

# Werkstofftechnik

Mechanismen der Entfestigung

Vorlesung



# 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

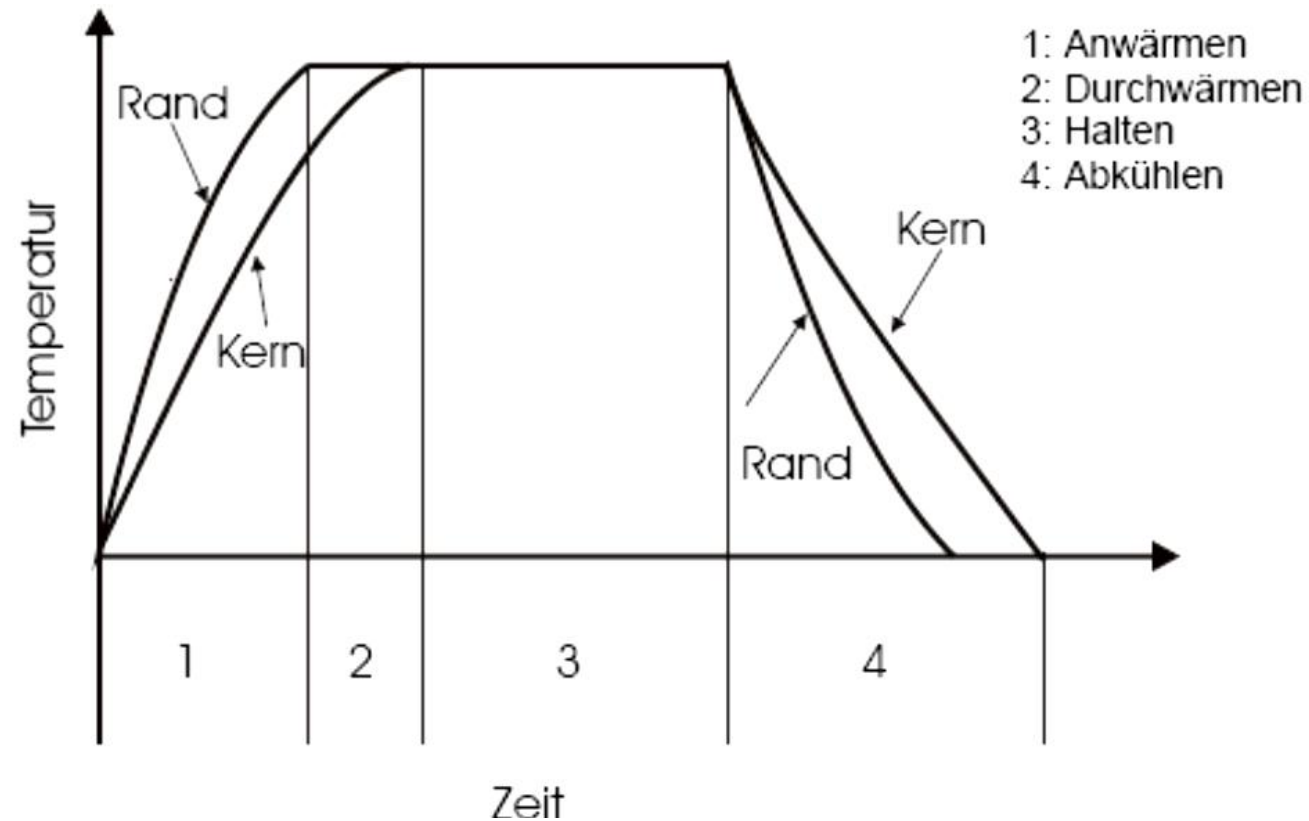
- Kaltverfestigung
- Mischkristallhärtung
- Ausscheidungshärtung
- Dispersionshärtung
- Feinkornhärtung
- **Umwandlungshärtung**

### Entfestigung

- Spannungsarmglühen (Erholung)
- Rekristallisationsglühen
- Homogenisieren und Diffusionsglühen

# Mechanismen der Entfestigung

Typischer Temperatur-Zeit-Verlauf beim Glühen



**Glühen:** Besteht aus langsamen Erwärmen, Halten auf Glühtemperatur und langsamen Abkühlen

## Erholungsglühung

# Mechanismen der Entfestigung

Erholungsglühung - Anwendungsfall



# Mechanismen der Entfestigung

## Erholungsglühung - Anwendungsfall

Zur Verringerung des Eigenspannungszustandes ist eine Erholungsglühung notwendig.



*Entstehung von Bauteileigenspannungen beim Härten / Vergüten von Bauteilen*



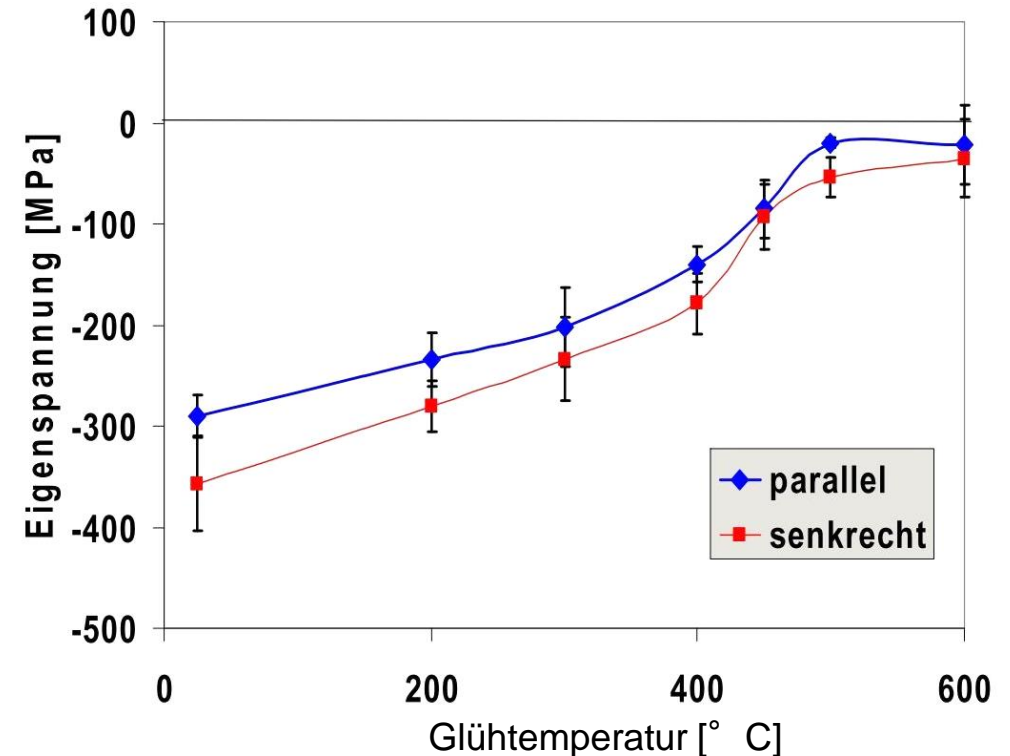
*Entstehung von Schleifeigenspannung aufgrund ungleichmäßiger Wärmeentwicklung*



# Mechanismen der Entfestigung

## Auftretende Effekte bei der Erholungsglühung

- Das Erholungsglühen ist eine Wärmebehandlung die unterhalb der Rekristallisationstemperatur des Werkstoffs ( $< 0,4 T_S$ ) erfolgt.
- Die Festigkeit des Werkstoffs wird abgesenkt.
- Der Spannungsabbau erfolgt durch Versetzungsbewegung und kann zu einem Verzug des Bauteils führen.
- Die Abkühlung muss langsam erfolgen, damit keine neuen Spannungen im Bauteil entstehen können (z.B. zwischen dem Kern und der Randschicht des Bauteils).



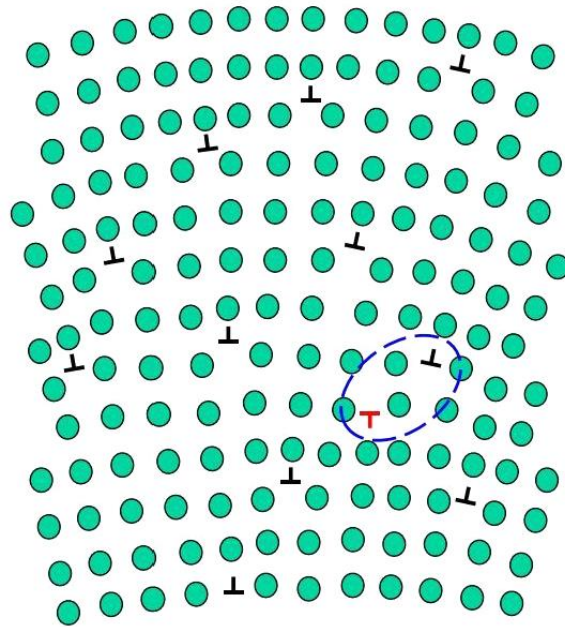
*Abbau durch Schleifeigenstressungen  
am Baustahl von S235*

Die Erholung eines Werkstoffs erfolgt ohne im Lichtmikroskop sichtbare Gefügeveränderungen.

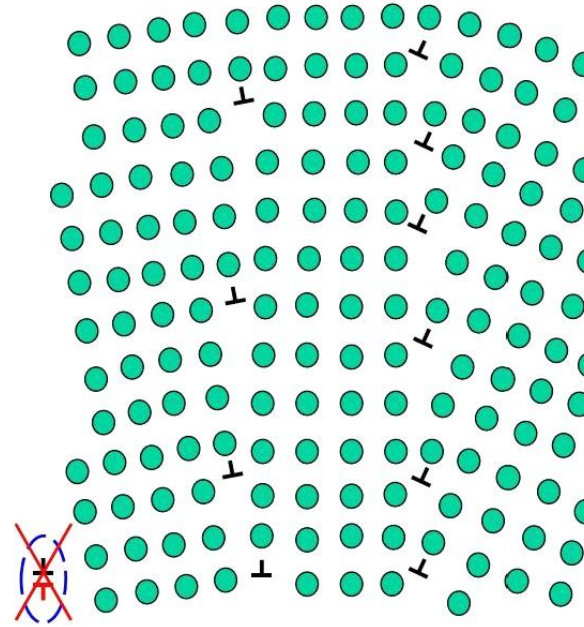
# Mechanismen der Entfestigung

## Mechanismus der Erholungsglühung

Verformtes Kristallgitter



Zustand nach Erholungsglühung



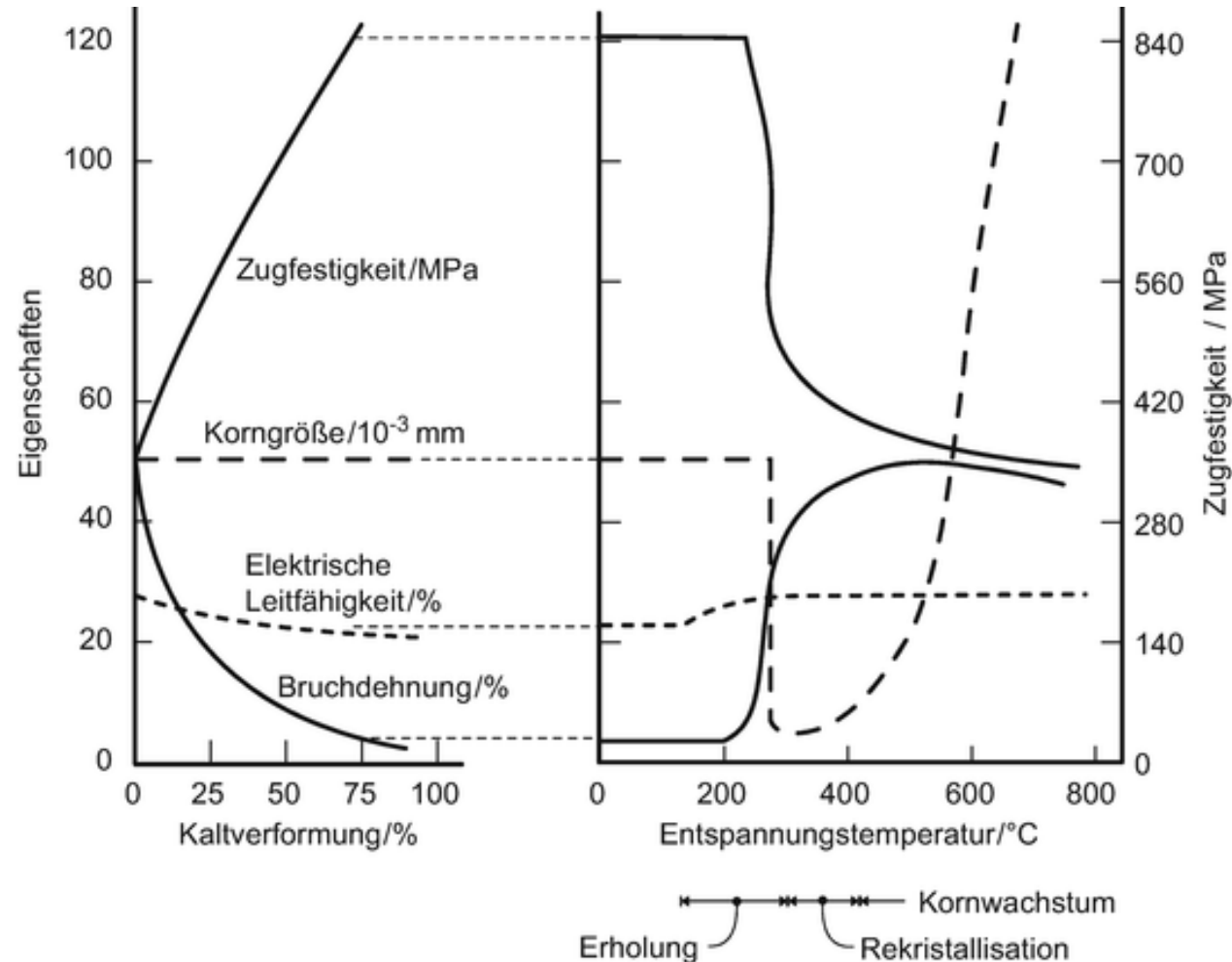
- Abbau von „nulldimensionalen Fehlern“ (u.a. Leerstellen, Zwischengitteratome)
- Abbau bzw. Neuordnung von Versetzungen.
- Es kommt NICHT zur Bildung neuer Körner.



# Mechanismen der Entfestigung

Einfluss der Erholungsglühung auf die mechanischen und elektrischen Eigenschaften

*Einfluss der Kaltverfestigung  
auf die mechanischen  
Eigenschaften einer Cu-Zn35  
Legierung*



*Einfluss der Glühtemperatur auf die  
mechanischen Eigenschaften einer Cu-  
Zn35 Legierung mit einem Umformgrad  
von 75 %.*

## Rekristallisationsglühung

# Mechanismen der Entfestigung

## Rekristallisationsglühen - Anwendungsfall

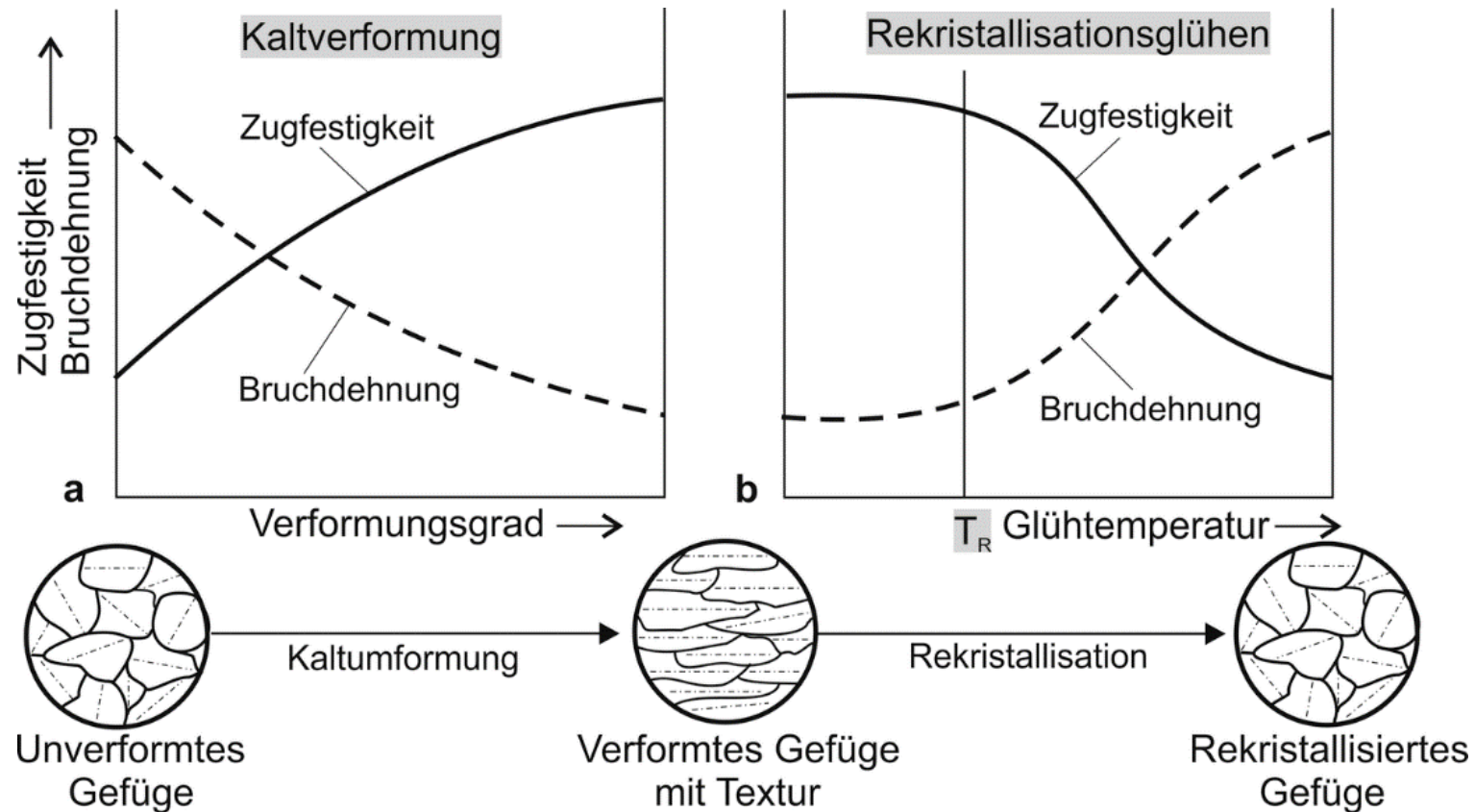
- Während des Kaltumformens besteht die Gefahr einer zu hohen Kaltverfestigung. Das Umformvermögen des Werkstoffs ist daher begrenzt.
- Das Rekristallisationsglühen wird hauptsächlich nach den einzelnen Umformungsstufen beim z.B. Kaltwalzen von Blechen bzw. Kaltziehen von Drähten angewandt.



*Mehrstufiges Kaltumformverfahren und damit einhergehende Kaltverformung bzw. –verfestigung des Werkstoffs*

# Mechanismen der Entfestigung

## Auftretende Effekte bei der Rekristallisationsglühung



*Einfluss der Rekristallisationsglühung auf die mechanischen Eigenschaften eines kaltverformten Metalls.*

# Mechanismen der Entfestigung

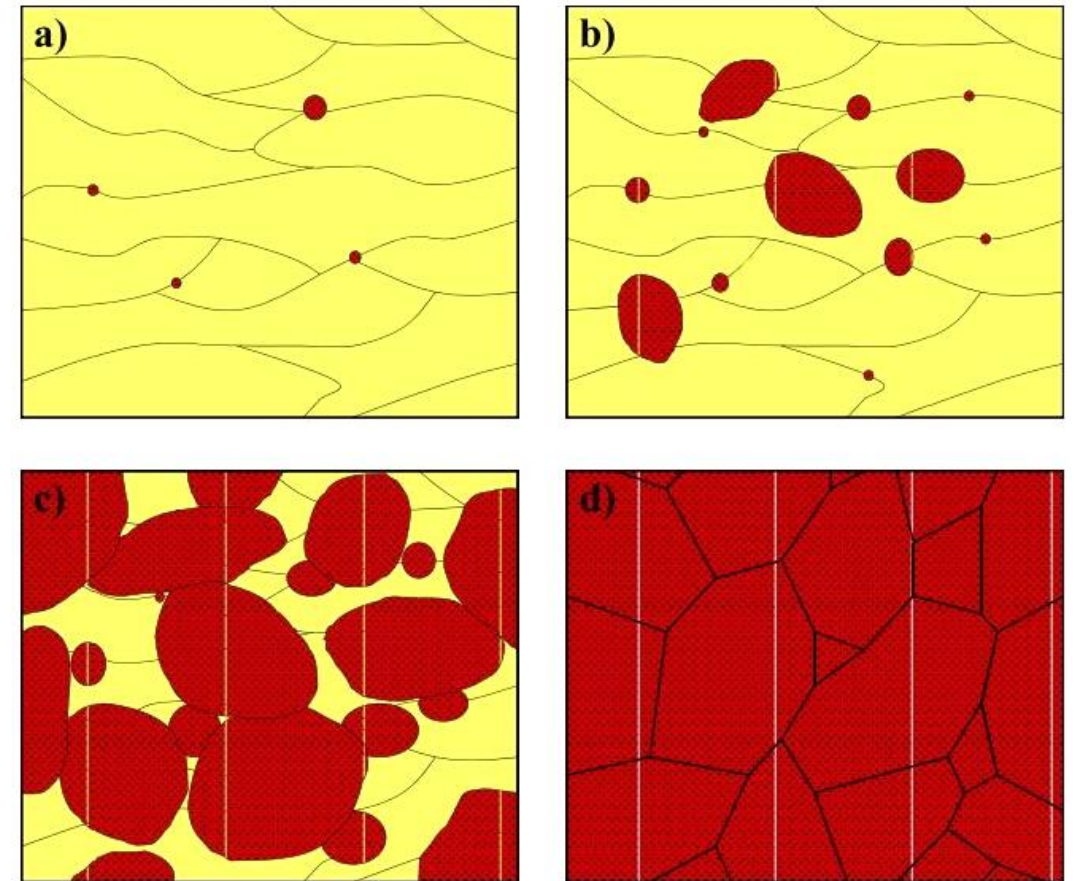
## Mechanismus der Rekristallisationsglühung

Folgende Merkmale der Rekristallisation sind zu berücksichtigen:

- Die Rekristallisationstemperatur liegt bei ca.  $0,4 T_S$ .
- Im Gegensatz zur Erholungsglühung kommt es zur Kornneubildung.
- Der Grad der Kornneubildung ist abhängig vom Verformungsgrad.

### Mechanismus

- a) Rekristallisationskeime im kaltumgeformten Gefüge
- b) Wachsen vorhandener Keime zu rekristallisierten Körnern
- c) Zusammenwachsen rekristallisierter Körner
- d) Neues Gefüge aus unverformten Körnern und Ende der Rekristallisation

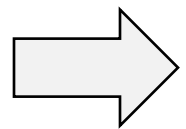


*Mechanismus der Rekristallisation*

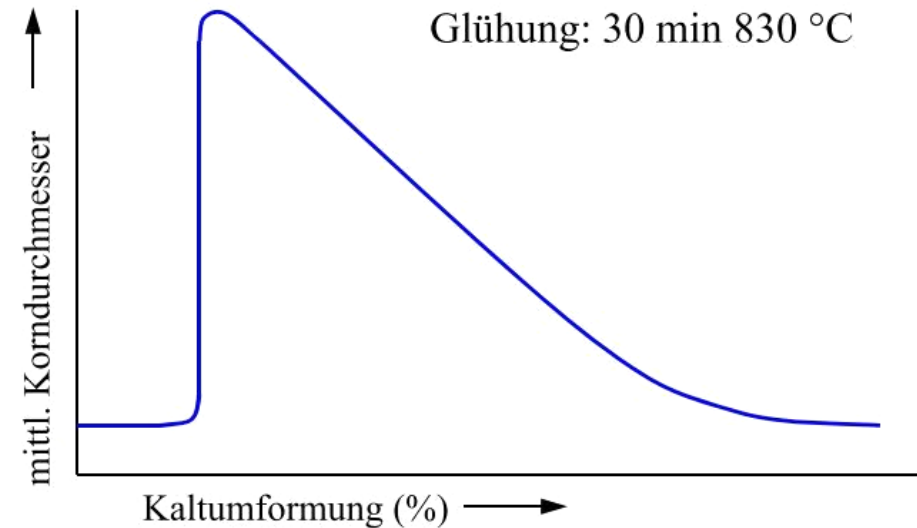
# Mechanismen der Entfestigung

## Einfluss des Umformgrades auf die Rekristallisation

- Bei sehr geringen Umformgraden findet in der Regel keine Rekristallisation statt.
- Bei kleinen Umformgraden kommt es zur Bildung von sehr groben Körnern, da eine geringe Versetzungsdichte vorliegt.
- Mit zunehmendem Umformgrad kommt es zur Bildung vieler Keime. Diese behindern sich gegenseitig in ihrem Wachstum.



Feine Kornstruktur



Umformung %

unver- 10 25 40 55 70 85  
formt

Korngröße  $\mu\text{m}$

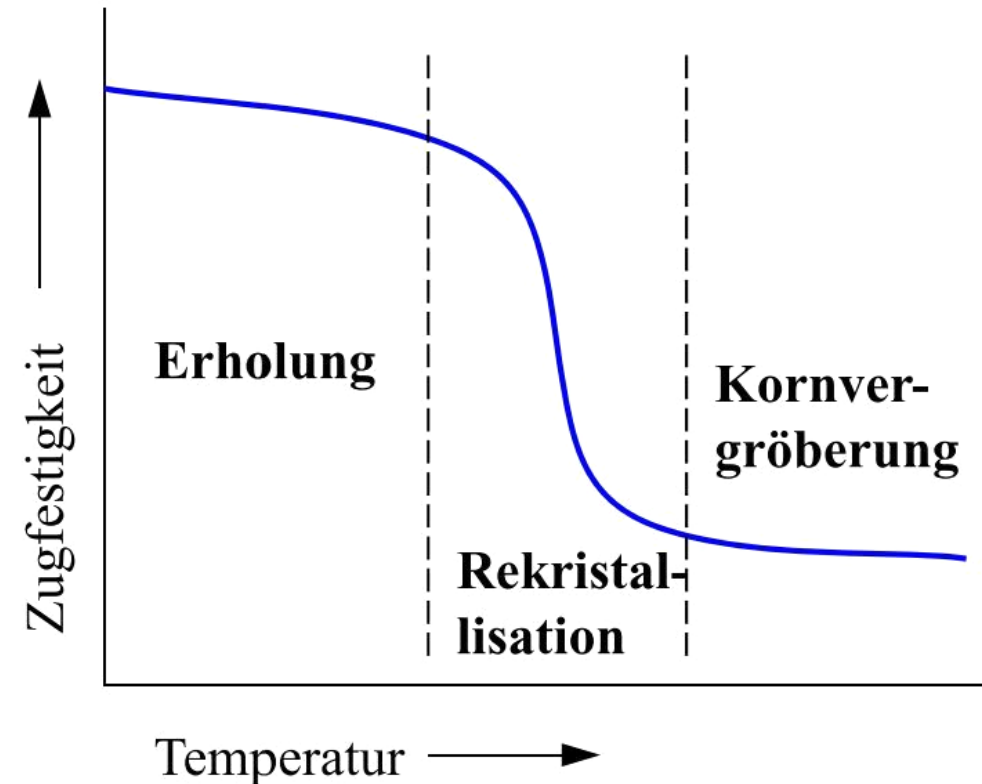
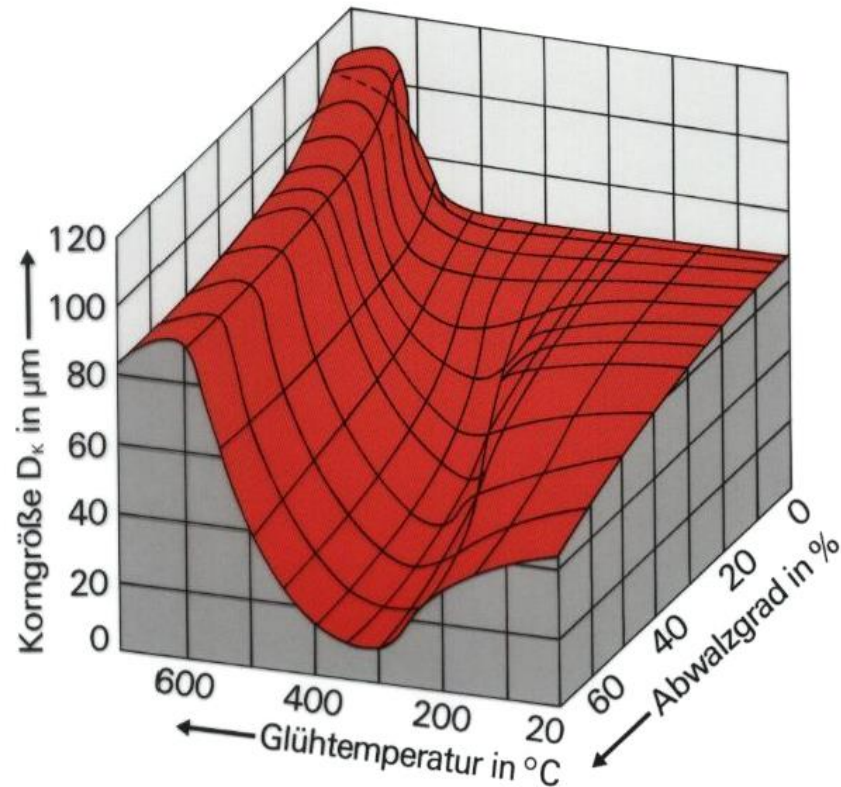
45 1000 400 250 130 45 30



# Mechanismen der Entfestigung

Einfluss des Umformgrades und der Temperatur auf die Rekristallisation

- Bei der Rekristallisation ist der Festigkeitsabfall deutlich höher als beim Erholungsglühen.
- Sowohl zu hohe Temperaturen als auch geringe Verformungsgrade haben eine Grobkornbildung zur Folge.



# Mechanismen der Entfestigung

## Dynamische Rekristallisation beim Warmumformen

- Die dynamische Rekristallisation wird bei der Warmumformung eingesetzt. Sie beruht auf dem Effekt, dass Kaltverfestigung und Rekristallisation parallel ablaufen.
- Prozesse in der Warmumformung zeichnen sich durch geringe Umformkräfte und ein höheres Formänderungsvermögen aus. Eine Verfestigung des Werkstoffes findet durch die ständige Rekristallisation nicht statt.
- Nachteilig bei der Warmumformung mit Stahlwerkstoffen ist die erhöhte Zunderbildung und der mögliche Bauteilverzug aufgrund starker Temperaturgradienten.



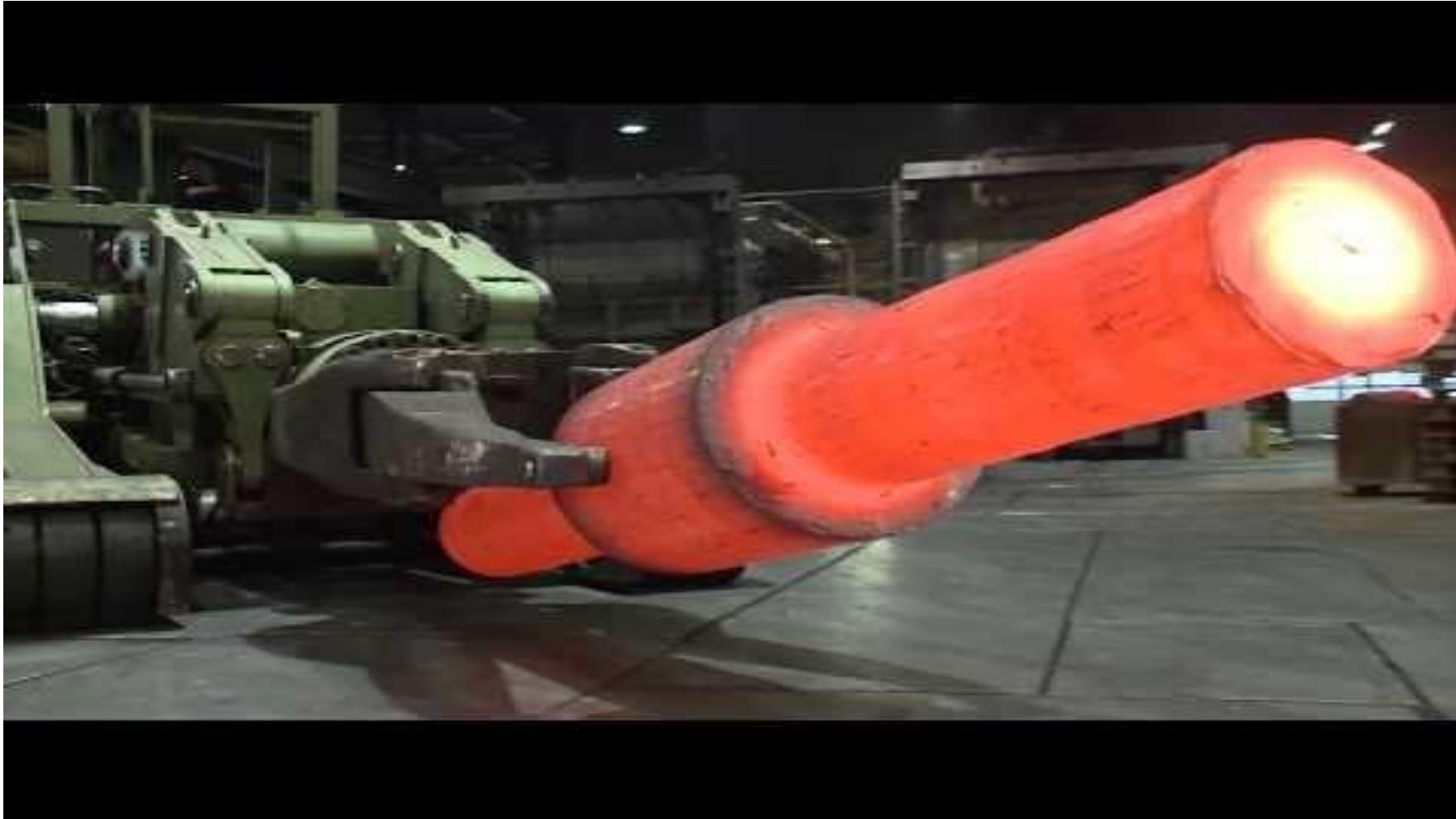
*Warmumformung einer Pleuelstange oberhalb der  
Rekristallisationstemperatur*



*Stadienfolge einer geschmiedeten Kurbelwelle*

# Mechanismen der Entfestigung

## Dynamische Rekristallisation

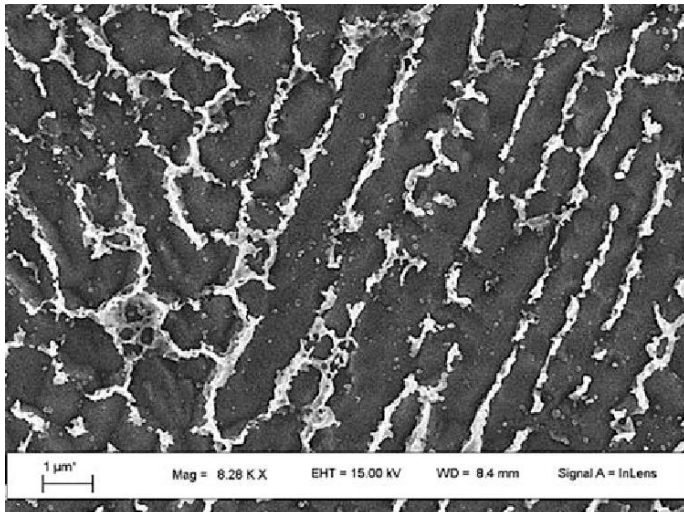


## Diffusionsglühung

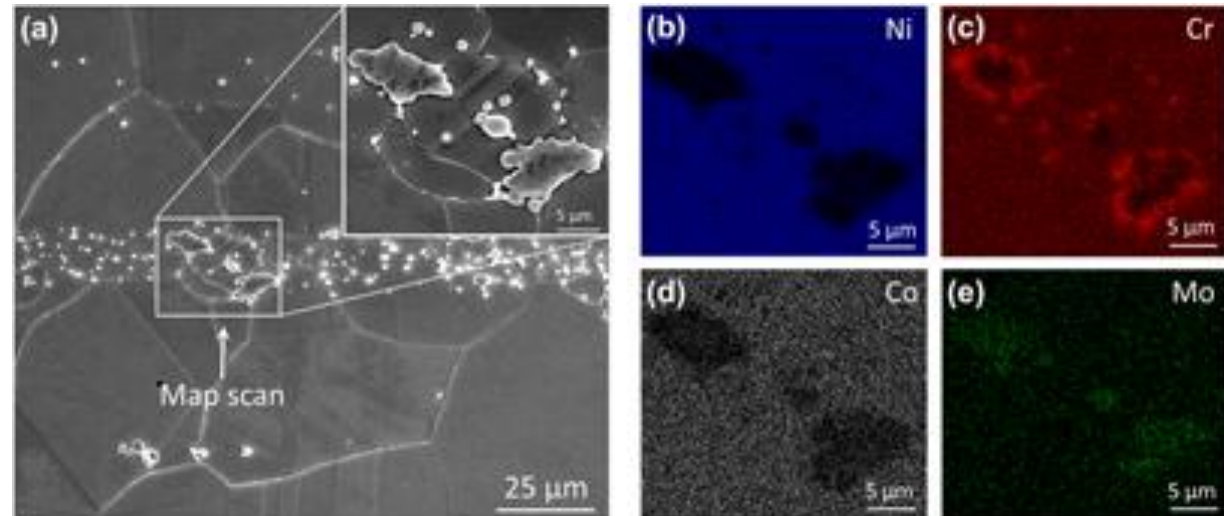
# Mechanismus der Entfestigung

## Diffusionsglühen und Homogenisieren

- Beim Homogenisieren handelt es sich um ein Wärmebehandlungsverfahren, welches den Ausgleich von Konzentrationsunterschieden (z.B. Mikroseigerungen) als Ziel hat.
- Temperatur und Glühzeit hängen von den Diffusionskoeffizienten der Legierungen ab und liegen in den meisten Fällen nur knapp unterhalb der Solidustemperatur.
- Das Homogenisieren führt zu einer Grobkornbildung.



*Seigerungen in einer additiv (SLM) erzeugten - Inconel 718 Mikrostruktur*



*Seigerungen in einem Inconel 617 Schweißgut*



# Mechanismen der Entfestigung

## Fragen

- Wir kennen den Unterschied zwischen Rekristallisation und Erholung. Was sind typische Anwendungsfälle dieser Glühverfahren.
- Welche festigkeitssteigernden Mechanismen gibt es?
- Was sind die Voraussetzungen für die Ausscheidungshärtung, wie funktioniert diese und wo wird sie technisch eingesetzt.
- Was zeichnet die Feinkornhärtung aus im Vergleich zu den übrigen festigkeitssteigernden Mechanismen? Was besagt die Hall-Petch Beziehung?
- Bei Reinaluminium ist eine Rekristallisationsglühung durchzuführen. Berechnen Sie die erforderliche Glühtemperatur.
- Welche zwei Möglichkeiten kennen Sie, um bei Aluminium eine Feinkornhärtung zu erzielen.