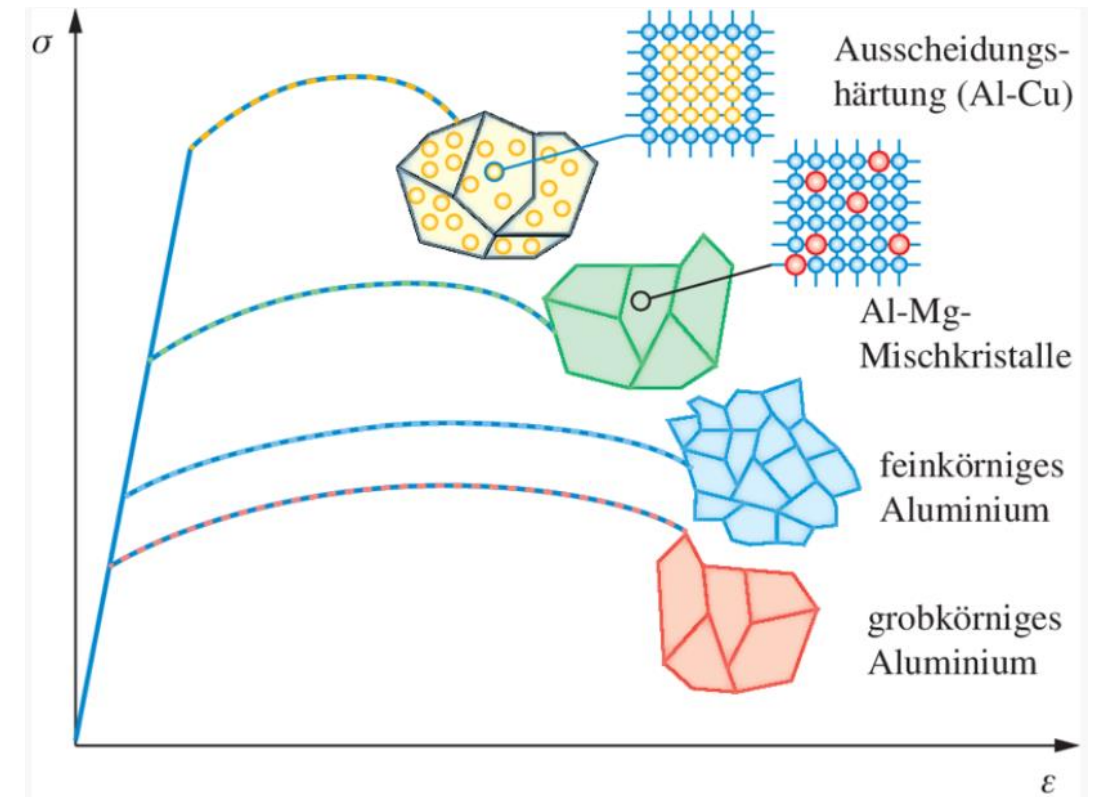


Werkstofftechnik

Mechanismen der Verfestigung

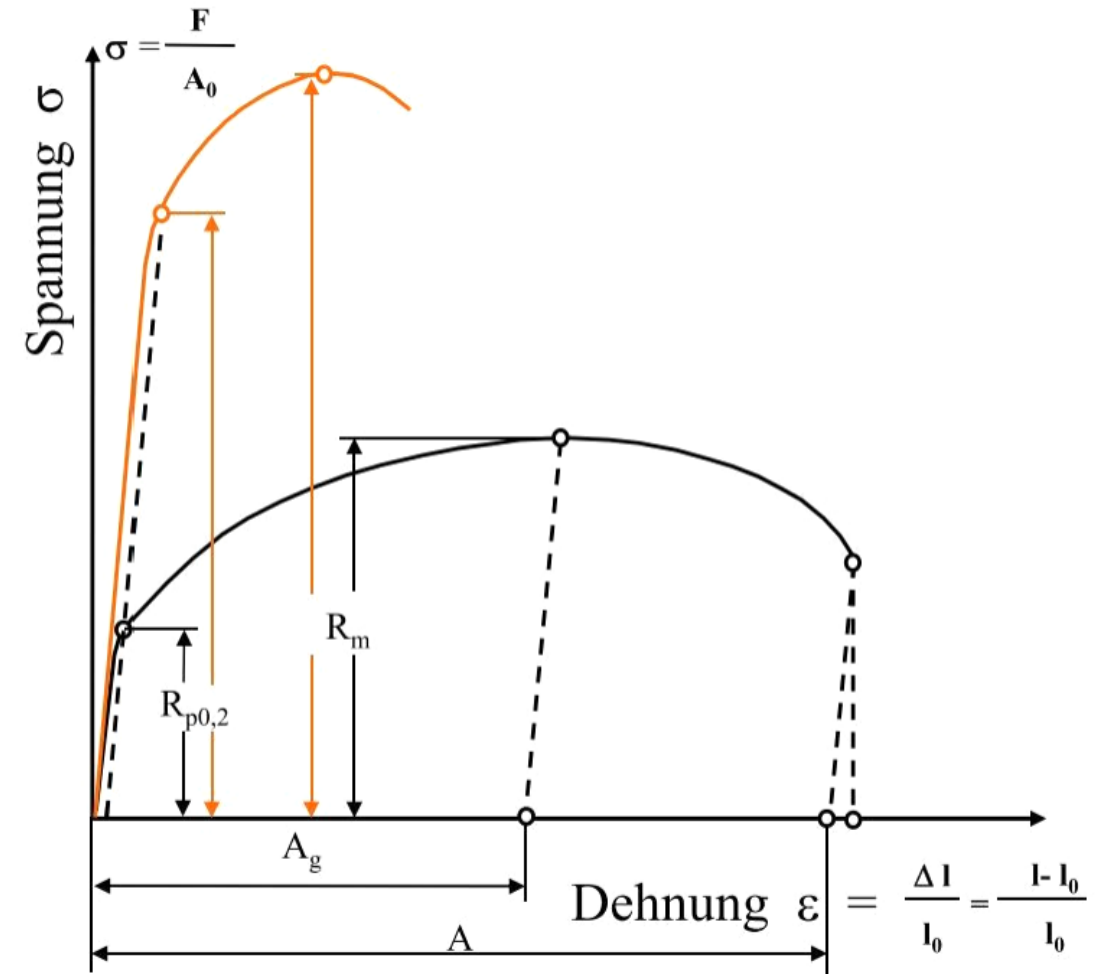
Vorlesung



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

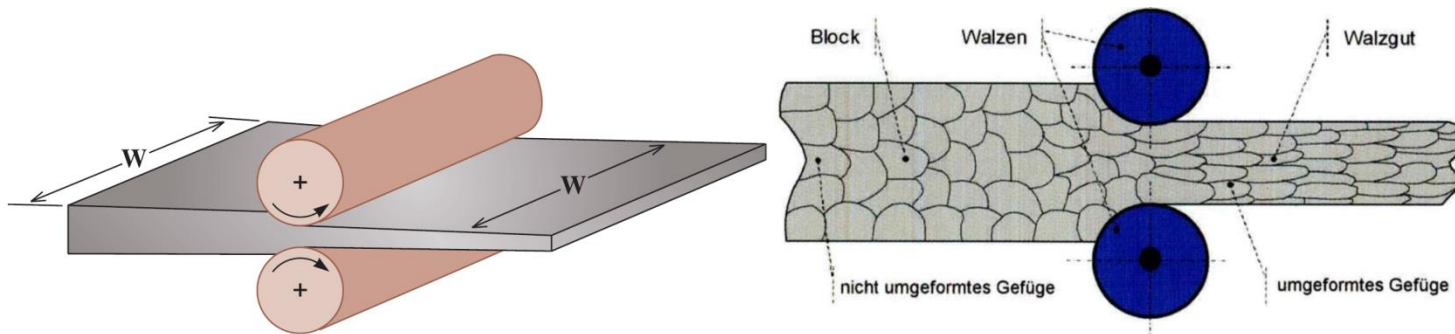
Kaltverfestigung

Mechanismen der Verfestigung

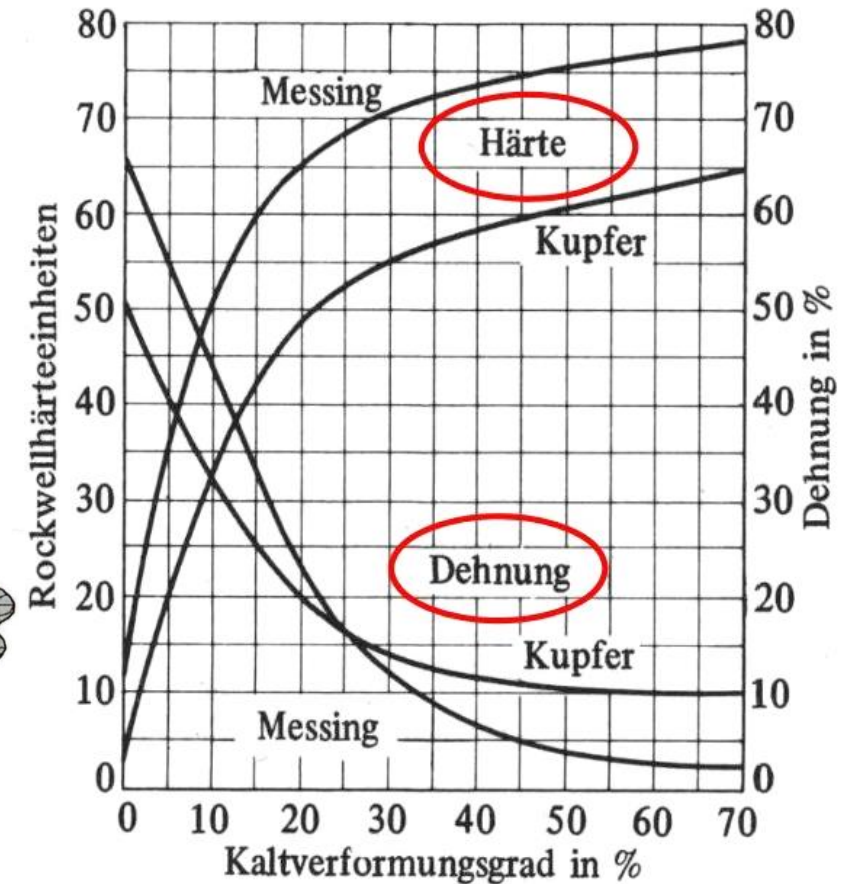
Kaltverfestigung

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

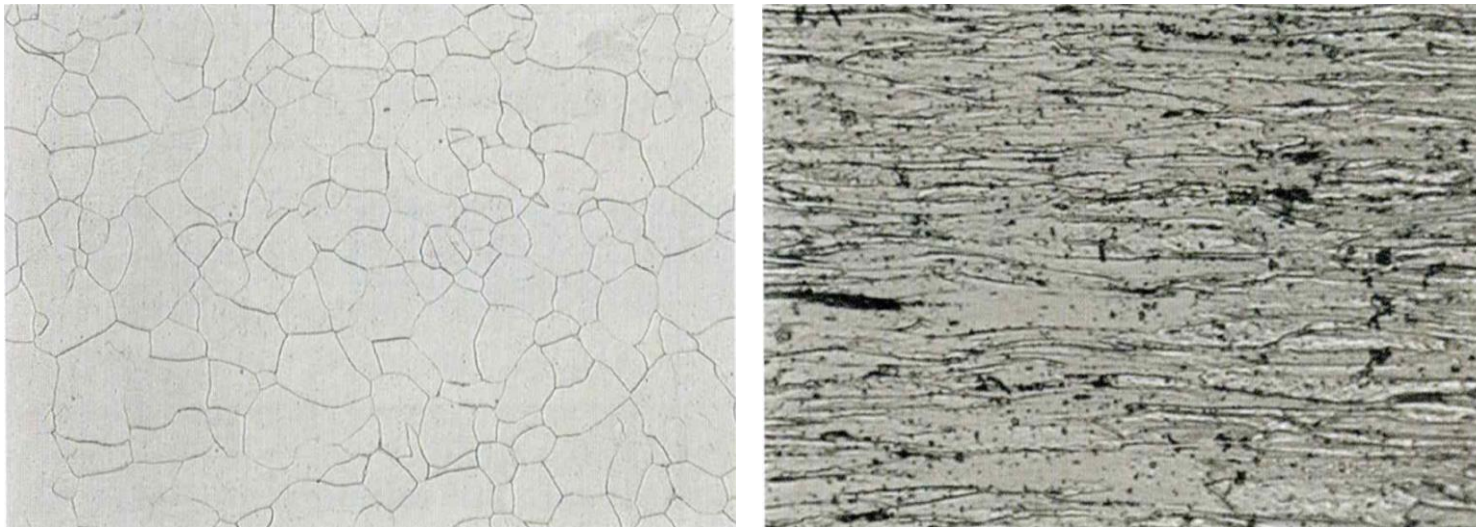


Werkstoffeigenschaften von Kupfer und Messing in Abhängigkeit des Kaltverformungsgrades

Mechanismen der Verfestigung

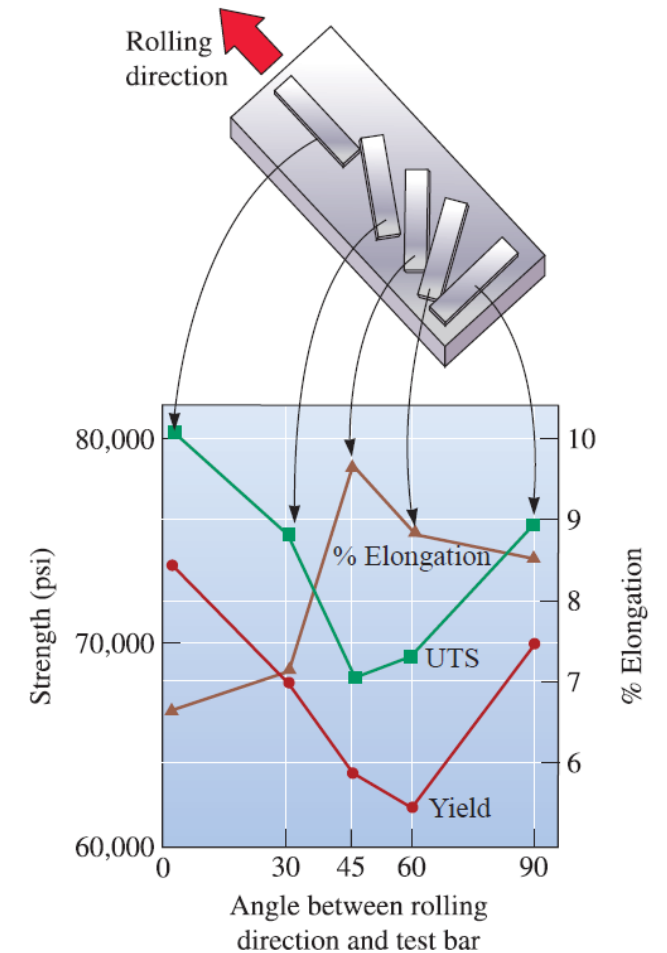
Kaltverfestigung und Anisotropie

Vorsicht: Die Werkstoffeigenschaften sind anisotrop!



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

Anisotrope Eigenschaften = Richtungsabhängige Eigenschaften
Isotrope Eigenschaften = Richtungsunabhängige Eigenschaften

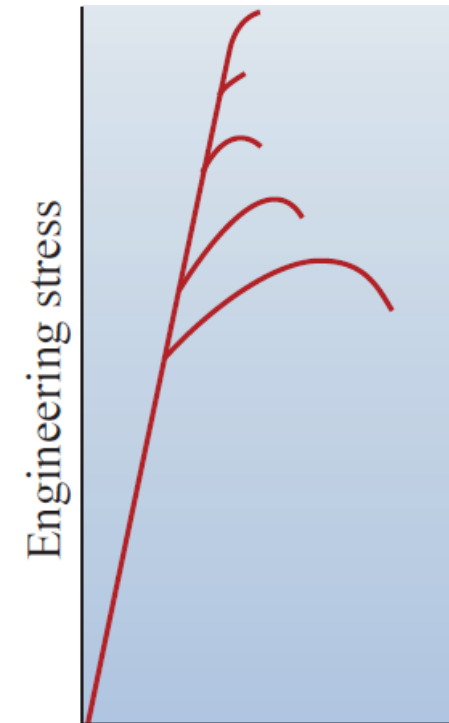
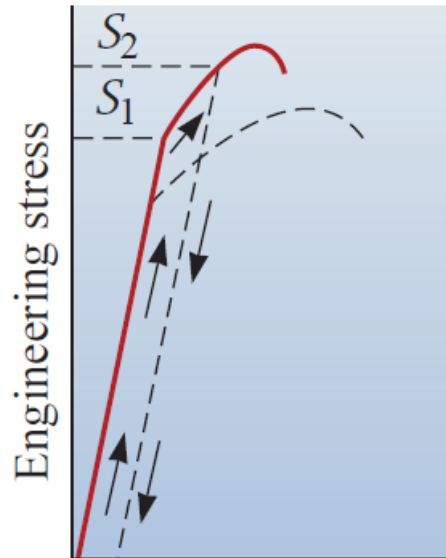
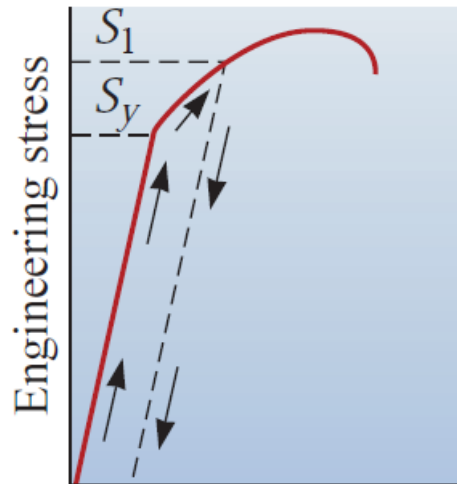


Anisotrope (richtungsabhängige) Eigenschaften eines kaltverformten Al-Li Blechwerkstoffs

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.

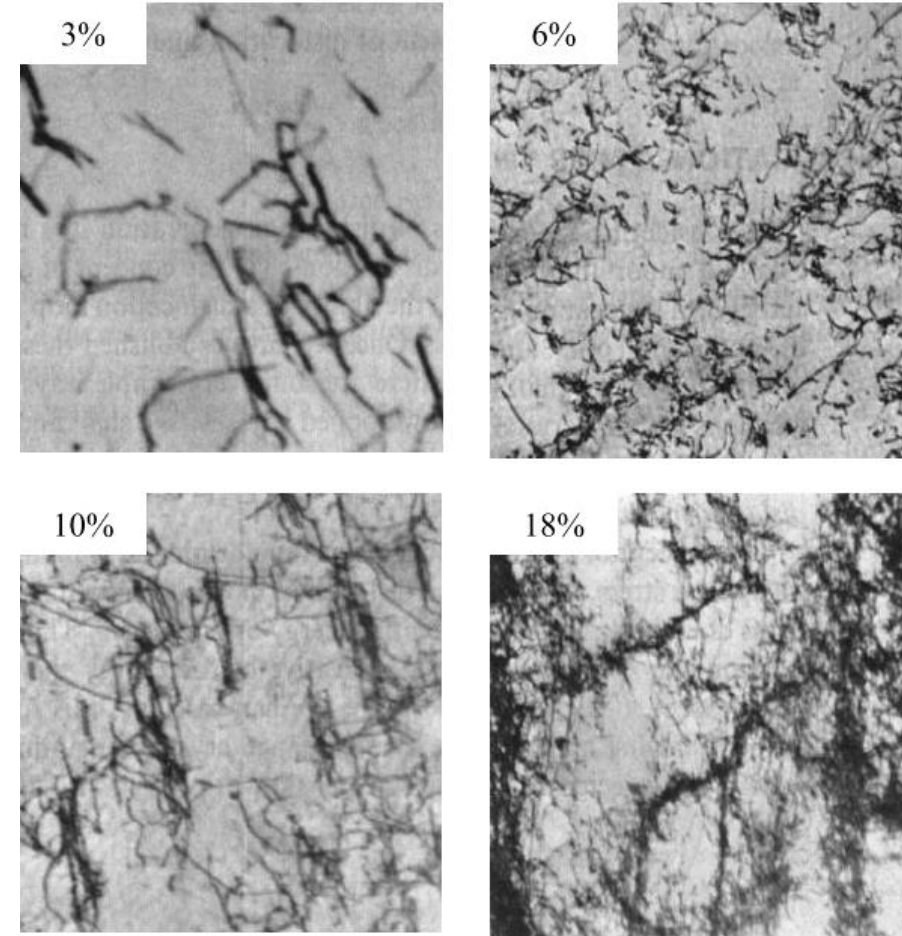


Mechanismen der Verfestigung

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 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.



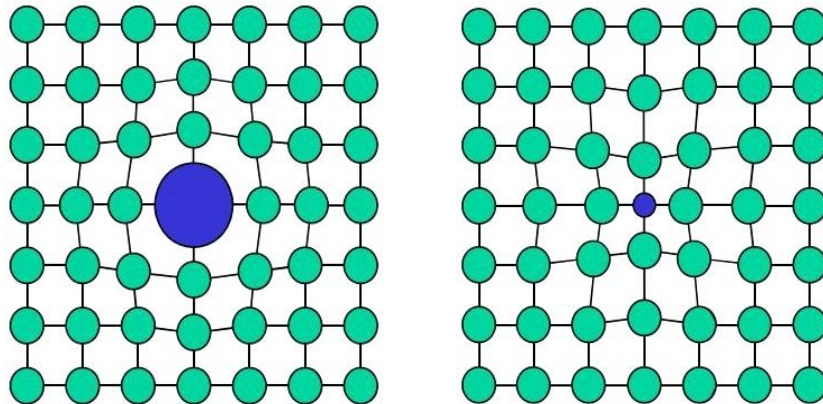
Versetzungslinien in einem austenitischen CrNi-Stahl nach Kaltverformung (TEM – Aufnahmen).

Mischkristallhärtung

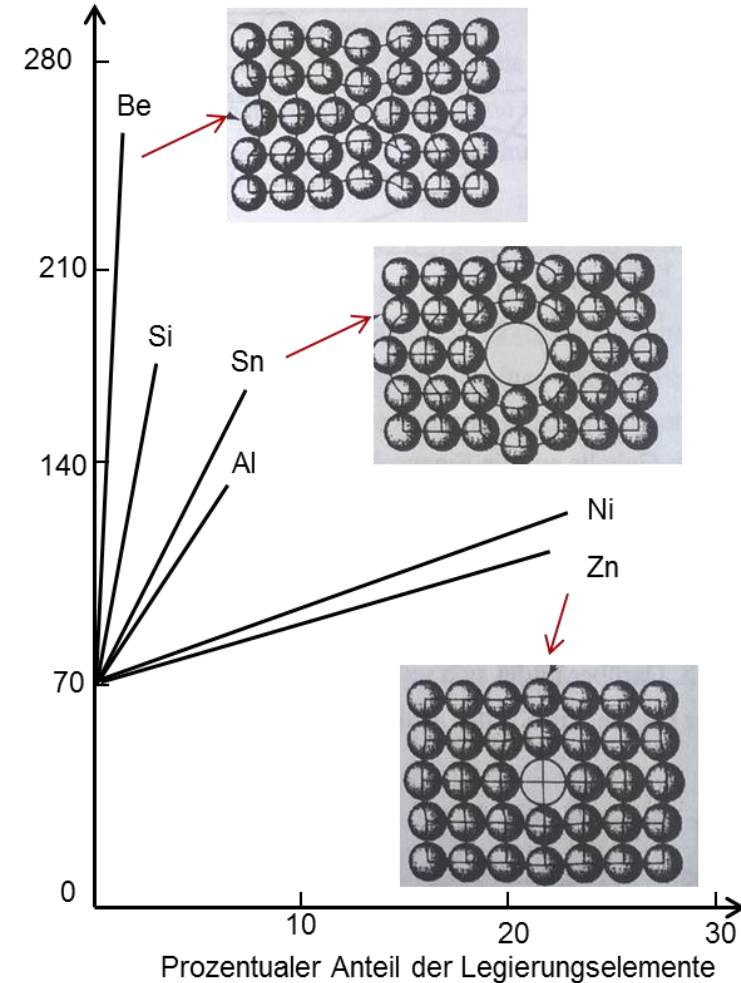
Mechanismen der Verfestigung

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.



Mechanismus der Gitterdeformation

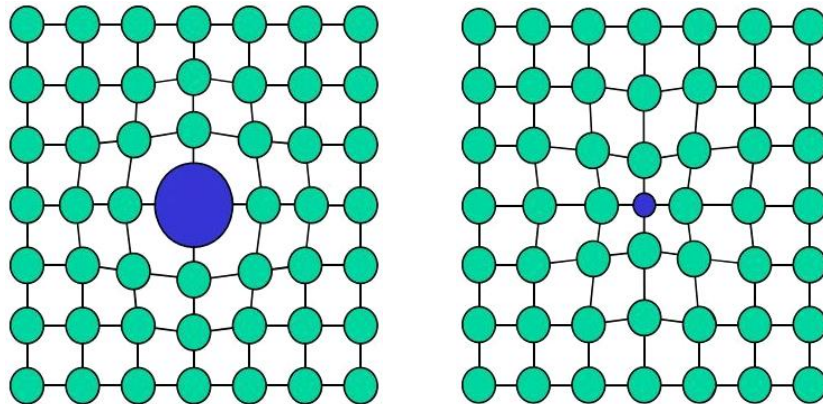


Einfluss verschiedener Legierungselemente auf die Streckgrenze von Cu

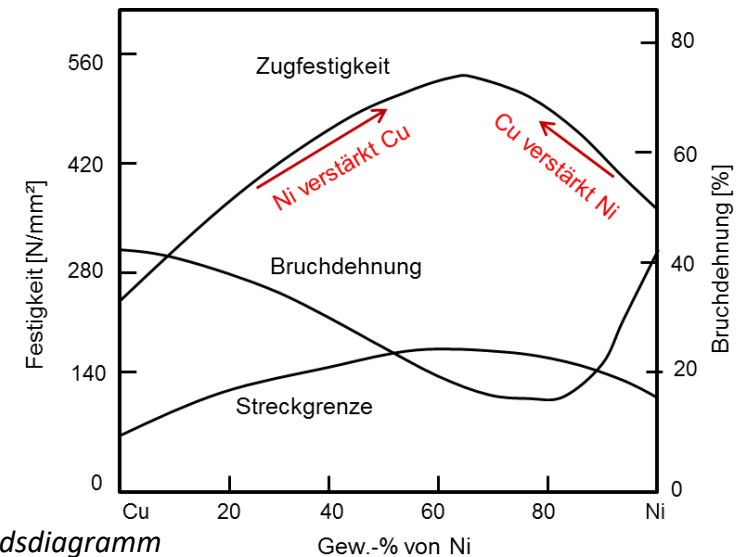
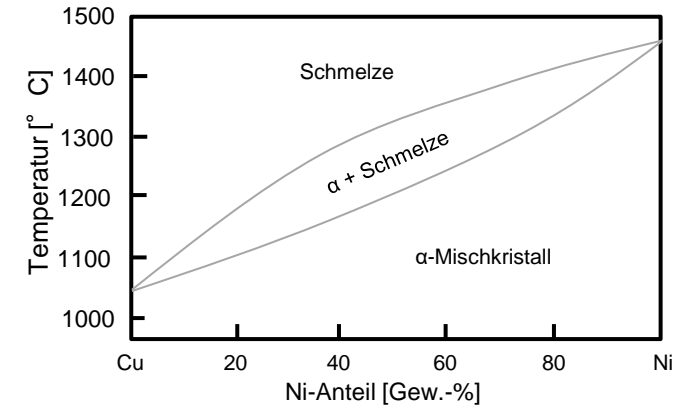
Mechanismen der Verfestigung

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.



Mechanismus der Gitterdeformation



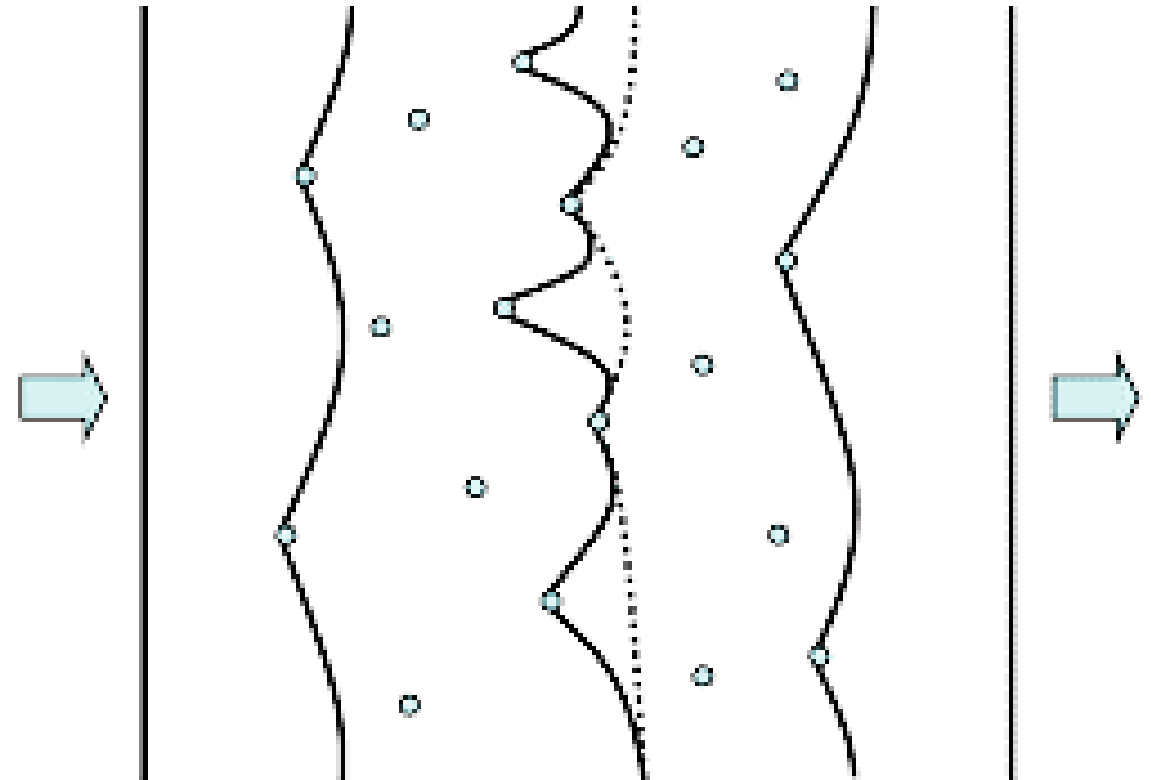
Cu - Ni Zustandsdiagramm

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.

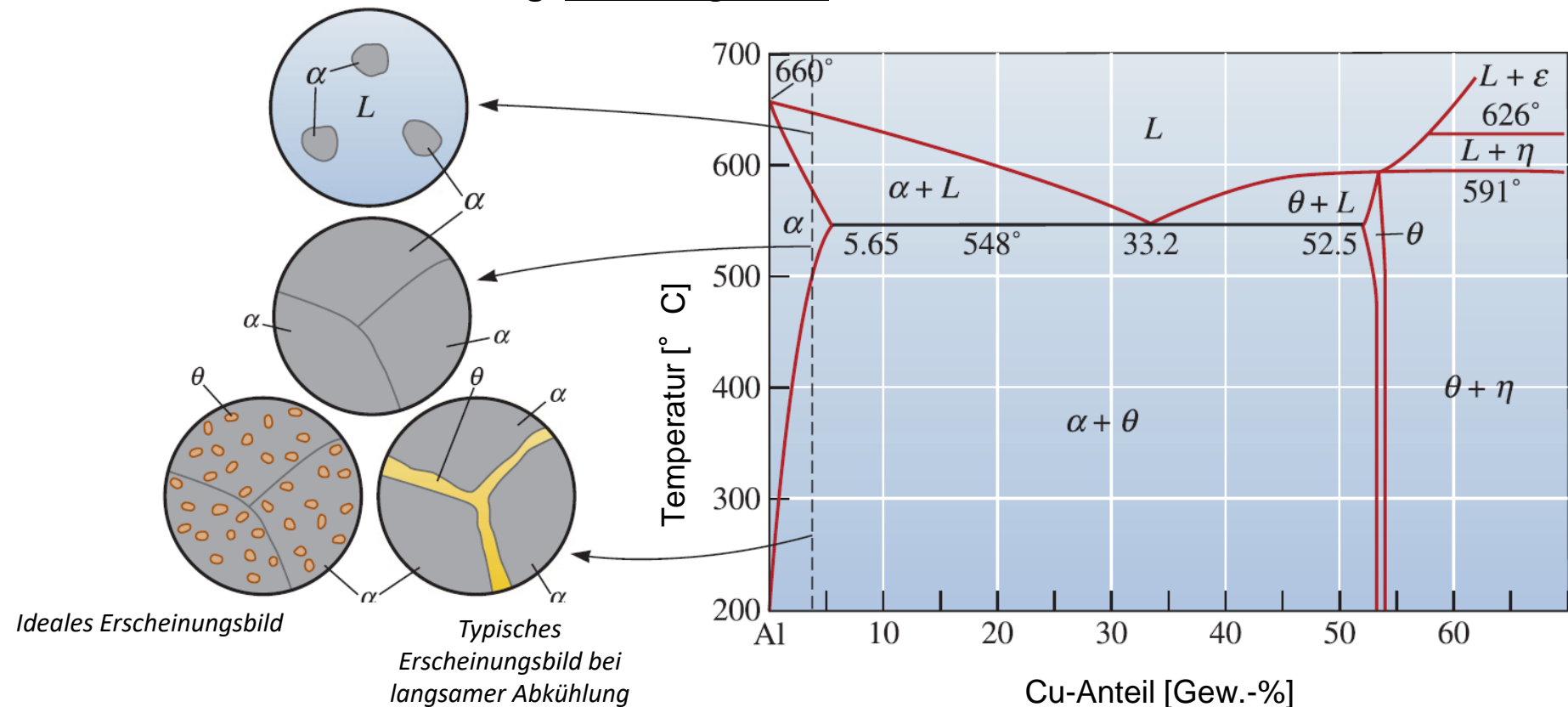


Ausscheidungen dienen als Hindernisse für Versetzungen

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.



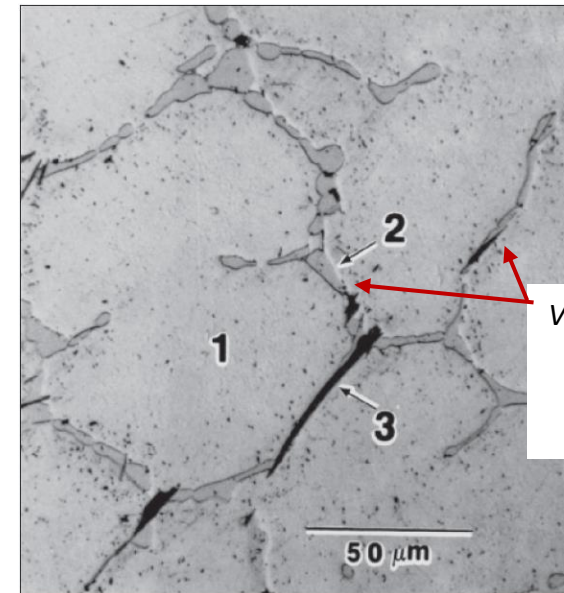
Mechanismen der Verfestigung

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)

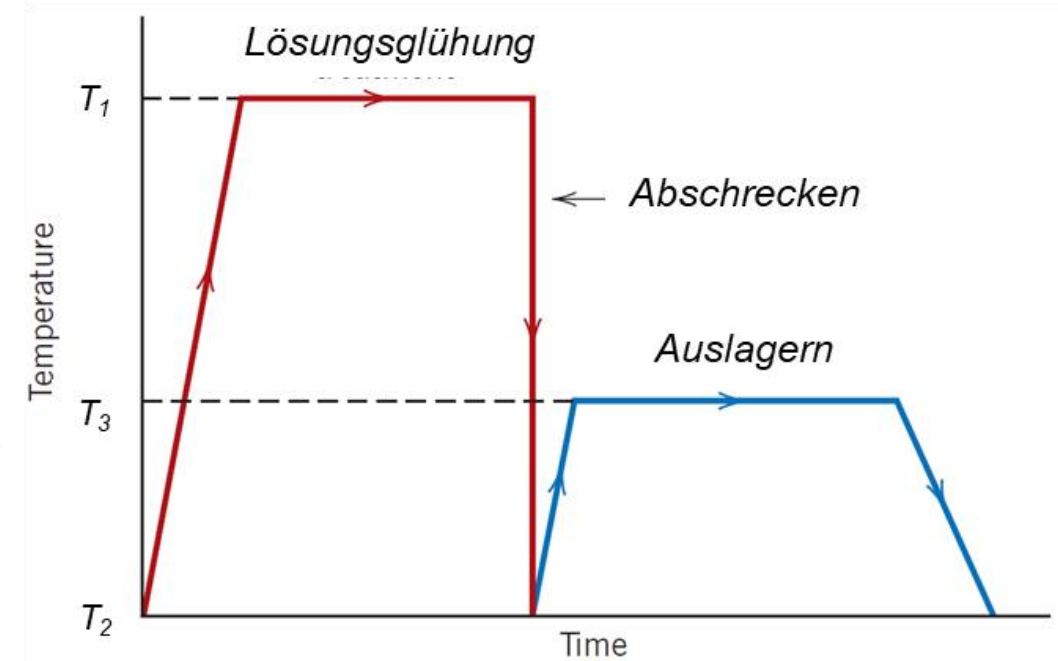
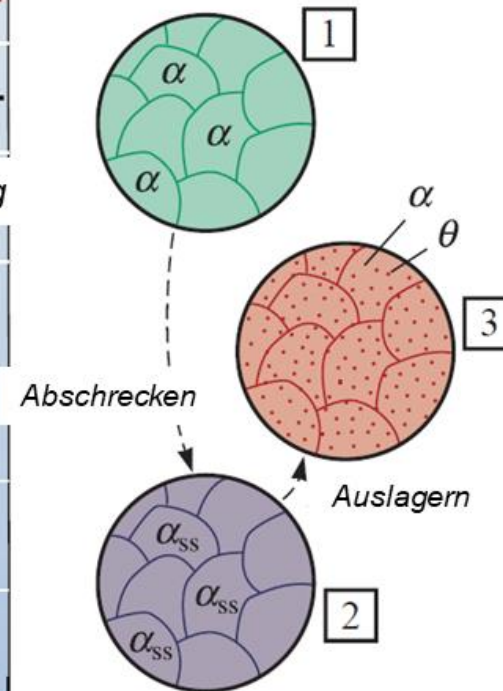
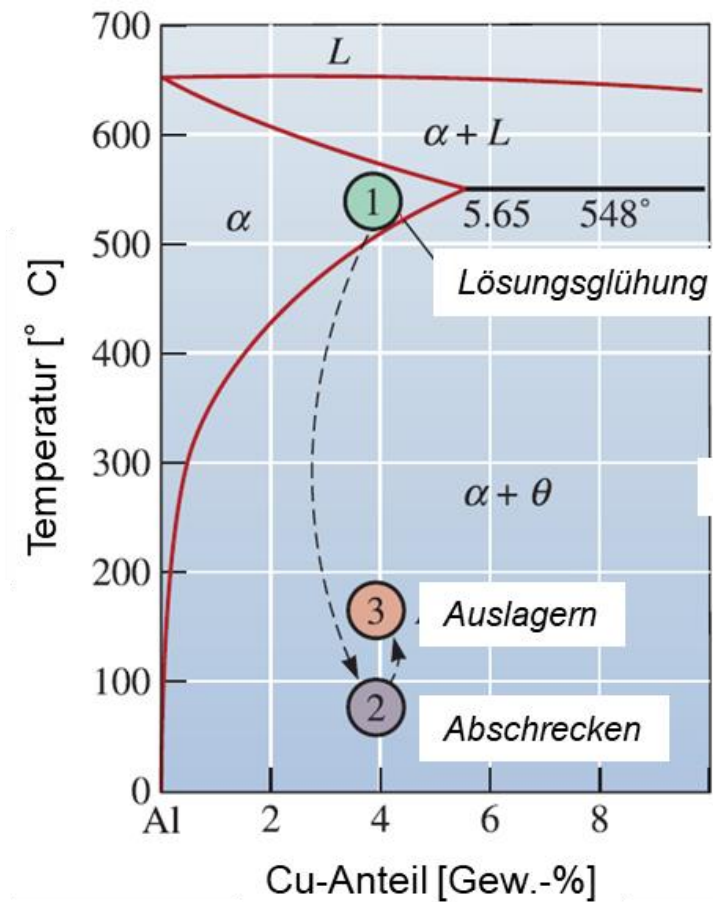


Verhältnismäßig grobe und inhomogen verteilte Ausscheidungen entlang der Korngrenzen

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

Mechanismen der Verfestigung

Ausscheidungshärtung

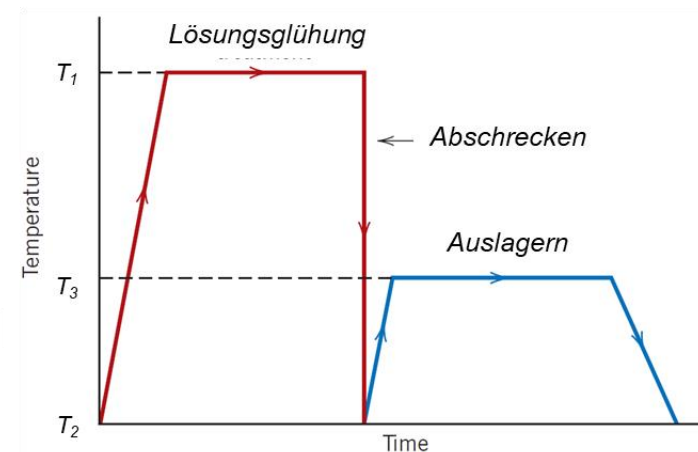
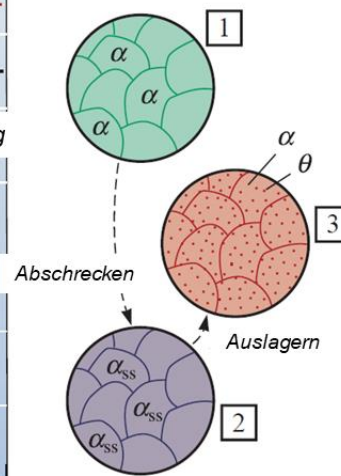
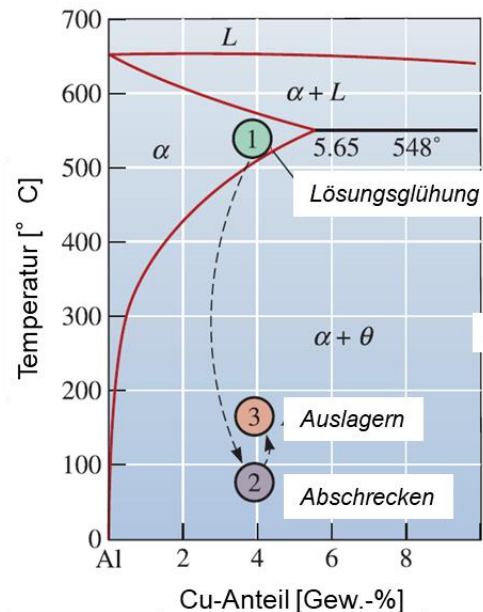


Mechanismen der Verfestigung

Ausscheidungshärtung

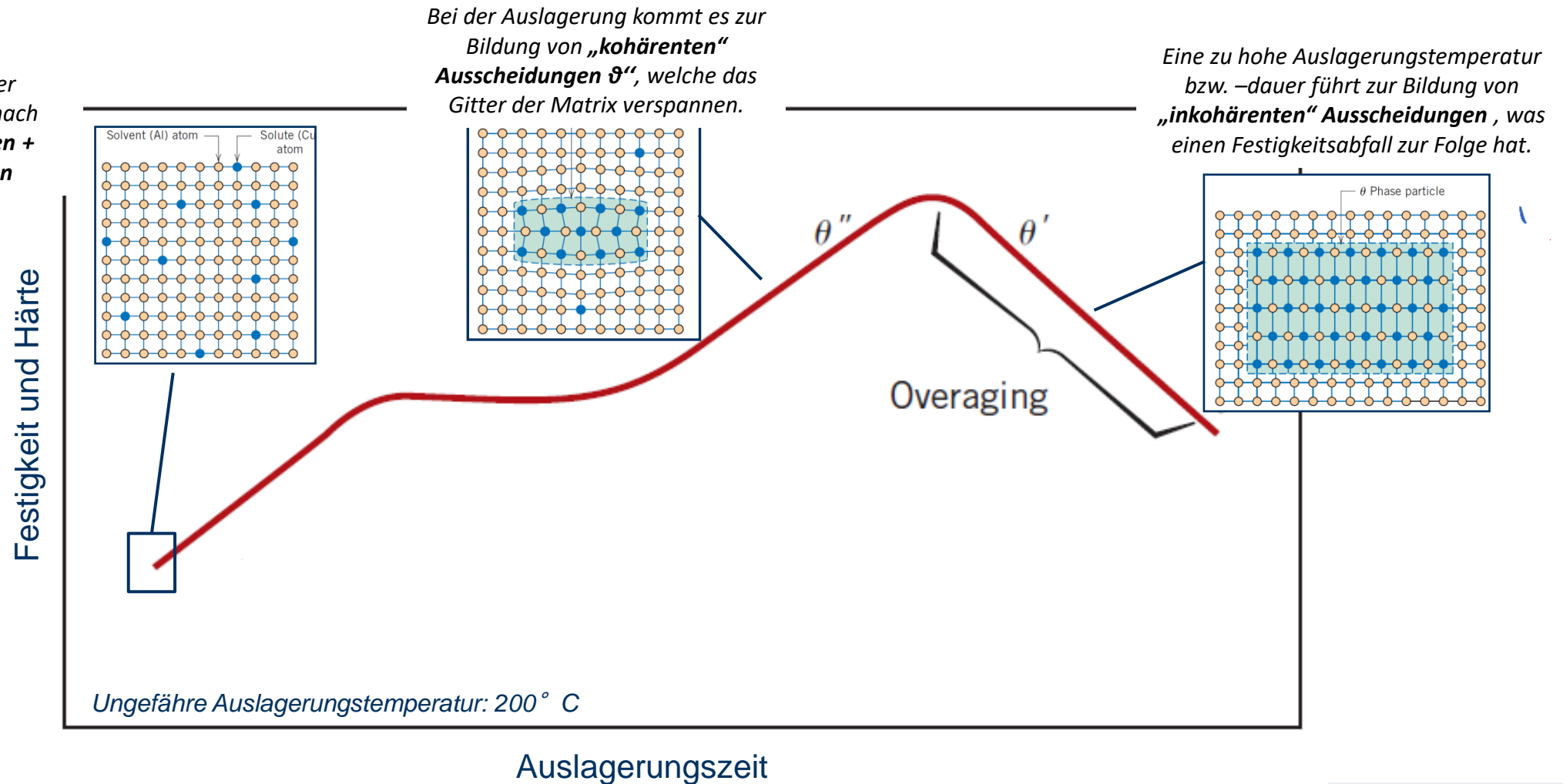
Verfahren der Ausscheidungshärtung am Beispiel einer Al-Cu (4Gew.%) -Legierung:

- 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

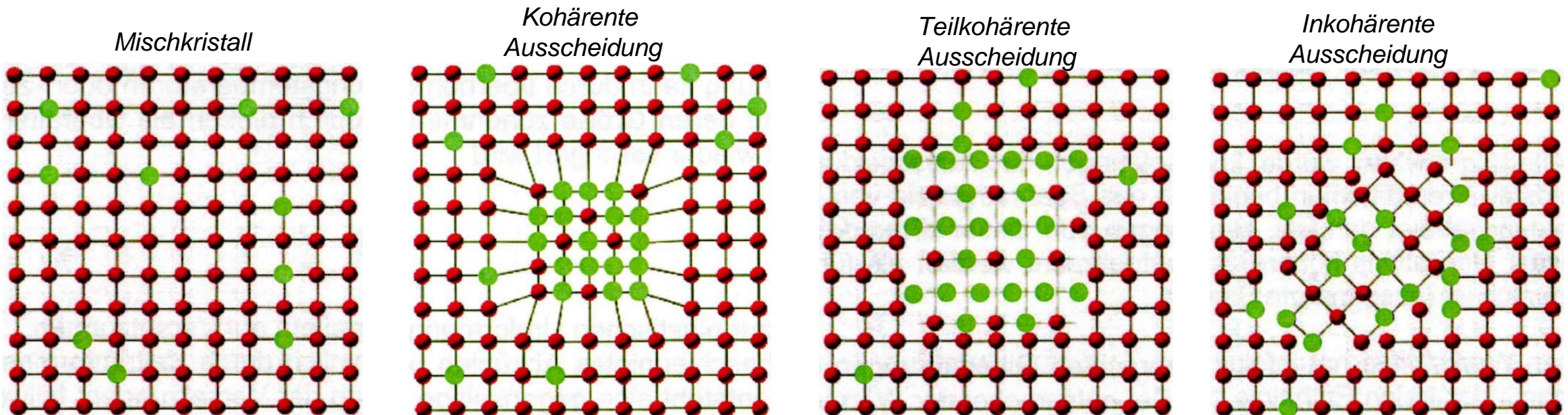
Ausscheidungshärtung – Einfluss von Ausscheidungszeit ausgehend von einem übersättigten Mischkristall



Mechanismen der Verfestigung

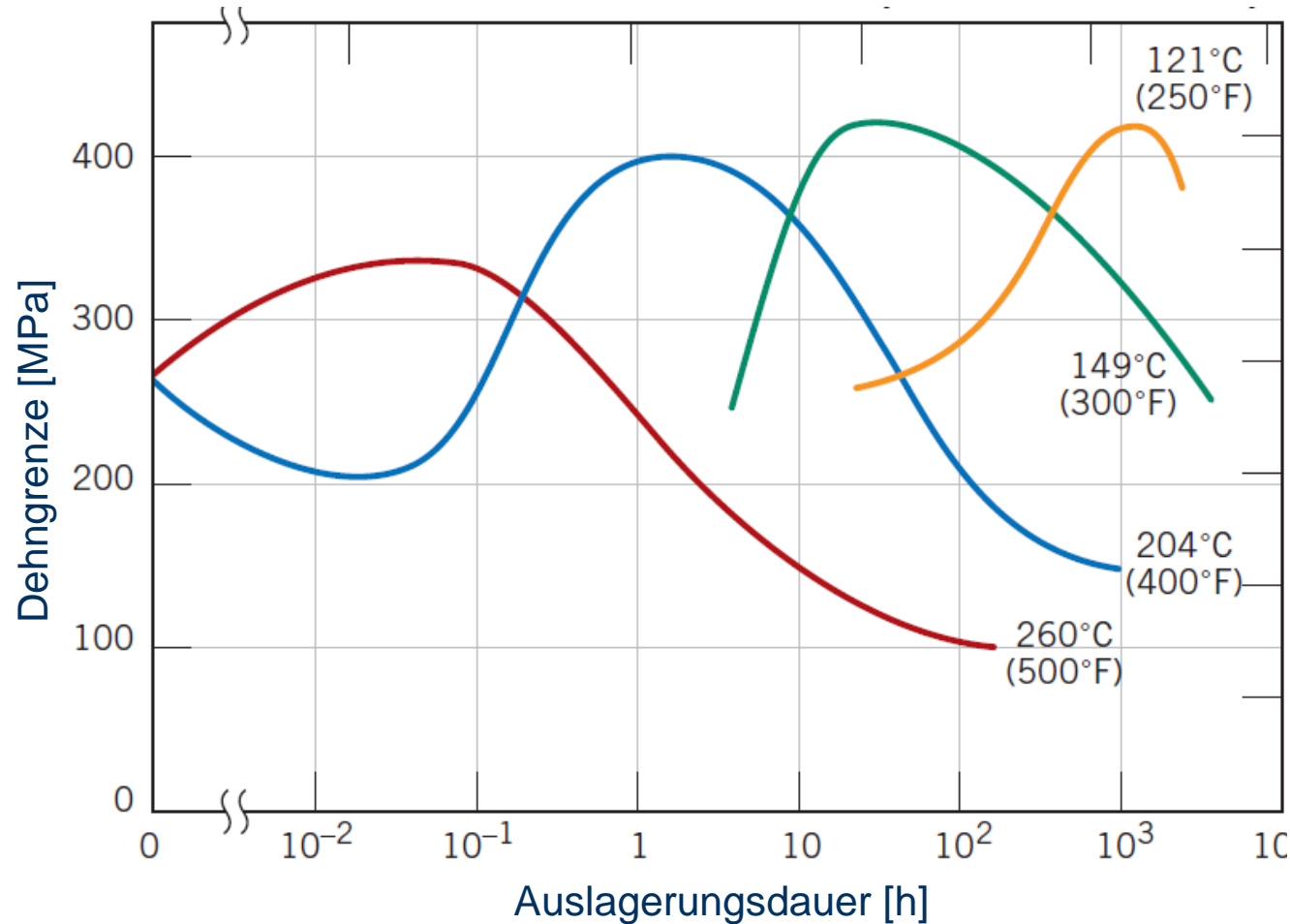
Ausscheidungshärtung – Ausscheidungscharakteristik

- 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.
- Inkohärente 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

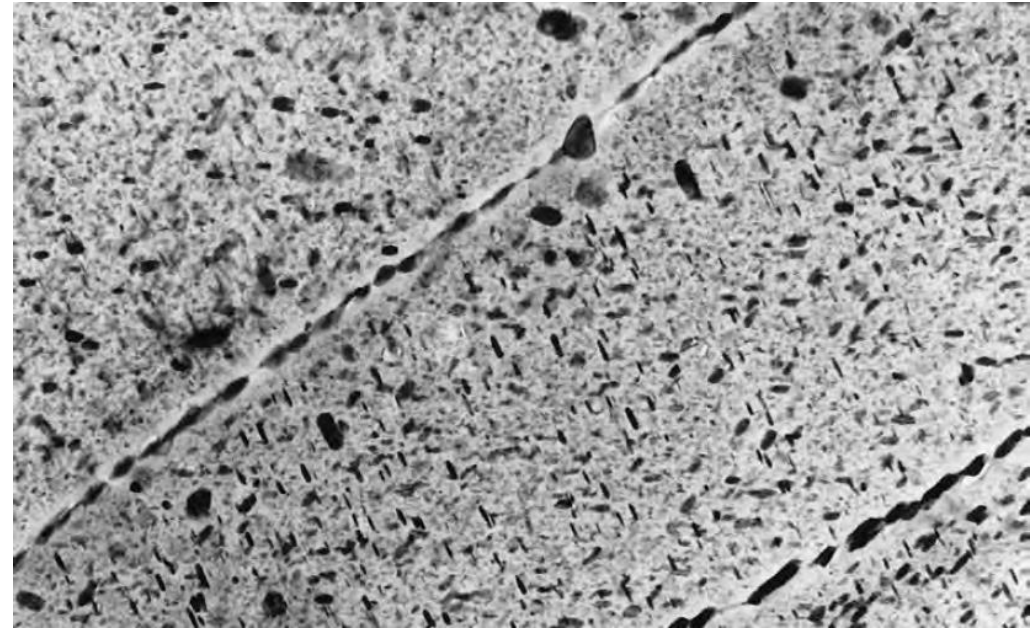
Mechanismen der Verfestigung

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.



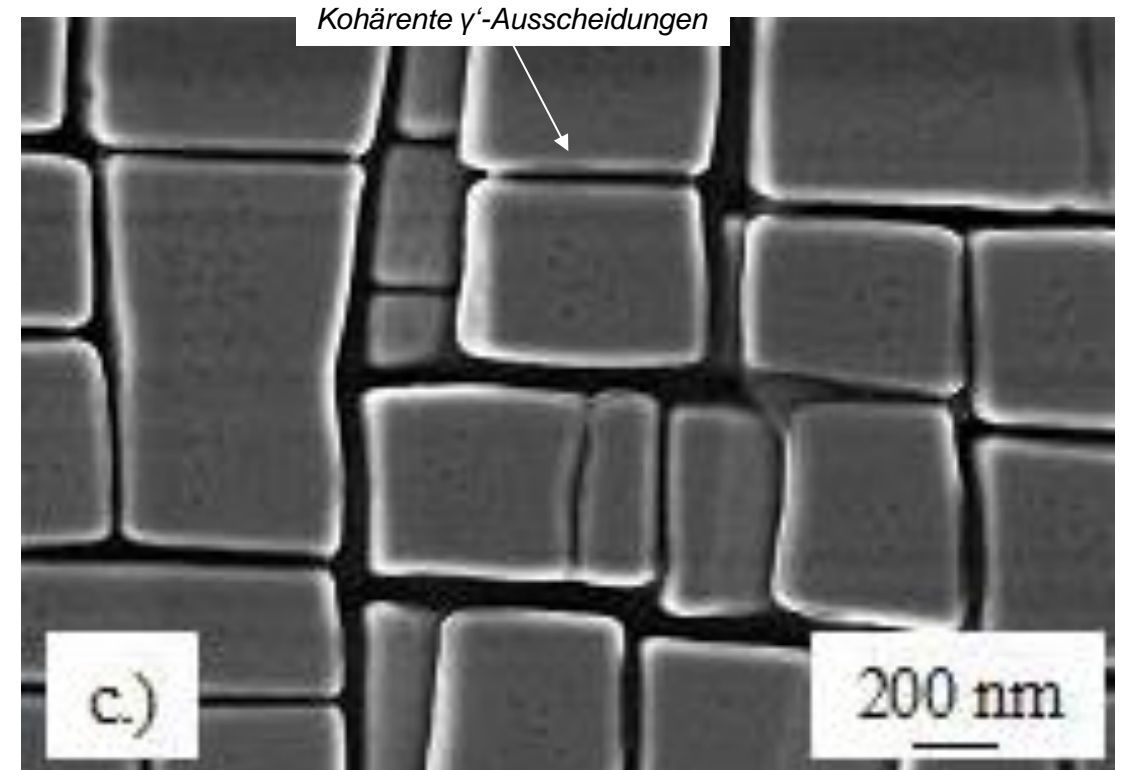
Ausscheidungshärtung erfolgt während dem Einbrennen des Lacks



Gefüge einer ausscheidungsgehärteten AlZnCu-Legierung (EN-AW7150)

Mechanismen der Verfestigung

Ausscheidungshärtung – Technologische Bedeutung für den Flugzeug- bzw. Turbinenbau



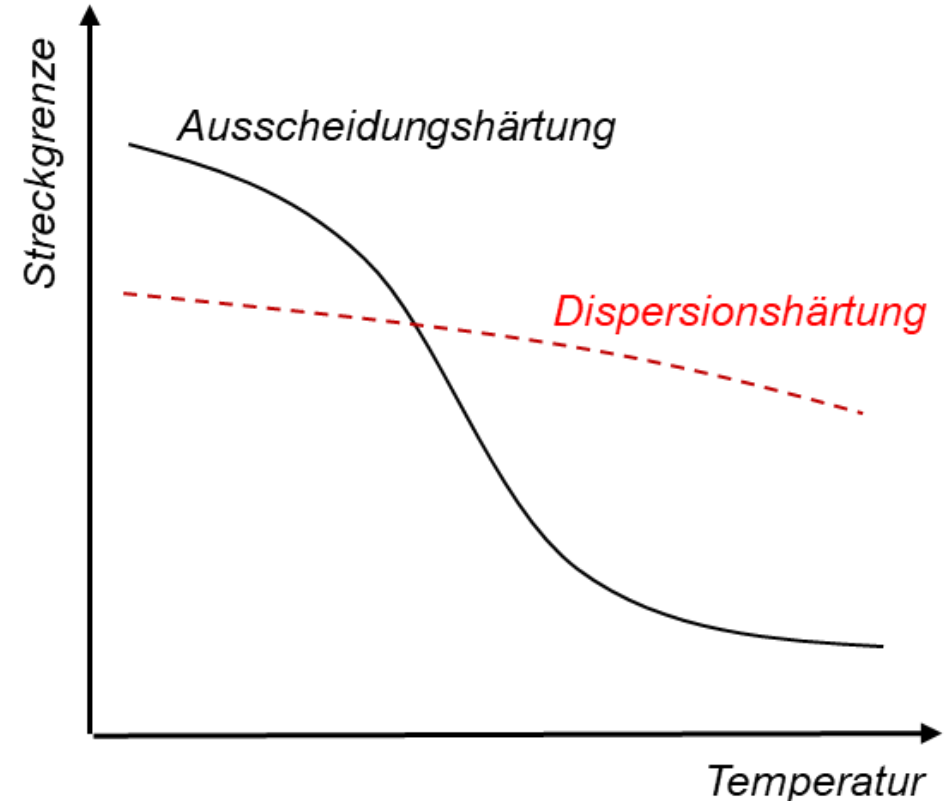
Gefüge einer Ni-Basis Superlegierung

Dispersionshärtung

Mechanismen der Verfestigung

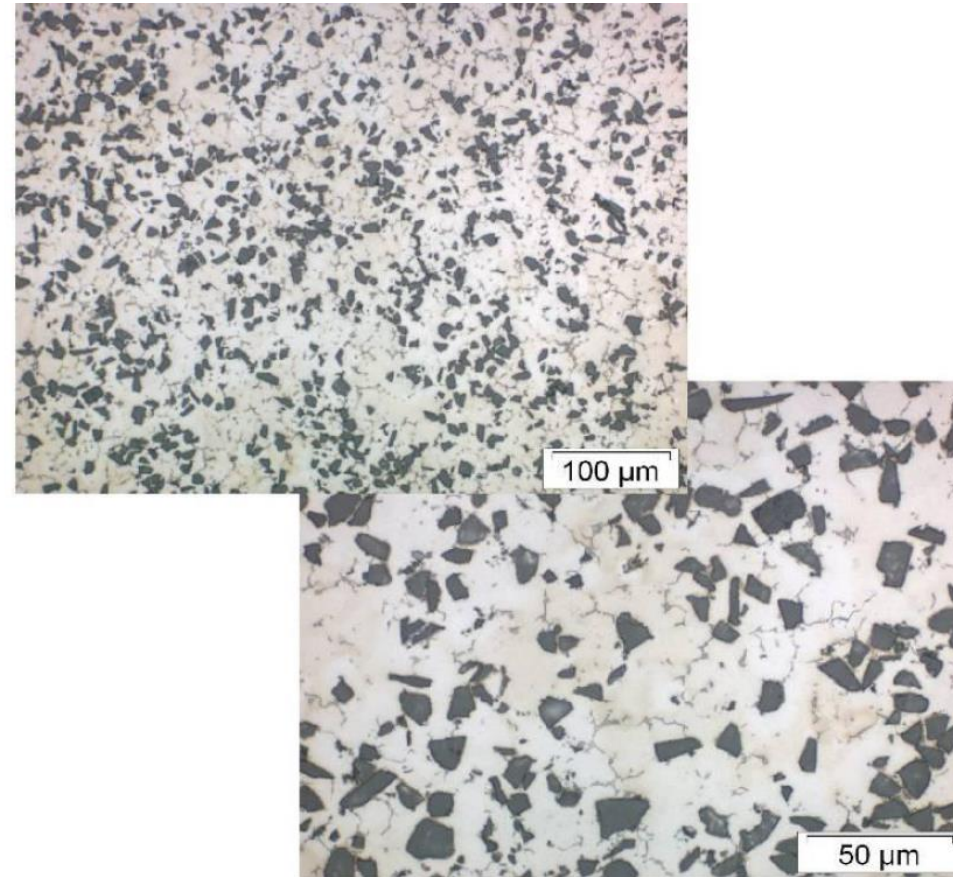
Dispersionshärtung

- 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 Dispersionshärter 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

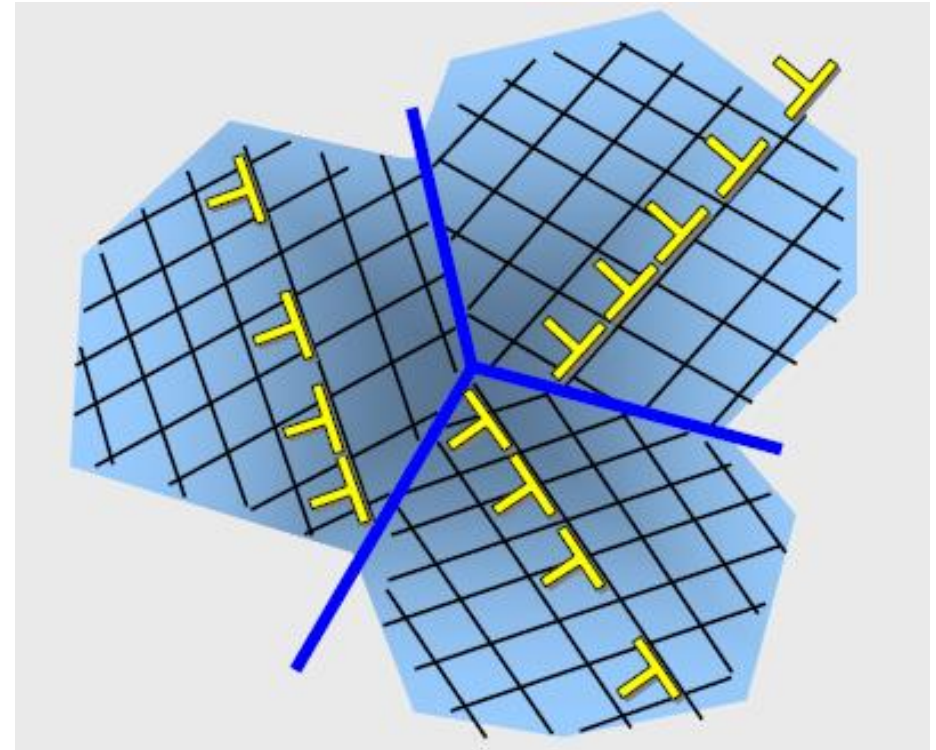
Mechanismen der Verfestigung

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

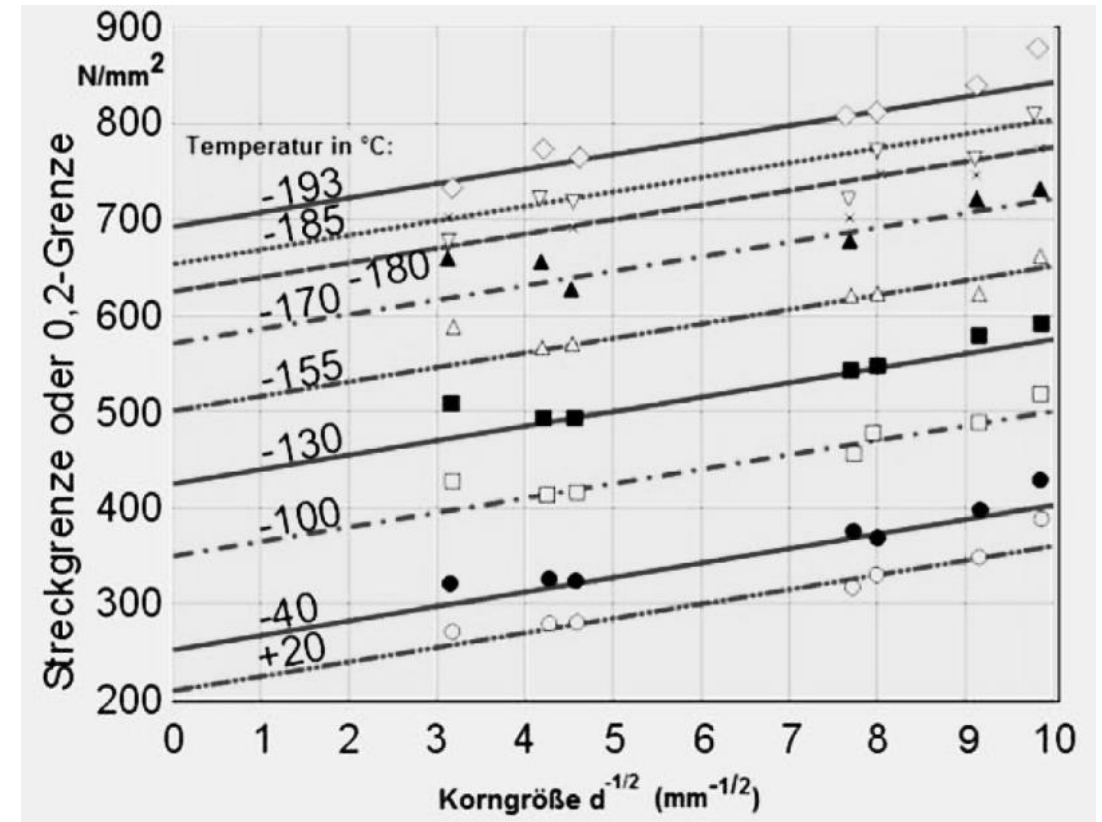
Feinkornhärtung

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.

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

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

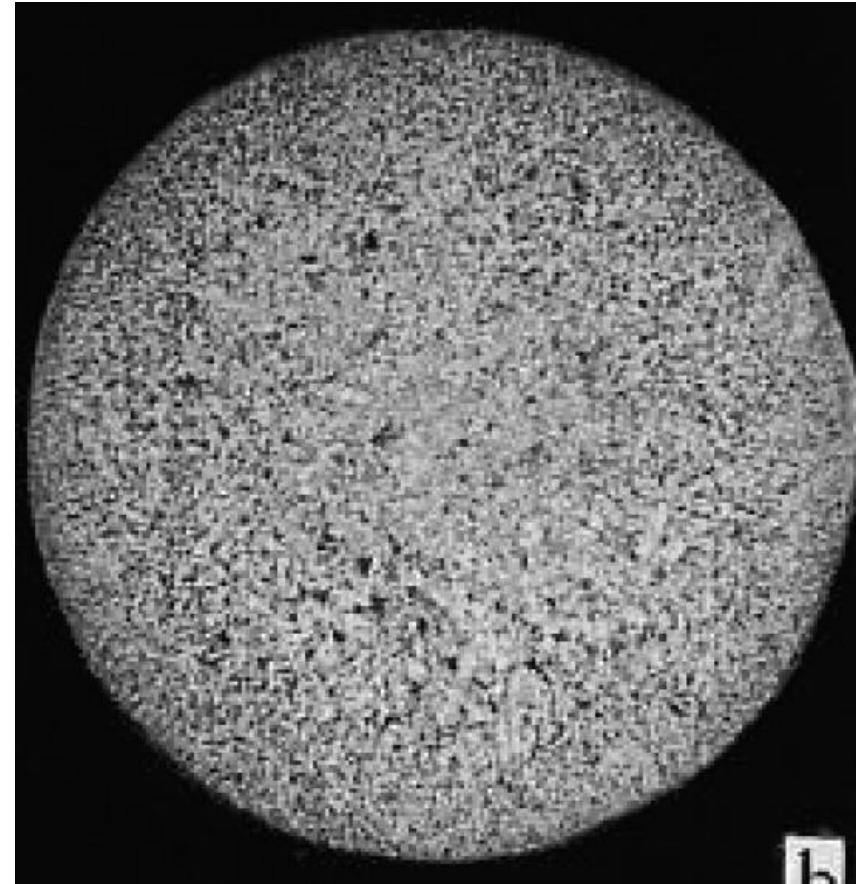
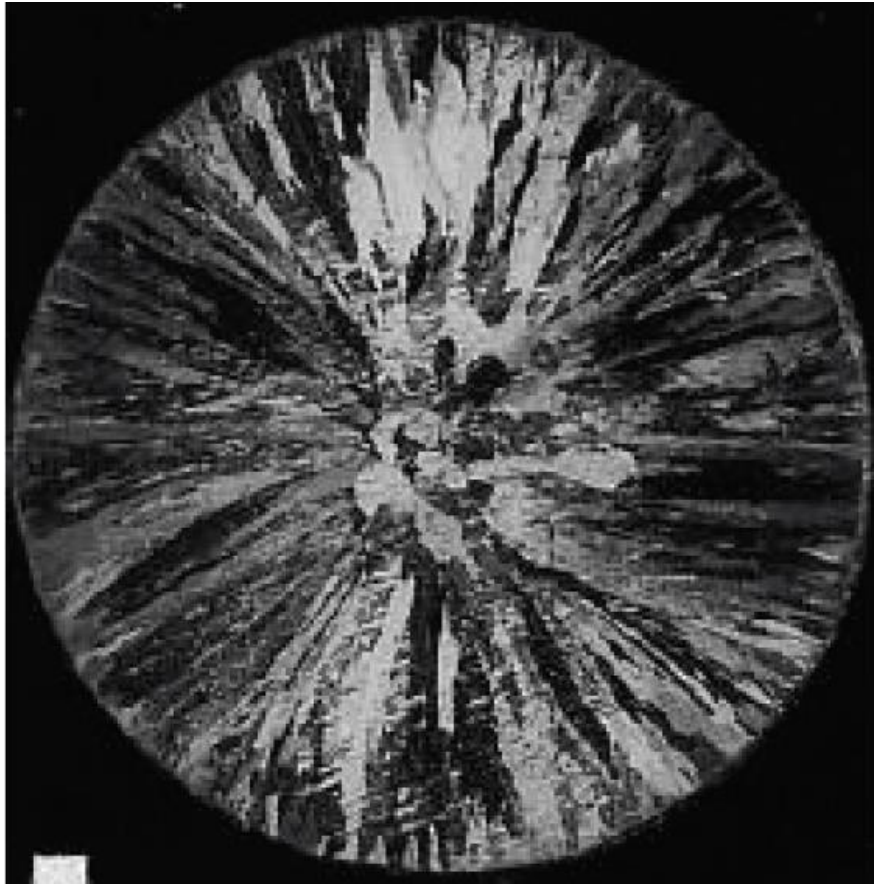


σ_i : Reibungsspannung

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

