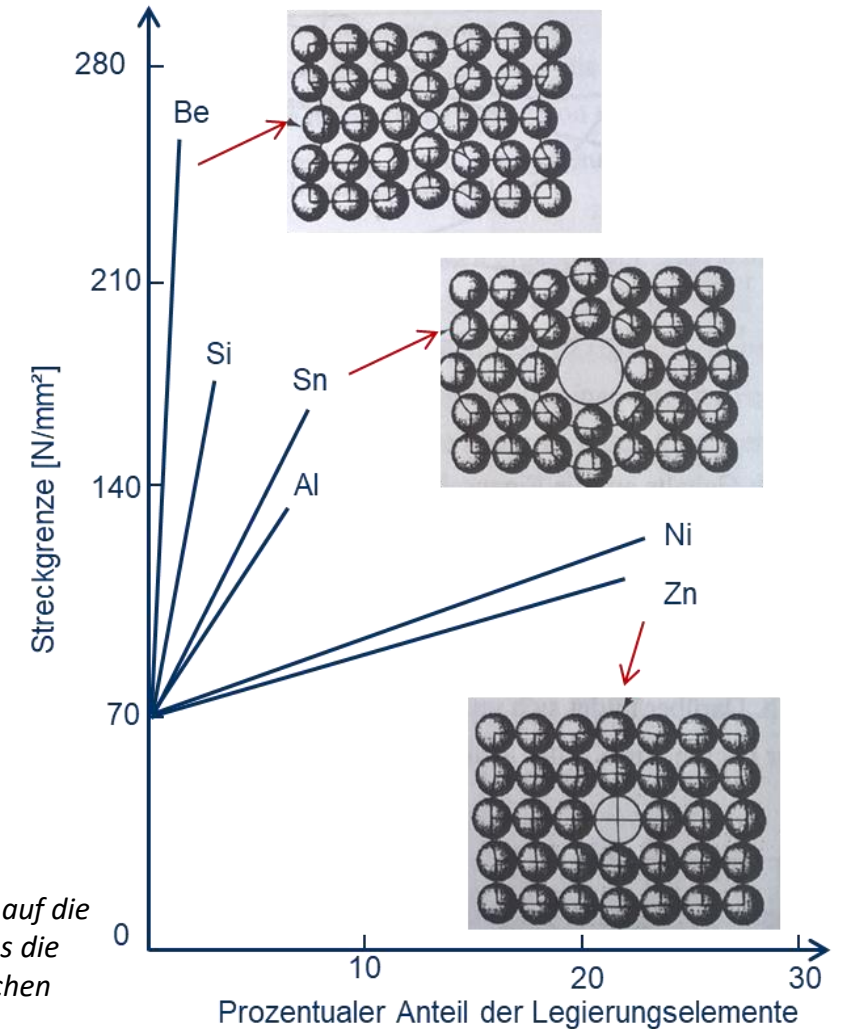
- Ungefähr gleiche Atomradien (Abweichungen $< 15\%$)
- Gleiche Gitterstruktur der Stoffkomponenten
- Chemische Ähnlichkeit (z.B. gleiche Elektronegativität)

Diese Legierungen zeigen eine Mischkristallverfestigung, welche sich durch die Verzerrung des Gitters erklären lässt (Beispiel: Fe-Ni, Cu-Ni).

Arten der Gitterdeformation



Einfluss verschiedener Legierungselemente auf die Streckgrenze von Cu. Ni und Zn haben etwa die gleiche Größe wie Cu-Atome, dagegen weichen Beryllium und Zinn erheblich ab.

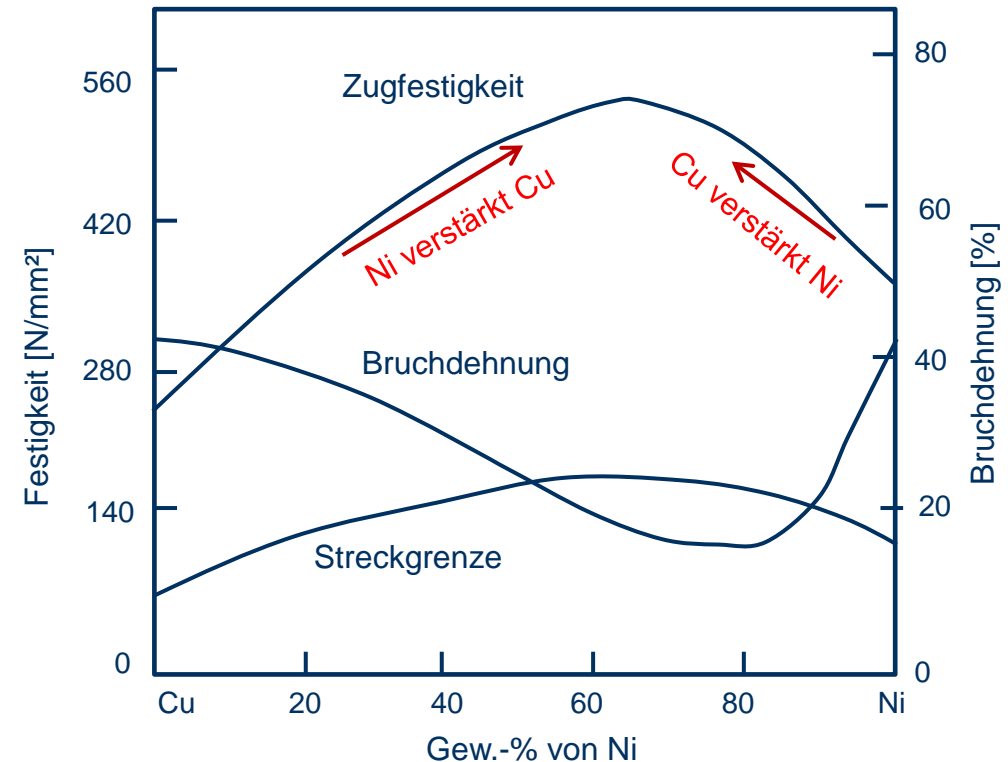


Aufbau metallischer Werkstoffe – Teil 2

Bedeutung von Fremdatomen

Die Mischkristallverfestigung hat Einfluss auf folgende Materialeigenschaften:

- Streckgrenze, Zugfestigkeit und Härte nehmen zu.
- Duktilität nimmt ab.
- Elektrische Leitfähigkeit nimmt ab.

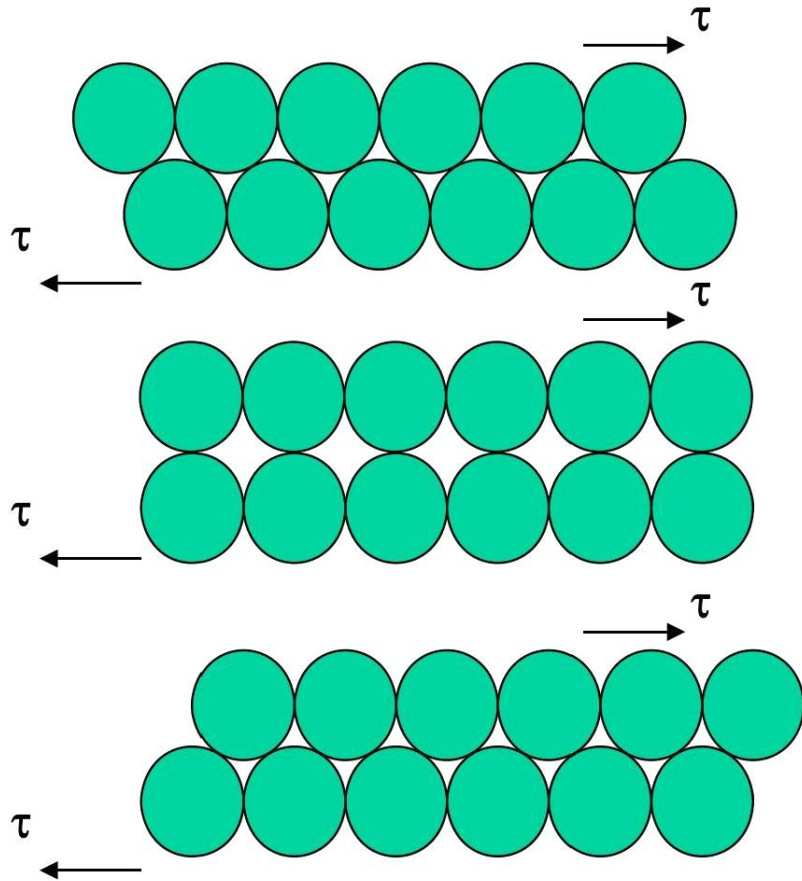


*Mechanische Eigenschaften von Cu-Ni-Legierungen
(Mischkristallverfestigung bei vollständiger Löslichkeit) –
schematische Darstellung*

Bedeutung von Versetzungen für die Verformbarkeit von metallischen Werkstoffen

Aufbau metallischer Werkstoffe – Teil 2

Wirkungsweise von Versetzungen



Theoretische Schubfestigkeit:

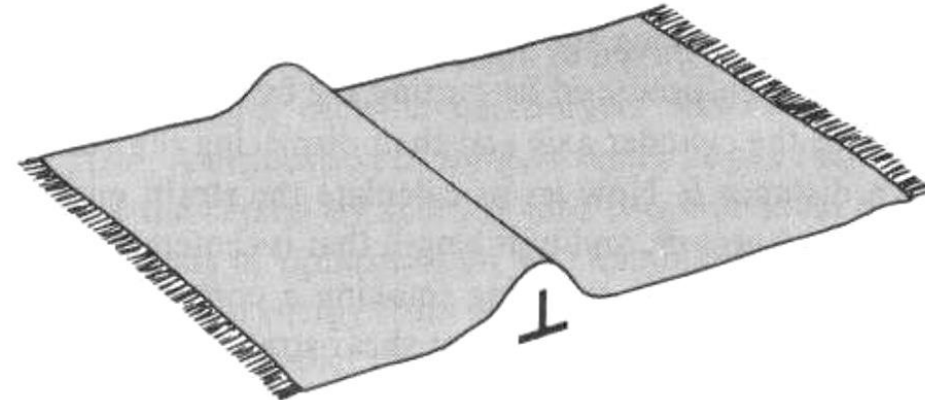
$$\tau_{\max} \sim G/10$$

Reale Schubfestigkeit:

$$\tau \sim G/1000$$

Die theoretische Schubfestigkeit (starres Abgleiten) übersteigt die experimentell ermittelten Werte um Größenordnungen.

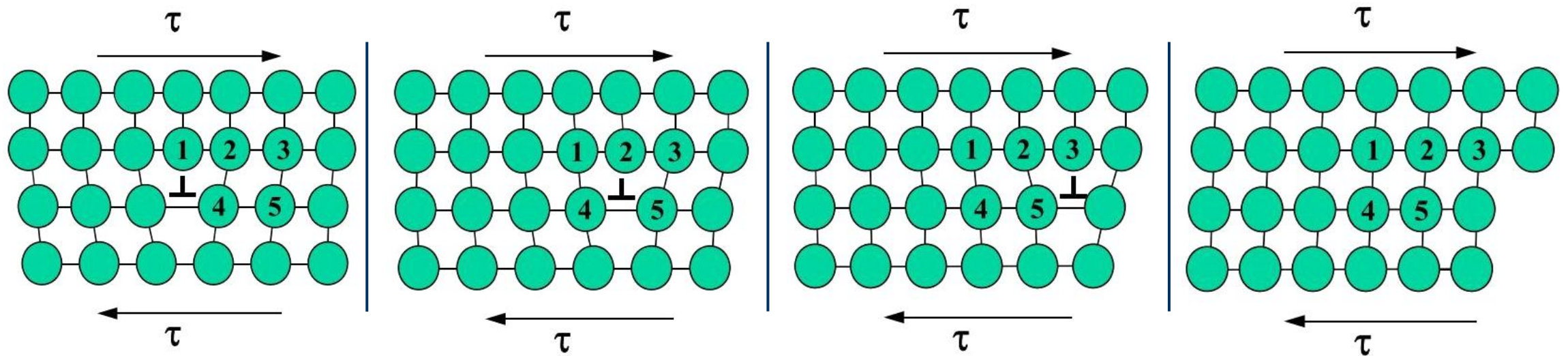
Die Verformung von metallischen Werkstoffen kann also nicht durch starres Abgleiten erfolgen, sondern durch die Verschiebung von Versetzungen.



Aufbau metallischer Werkstoffe – Teil 2

Prinzip der plastischen Verformung durch Versetzungsbewegung

- Versetzungen sind beweglich und ermöglichen dadurch die plastische Verformung des Kristalls.
- Die Versetzungsdichte ist vom Verformungszustand des Metalls abhängig.
 - Weichgeglühtes Metall ca. 10^{12} m^{-2} , entspricht Versetzungslänge von 1 km/mm³
 - Kaltverformtes Metall ca. 10^{16} m^{-2} , entspricht Versetzungslänge von 10.000 km/mm³

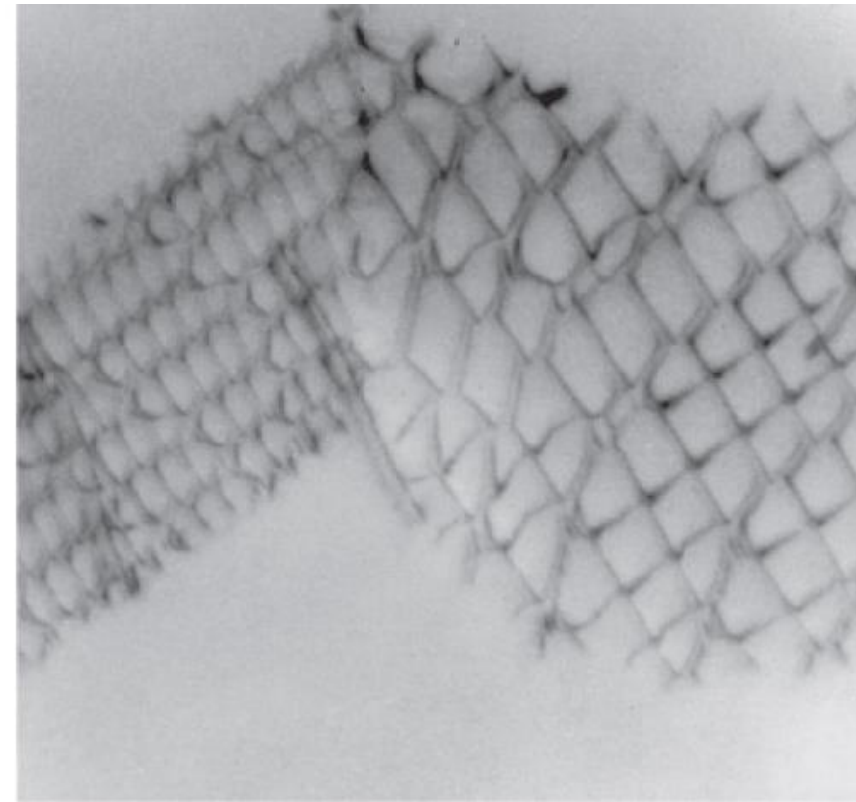


Ohne Versetzungen würde sich Metall eher spröde verhalten!!!!

Aufbau metallischer Werkstoffe – Teil 2

Prinzip der plastischen Verformung durch Versetzungsbewegung

Erscheinungsbild von Versetzungen im Transmissionselektronenmikroskop (TEM) – Versetzungsstapel (links) und Versetzungsnetze (rechts)

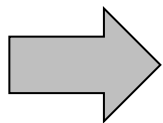


Aufbau metallischer Werkstoffe – Teil 2

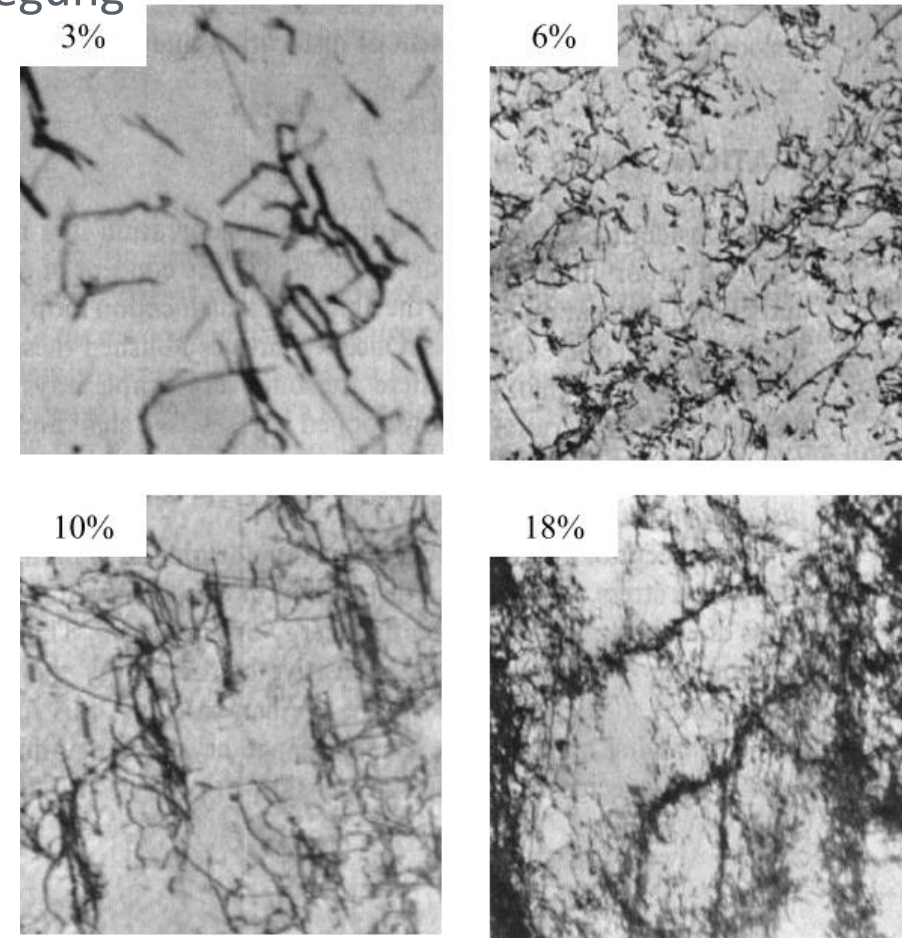
Prinzip der plastischen Verformung durch Versetzungsbewegung

Ursachen der Verfestigung:

- Versetzungen wandern bis an Versetzungsknoten oder andere Hindernisse innerhalb der Körner, werden dort festgehalten und fallen für die weitere Formänderung aus.
- Die Neubildung von Versetzungen führt zudem zu einer weiteren Erhöhung der Versetzungsdichte.
- Die Kaltumformung eines metallischen Werkstoffs hat aufgrund der eingebrachten Gitterstörungen eine Erhöhung der inneren Energie zur Folge. Bei Wärmezufuhr ist dieser thermodynamisch instabile Zustand bestrebt, durch Umordnung und Abbau von Gitterstörungen die freie Enthalpie zu verringern.



Erholungs- und
Rekristallisationsglühen



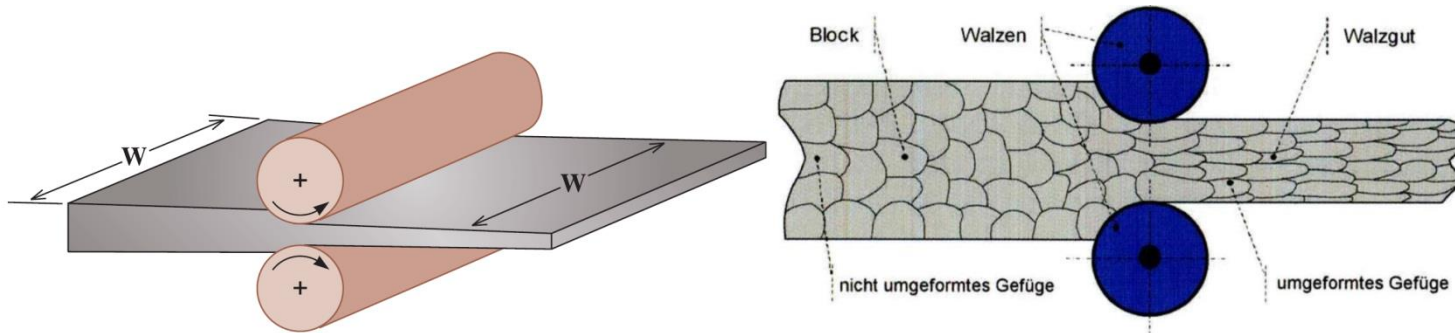
Versetzungslinien in einem austenitischen CrNi-Stahl nach Kaltverformung (TEM – Aufnahmen).

Aufbau metallischer Werkstoffe – Teil 2

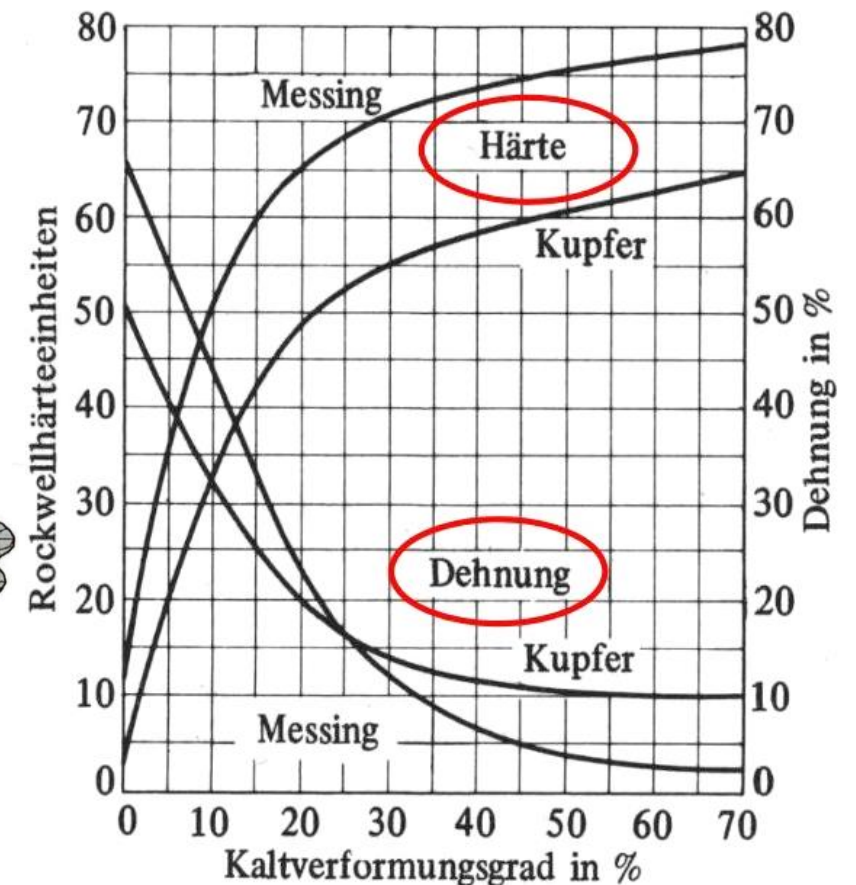
Versetzungsbewegung und Kaltverfestigung

Typische Einsatz- und Anwendungsgebiete der Kaltverfestigung

- Beim Umformen (z.B. Walzen) kommt es zu einer plastischen Verformung des Werkstoffs.
- Die plastische Verformung geht einher mit einer Zunahme der Festigkeit und Härte, aber auch Abnahme der Dehnung und Kerbschlagarbeit des Werkstoffs.



Schematische Darstellung des Kaltwalzprozesses und dessen Auswirkungen auf das Gefüge

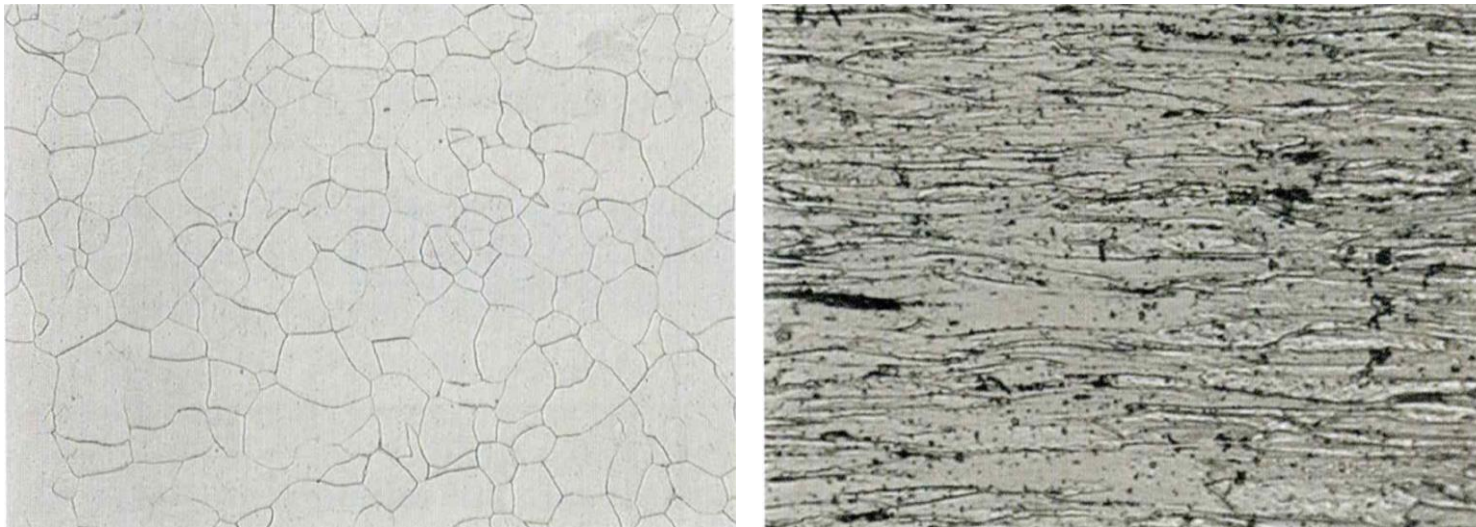


Werkstoffeigenschaften von Kupfer und Messing in Abhängigkeit des Kaltverformungsgrades

Aufbau metallischer Werkstoffe – Teil 2

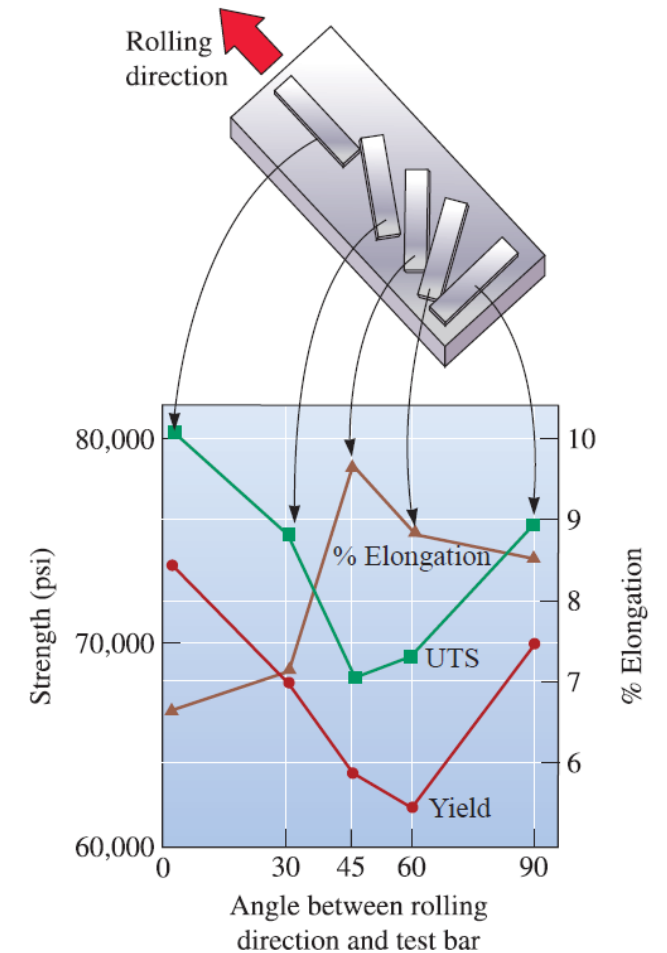
Versetzungsbewegung und Kaltverfestigung

Vorsicht: Die Werkstoffeigenschaften sind anisotrop!



Typisches Gefüge eines normalisierten (links) und kaltverformten Stahls (rechts)

Anisotrope Eigenschaften = Richtungsabhängige Eigenschaften
Isotrope Eigenschaften = Richtungsunabhängige Eigenschaften

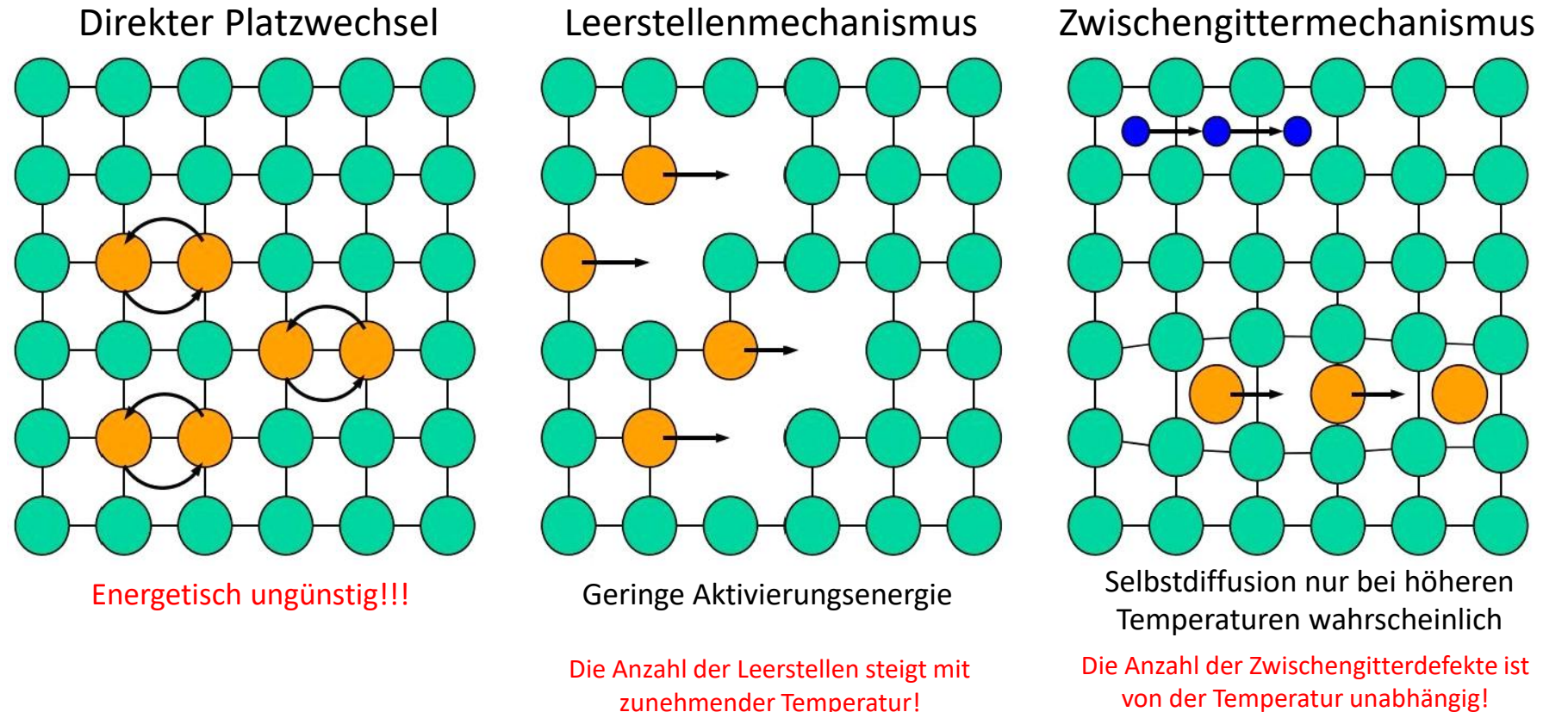


Anisotrope (richtungsabhängige) Eigenschaften eines kaltverformten Al-Li Blechwerkstoffs

Bedeutung von Leerstellen und interstitiellen Fremdatomen für die Diffusion

Aufbau metallischer Werkstoffe – Teil 2

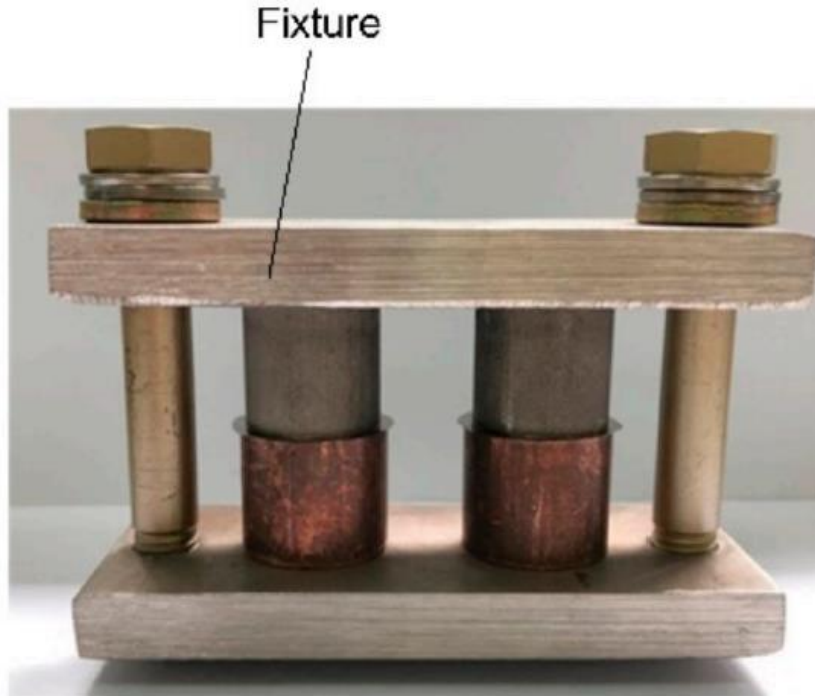
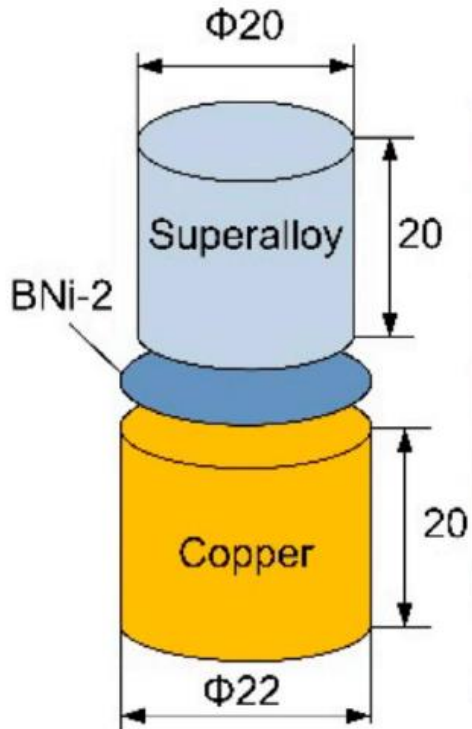
Bedeutung von Leerstellen und Zwischengitteratomen für die Diffusion



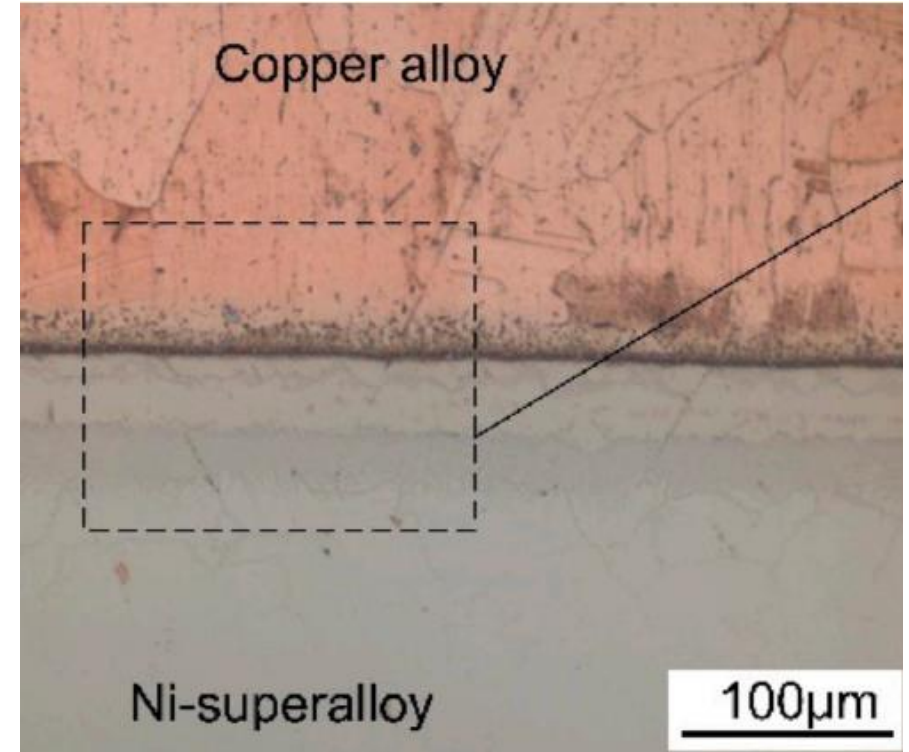
Beide Mechanismen sind für Diffusionsprozesse entscheidend!

Aufbau metallischer Werkstoffe – Teil 2

Bedeutung von Leerstellen – Beispiel: Diffusion von Nickel mit Kupfer



Darstellung des Versuchsaufbaus



Darstellung des Gefüges und der Verbindungszone im Lichtmikroskop

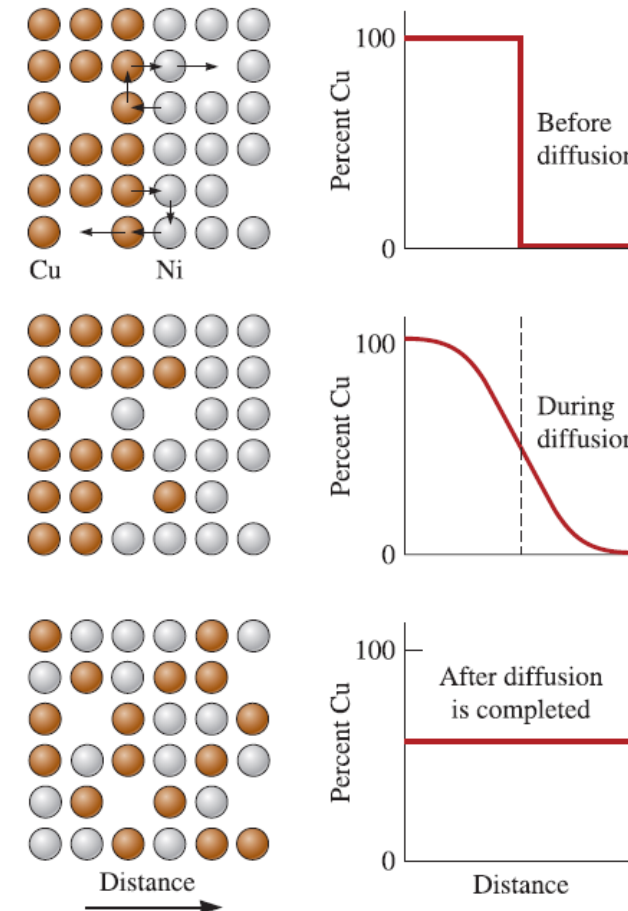
Quelle: Metals, Zhang - 2021

Aufbau metallischer Werkstoffe – Teil 2

Bedeutung von Leerstellen – Beispiel: Diffusion von Nickel mit Kupfer

- Wird ein Nickelblech auf ein Kupferblech gebondet, diffundieren allmählich Ni-Atome in das Kupfer und Cu-Atome in das Nickel.
- Am Ende des Vorgangs sind Ni- und Cu-Atome gleichmäßig verteilt.
- In diesem Fall basiert der dominante Mechanismus auf Leerstellendiffusion.
- Mit zunehmender Temperatur nimmt die Geschwindigkeit der Diffusion zu.

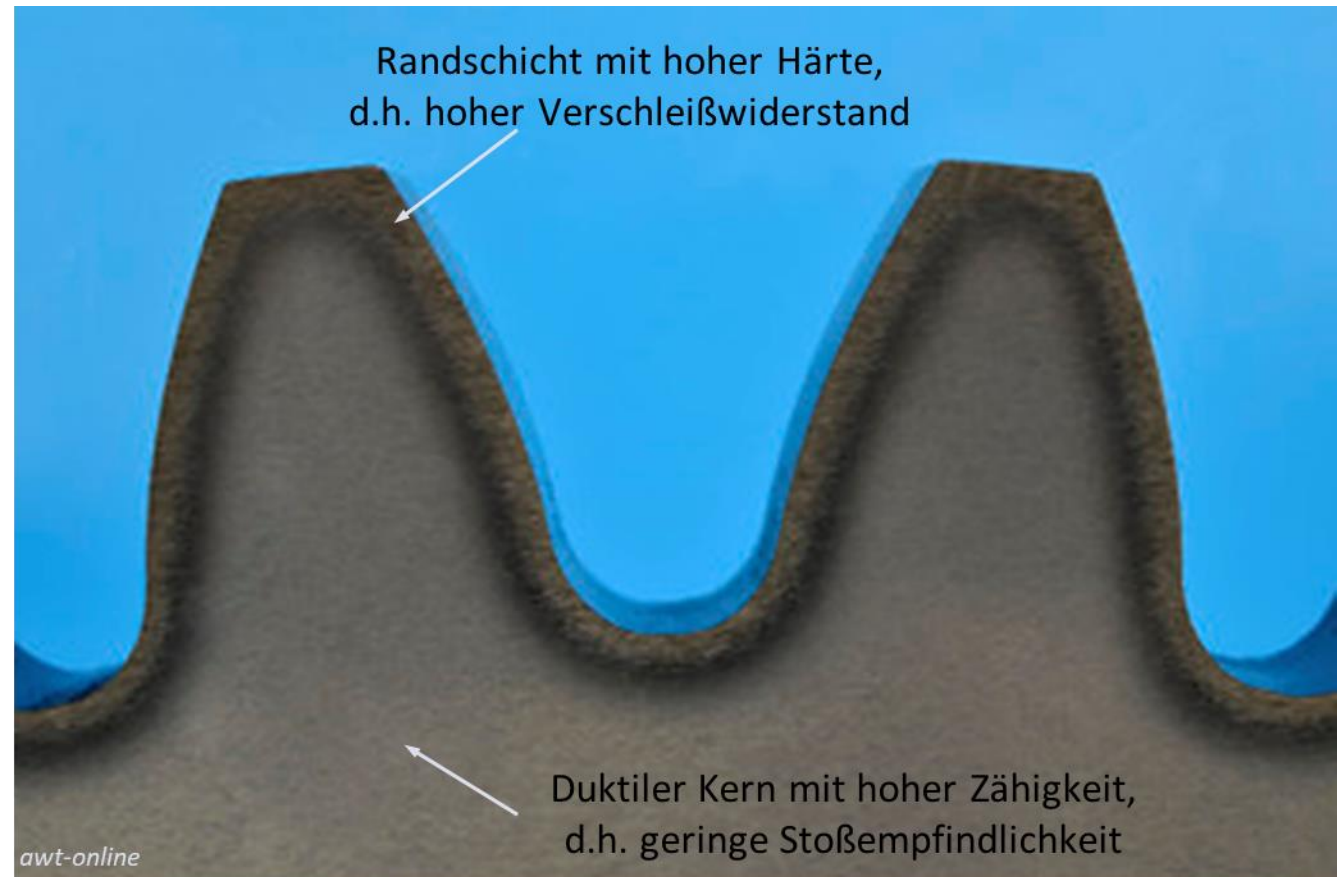
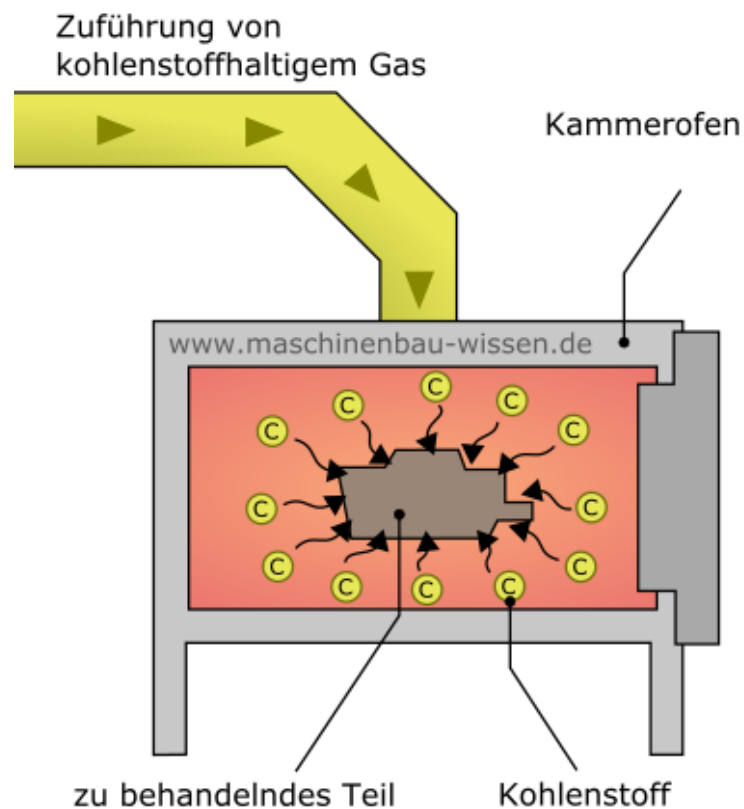
Schematische Darstellung der Leerstellendiffusion an der Grenzfläche Ni / Cu



Aufbau metallischer Werkstoffe – Teil 2

Bedeutung von Zwischengitteratomen – Beispiel: Diffusion von Kohlenstoff in Stahl

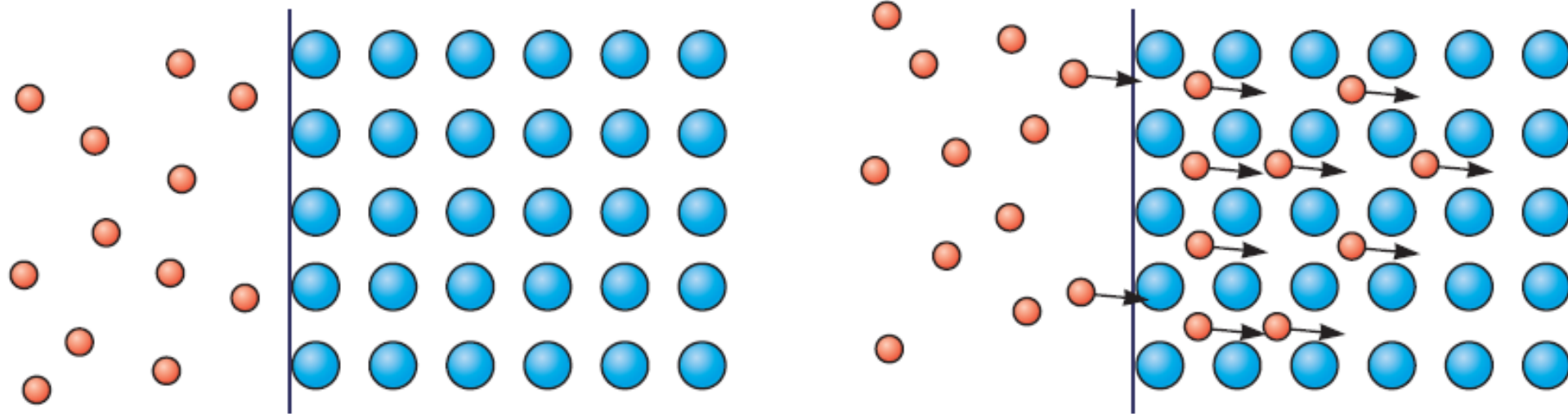
Das sogenannte Aufkohlen wird beim Einsatzhärten von Zahnrädern eingesetzt.



Aufbau metallischer Werkstoffe – Teil 2

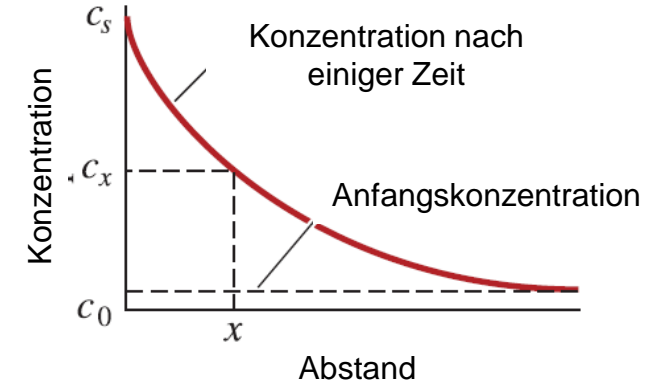
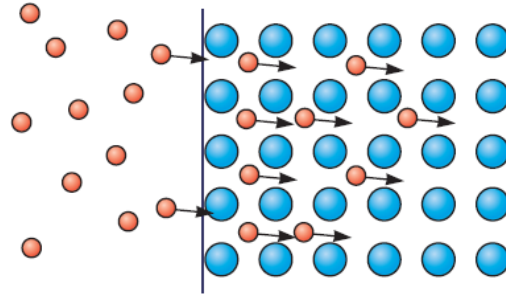
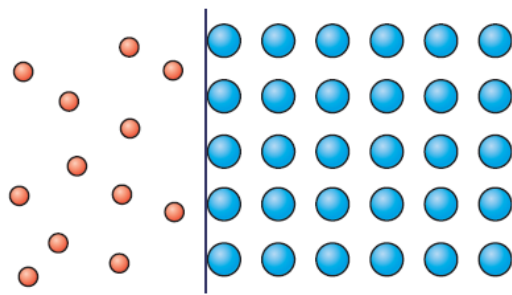
Bedeutung von Zwischengitteratomen – Beispiel: Diffusion von Kohlenstoff in Stahl

- Das sogenannte Aufkohlen wird beim Einsatzhärten von Zahnrädern eingesetzt.
- Die viel kleineren C-Atome diffundieren entlang der Zwischengitterplätze in den Stahl.
- Der gleiche Mechanismus ist auch bei N und H zu beobachten.



Aufbau metallischer Werkstoffe – Teil 2

Diffusion – Die Fick'schen Gesetze



Vereinfacht gilt:

$$x = \sqrt{2Dt}$$

mit

$$D = D_0 \cdot e^{-Q/RT}$$

c_i = Konzentration

x = Diffusionsweg [m]

t = Zeit [s]

T = Temperatur [K]

D = Diffusionskoeffizienten [m^2/s]

D_0 = Diffusionskonstante [m^2/s]

Q = Aktivierungsenergie [J/mol]

R = Gaskonstante [J/mol*K]

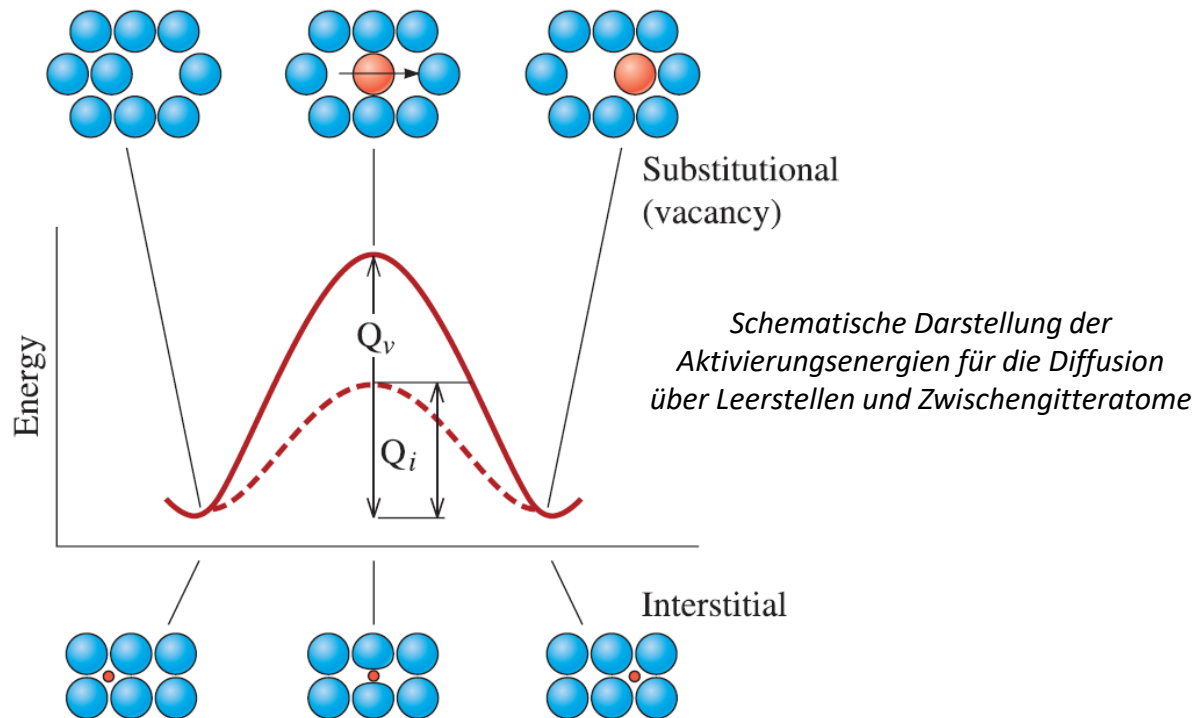
Modellschema der Diffusion von Atomen in eine Materialoberfläche und Darstellung der Ortsabhängigkeit der Konzentration nach dem zweiten Fick'schen Gesetz

2. Fick'sches Gesetz

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = D \cdot \left(\frac{\partial^2 c_i}{\partial x^2} \right)$$

Aufbau metallischer Werkstoffe – Teil 2

Zwischengitterdiffusion versus Leerstellendiffusion



Zwischengitterdiffusion ist in der Regel charakterisiert durch:

- Geringere Aktivierungsenergien
- Höhere Diffusionskoeffizienten

Diffusionsparameter ausgewählter Stoffe

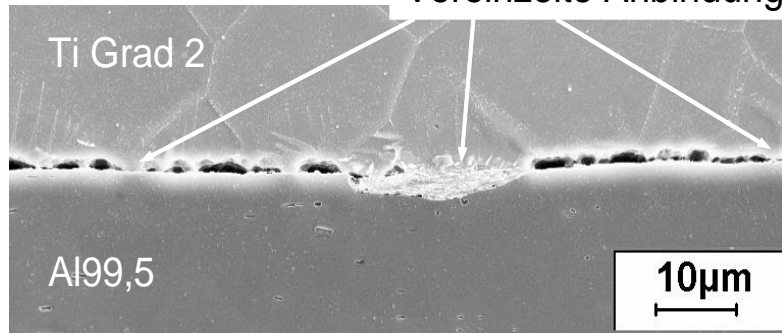
Diffusionspaar	Q (kJ/mol)	D_0 (cm ² /s)
Zwischengitterdiffusion:		
C in kfz Fe	138	0,23
C in krz Fe	87,6	0,011
N in kfz Fe	145	0,0034
N in krz Fe	76,7	0,0047
H in kfz Fe	43,2	0,0063
H in krz Fe	15,1	0,0012
Selbstdiffusion (Leerstellendiffusion):		
Pb in kfz Pb	109	1,27
Al in kfz Al	135	0,10
Cu in kfz Cu	208	0,36
Fe in kfz Fe	279	0,65
Zn in hdp Zn	91,3	0,1
Mg in hdp Mg	135	1,0
Fe in krz Fe	247	4,1
W in krz W	600	1,88
Si in Si (kovalent)	461	1800,0
C in C (kovalent)	683	5,0
Heterogene Diffusion (Leerstellendiffusion):		
Ni in Cu	243	2,3
Cu in Ni	258	0,65
Zn in Cu	184	0,78
Ni in kfz Fe	268	4,1
Au in Ag	191	0,26
Ag in Au	168	0,072
Al in Cu	166	0,045
Al in Al ₂ O ₃	478	28,0
O in Al ₂ O ₃	637	1900,0
Mg in MgO	331	0,249
O in MgO	344	0,000043

Aufbau metallischer Werkstoffe – Teil 2

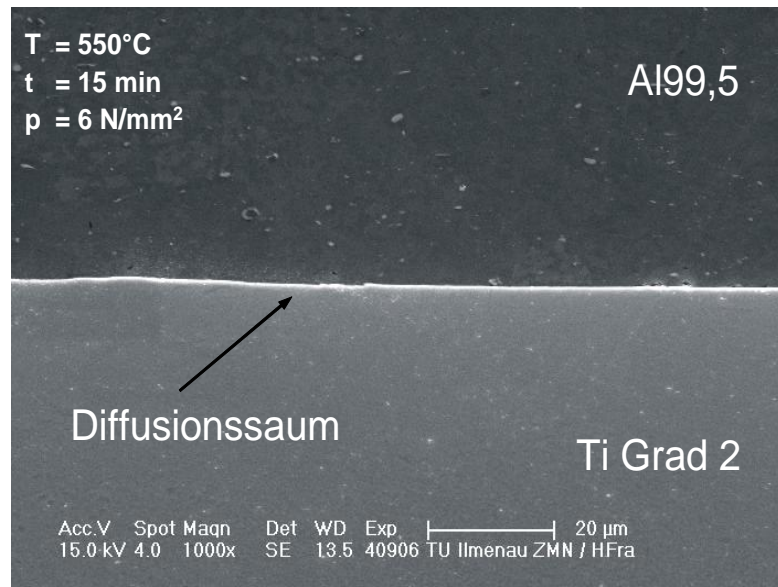
Diffusion – Praxisbeispiel: Diffusionsbonden von Titan mit Aluminium

550° C, 5 Minuten

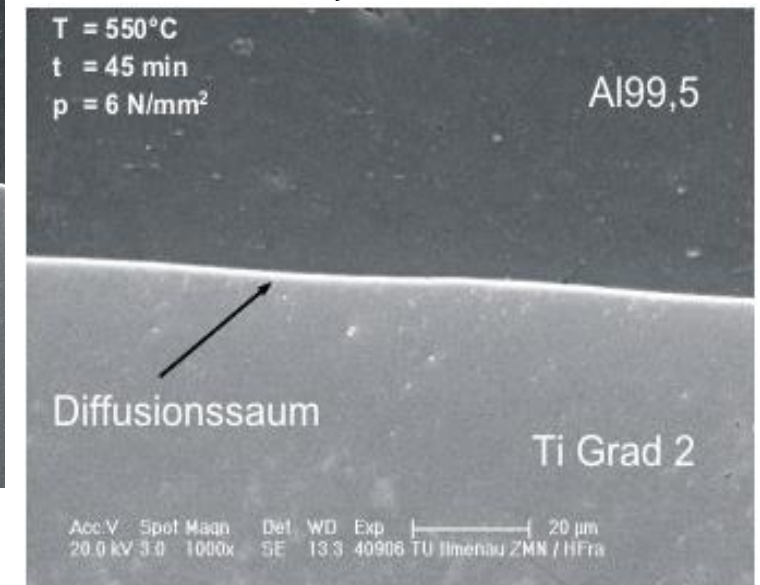
Vereinzelte Anbindungsstellen



550° C, 15 Minuten



550° C, 45 Minuten



Quelle: TU Ilmenau

Aufbau metallischer Werkstoffe – Teil 2

Diffusion – Praxisbeispiel: Der Kirkendall Effekt

- Aufgrund unterschiedlicher Diffusionskoeffizienten kommt es zu Porosität bzw. zu Hohlräumen in der Cu-Schicht
- Im Fall von Schaltkreisen (Gold-Aluminium-Kontakte) kann dies zu Frühausfällen führen.

1 min bei 1273 K



15 min bei 1273 K



Aufbau metallischer Werkstoffe – Teil 2

Diffusion – Aufgabe

Es sollen die Kosten einer Wärmebehandlung näher betrachtet werden. Um eine Charge von 500 Stahlteilen bei 900°C (hier besitzt Fe eine kfz-Struktur) aufzukohlen, sind 10h erforderlich. Die Betriebskosten des Ofens mögen bei 900°C ca. 1000 Euro/h und bei 1000°C ca. 1500 Euro/h betragen. Zu berechnen ist, ob es kostengünstiger wäre, die Diffusion bei 1000°C durchzuführen.