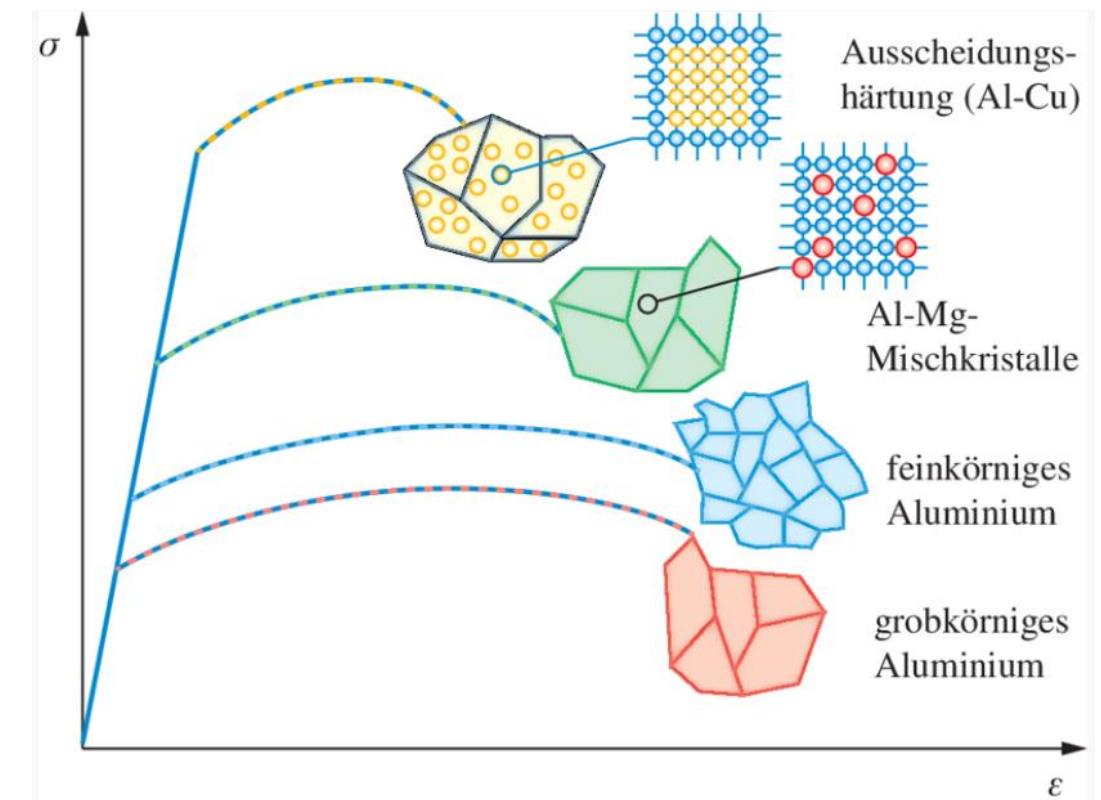


Werkstofftechnik

Mechanismen der Verfestigung

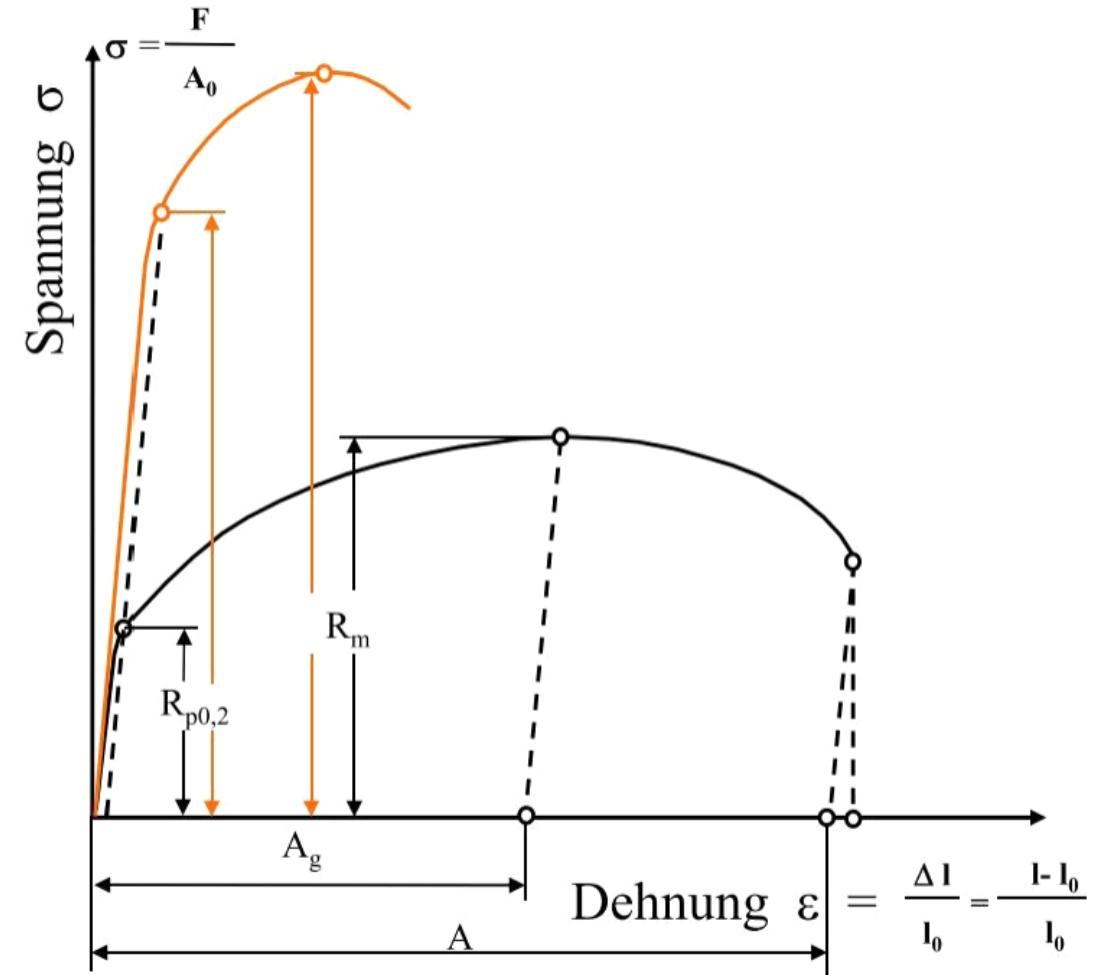
Vorlesung



Mechanismen der Ver- und Entfestigung

Der Begriff Ver- / Entfestigung

- Mit den Begriffen Ver- oder Entfestigung ist eine Erhöhung oder Erniedrigung der Festigkeit verbunden. Sowohl die Dehngrenze $R_{p0,2}$ als auch die Zugfestigkeit R_m nehmen zu oder ab.
- Die Festigkeitssteigerung hat in der Regel eine Verringerung der plastischen Verformung zur Folge.



Mechanismen der Ver- und Entfestigung

Der Begriff Ver- / Entfestigung

Bei der Ver- und Entfestigung handelt es sich um eine Veränderung der Stoffeigenschaften. Sie teilen sich wie folgt auf:

Verfestigung

- Kaltverfestigung
- Mischkristallhärtung
- Ausscheidungshärtung
- Dispersionshärtung
- Feinkornhärtung
- **Umwandlungshärtung**

Entfestigung

- Spannungsarmglühen (Erholung)
- Rekristallisationsglühen
- Homogenisieren und Diffusionsglühen

Mechanismen der Verfestigung

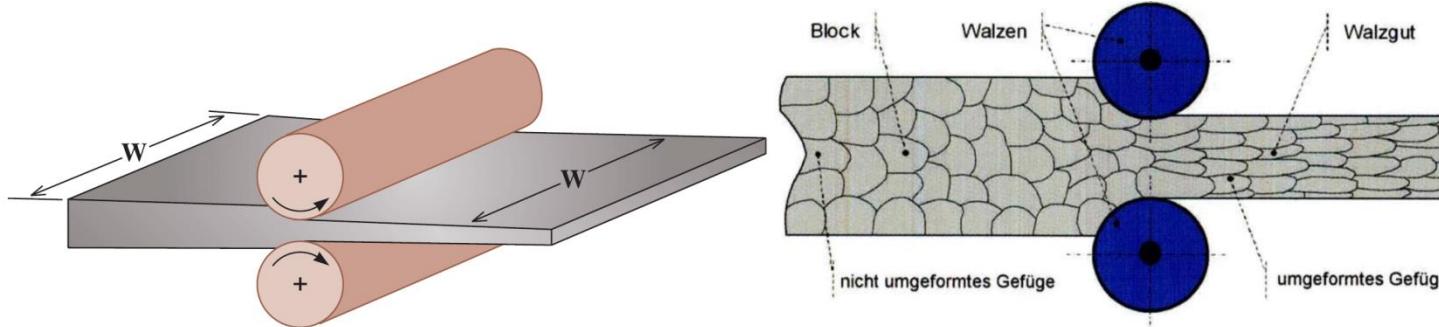
Kaltverfestigung

Mechanismen der Verfestigung

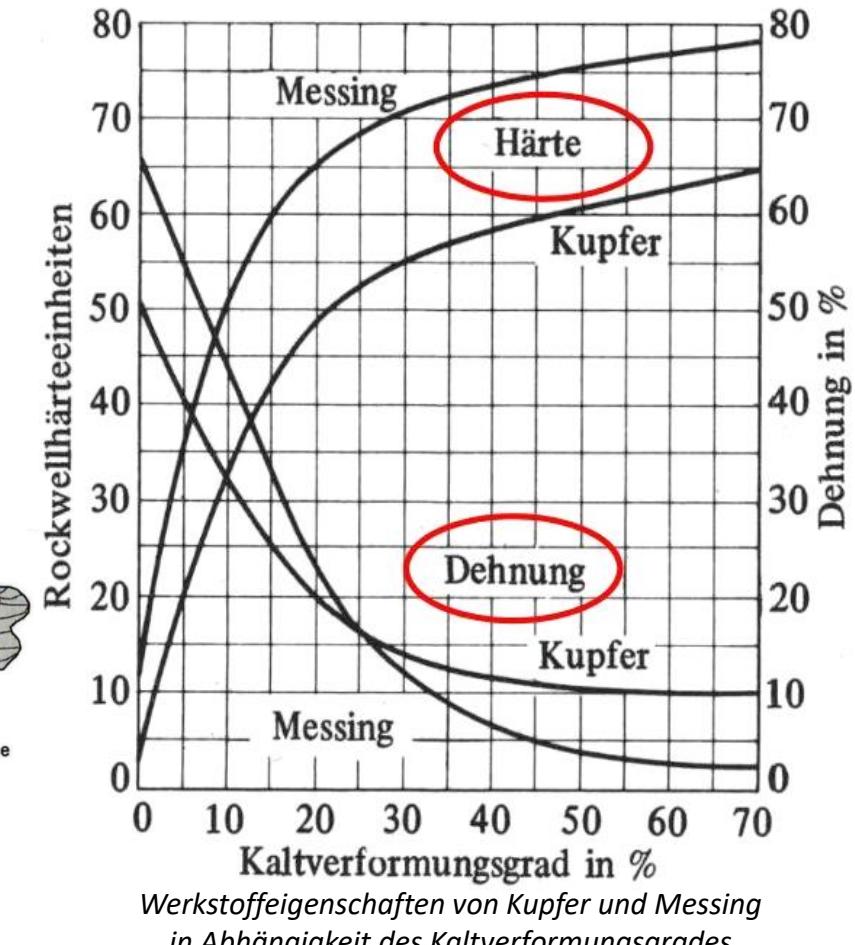
Kaltverfestigung

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

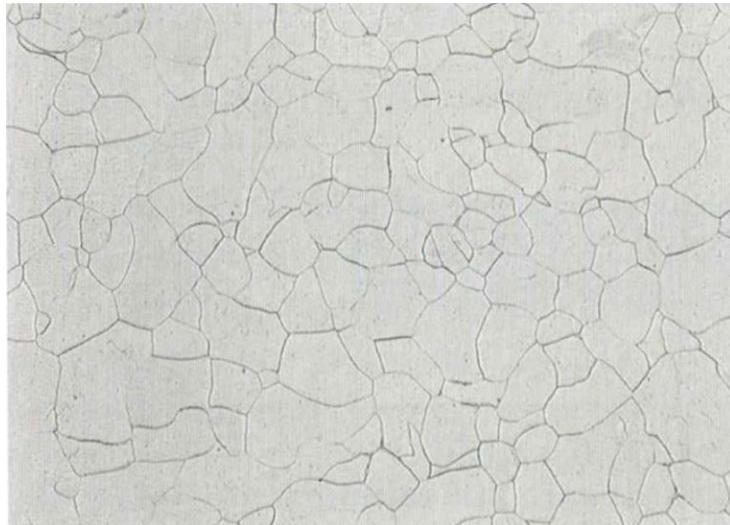


Werkstoffeigenschaften von Kupfer und Messing in Abhängigkeit des Kaltverformungsgrades

Mechanismen der Verfestigung

Kaltverfestigung und Anisotropie

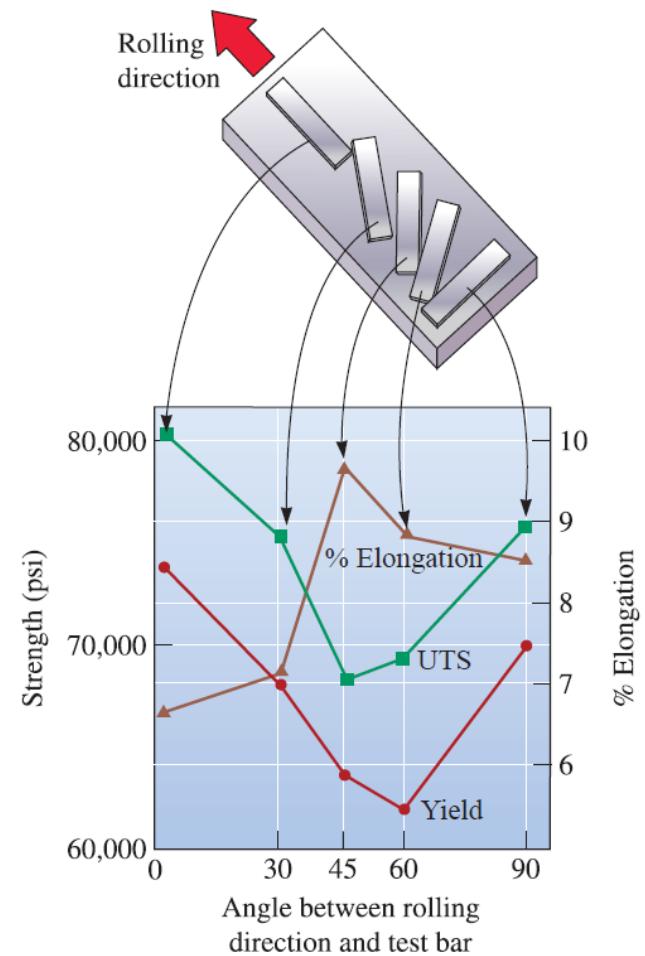
Vorsicht: Die Werkstoffeigenschaften sind anisotrop!



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

Anisotrope Eigenschaften = Richtungsabhängige Eigenschaften

Isotrope Eigenschaften = Richtungsunabhängige Eigenschaften

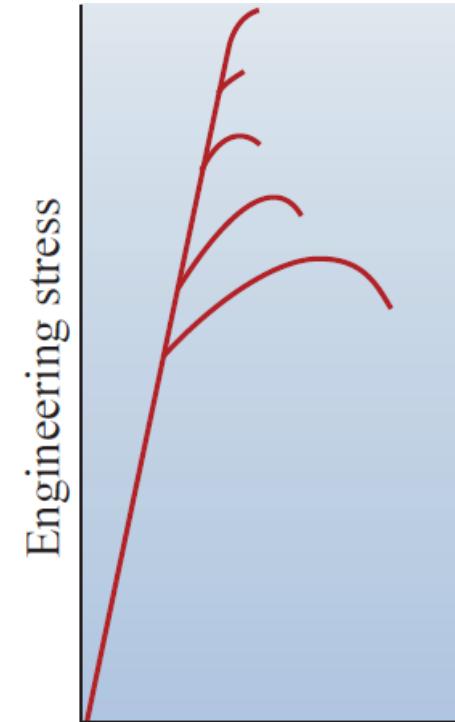
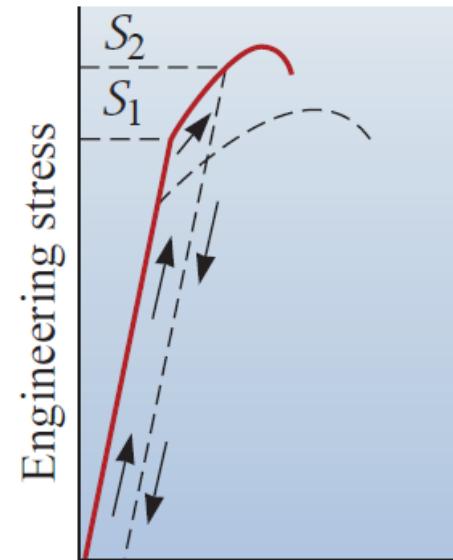
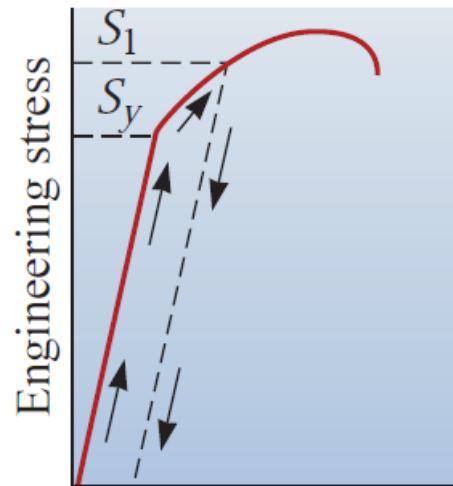


Anisotrope (richtungsabhängige) Eigenschaften eines kaltverformten Al-Li Blechwerkstoffs

Mechanismen der Verfestigung

Kaltverfestigung

- Wiederholte Be- und Entlastung einer Zugprobe beim einachsigen Zugversuch
- Die teilweise plastische Verformung einer Zugprobe und nachträgliche Entlastung führt zu einer Erhöhung der Dehngrenze $R_{P0,2}$ bei einer wiederholten Belastung.

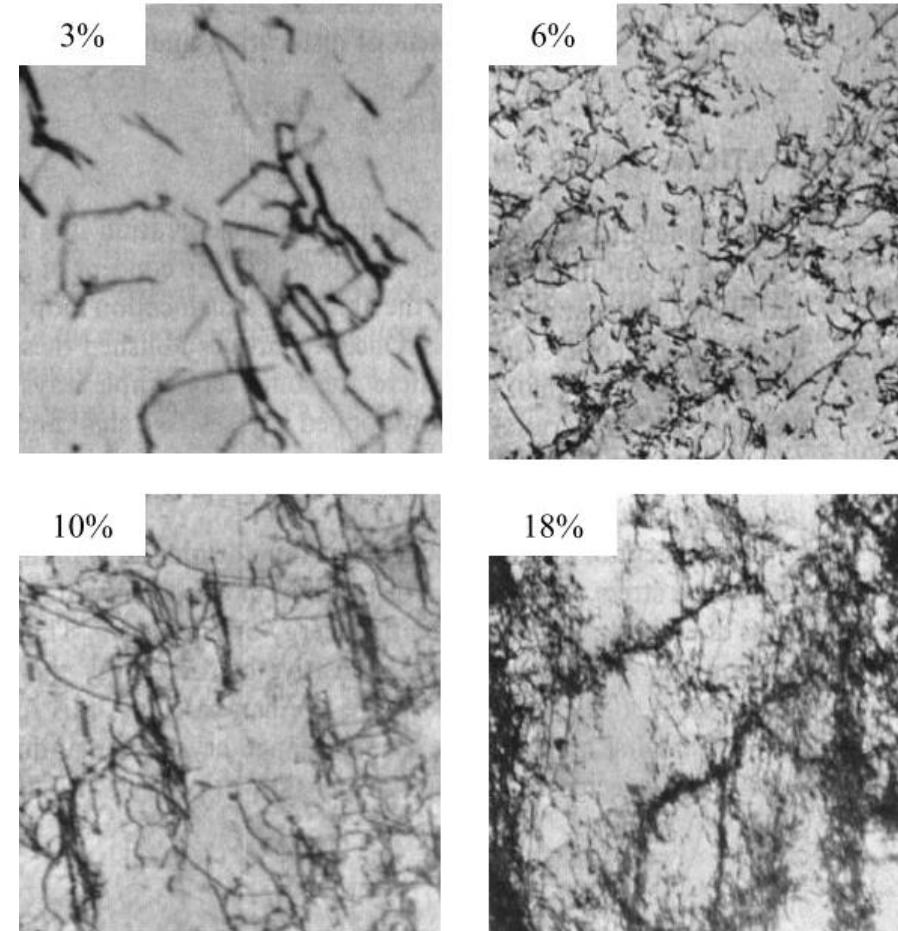


Mechanismen der Verfestigung

Kaltverfestigung und Versetzungen

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 Versetzungsichte.
- 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.



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

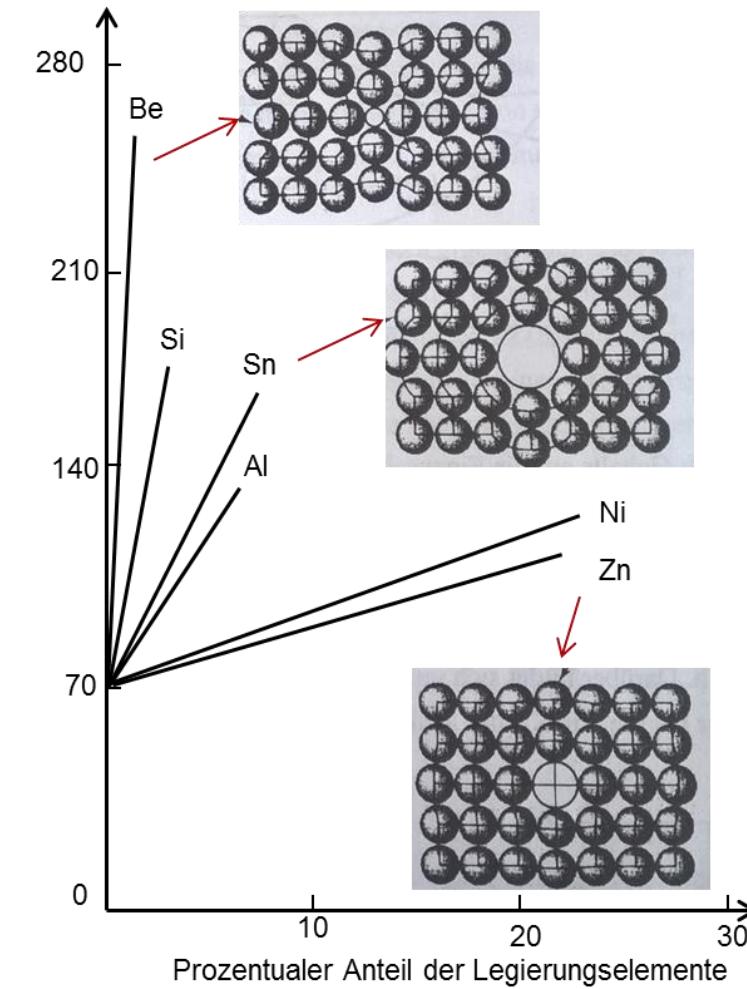
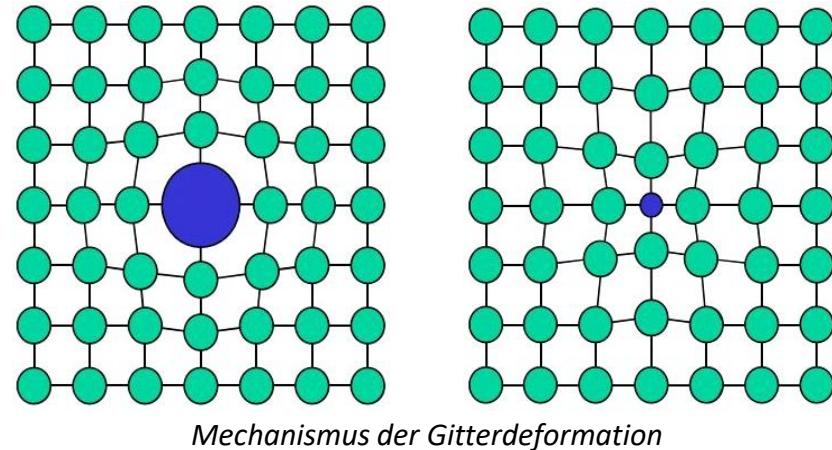
Mechanismen der Verfestigung

Mischkristallhärtung

Mechanismen der Verfestigung

Mischkristallhärtung

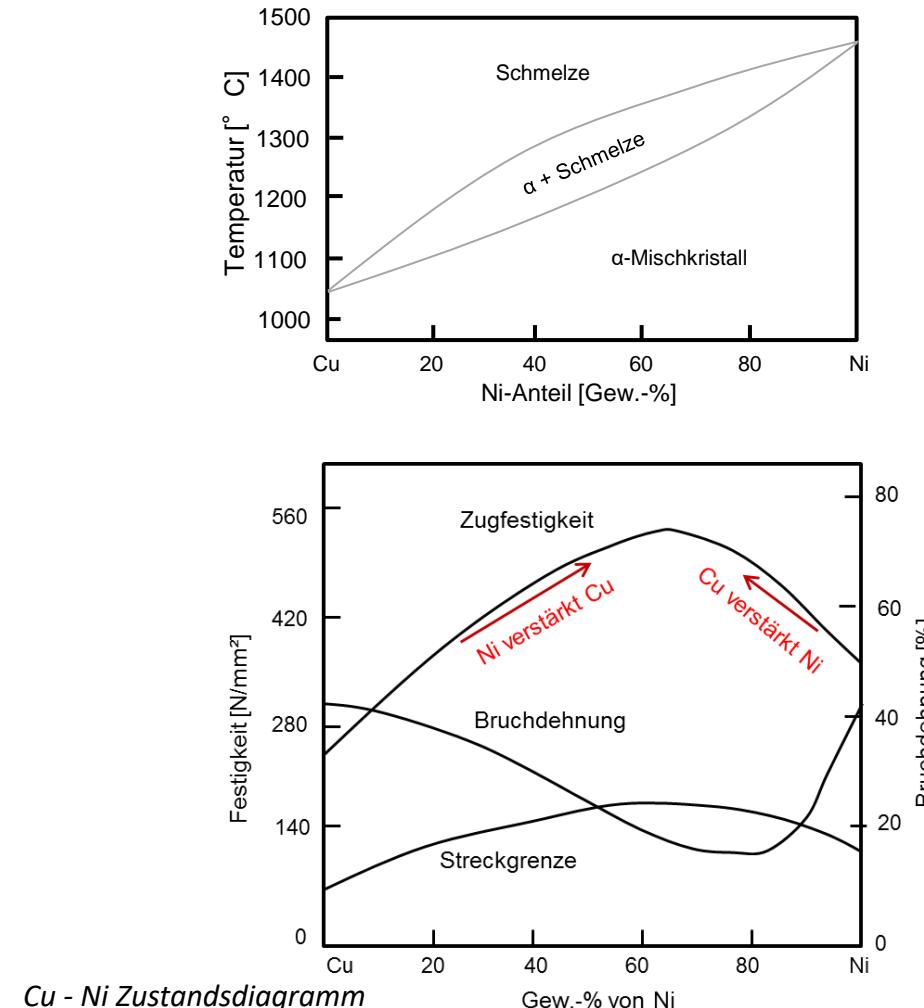
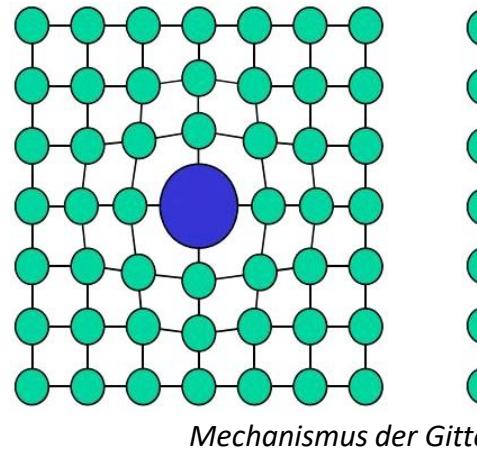
- Bei der Mischkristallhärtung führen substitutionell oder interstitiell gelöste Fremdatome zu einer Verspannung des Gitters, was zu einer Festigkeitssteigerung führt.
- Der Grad der Festigkeitssteigerung ist abhängig vom Radius der Fremdatome und ihrer Konzentration.
- Die Festigkeitssteigerung geht mit einer Abnahme der Duktilität einher.



Mechanismen der Verfestigung

Mischkristallhärtung

- Bei der Mischkristallhärtung führen substitutionell oder interstitiell gelöste Fremdatome zu einer Verspannung des Gitters, was zu einer Festigkeitssteigerung führt.
- Der Grad der Festigkeitssteigerung ist abhängig vom Radius der Fremdatome und ihrer Konzentration.
- Die Festigkeitssteigerung geht mit einer Abnahme der Duktilität einher.



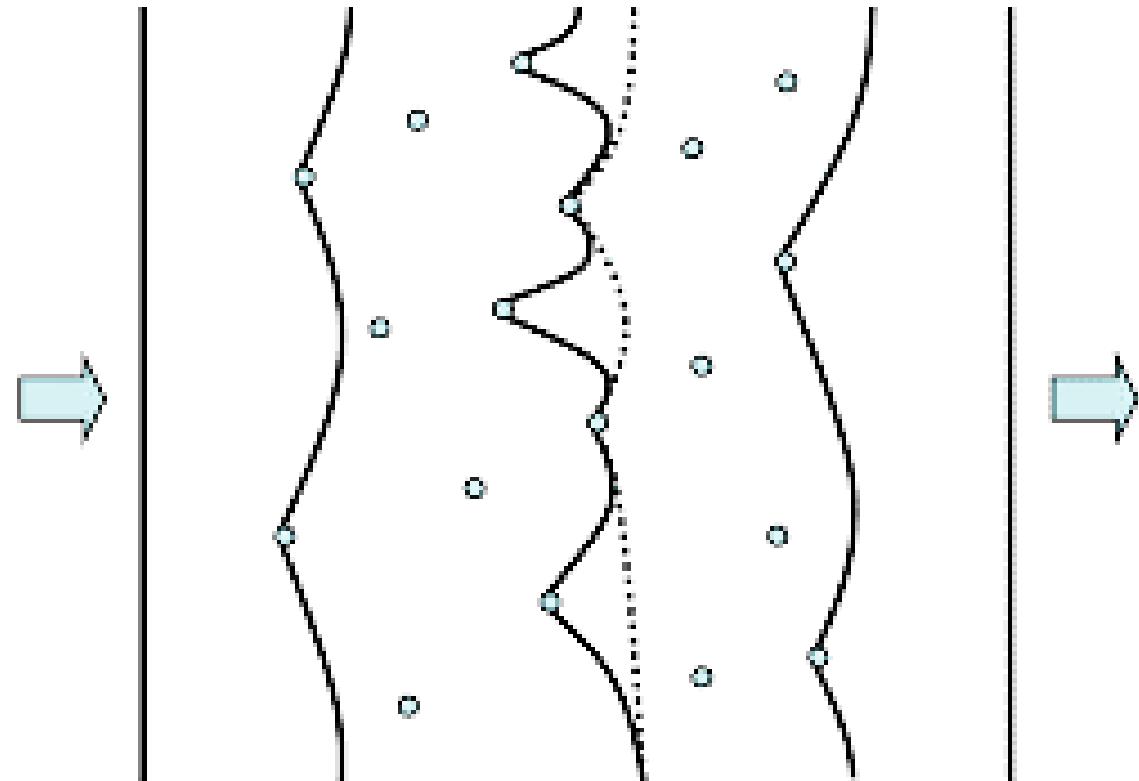
Mechanismen der Verfestigung

Ausscheidungshärtung

Mechanismen der Verfestigung

Ausscheidungshärtung

- Die Ausscheidungshärtung hat insbesondere bei Aluminiumlegierungen im Automobil- und Flugzeugbau eine hohe technologische Bedeutung (z.B. AlMgSi, AlCu).
- Ausscheidungen wirken als Hindernisse für Versetzungen während der plastischen Verformung, wodurch ein Anstieg der Festigkeit hervorgerufen wird.

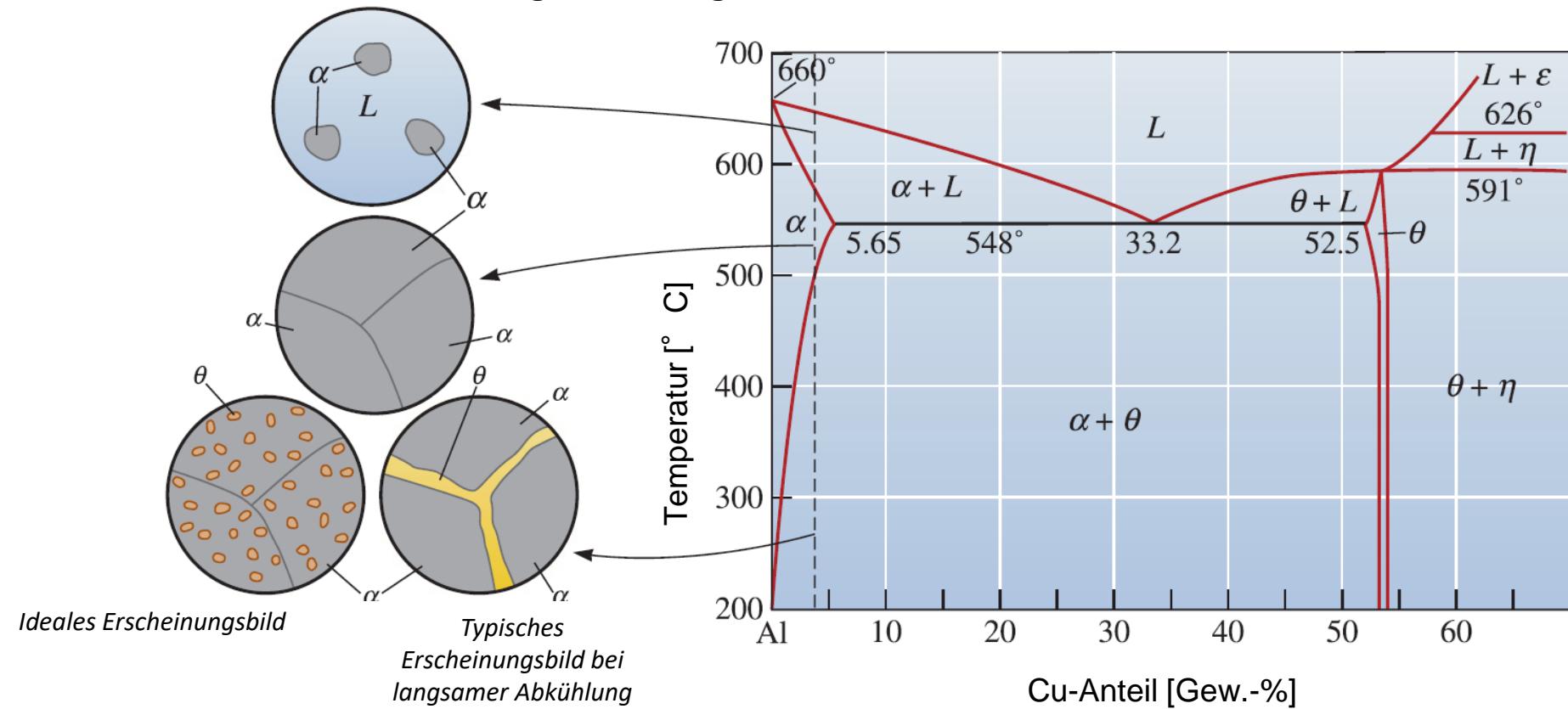


Ausscheidungen dienen als Hindernisse für Versetzungen

Mechanismen der Verfestigung

Ausscheidungshärtung

Voraussetzung für die Ausscheidungshärtung ist eine mit steigender Temperatur zunehmende Löslichkeit der Komponente B im α -Mischkristall. Dies wird als sog. Mischungslücke bezeichnet.



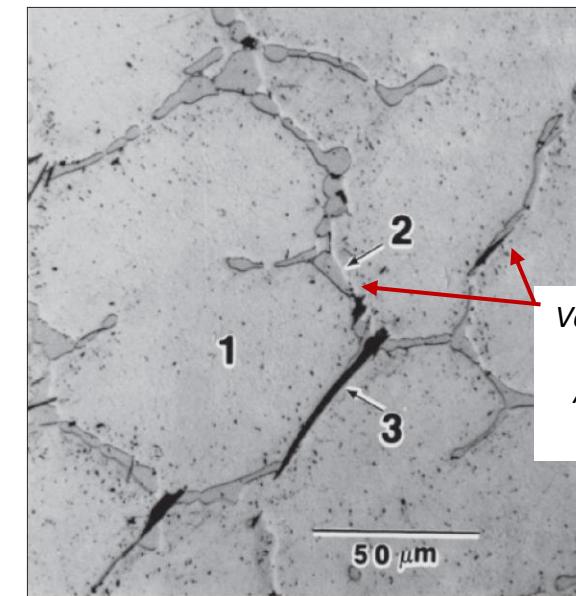
Mechanismen der Verfestigung

Ausscheidungshärtung

- Für die Ausscheidungshärtung ist die homogene Verteilung feiner Ausscheidungen anzustreben, um einen maximalen Festigkeitsanstieg zu erzielen.
- Das Verfahren der Ausscheidungshärtung wurde durch Alfred Wilm in den Jahren 1903 – 1909 entwickelt und patentiert.



Flugzeug der Gebrüder Wright (1903)

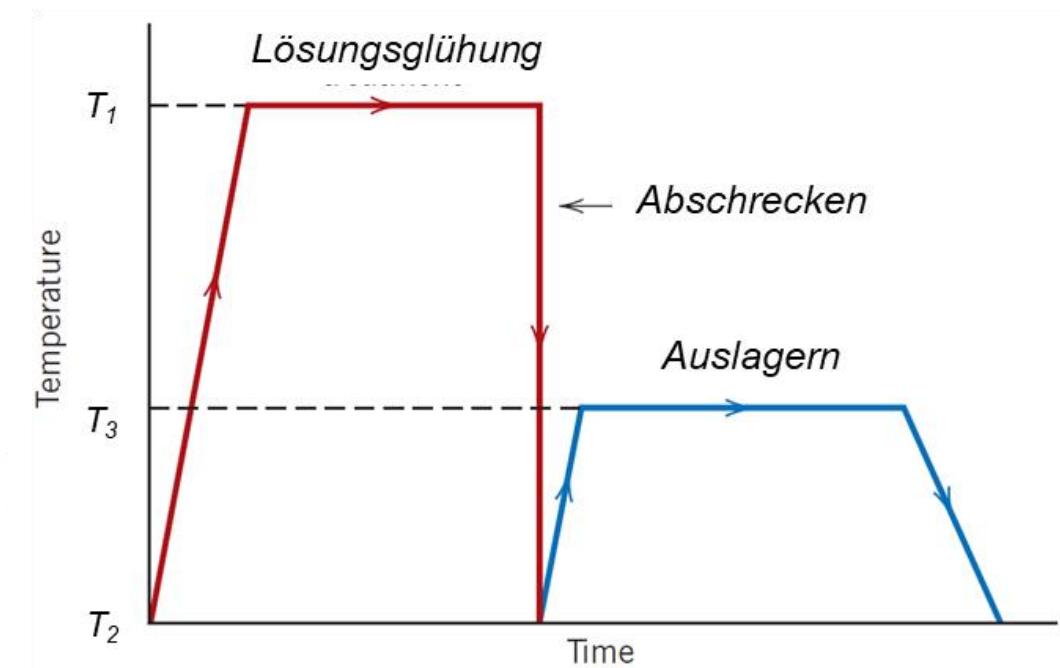
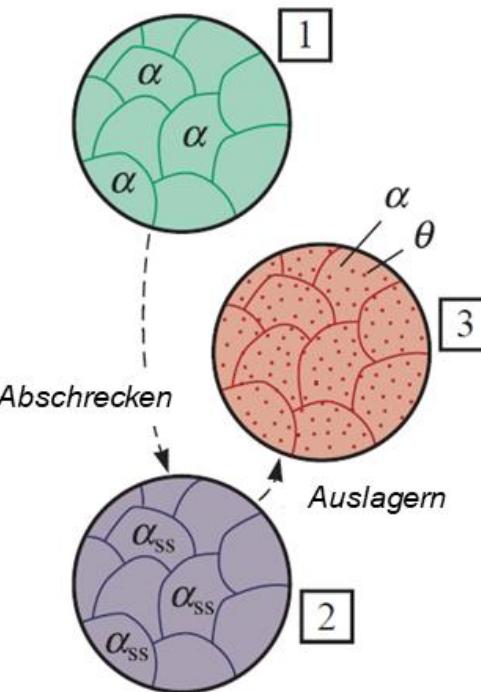
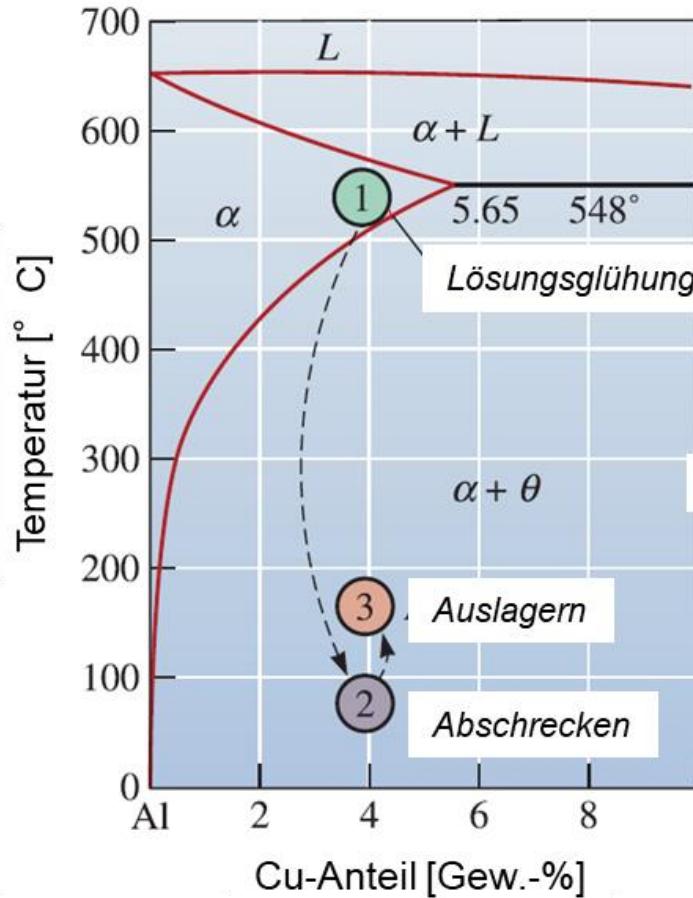


Gefüge der Al-Motorblocklegierung des
Gebrüder Wright Flugzeugs (1903)

Verhältnismäßig grobe und
inhomogen verteilte
Ausscheidungen entlang
der Korngrenzen

Mechanismen der Verfestigung

Ausscheidungshärtung

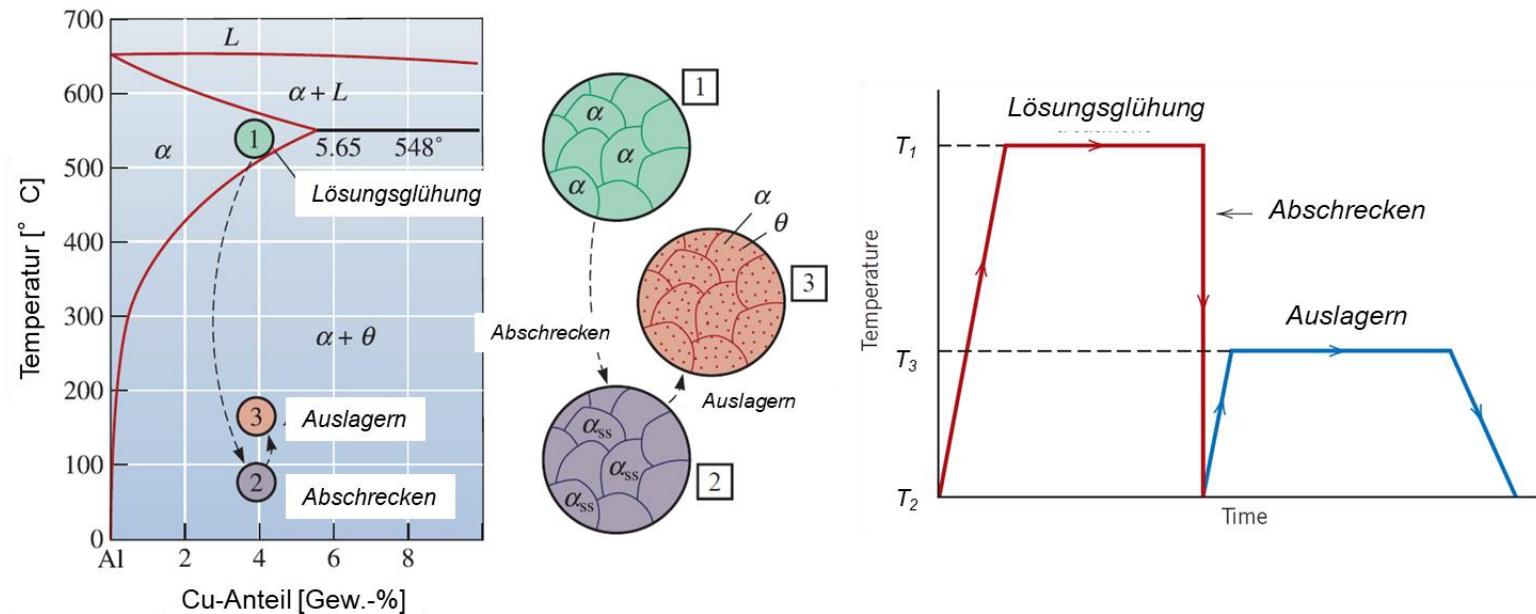


Mechanismen der Verfestigung

Ausscheidungshärtung

Verfahren der Ausscheidungshärtung am Beispiel einer Al-Cu (4Gew.-%)-Legierung:

- Lösungsglühen bei T_1 ; Anreicherung des Mischkristalls mit den für die Aushärtung wirksamen Legierungskomponenten
- Abschrecken auf T_2 ; an Legierungszusätzen angereicherter Mischkristall wird in den übersättigten Zustand überführt
- Auslagern bei T_3 ; Es kommt zu Ausscheidungen aus dem übersättigten Mischkristall

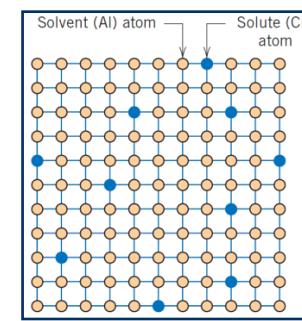


Mechanismen der Verfestigung

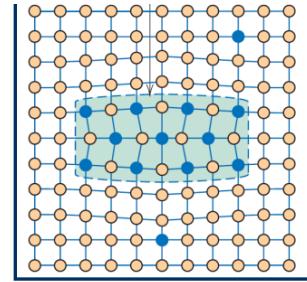
Ausscheidungshärtung – Einfluss von Ausscheidungszeit ausgehend von einem übersättigten Mischkristall

Übersättigter
Mischkristall nach
Lösungsglühen +
Abschrecken

Festigkeit und Härte



Bei der Auslagerung kommt es zur
Bildung von „**kohärenten**“
Ausscheidungen θ , welche das
Gitter der Matrix verspannen.

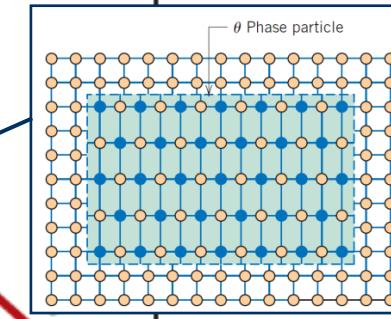


θ''

θ'

Overaging

Eine zu hohe Auslagerungstemperatur
bzw. -dauer führt zur Bildung von
„**inkohärenten**“ **Ausscheidungen**, was
einen Festigkeitsabfall zur Folge hat.



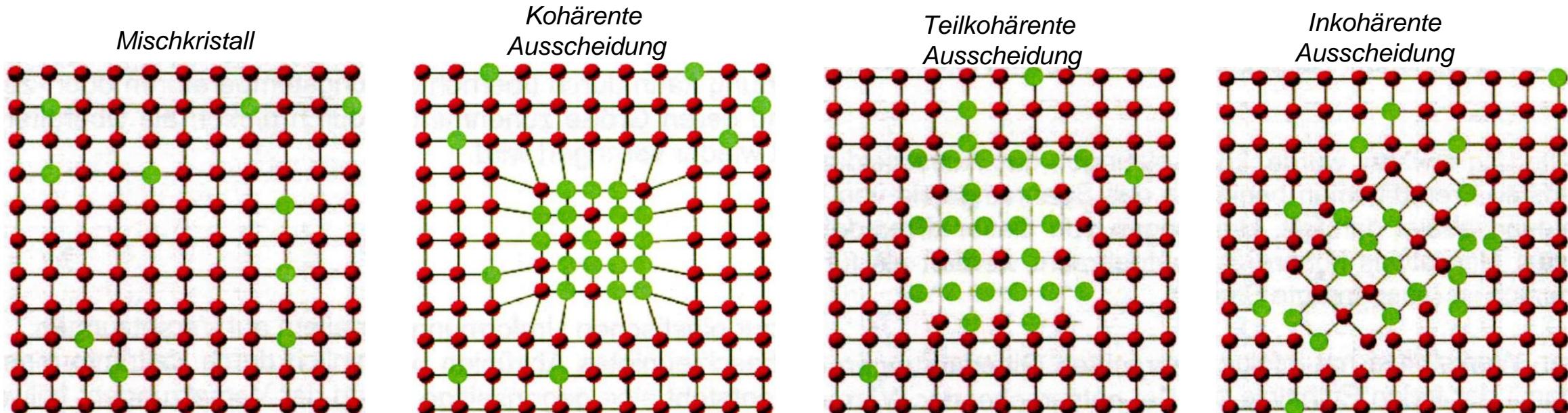
Ungefähr Auslagerungstemperatur: 200 ° C

Auslagerungszeit

Mechanismen der Verfestigung

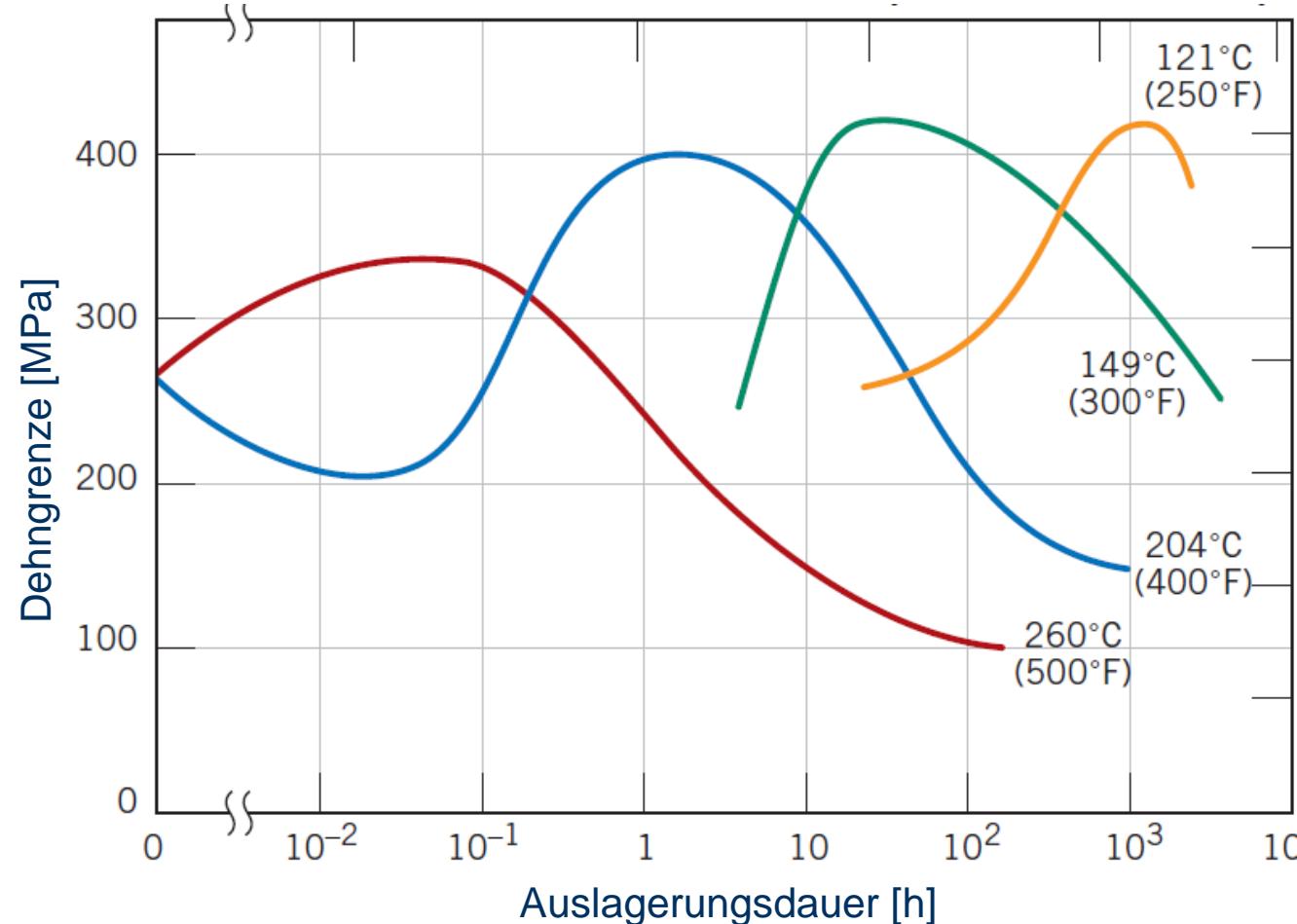
Ausscheidungshärtung – Ausscheidungscharakteristik

- Bei einer kohärenten Ausscheidung stimmen die Kristallgitter von Matrix und ausgeschiedener Phase überein. Die vorhandenen Unterschiede in den Atomabständen führen zu sogenannten Kohärenzspannungen. Kohärente Ausscheidungen bewirken die effektivste Festigkeitserhöhung.
- Bei teilkohärenten Ausscheidungen liegt nur eine teilweise Kohärenz zwischen den Gittern vor.
- Bei Inkohärenten Ausscheidungen besitzen stets eine von der Legierungsmatrix deutlich verschiedene Gitterstruktur.



Mechanismen der Verfestigung

Ausscheidungshärtung – Einfluss von Ausscheidungstemperatur und -zeit



Einfluss der Auslagerungstemperatur und –dauer
auf die Festigkeit einer Al-4wt.%Cu Legierung

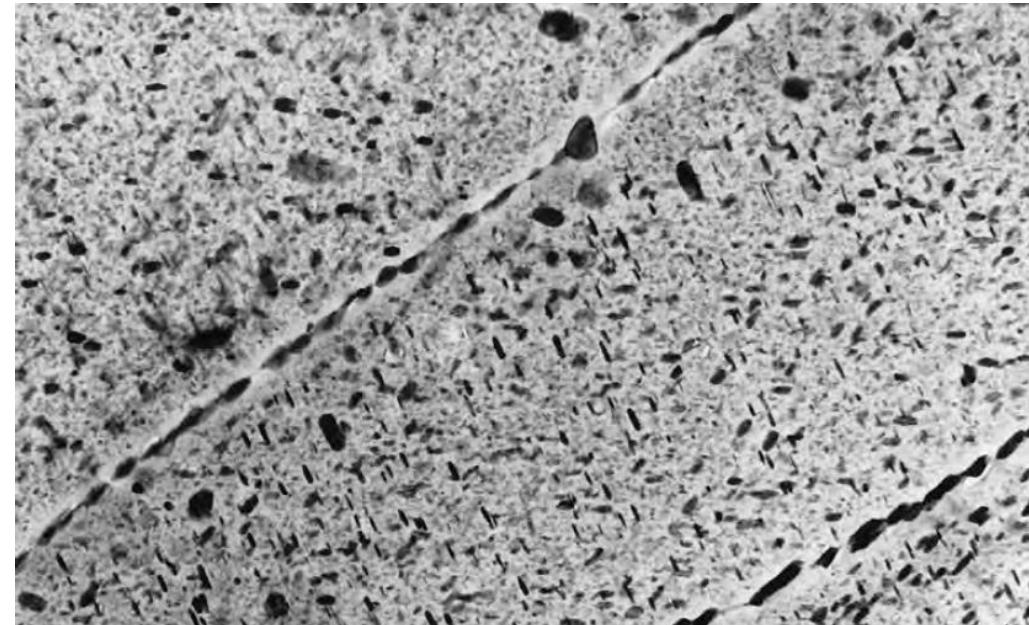
Mechanismen der Verfestigung

Ausscheidungshärtung – Technologische Bedeutung für den Automobilbau

Die Temperatur beim Einbrennen des Lacks beträgt ca. 180° C. Dies entspricht der idealen Auslagerungstemperatur der verwendeten Al-Legierungen (AlMgSi-Legierungen) und geht einher mit einem Festigkeitsanstieg. Das Einbrennen des Lacks und die Festigkeitssteigerung der Al-Legierung erfolgt somit in einem Fertigungsschritt.



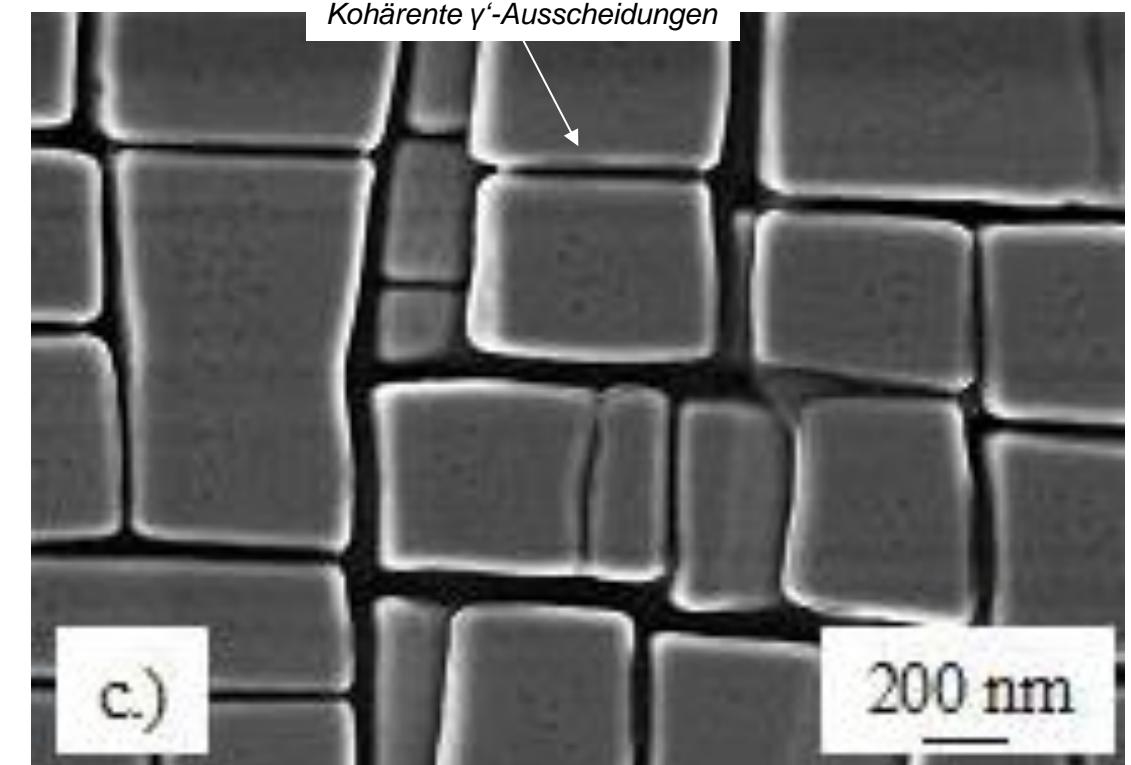
*Ausscheidungshärtung erfolgt während dem
Einbrennen des Lacks*



Gefüge einer ausscheidungsgehärteten AlZnCu-Legierung (EN-AW7150)

Mechanismen der Verfestigung

Ausscheidungshärtung – Technologische Bedeutung für den Flugzeug- bzw. Turbinenbau



Gefüge einer Ni-Basis Superlegierung

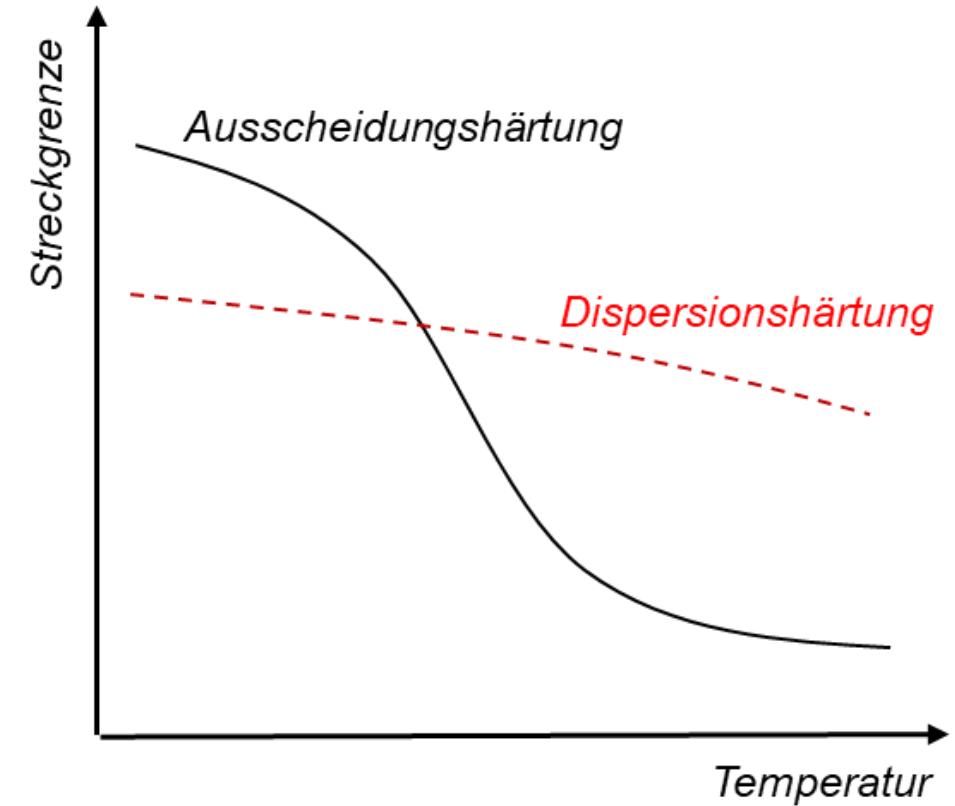
Mechanismen der Verfestigung

Dispersionshärtung

Mechanismen der Verfestigung

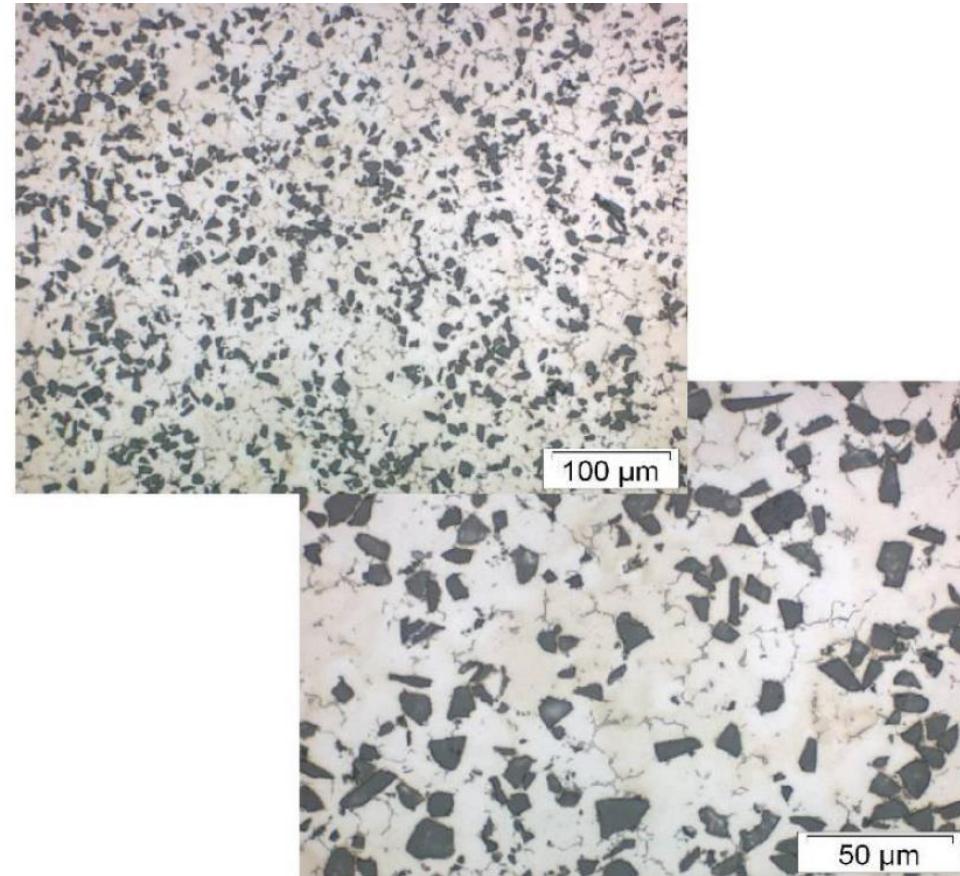
Dispersionshärtung

- Als Dispersion im Festkörper gelten feinverteilte Fremdphasen in der Matrix. Die Festigkeitssteigerung ist vergleichbar mit der von inkohärent ausgeschiedenen Phasen.
- Die Dispersion kann in der Schmelze, mit pulvermetallurgischen Verfahren oder durch innere Oxidation erfolgen.
- Der Vorteil von dispersiongehärteten Werkstoffen liegt in ihrer thermischen Stabilität durch die Unlöslichkeit der dispergierten Phase in der Matrix. Damit ist der Abfall der Festigkeit über der Temperatur geringer als bei ausscheidungsgehärteten Metallen.
- Die dispergierten Partikel sind thermisch stabil, d.h. kein Wachstum oder Koagulation.
- Gebräuchlicher Dispersionshärtter ist Al_2O_3 bei Aluminium; ZrO_2 oder Y_2O_3 bei Ni-Basis Werkstoffen.



Mechanismen der Verfestigung

Dispersionshärtung



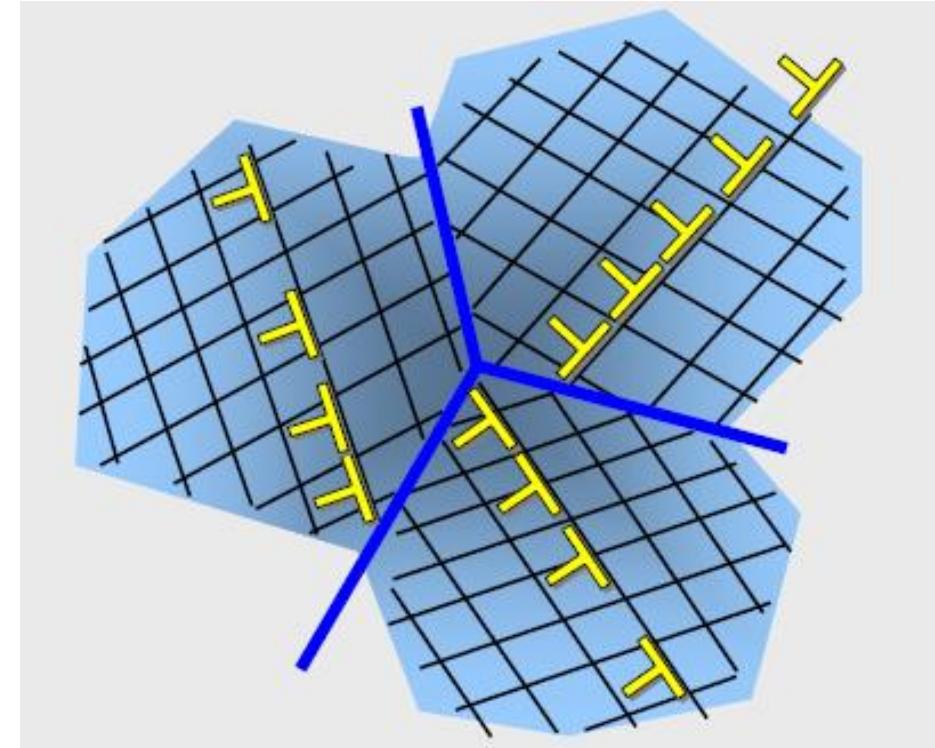
Mittels Thixospritzguss hergestellter AJ62 – 15% SiC Verbund

Feinkornhärtung

Mechanismen der Verfestigung

Feinkornhärtung

- Einen erheblichen Beitrag zur Festigkeitssteigerung liefert Feinkornhärtung. Durch Verringerung der Korngröße wird die Anzahl der Korngrenzen erhöht, welche als Hindernisse bei der Versetzungsbewegung (Versetzungsaufstau) während der plastischen Verformung fungieren.
- Die erforderliche Spannung zur Überwindung dieses Widerstandes nimmt zu, die Streckgrenze und Zugfestigkeit steigt an. Die feinere Körnung bewirkt zudem eine verbesserte Duktilität des Werkstoffs, da mehr Gleitebenen günstig zur Beanspruchungsrichtung orientiert liegen.



Versetzungsaufstau an den Korngrenzen während der plastischen Verformung

Mechanismen der Verfestigung

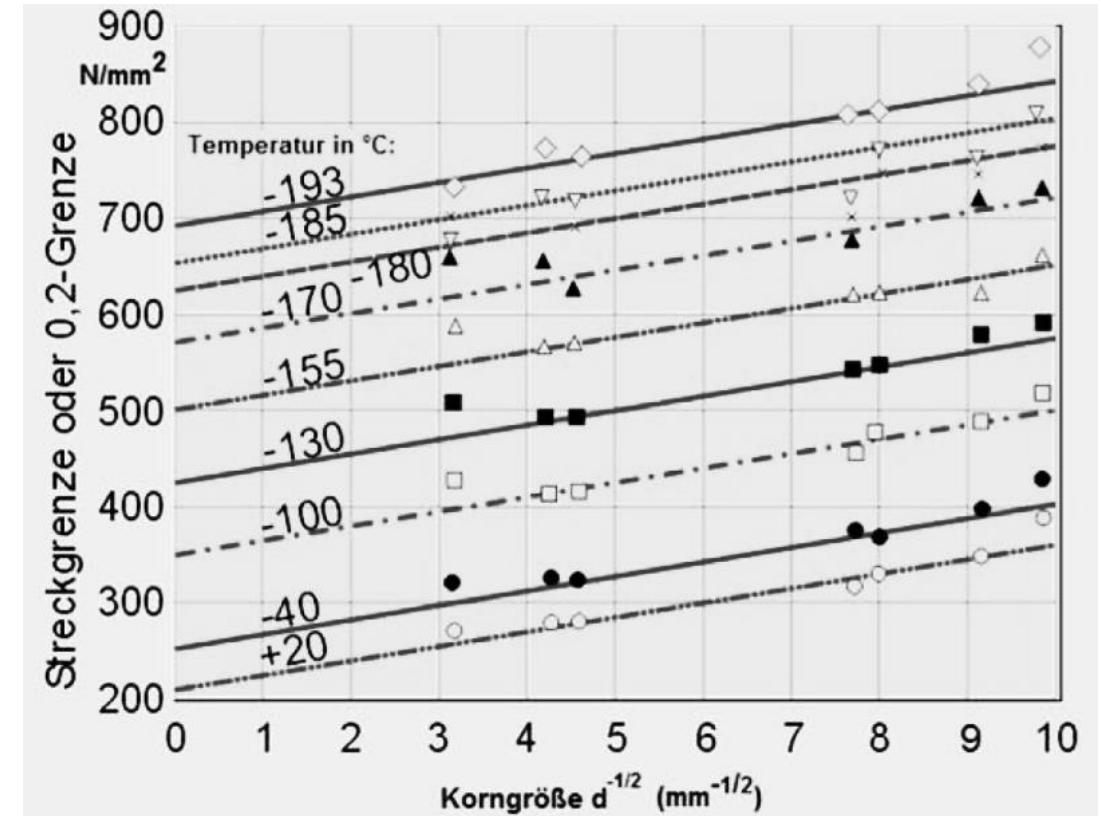
Feinkornhärtung

Besonderheiten der Feinkornhärtung:

- Scheinbar isotropes (richtungsunabhängiges) Werkstoffverhalten.
- Einziger Verfestigungsmechanismus, der mit einer Zunahme der Festigkeit und Dehnung und Zähigkeit einhergeht.
- Erfährt breite Anwendung im Bereich der Stahlwerkstoffe (Feinkornbaustahl).
- Zahlenmäßig kann der Einfluss des mittleren Korndurchmessers d auf die Streckgrenze R_e mit Hilfe der Hall-Petch-Beziehung angegeben werden.

$$R_e = \sigma_i + k_y \cdot \frac{1}{\sqrt{d}}$$

$$R_e \sim \frac{1}{\sqrt{d}}$$

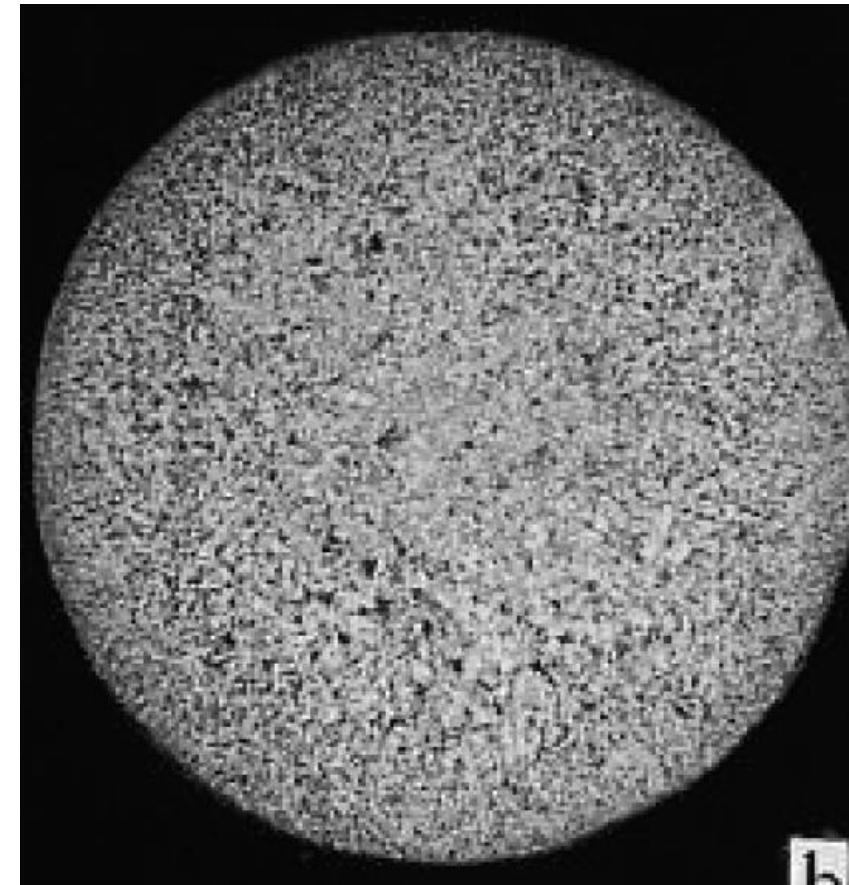
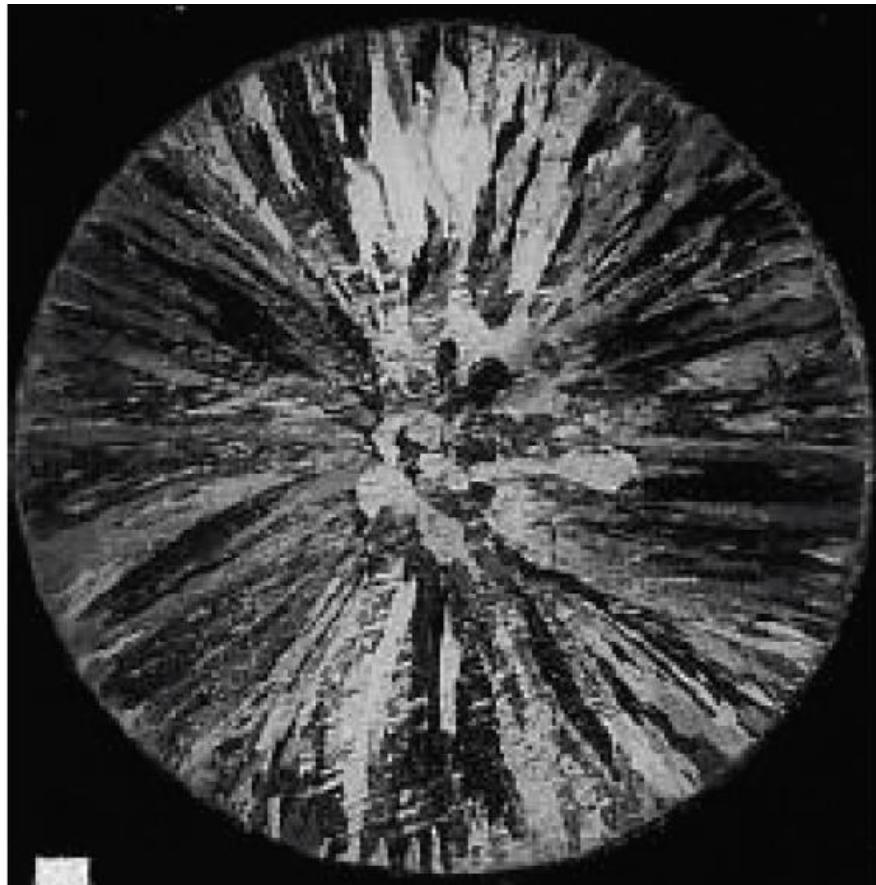


σ_i : Reibungsspannung

k_y : Maßzahl für den Korngrenzenwiderstand

Mechanismen der Verfestigung

Feinkornhärtung – Kornfeinung in einem Al-Gussblock



Kornstruktur von Reinaluminium ohne Kornfeinung (links) und mit Kornfeinung mittels Kornfeinungsmittels Al₅TiB₁ (rechts); Quelle: BIAS

Mechanismen der Verfestigung

Feinkornhärtung – Anwendung bei Feinkornbaustählen



Fußgängerbrücke „Simone de Beauvoir“
Feinkornbaustahl S355



Liebherr – Kranbau
Höherfeste Feinkornbaustähle

Mechanismen der Verfestigung

Einordnung der festigkeitssteigernden Maßnahmen am Beispiel Aluminium

