

# Werkstofftechnik I

## Mechanische Eigenschaften

Verfasser:

Prof. Dr.-Ing. Hans-Jürgen Christ

Datum:

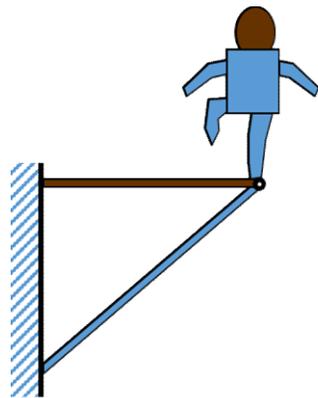


# Agenda

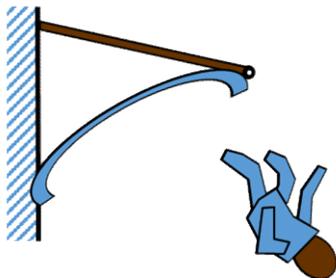
---

- Einleitung
- Werkstoffprüfung
- Metallographie
- Aufbau von Werkstoffen
- **Mechanische Eigenschaften**
  - Makroskopisches Verhalten
  - Mikroskopisches Verhalten
  - Maßnahmen zur Festigkeitssteigerung
- Aufbau mehrphasiger Werkstoffe
- Grundlagen der Wärmebehandlung

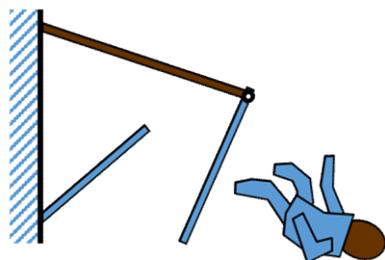
# Festigkeit



Ausgangssituation



Formänderung (Duktil)

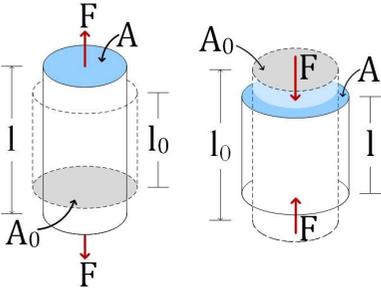
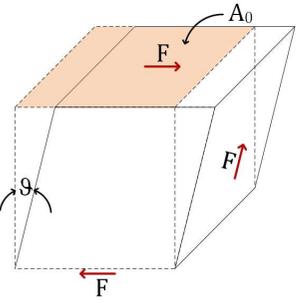


Sprödbbruch

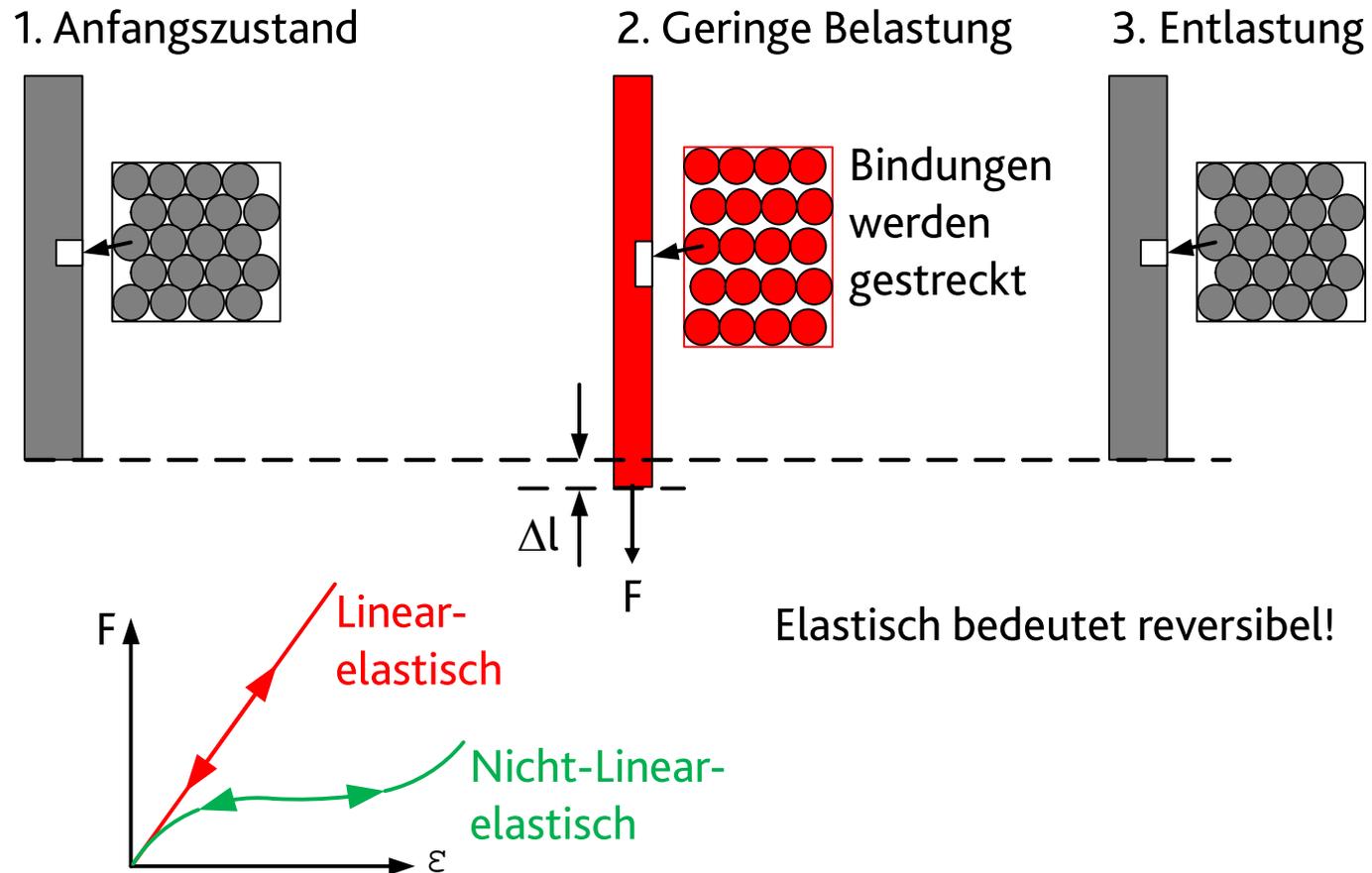
Es interessiert insbesondere die Festigkeit eines Werkstoffes, die als Widerstand zu verstehen ist, den der Werkstoff aufgrund seines atomaren Aufbaus und seines Gefüges

- der Formänderung bzw.
- dem Bruch  
entgegensetzt.

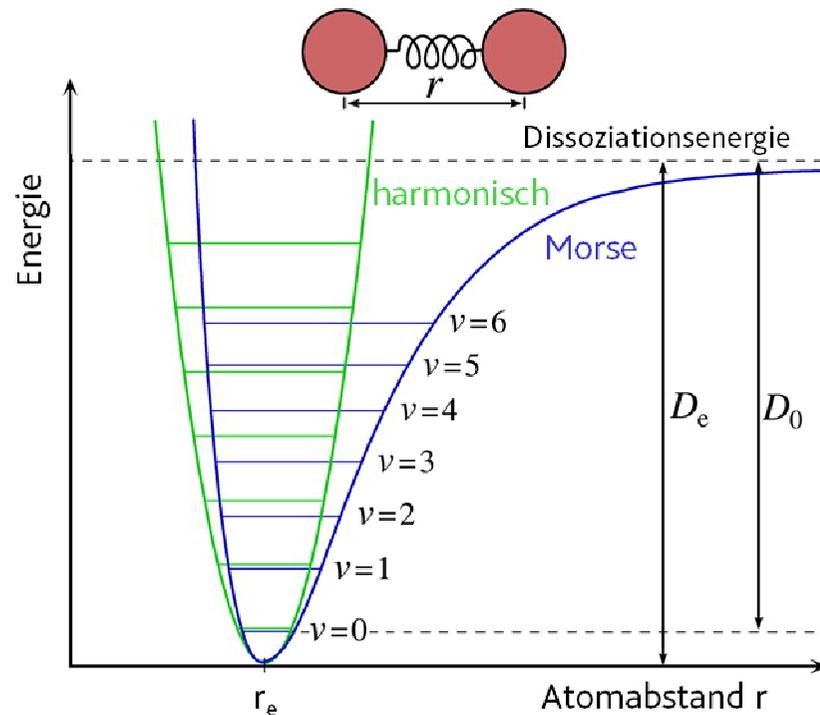
# Spannung und Dehnung

Beanspruchungsart	Spannung	Dehnung
Zug - Druck 	$\sigma = \frac{F}{A_0}$	$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0}$
Scherung 	$\tau = \frac{F}{A_0}$	$\gamma = \tan(\vartheta)$

# Elastisches Verhalten



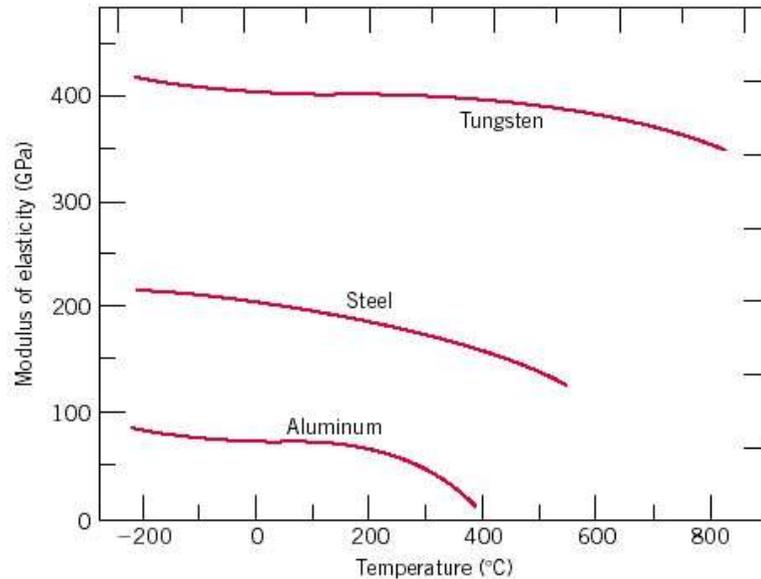
# Atomare Bindung



## Einfluss der Temperatur:

- Infolge der Wärmeschwingungen nimmt die Bindungsenergie mit steigender Temperatur ab und der Bindungsabstand zu.
- Zudem nimmt auch die Bindungssteifigkeit ab.
- Damit ist zu erwarten, dass  $E$ ,  $G$  und  $K$  mit zunehmender Temperatur abnehmen.

# Einfluss der Temperatur

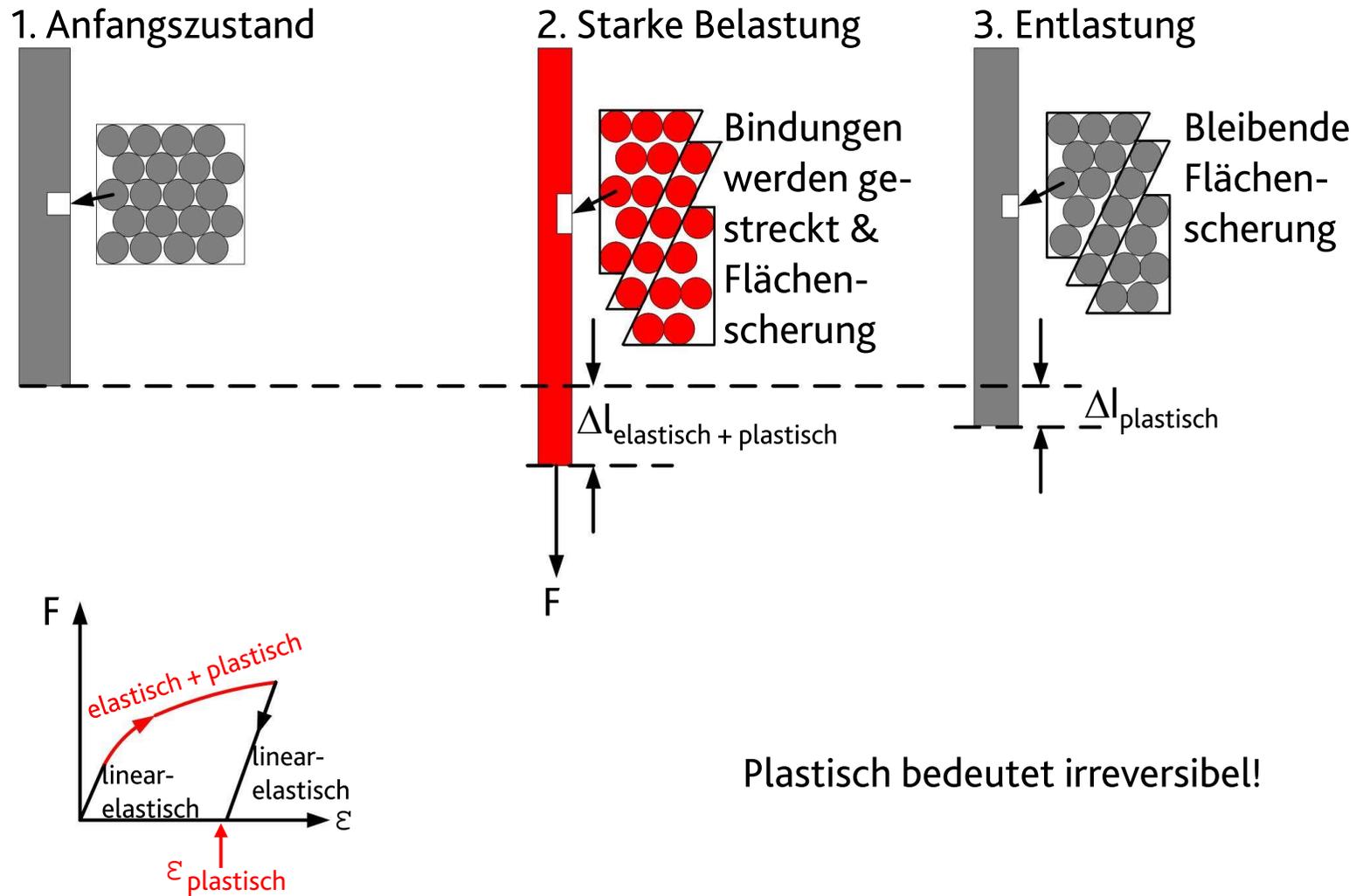


Faustregel:

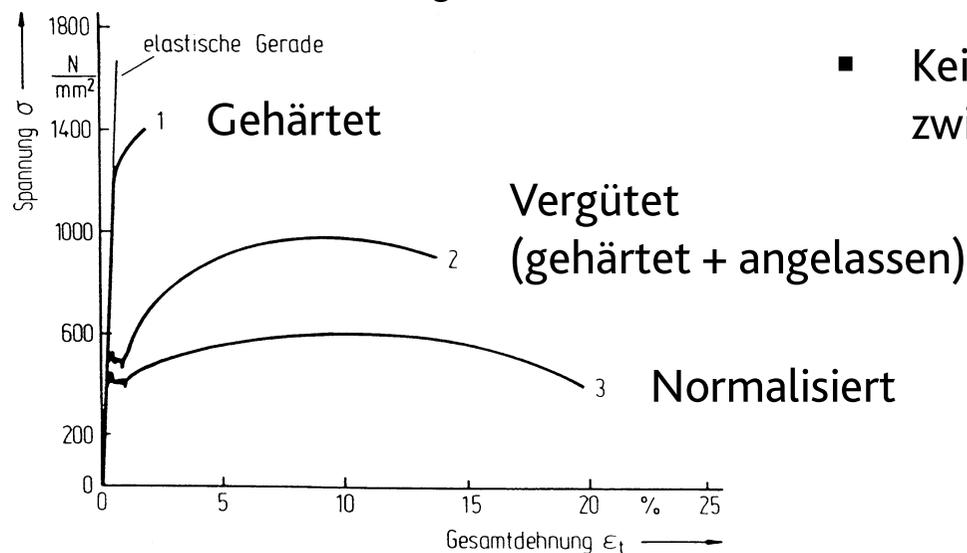
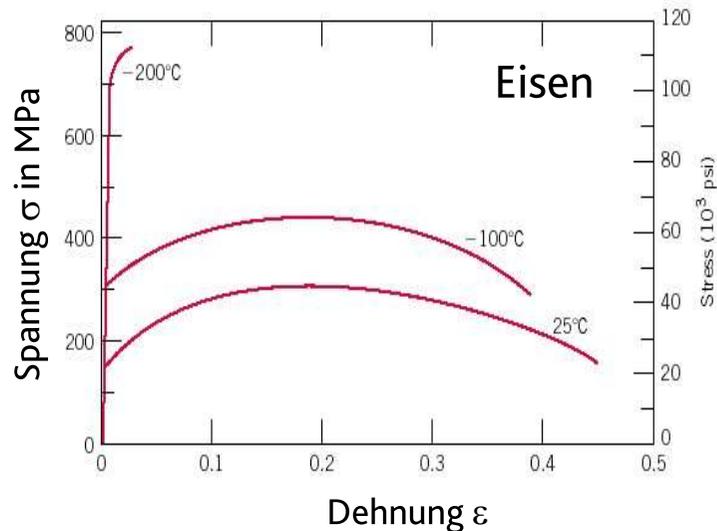
Je höher der Schmelzpunkt, desto höher der Elastizitätsmodul (gilt für ähnlich aufgebaute Werkstoffe).

Werkstoff	Kristallstruktur	Elastizitätsmodul E in GPa	Schmelztemperatur T in °C
Wolfram	krz	405	3422
Titan	hex, ktz	107	1668
Stahl	krz, kfz	207	1536
Kupfer	kfz	110	1084
Aluminium	kfz	69	660
Magnesium	hdp	45	650

# Grundsätzlicher Verformungsmechanismus



# Plastische Verformung

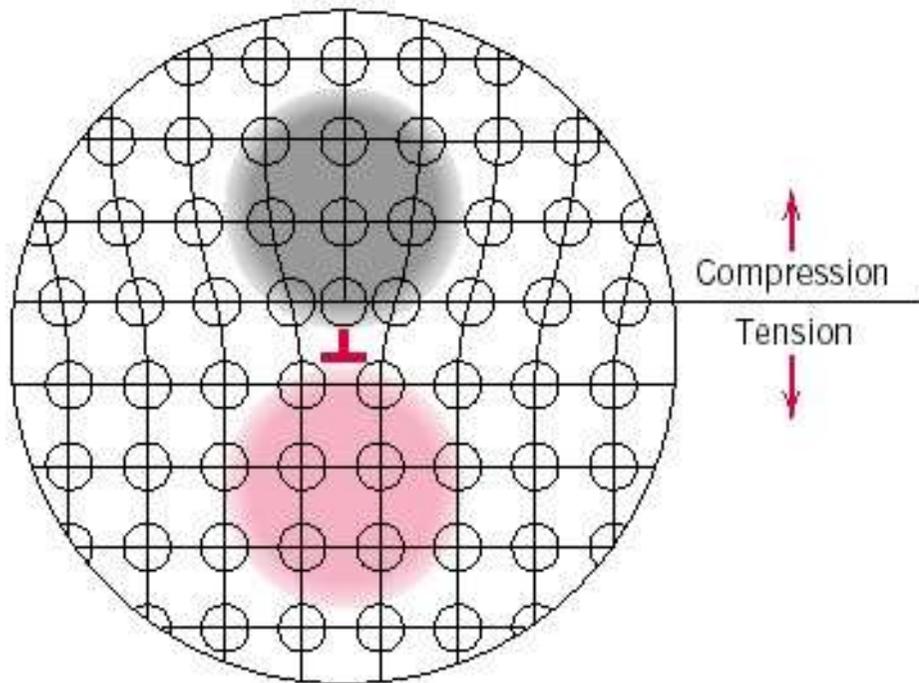


**Einfluss des Behandlungszustandes  
Von C45 (Vergütungsstahl)**

## Merkmale:

- Plastische Verformung erfolgt oberhalb der Elastizitätsgrenze (technisch: Dehngrenze).
- Diese Grenzspannung ist ebenfalls temperaturabhängig.
- Plastische Verformung ist irreversibel.
- Kein linearer Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung.

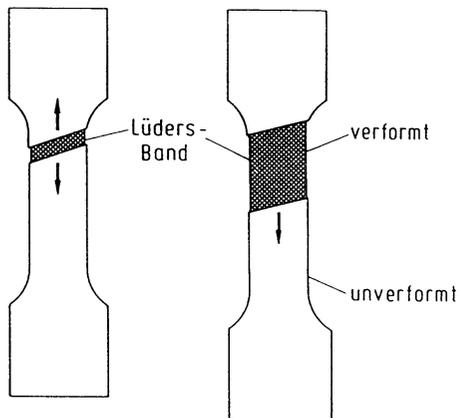
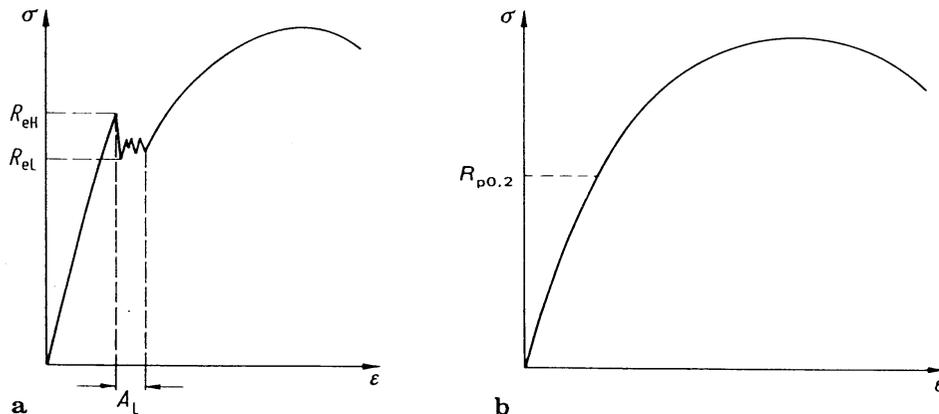
# Versetzungsbewegung



Cottrell-Wolken

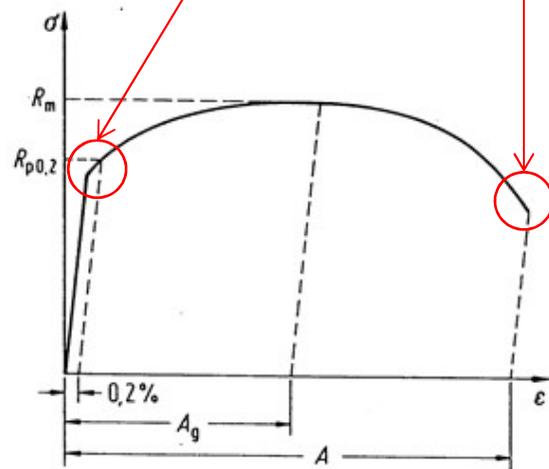
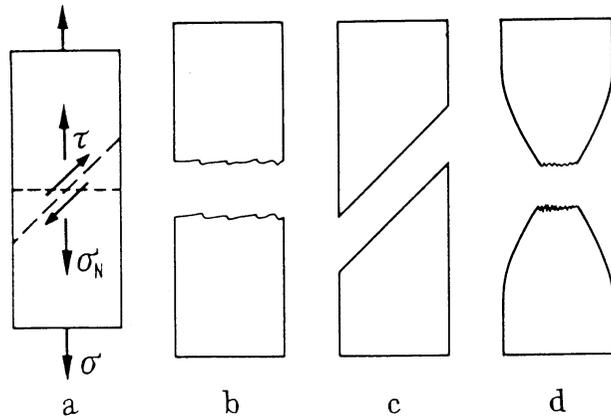
- Die plastische Verformung ist die Folge der Bewegung von Versetzungen.
- Versetzungen besitzen ein Spannungsfeld, in dem sich insbesondere Zwischengitteratome wie C und N anreichern können (Cottrell-Wolken im Zugbereich).
- Die Versetzungen werden dadurch festgehalten und können sich erst bei Überschreiten von  $R_{eH}$  losreißen.

# Lüdersdehnung



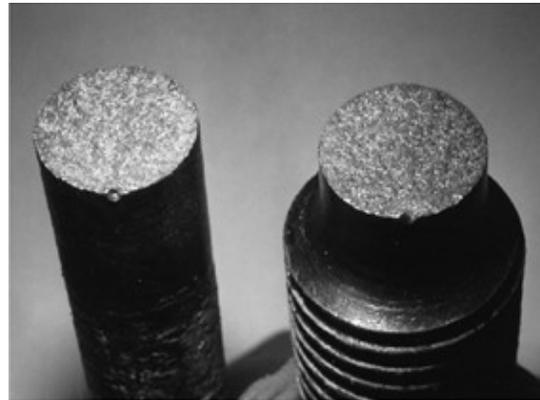
- Die freibeweglichen Versetzungen reißen weitere Versetzungen los, so dass es zu einer **lawinenartigen Versetzungsbewegung** kommt.
- Dieser Prozess schreitet über die gesamte Messlänge bei  $R_{eL}$  fort und ist in Form einer **Lüdersbandausbreitung** erkennbar.
- Nach der **Lüdersdehnung**  $A_L$  erfolgt der normale Spannungsanstieg.
- Abstellmaßnahmen:
  - IF (Interstitial free) Stähle
  - **Dressieren** von Blechen

# Bruch



Bruchformen unter Zugspannung ohne Anriss:

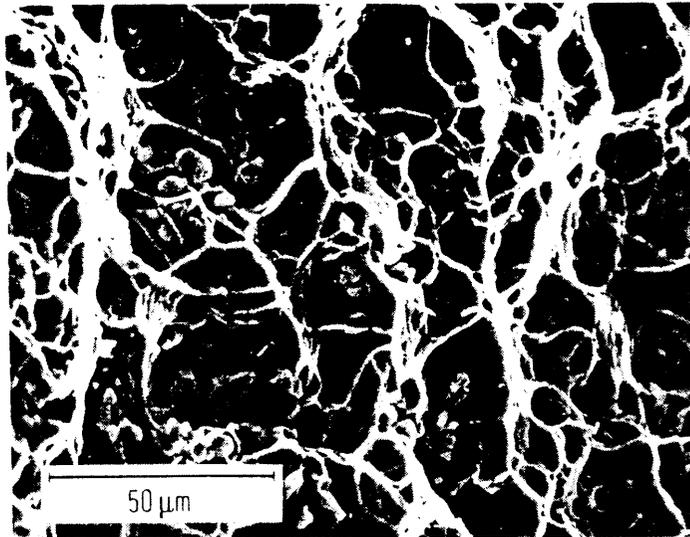
- Schub- und Normalspannung
- Spaltbruch durch  $\sigma_N$
- Schubbruch durch  $\tau$
- Bruch nach Einschnürung



Sprödbruch



Verformungsbruch



Beispiel: duktil gerissene Al-Legierung mit Wabenstruktur (REM)

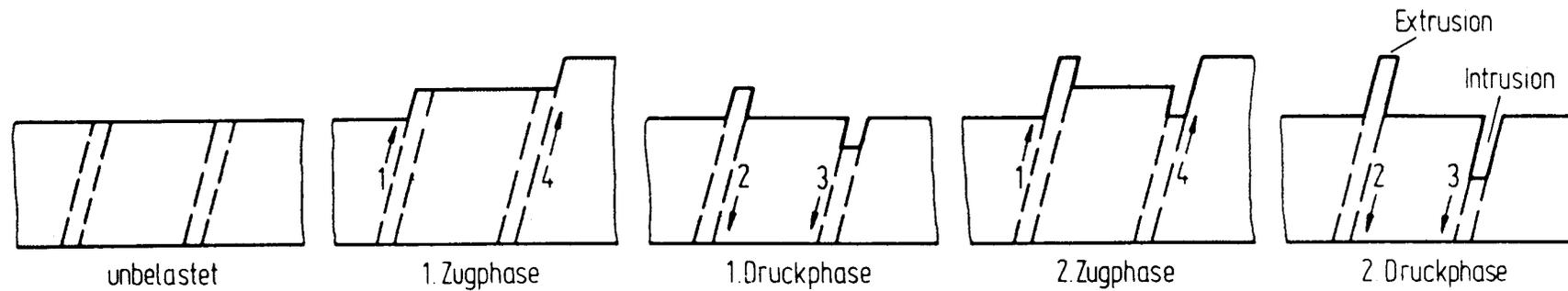
- Liegt in einem Bauteil bereits ein Anriss vor, so kann durch Rissausbreitung selbst in einem duktilen Werkstoff ein spröder Bruch erfolgen, da die plastische Verformung nur im Bereich der Risspitze (Spannungserhöhung!) stattfindet.
- Aussagen darüber, ob der Riss überkritisch ist oder nicht, liefert die **Bruchmechanik**. Kriterium für instabile (überkritische) Rissausbreitung:

$$K_I \geq K_{Ic}$$

- Dennoch kann es bei Belastungen unterhalb des **kritischen Spannungsintensitätsfaktors**  $K_{Ic}$  zu einer (unterkritischen) Rissausbreitung kommen (**Materialermüdung**).

## Merkmale der Materialermüdung (Rissbildung)

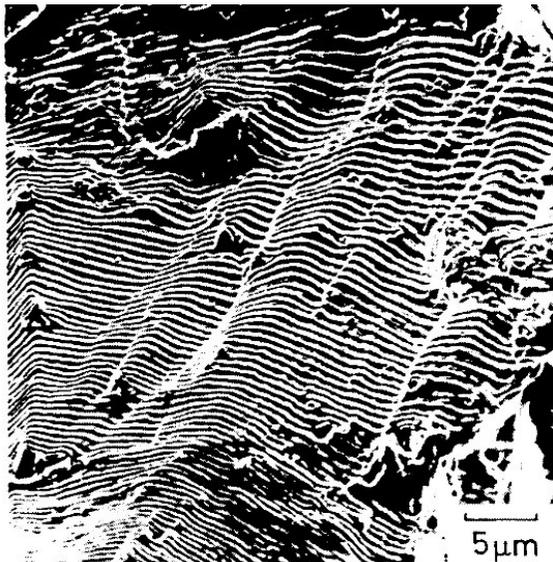
- Die Rissbildung erfolgt meist an der Oberfläche als Folge einer **Irreversibilität** der Abgleitung (Ausnahme, wenn z.B. große Einschlüsse, Poren etc. im Inneren des Werkstoffs vorhanden sind).



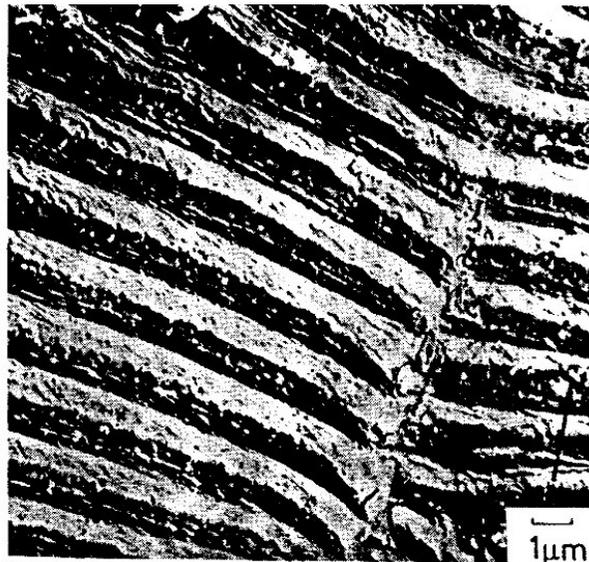
Grob vereinfachte Darstellung der Extrusions- und Intrusionsbildung als Vorstufe zum Riss

## Merkmale der Materialermüdung (Dauerbruch)

- Der Riss breitet sich allmählich aus, was bei duktilen Werkstoffen zur Schwingstreifen (=Rissverlängerung pro Zyklus) führt.
- Das Versagen erfolgt letztendlich als Gewaltbruch, wenn der Riss den lasttragenden Querschnitt soweit reduziert hat, dass die Maximallast nicht mehr ertragbar ist.



Nickelbasis-Legierung



Aluminium-Legierung

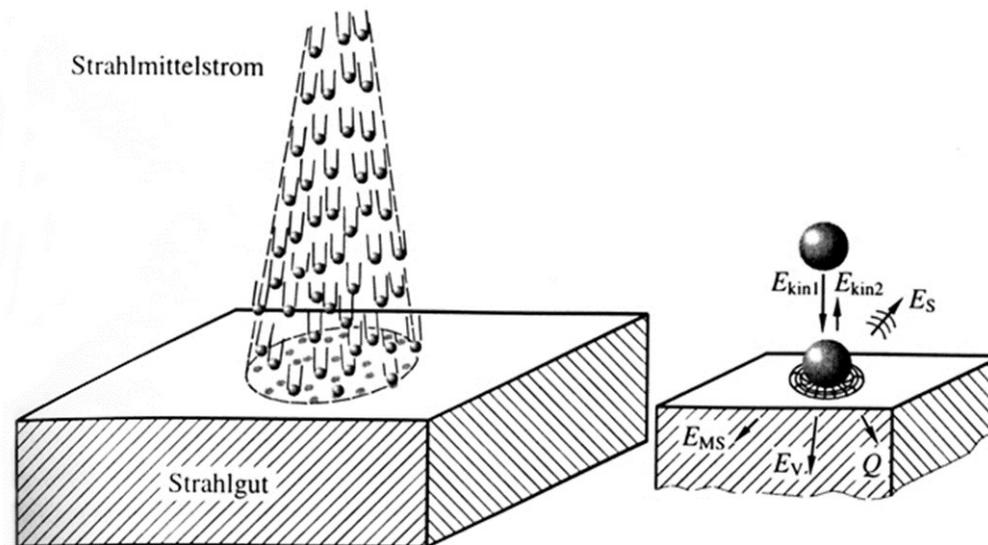


Schwingbruch eines Pedalarms  
aus Aluminium

## Merkmale der Materialermüdung (Druckeigenspannung)

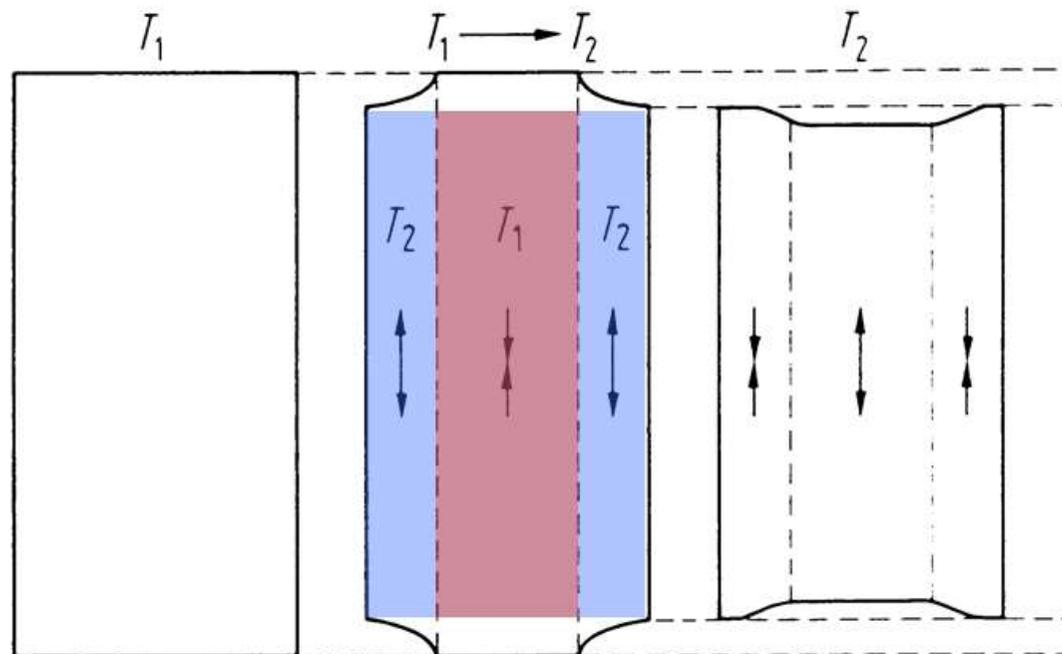
Konsequenz: Die Rissbildungstendenz der Oberfläche kann reduziert werden, wenn in die Oberfläche Druckeigenspannungen eingebracht werden. Dies ist möglich z.B. durch:

- Kugelstrahlen

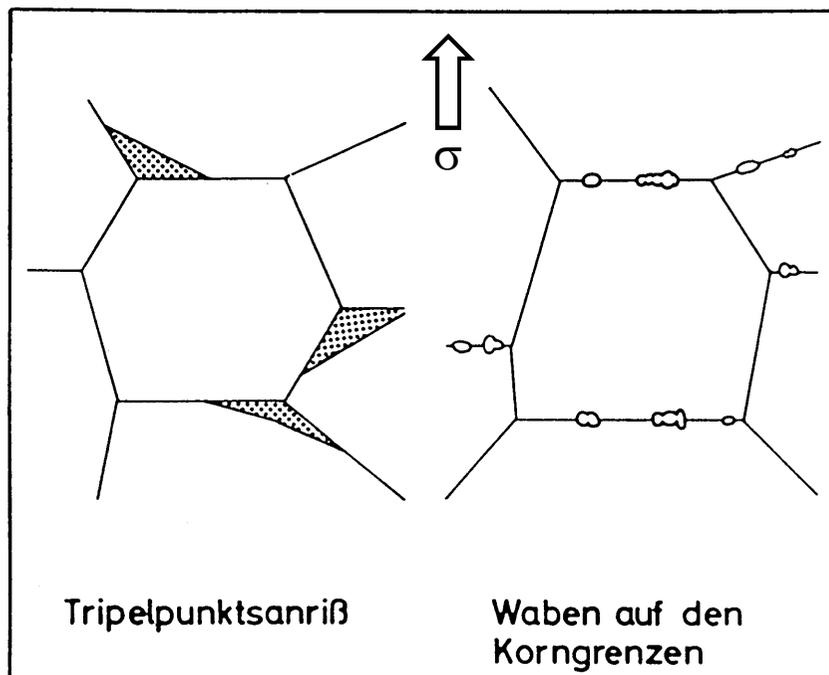


## Merkmale der Materialermüdung (Druckeigenspannung)

- Rasche Abkühlung (z.B. von Glas)
  - Rasche Abkühlung eines Zylinders von  $T_1$  nach  $T_2$ : Die Oberfläche kühlt zuerst ab und kontrahiert. Der noch heiße (leicht verformbare) Kern wird plastisch mitverformt.
  - Kühlt nun dieser auch ab, so entstehen durch die Kontraktion Druckeigenspannungen im äußeren Stabmantel, die mit den Zugspannungen im Inneren im Gleichgewicht sind.



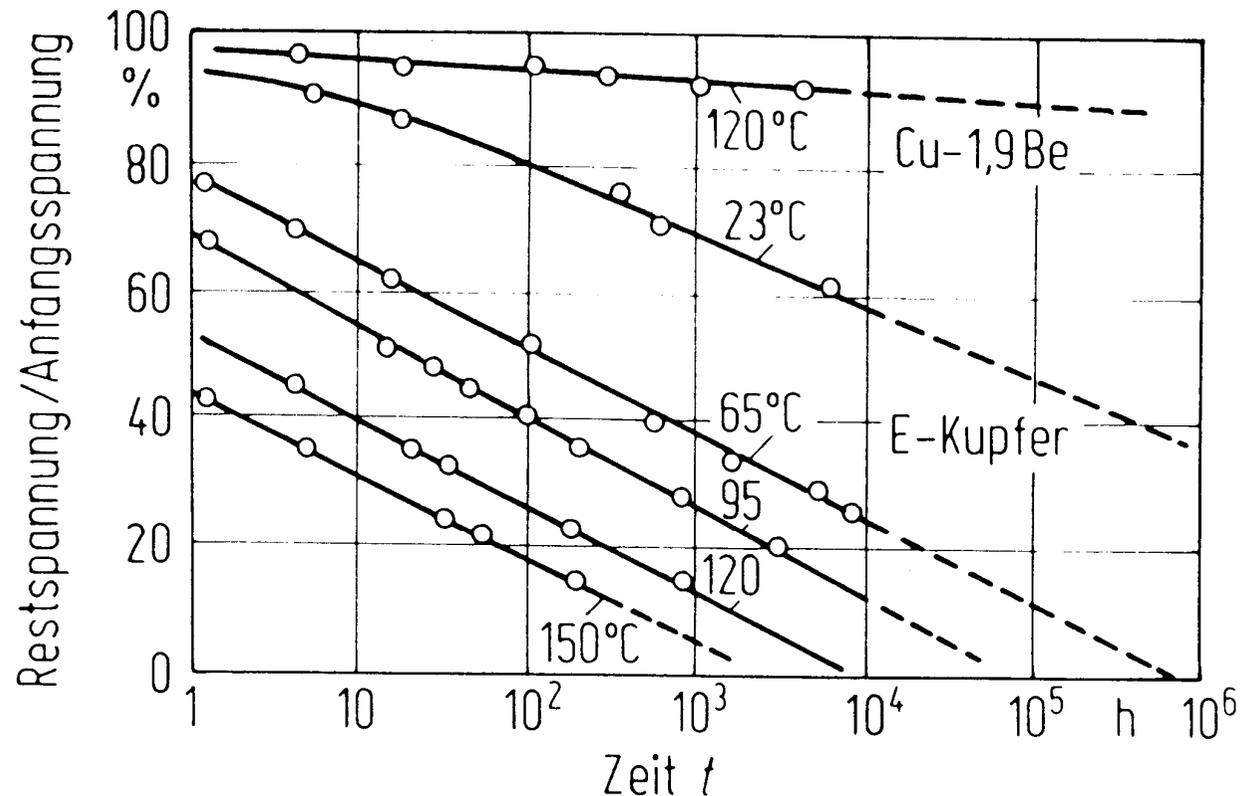
## Merkmale des Kriechbruchs



- Kriechen (zeitabhängige plastische Verformung bei  $T \geq 0,3T_m$ ) kann zum Kriechbruch führen.
- Der Bruch ist meist eine Folge der Bildung und des Wachstums von Poren an den Korngrenzen. Diese Poren ergeben Risse **im Inneren des Werkstoffes**. Poren an Korngrenzen bilden sich infolge einer Zusammenlagerung von Leerstellen.
- Keilförmige Risse an **Korngrenzentripelpunkten** entstehen durch **Korngrenzengleitung**.
- Konsequenz: Vermeidung von Korngrenzen für kriechbeanspruchte Legierungen (einkristalline Nickelbasis-Superlegierungen).

## Merkmale des Kriechbruchs

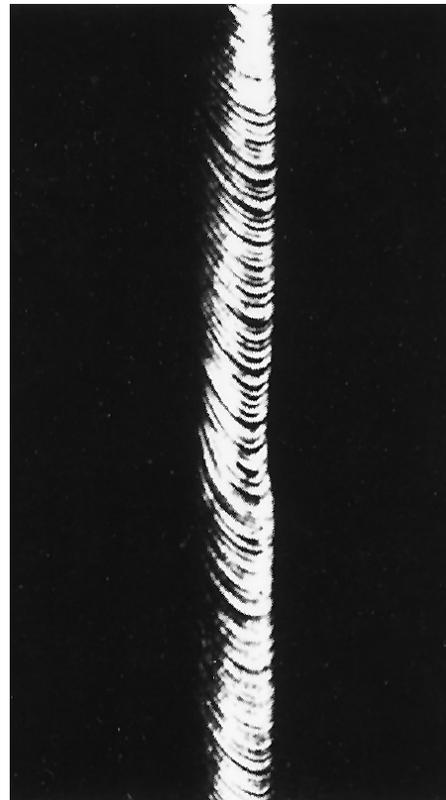
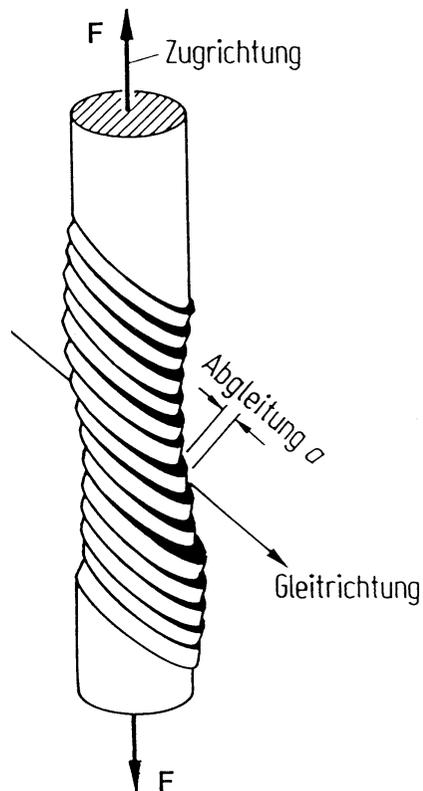
Ein technisch wichtiges Phänomen, dessen Ursache eine Kriechverformung ist, stellt die Spannungsrelaxation dar.



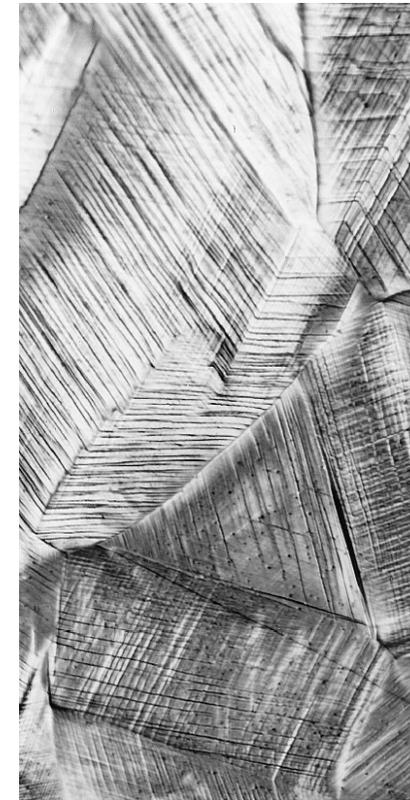
Wird ein Werkstoff (z.B. als Schraube) durch Anlegen einer äußeren Spannung auf eine konstante Dehnung gebracht, so kann durch Umsetzung von elastischer Dehnung in plastische Dehnung die Spannung allmählich abgebaut werden.

## Beobachtung

- Der Grundvorgang der plastischen Verformung ist die Abgleitung von Bereichen gegeneinander ("Wurstscheiben-Modell").
- Die Abgleitung erfolgt längs einer bestimmten kristallographischen Ebene (**Gleitebene**) in eine bestimmte kristallographische Richtung (**Gleitrichtung**).

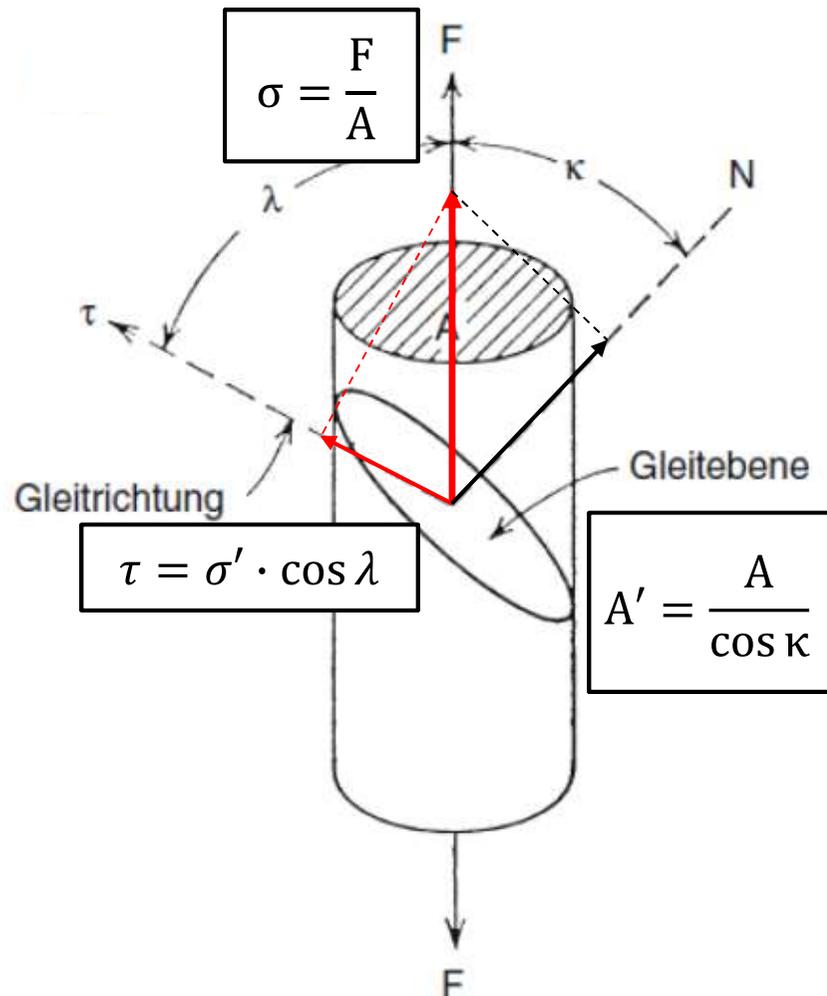


Zink-Einkristall



Kupfer-Vielkristall

# Spannungszustand



Einachsige Spannung  $\sigma$  an der Zugprobe:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Fläche  $A'$  der Gleitebene:

$$A' = \frac{A}{\cos \kappa}$$

Spannung  $\sigma'$  in der Gleitebene:

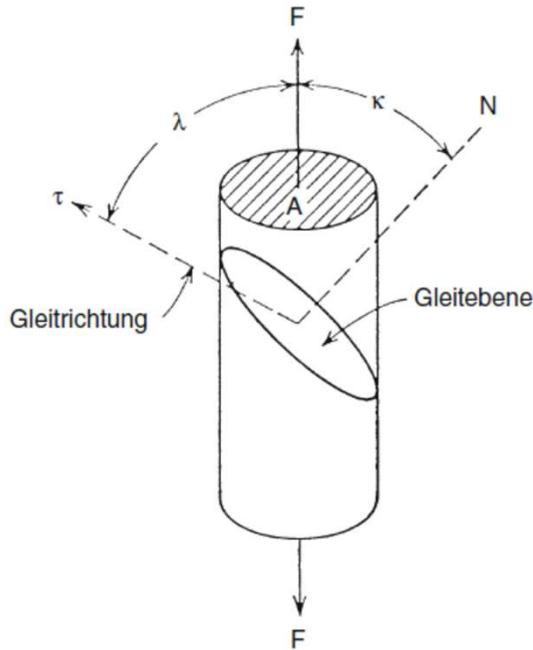
$$F = \sigma \cdot A = \sigma' \cdot A'$$

$$\Rightarrow \sigma' = \sigma \cdot \frac{A}{A'} = \sigma \cdot \cos \kappa$$

Schubspannung  $\tau$  in der Gleitebene in Gleitrichtung:

$$\tau = \sigma' \cdot \cos \lambda = \sigma \cdot \cos \kappa \cdot \cos \lambda$$

# Schmid'sches Schubspannungsgesetz

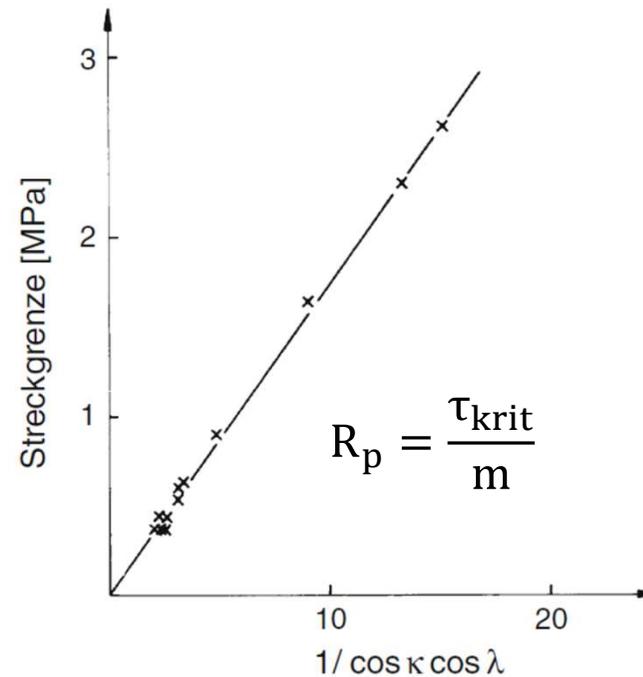


- Wirksame Schubspannungen:

$$\tau = \frac{F}{A} \cdot \cos \kappa \cdot \cos \lambda = \sigma \cdot \cos \kappa \cdot \cos \lambda = m \cdot \sigma$$

$m = \cos \kappa \cdot \cos \lambda$  (Schmidfaktor:  $0 < |m| < 0,5$ )

- Plastische Verformung (Abgleitung) erfolgt, wenn  $\tau > \tau_{krit}$

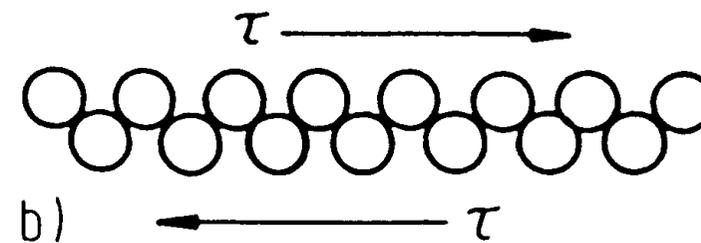
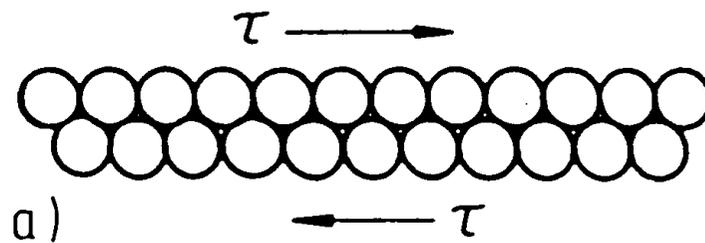


$\tau_{krit}$  : Kritische Schubspannung

## Gleitebene

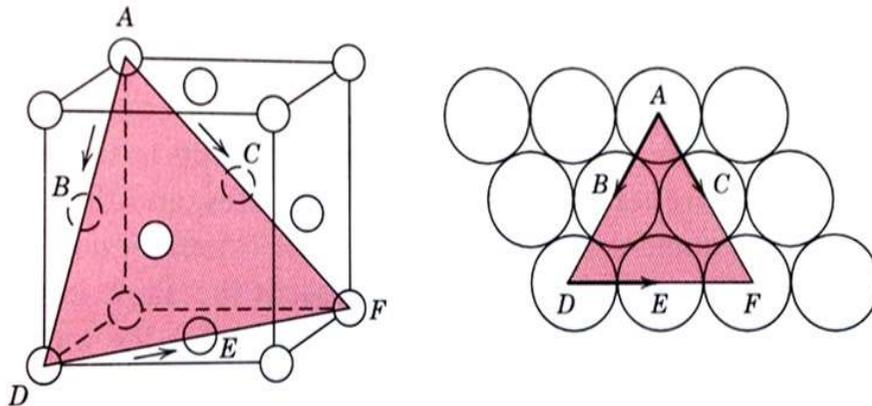
Welche kristallographische Ebene ist die **Gleitebene**?

Anschaulich:

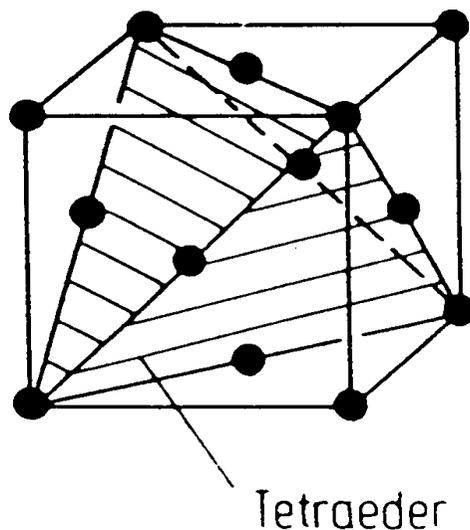


- Die Abgleitung erfolgt leichter, wenn die Gleitebene dicht gepackt ist.
- Konsequenz: Die Gleitebene ist (meist) die dichtest gepackte Ebene!

# Gleitsystem

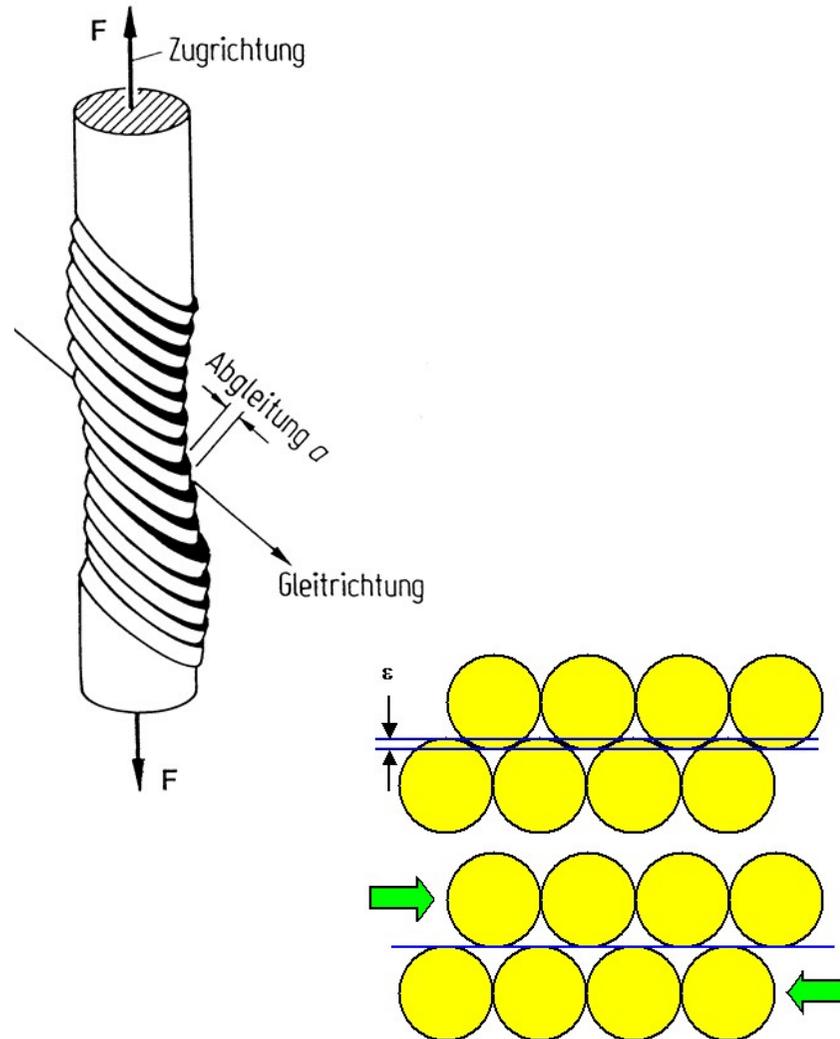


**Beispiel:** kfz-Gitter: Gleitebene  $\{111\}$ , Gleitrichtung  $\langle 110 \rangle$



- Abgleitung folgt dem leichtesten Pfad. Diese Richtung (**Gleitrichtung**) entspricht der dichtest gepackten Richtung.
- kfz-Gitter: Die 4  $\{111\}$ - Ebenen bilden zusammen ein Tetraeder, dessen Kanten die 6  $\langle 110 \rangle$ - Richtungen sind. Die Gleitebene mit der Gleitrichtung ergibt zusammen ein **Gleitsystem**. Insgesamt verfügt das kfz-Gitter über  $4 \times 3 = 12$  Gleitsysteme.
- Hinweis: Klammersetzung beachten, geschweifte und spitze Klammern kennzeichnen den Typ einer Ebene bzw. einer Richtung.

# Grundsätzlicher Verformungsmechanismus

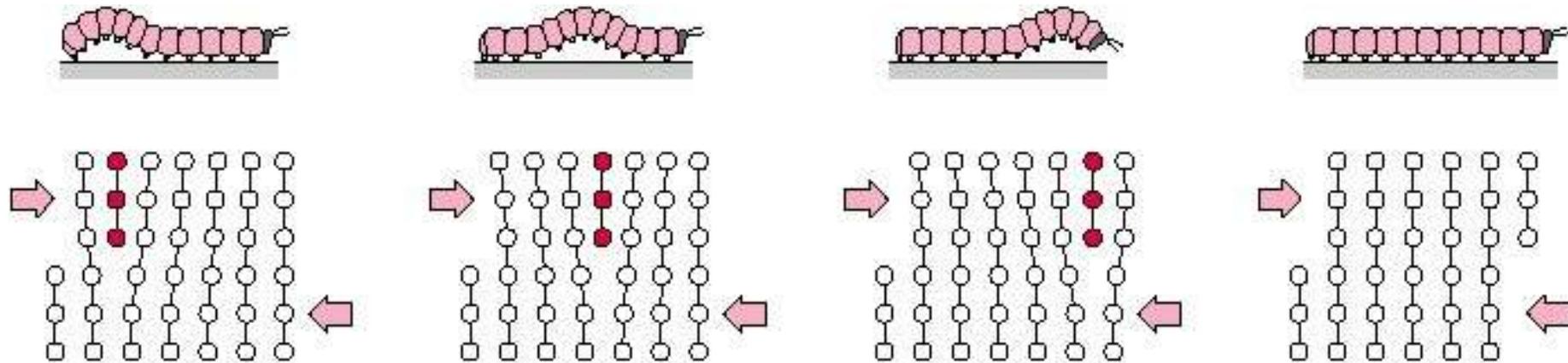


- Mit der Abgleitung von Ebenen wählt die Natur einen günstigeren Weg, einer äußeren Kraft durch plastische Verformung nachzugeben.
- Die dreidimensionale Verformung wird durch einen zweidimensionalen Vorgang erreicht.
- Aber auch dieser zweidimensionale Abgleitvorgang lässt sich weiter erleichtern, da die vollständige Abgleitung zweier Ebenen immer noch hohe Spannungen erfordern würde (Beispiel: Wellblech).

# Grundsätzlicher Verformungsmechanismus

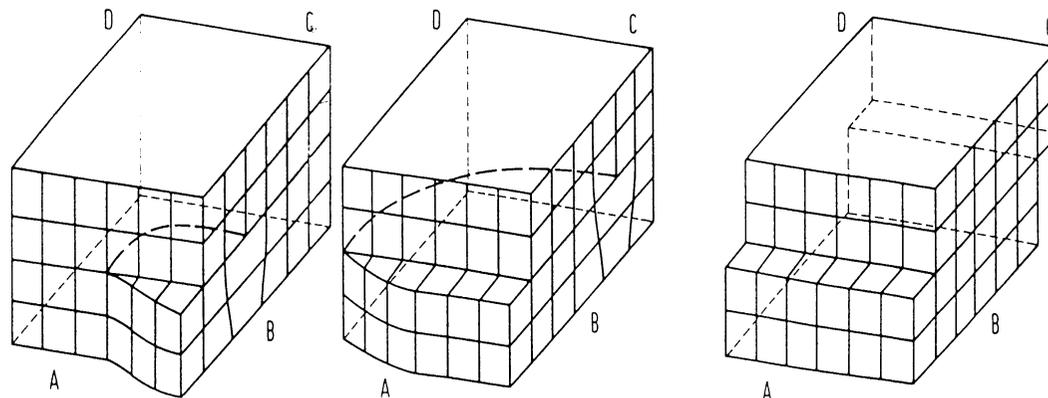
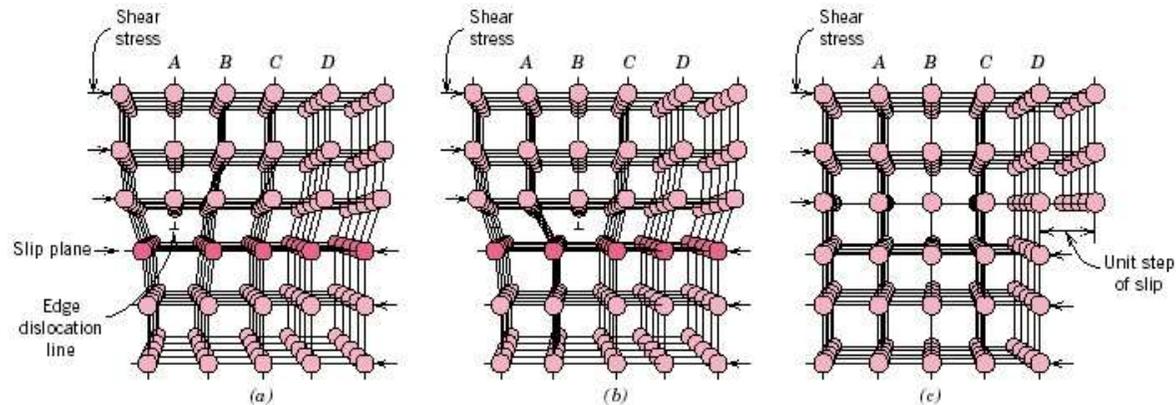
Es erfolgt ein Übergang zu einem eindimensionalen Vorgang.

Analogie: Bewegung einer Raupe  $\leftrightarrow$  Versetzungsbewegung



Representation of the analogy between caterpillar and dislocation motion.

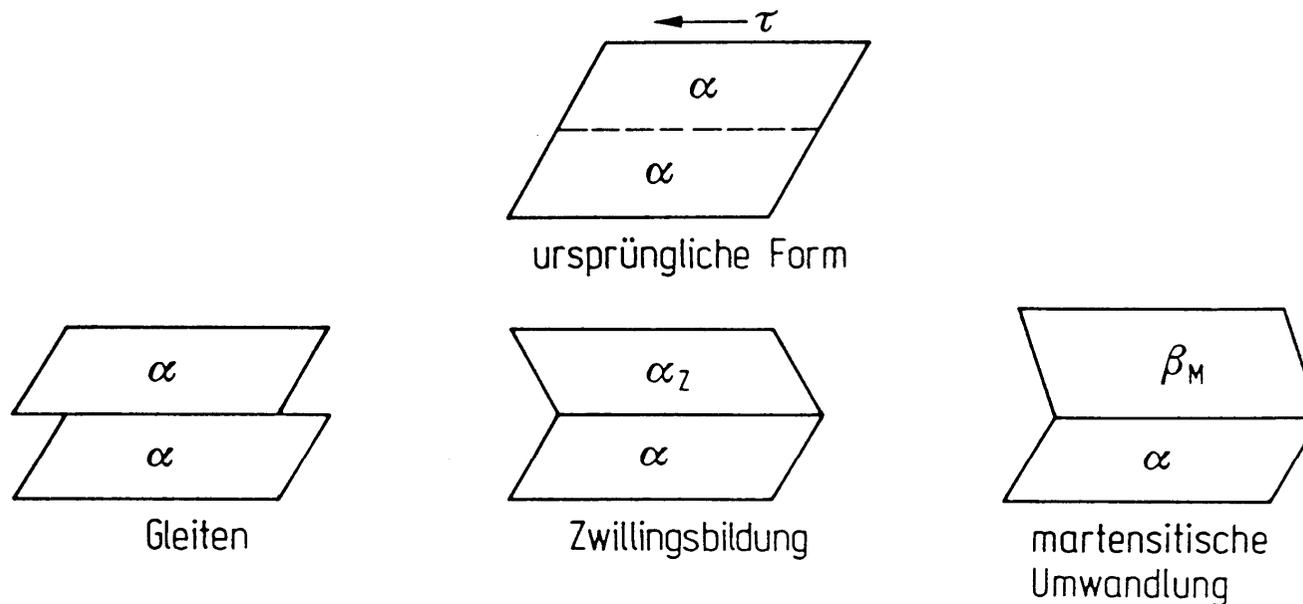
# Versetzungsbewegung



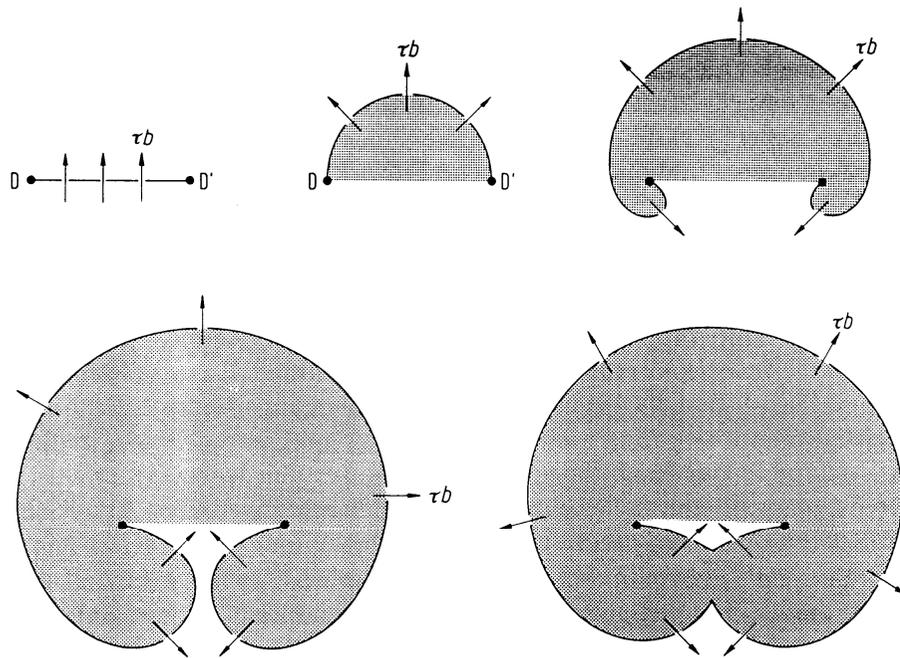
- Eine Versetzung bewegt sich als Versetzungslinie.
- Die Atome behalten ihre Nachbaratome bei.
- Versetzungen sind ringförmig geschlossen und besitzen überwiegend gemischten Charakter.

## Formen der plastischen Verformung

- Neben der Gleitung gibt es noch andere (weniger wichtige) Möglichkeiten der plastischen Verformung.

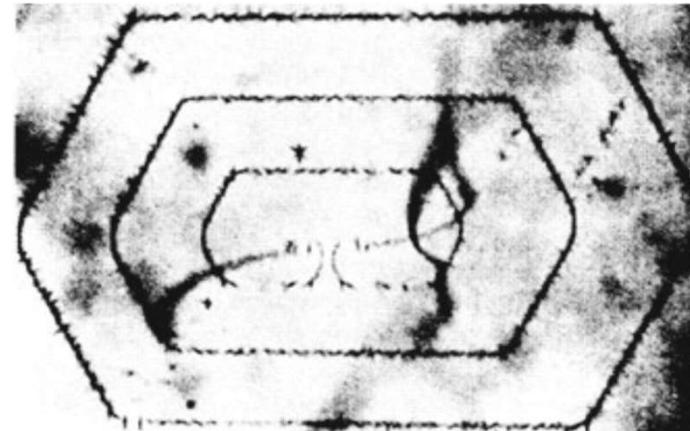


## Die Ursache der Verfestigung in der $\sigma$ - $\epsilon$ -Kurve



- Die Versetzungen schneiden sich gegenseitig und bilden z.T. unbewegliche Reaktionsprodukte.
- Durch eine Versetzungsmultiplikation steigt die Versetzungsdichte an.

→ Frank-Read-Quelle



Frank-Read-Quelle in Silizium

## Die Wechselwirkung von Versetzungen

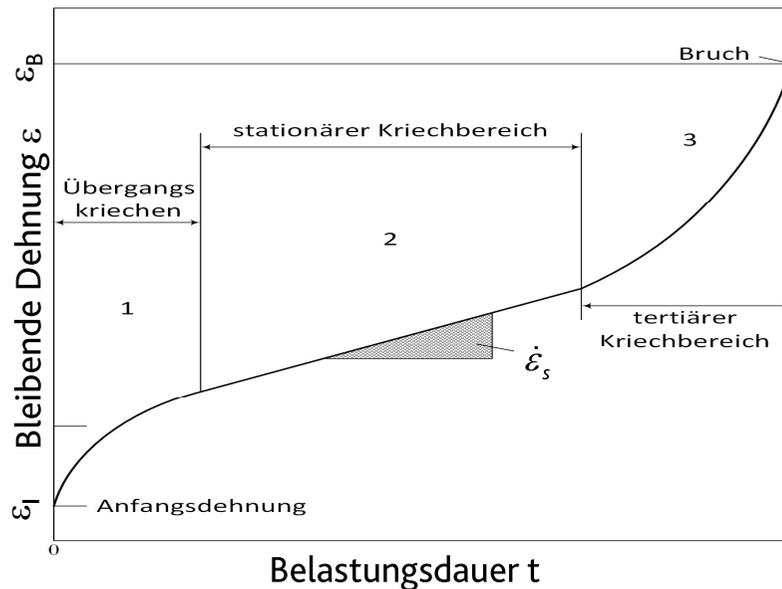
- Da sich die Versetzungen gegenseitig behindern, muss die äußere Spannung erhöht werden, um die Versetzungen weiter zu bewegen (d.h. die plastische Verformung voranzutreiben).
- Es gilt für reine Metalle als gute Näherung:

$$\sigma \approx \alpha G b \sqrt{\rho}$$

Hierbei ist  $\alpha$  ein Vorfaktor, der der Versetzungsanordnung Rechnung trägt und in der Größenordnung von 1 liegt,  $b$  der Betrag des Burgersvektors und  $\rho$  die Versetzungsdichte.

- Diese Näherung gibt den Zahlenwert von  $\tau_{\text{krit}}$  vernünftig wieder und erklärt den Anstieg der Festigkeit mit der plastischen Verformung als Folge der Erhöhung der Versetzungsdichte.

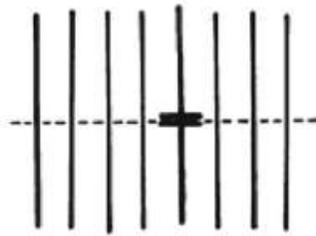
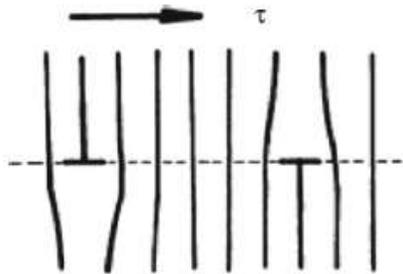
# Ursachen der Entfestigung



- Entfestigung findet insbesondere bei erhöhter Temperatur statt.
- Beispiel: Kriechverformung
- Der stationäre Kriechbereich (konstantes  $\dot{\epsilon}$ ) ist dadurch gekennzeichnet, dass sich Verfestigung und Entfestigung gerade die Waage halten (dynamisches Gleichgewicht).
- Entfestigung kann erfolgen durch
  - Erholung
  - Rekristallisation (wird später genauer behandelt)

# Erholungsvorgänge

## Annihilation



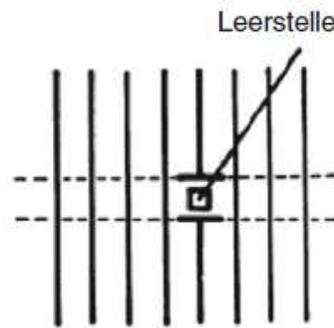
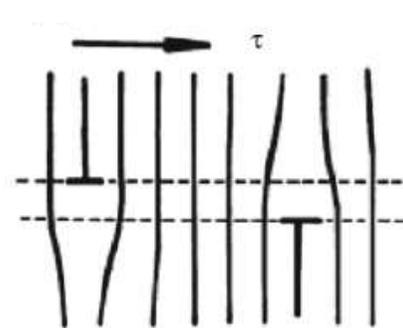
Grundsätzlich führt Erholung zum Abbau der versetzungsbedingten Verspannungen im Kristallgitter. **Erholungsvorgänge:**

a) Versetzungsannihilation (Vernichtung durch  $\perp + \top = 0$ )

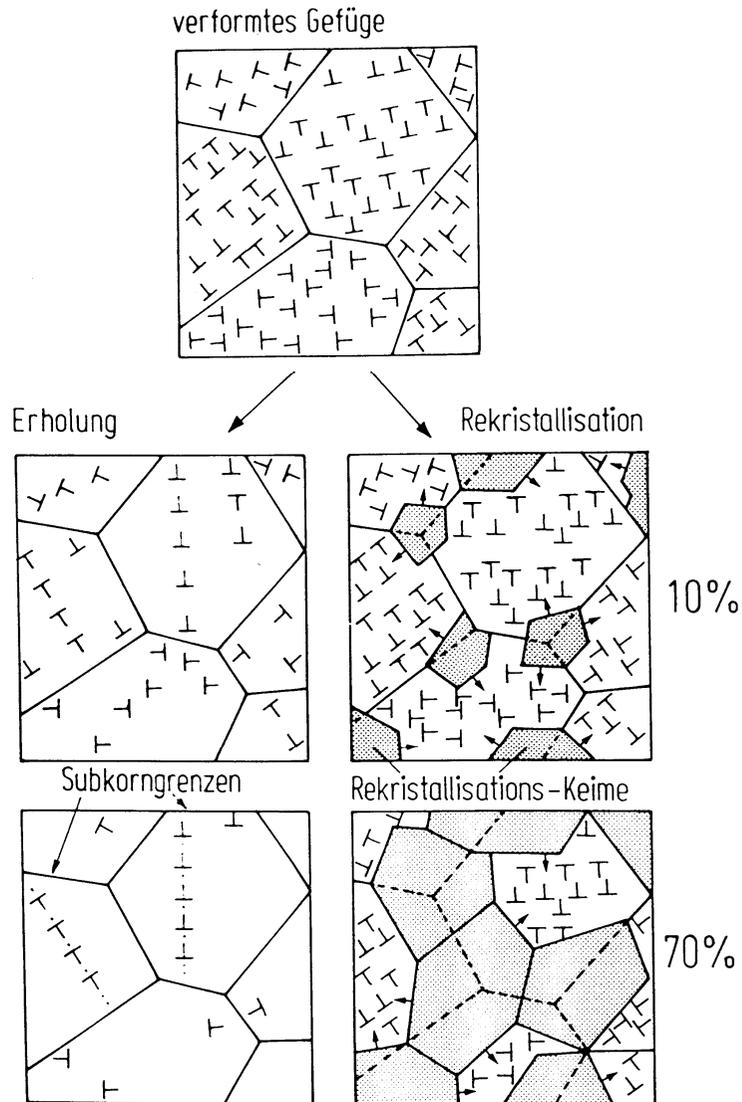
b) Rekombination von Versetzungen

$$(\perp_1 + \perp_2 = \perp_3 \Leftrightarrow \perp_3 = \perp_1 + \perp_2)$$

c) Zusammenlagern von Versetzungen zu Kleinwinkelkorngrenzen (Subkorngrenzenbildung)



# Abgrenzung von Erholung zur Rekristallisation



- **Rekristallisation** ist eine vollständige Neubildung der Körner durch Keimbildung und Keimwachstum.
- Sie vollzieht sich durch Entstehung und Bewegung von Großwinkelkorngrenzen unter Beseitigung der Verformungsstruktur.
- Die treibende Kraft stellt der Abbau von Versetzungen im plastisch verformten Gefüge dar.

## Steigerung der elastischen Steifigkeit

- Zur Erinnerung: Zusammenhang von Schmelzpunkt und elastischen Konstanten!
- Konsequenz:
  - Zulegieren kleiner Mengen von Legierungselementen (gelöst) bringt kaum etwas.
  - Besser: Stärkeres Zulegieren, bis eine zweite Phase mit einer hohen Gittersteifigkeit gebildet wird.

resultierender E-Modul (Parallelschaltung):

$$\bar{E} \approx \alpha_1 E_1 + \alpha_2 E_2$$

mit  $\alpha_1, \alpha_2$ : Volumenanteil der Phasen  
 $E_1, E_2$ : Elastische Modul der beiden Phasen

- Nächster logischer Schritt: Verbundwerkstoffe (z.B. Faserverstärkung von Polymeren)

## Steigerung des Widerstandes gegen plastische Verformung

Grundprinzip: Der Übergang von elastischer zu plastischer Verformung (technisch  $R_{p0,2}$ ) soll zu höheren Spannungen verschoben werden. Die plastische Verformung ist eine Folge der Bewegung von Versetzungen. Es kommen deshalb die Maßnahmen in Frage, die eine Behinderung der Versetzungsbewegung hervorrufen.

Fünf Grundmechanismen:

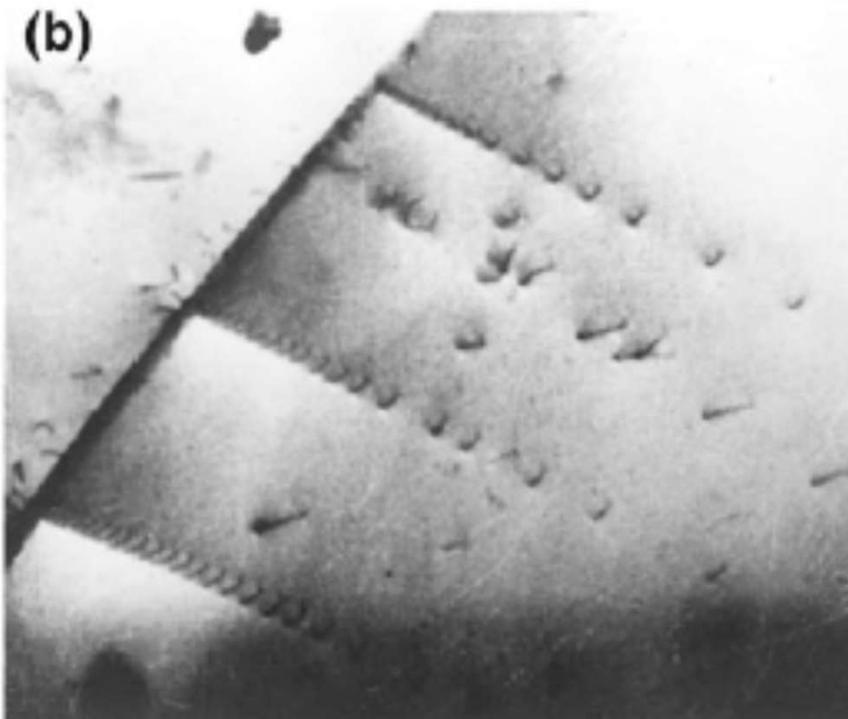
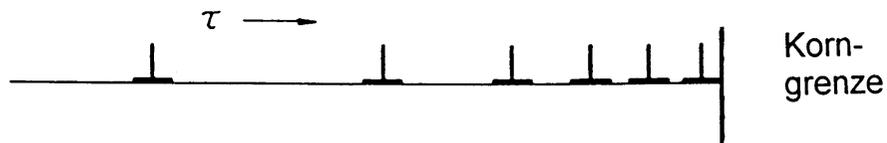
1. **Verfestigung durch Versetzungen (Verformungsverfestigung):**  
Aufgrund ihres Spannungsfeldes behindern sich die Versetzungen gegenseitig (anschaulich: Verfilzung). Eine Verfestigung kann somit durch Steigerung der Versetzungsdichte erreicht werden.

Grundgleichung:

$$\sigma \approx \Delta R_p \approx \alpha G b \sqrt{\rho}$$

Technische Anwendung: Walzen, Hämmern, Drahtziehen etc.

## Steigerung des Widerstandes gegen plastische Verformung



### 2. Verfestigung durch Korngrenzen (Feinkornhärtung):

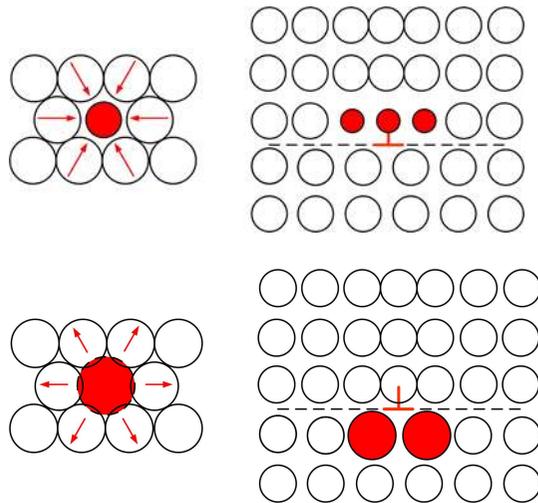
Korngrenzen behindern die Ausbreitung von Versetzungen, sie stellen Hindernisse dar. An den Korngrenzen kommt es zum Aufstau von Versetzungen.

Der Einfluß der Korngröße  $L_K$  auf die Streckgrenze (Dehngrenze) wird durch die **Hall-Petch-Beziehung** beschrieben:

$$\Delta R_p \approx k_y \frac{1}{\sqrt{L_K}}$$

Technische Anwendung:  
**Feinkornstähle**

# Steigerung des Widerstandes gegen plastische Verformung



## 3. Verfestigung durch gelöste Fremdatome (Mischkristallhärtung):

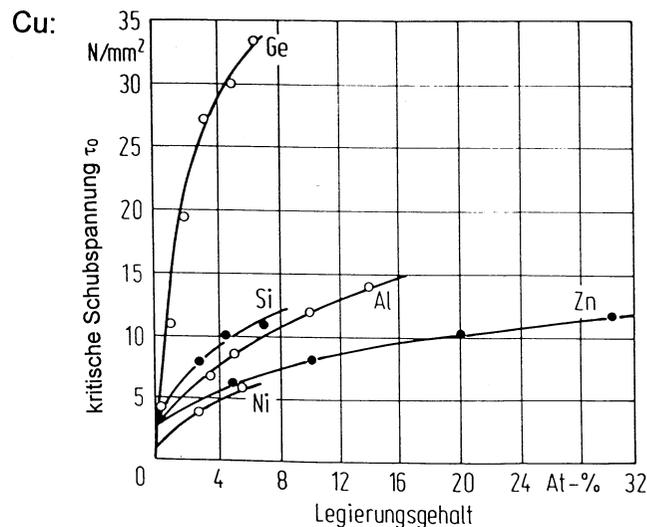
Fremdatome im Kristallgitter besitzen:

- a) eine andere Größe  
⇒ Verzerrung des Gitters
- b) eine andere Bindungskraft  
⇒ veränderter Schubmodul

Durch beide Effekte ergibt sich eine Hinderniswirkung für die Versetzungen. Für die Streckgrenze (Dehngrenze) gilt:

$$\Delta R_p = \text{const} \cdot \sqrt{c_{FA}}$$

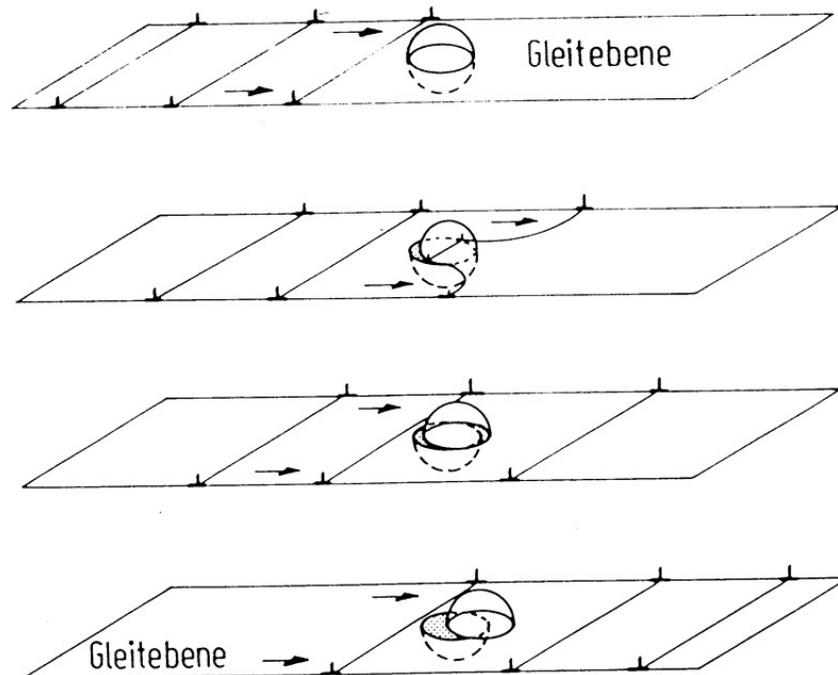
$c_{FA}$  ist dabei die Konzentration an Legierungsatomen.



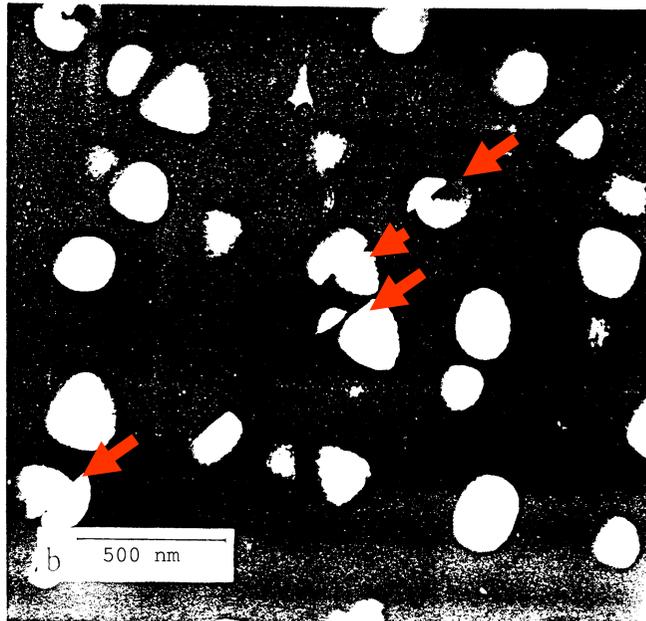
## Steigerung des Widerstandes gegen plastische Verformung

### 4. und 5. Verfestigung durch Teilchen einer zweiten Phase (Ausscheidungshärtung)

- a) Schneidbare Teilchen: Liegen kleine und kohärente Ausscheidungen vor, so können diese von den Versetzungen geschnitten werden, d.h. die Versetzungen können auf ihrem Weg die Teilchen durchlaufen.



## Steigerung des Widerstandes gegen plastische Verformung



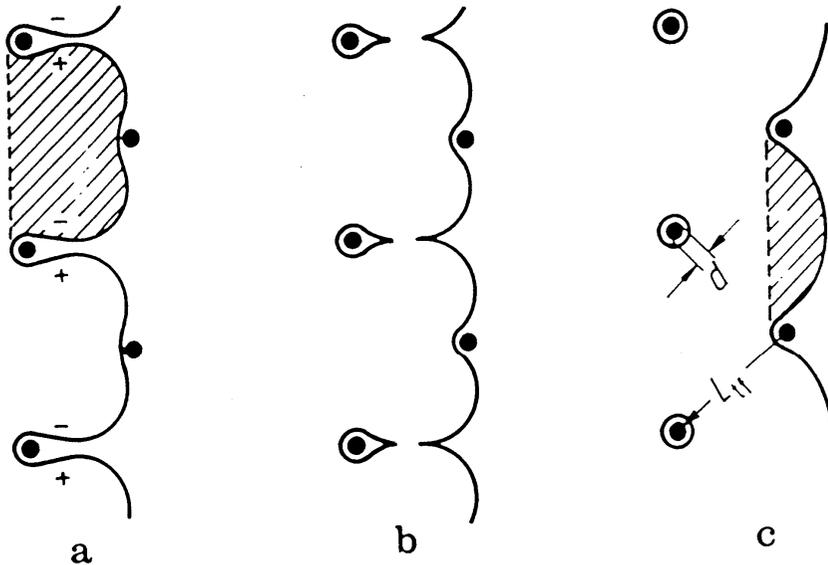
$\gamma'$ -Teilchen in einer Legierung aus Nickelbasis (Nickelbasis-Superlegierung)

- Die geschnittenen Ausscheidungsteilchen sind im TEM erkennbar.
- Das Schneiden von Teilchen stellt einen Energieaufwand dar und führt somit zu einer Verfestigung, deren Ausmaß von der Größe der Teilchen (z.B. Radius  $r_T$ ) und deren Volumenbruchteil  $f_V$  zusammenhängt:

$$\Delta R_p \approx \text{const} \cdot \sqrt{f_V \cdot r_T}$$

# Steigerung des Widerstandes gegen plastische Verformung

Bewegungsrichtung der Versetzung  $\longrightarrow$



- b) Nicht schneidbare Teilchen (Dispersionshärtung): Inkohärente Teilchen oder größere Ausscheidungen werden nicht mehr geschnitten, sondern von den Versetzungen umgangen.

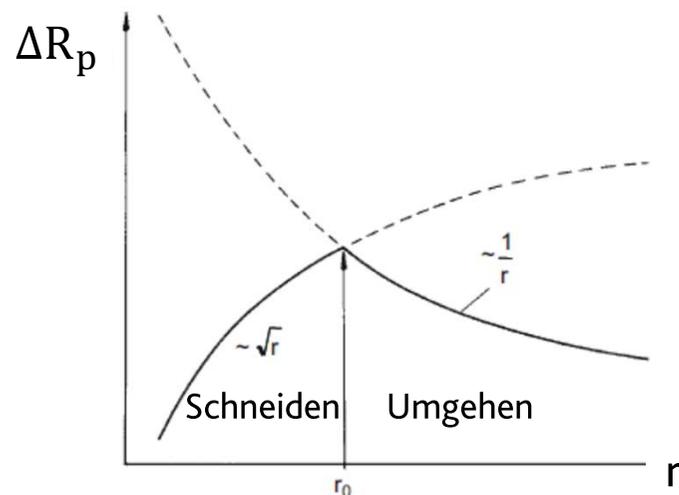
**Orowan-Umgehung** nicht schneidbarer Teilchen: Entscheidend für die Hinderniswirkung ist der Abstand zwischen den Teilchen  $L_{tf}$  und die Teilchengröße  $d$ :

$$\Delta R_p \approx \text{const} \cdot \frac{Gb}{L_{tf}} = \text{const} \cdot \frac{2Gb}{d} \cdot \sqrt{f}$$

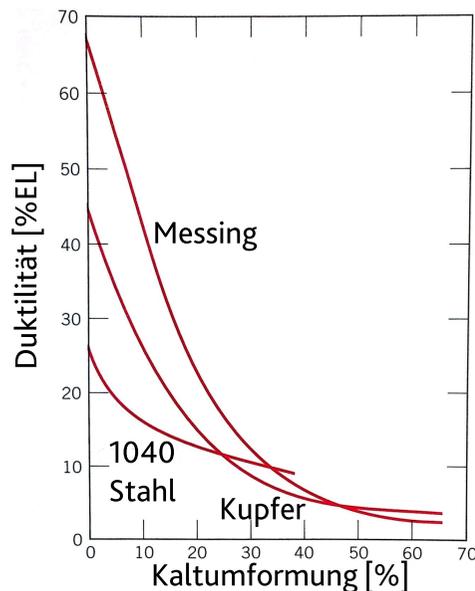
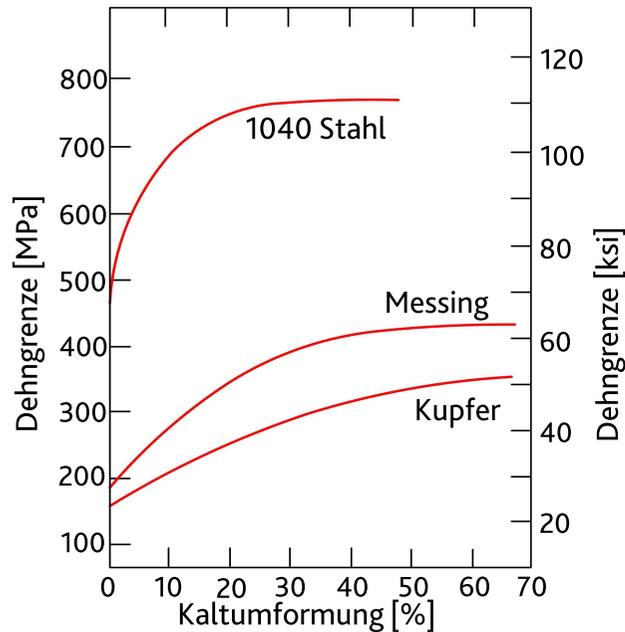
$f$  ist der Volumenbruchteil der Teilchen.

→ Grobe Teilchen besitzen eine geringe Verfestigungswirkung!

Beispiel: Gehärteter Stahl / Aluminium



## Steigerung der Bruchfestigkeit



- Generell: Eine Steigerung an Festigkeit bewirkt meist den Verlust an Duktilität.
- Kritisch ist insbesondere der „spröde“ Bruch, da er plötzlich erfolgt.
- Maßnahmen zu Erhöhung der Bruchfestigkeit:
  - Vermeidung einer Anrissbildung an der Oberfläche durch hohe Oberflächengüte
  - Vermeidung der Rissbildung im Werkstoffinneren durch Vermeidung von groben Einschlüssen und Poren im Gefüge
  - Vermeidung von spröden Phasen auf den Korngrenzen
  - Behandlung der Oberfläche (z.B. thermisch oder chemisch), so dass eine Druck-Vorspannung entsteht
  - Faserverbund mit hochfesten Fasern