

# Materialwissenschaften

Prof. Peter Müller-Buschbaum, TUM School of Natural Sciences

## Kapitel 7: Mechanische Eigenschaften von Metallen

7.1 Einleitung

7.2 Zugverhalten

7.3 Wahre Spannung und wahre Dehnung

7.4 Elastische Erholung

7.5 Härte

7.6 Versetzungen und plastische Verformung

7.7 Zusammenfassung

J. P. Mercier, G. Zambelli, W. Kurz: Introduction to Material Science.  
Elsevier, 2002. Kapitel 11.

W. D. Callister, D.G. Rethwisch: Materialwissenschaften und Werkstofftechnik.  
Wiley-VCH. Kapitel 6 und 7.

## 7.1 Einleitung

Bisher wurden die mechanischen Eigenschaften auf die **interatomaren Bindungen** zurückgeführt, die gemessenen Module sind aber oft niedriger als die so vorhergesagten Werte.

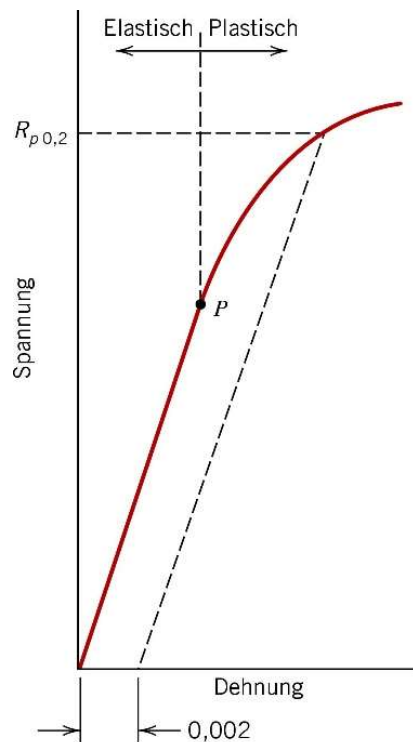
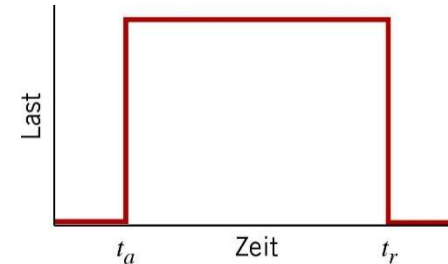
Grund für Abweichung: **Fehlstellen**

betrachte folgende **makroskopische Größen** und deren **mikroskopische Aspekte**:

- Steifigkeit (Elastizitätsmodul)
- Fließgrenze
- Zähigkeit
- Härte

## 7.2 Zugverhalten metallischer Materialien

**Kriechexperiment:** stufenartiges Anlegen einer Spannung  $\sigma$   
→ zunächst elastische Verformung,  
danach plastische Verformung



**Proportionalitätsgrenze  $P$ :**  
Abweichung von Linearität

Gerade parallel zum elastischen Bereich  
bei Dehnung von 0,002 (= 0,2 %).

→ Schnittpunkt der Gerade mit der Messkurve:  
**Ersatzstreckgrenze  $R_{p0,2}$**

# Zugverhalten metallischer Materialien

auf atomarer Ebene: **Aufbrechen von Bindungen**,

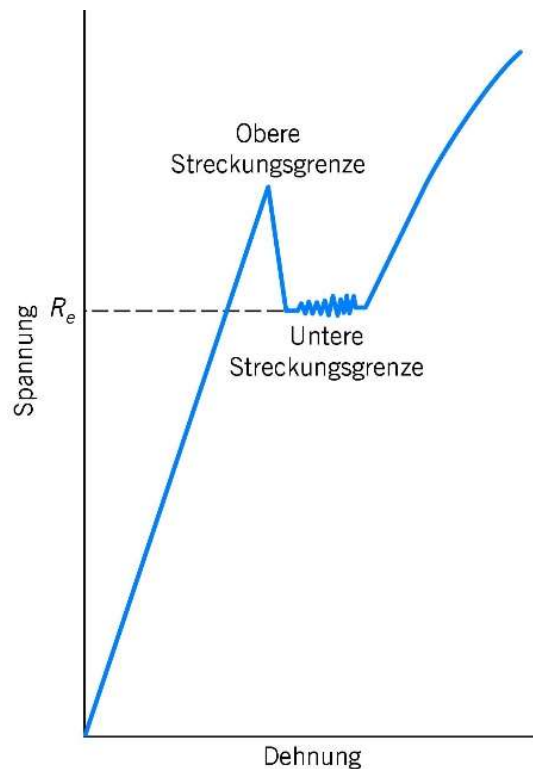
anschließende **Neubildung von Bindungen** mit anderen  
Nachbaratomen

- kristalline Festkörper:  
**Gleitprozesse** mit Versetzungsbewegungen
- nichtkristalline Materialien: viskose **Fließmechanismen**



# Streckgrenze

unterhalb der Streckgrenze erfährt der Werkstoff eine rein elastische Deformation



typische Kurve für Stahl mit ausgeprägter Streckgrenze

- an oberer Streckgrenze:  
plastische Verformung → Verminderung der Spannung
- danach konstante Spannungswerte:  
untere Streckgrenze
- danach wieder Anstieg der Spannung
- Fluktuationen: Losreißen von Versetzungen

**Streckgrenze:**

Maß für den Widerstand gegen plastische Verformung

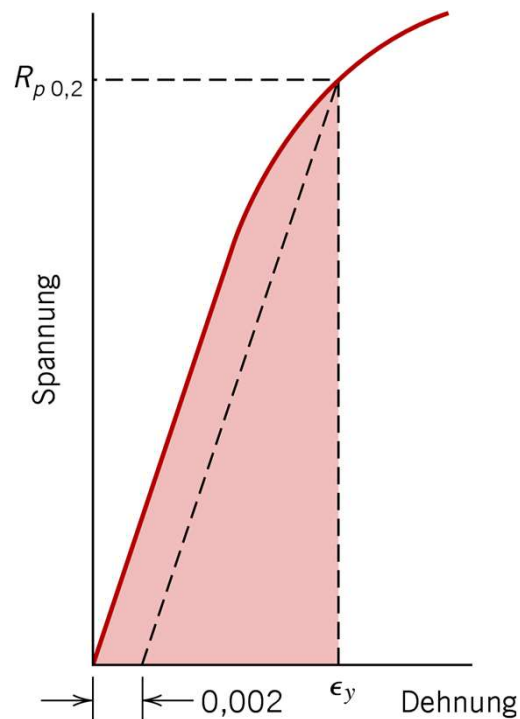
Aluminium: 35 MPa

hochfester Stahl: 1400 MPa

# Elastische Rückfederung

## Rückfederung:

Fähigkeit eines Materials, während der elastischen Verformung **Energie zu absorbieren** und diese während des Entlastungsvorgangs **wieder freizugeben**



**Rückfederungsmodul  $E_r$  (= Federkonstante):**

Fläche unterhalb der Spannungs-Dehnungs-Kurve bis zur Streckgrenze

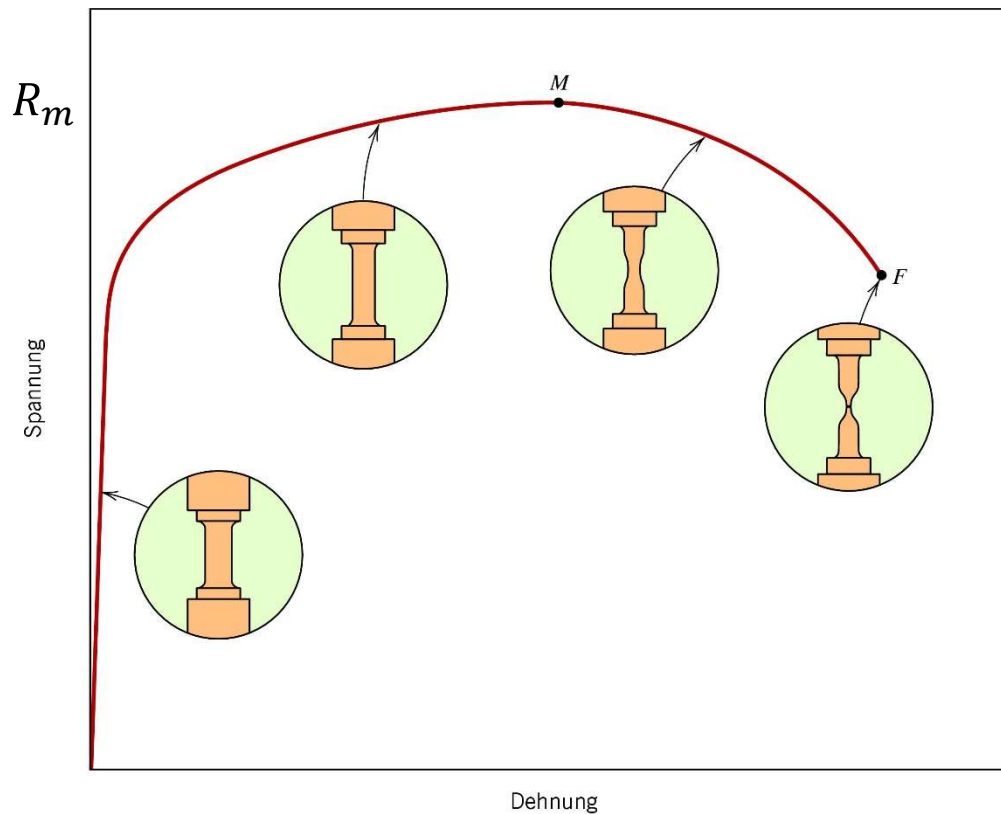
$$E_r = \int_0^{\epsilon_y} \sigma d\epsilon \approx \frac{1}{2} \sigma_y \epsilon_y = \frac{\sigma_y^2}{2E}$$

= Energieabsorption pro Volumeneinheit

→ hohes Rückfederungsvermögen für  
hohe Streckgrenze und niedrigen Elastizitätsmodul,  
gut für Federn

# Zugfestigkeit

Spannung-Dehnungs-Diagramm bis zum Bruch des Materials in Punkt F



Anstieg der Spannung  
bis zum Maximum M

$R_m$ : maximaler Spannungswert,  
**Zugfestigkeit** (50-3000 MPa)

danach **Abnahme der Spannung**  
bis zum Punkt F, dort **Bruch**

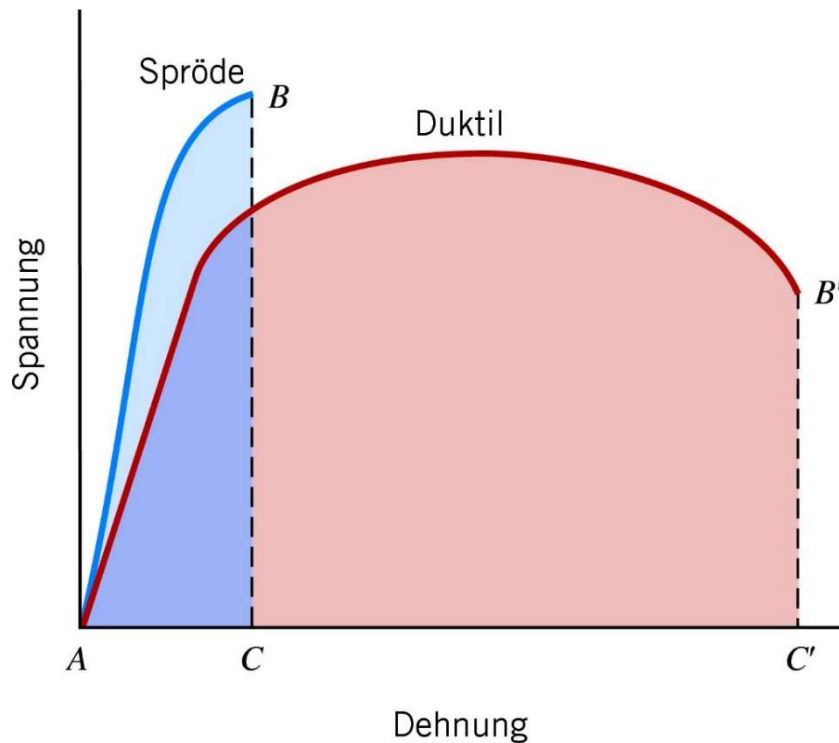
jenseits des Maximums  
**Einschnürung** des Probekörpers

**Bruchfestigkeit:**

Spannung zum Zeitpunkt des Bruchs

# Duktilität

Eigenschaft eines Werkstoffes, sich unter Zugbelastung vor einem Bruch dauerhaft plastisch zu verformen



Messung der plastischen Verformung bis zum Versagen des Materials

- **sprödes Metall:**  
nicht oder wenig plastisch verformbar, bevor Bruch eintritt  
z. B. gehärtete Stähle und Grauguss
- **duktiles Metall:**  
stark verformbar, bevor Bruch eintritt  
z. B. unlegierte Stähle und Aluminium



# Quantisierung der Duktilität

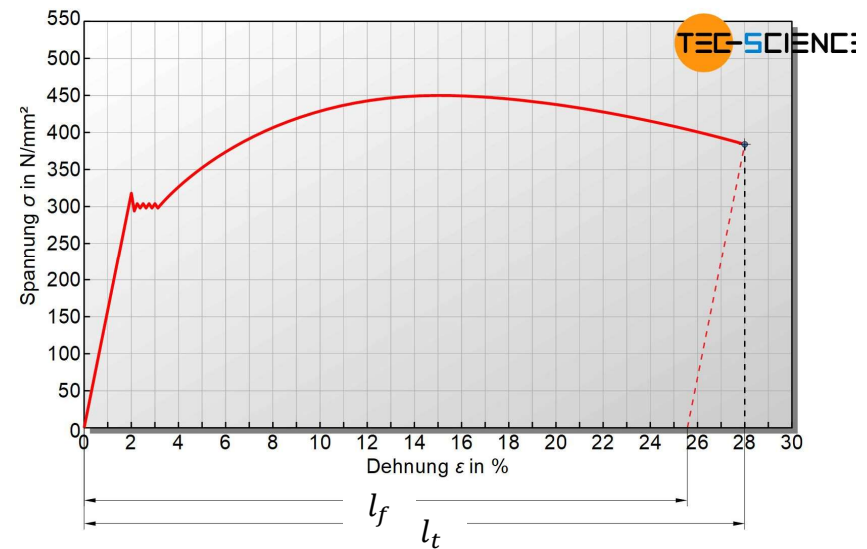
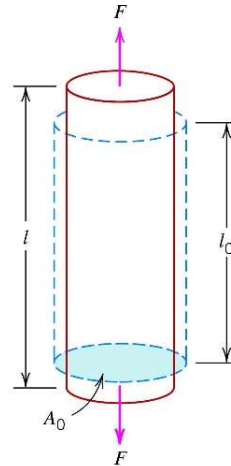
- **Bruchdehnung:**  
Verlängerung in Prozent

$$A = \frac{l_f - l_0}{l_0} \times 100$$

$l_f$ : bleibende Verlängerung nach dem Bruch

$l_0$ : Anfangslänge

wegen Einschnürung wird die Anfangslänge mit angegeben



Probe geht beim Zerreißen um Anteil der elastischen Verformung wieder zurück

- **Brucheinschnürung:** Prozent Querschnittsflächenverringern

$$Z = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100$$

$A_0$ : Ausgangsquerschnitt

$A_f$ : Querschnitt während des Bruchs

# Quantisierung der Duktilität

mechanische Eigenschaften einiger Metalle  
und Legierungen im wärmebehandelten Zustand

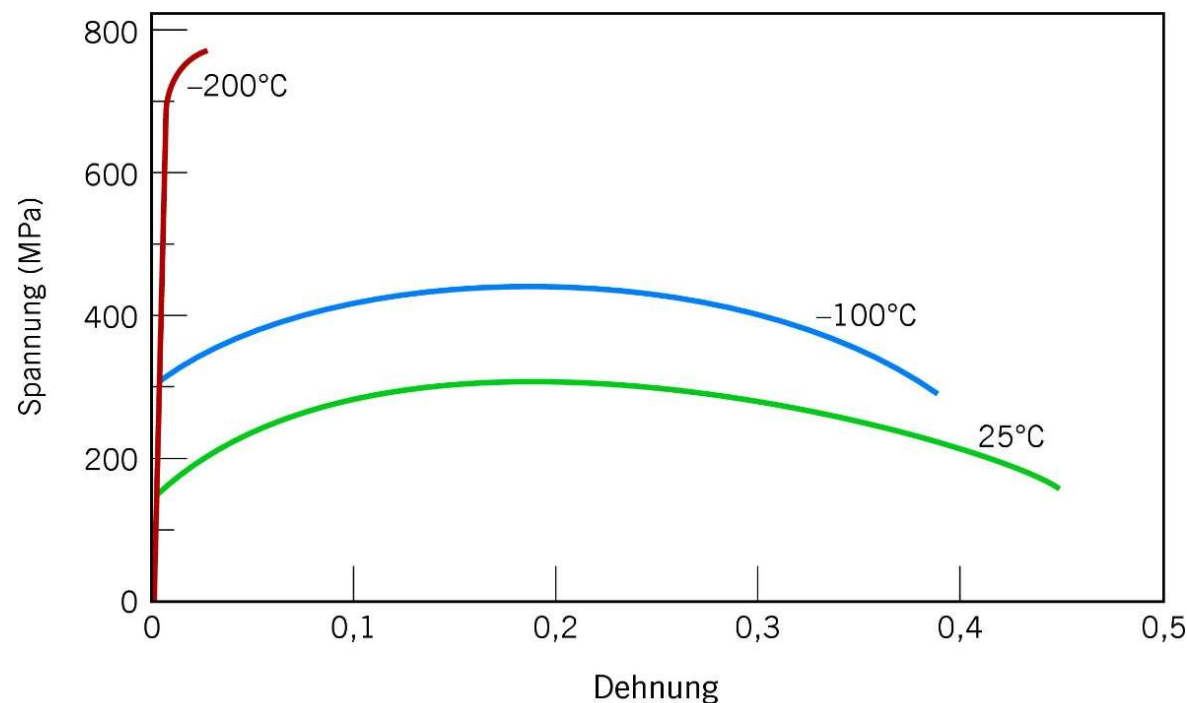
Metall/Legierung	Streckgrenze (MPa)	Zugfestigkeit (MPa)	Duktilität (Anfangsmesslänge)
Aluminium	35	90	40
Kupfer	69	200	45
Messing (70Cu–30Zn)	75	300	68
Eisen	130	262	45
Nickel	138	480	40
Stahl (1020)	180	380	25
Titan	450	520	25
Molybdän	565	655	35

Je höher die Duktilität desto besser ist die Verformbarkeit.

**Duktilität:** Grad der zulässigen Verformung während des Herstellungsprozesses, ohne dass das Material versagt

# Temperaturabhängigkeit der Duktilität

Spannungs-Dehnungs-Kurven von Eisen bei verschiedenen Temperaturen



Elastizitätsmodul, Streckgrenze und Zugfestigkeit nehmen mit zunehmender Temperatur ab.

# Bruch

unterschiedliche Bruchflächen

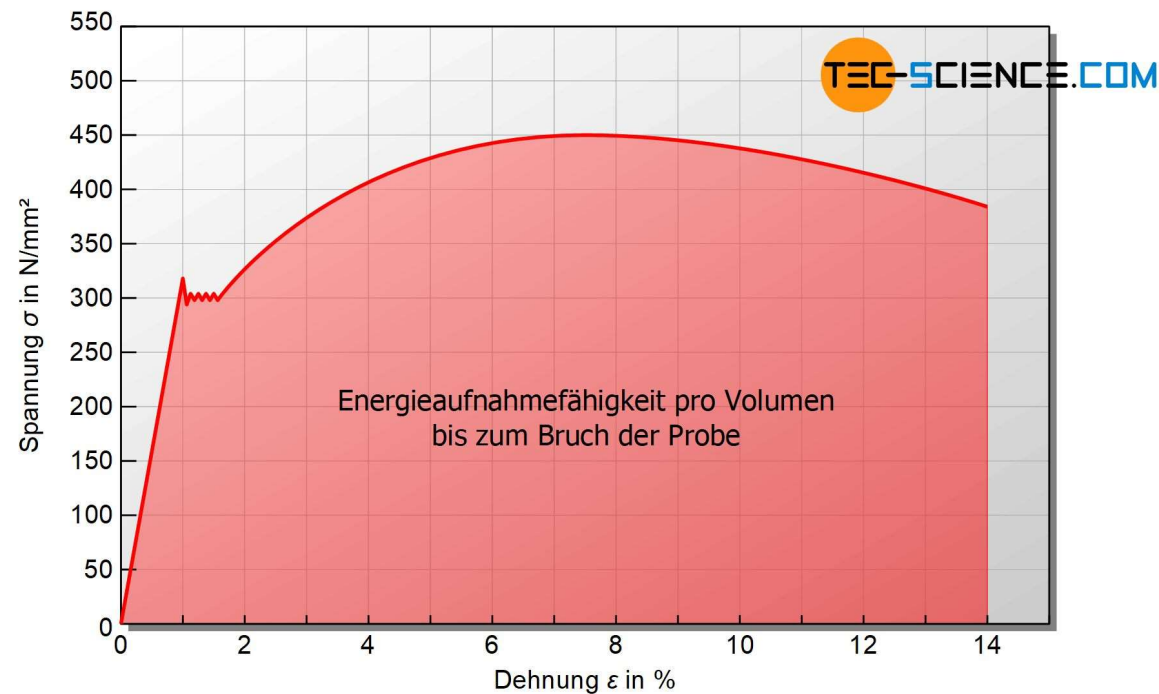
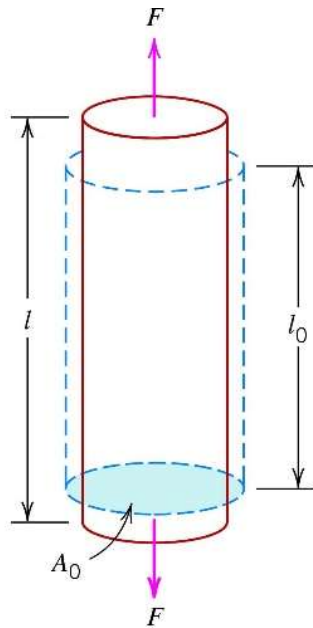


**Sprödbbruch:** (fast) nicht vorhandene Verformung und geringe Einschnürung

**Verformungsbruch:** starke Einschnürung

# Verformungsenergie

Fläche unter der Kurve der aufgenommenen Energie pro Werkstoffvolumen



z.B. Stoßfänger-Querträger soll bei einem Unfall möglichst viel Energie bei der Verformung aufnehmen



# Zähigkeit

Fähigkeit eines Materials, vor dem Bruch **Energie zu absorbieren** und sich plastisch zu verformen

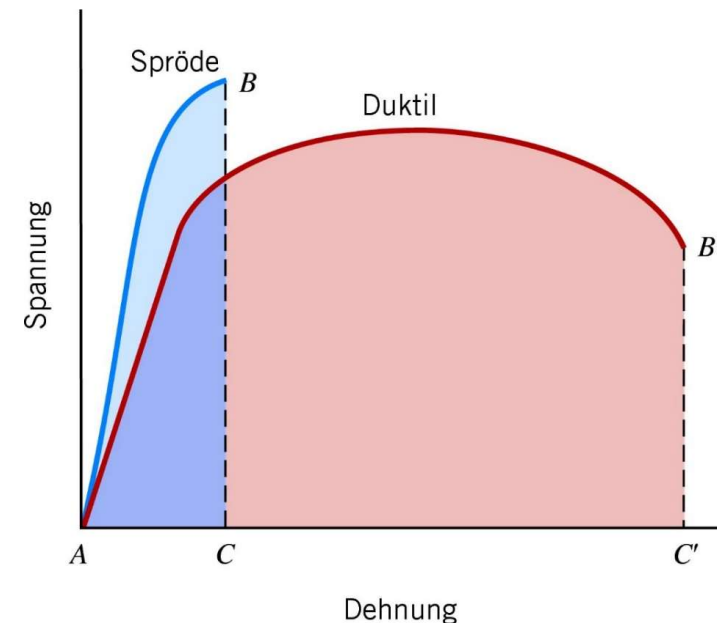
beschreibt die Widerstandsfähigkeit eines Werkstoffs gegen Bruch oder Rissausbreitung

**Maß für die Zähigkeit:**

Fläche unter Spannungs-Dehnungs-Kurve bis zum Bruch

**zähes Material:** hohe Festigkeit (= E-Modul),  
hohe Duktilität

duktiler Material hat höhere Zähigkeit  
kann Stöße und Energie absorbieren



## 7.3 Wahre Spannung und wahre Dehnung

Absinken der Spannung nach Überschreiten des Maximums ist nicht auf ein Weicherwerden des Metalls zurück zu führen, sondern liegt an der **Verringerung der Querschnittsfläche**.

wahre Spannung:  $\sigma_w = \frac{F}{A_i}$

$F$ : Kraft

$A_i$ : momentane Querschnittsfläche

wahre Dehnung:  $\varepsilon_w = \int_{l_0}^{l_i} \frac{dl}{l} = \ln\left(\frac{l_i}{l_0}\right)$

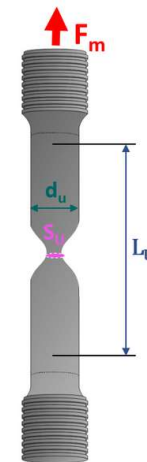
$l_i$ : momentane Länge

Annahme: keine Volumenänderung  $\rightarrow A_i l_i = A_0 l_0$

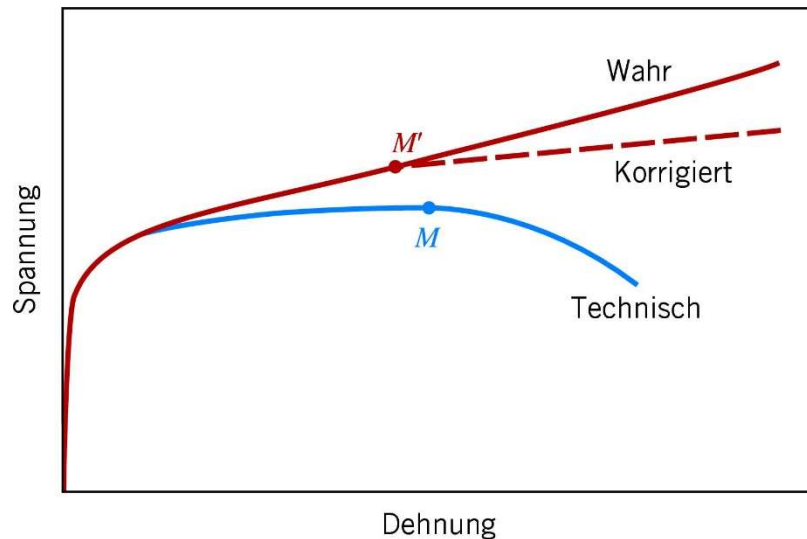
→ Zusammenhang zwischen technischen und wahren Größen,

**bis Einschnürung auftritt:**  $\sigma_w = \sigma(1 + \varepsilon)$ ,  $\varepsilon_w = \ln(1 + \varepsilon)$

**wenn Einschnürung vorhanden:** Werte müssen aus jeweiliger Kraft, Querschnittsfläche und Länge berechnet werden



# Wahre Spannungs-Dehnungs-Kurve



wahre Spannung steigt oberhalb der Zugfestigkeit ( $M'$ ) weiter an.

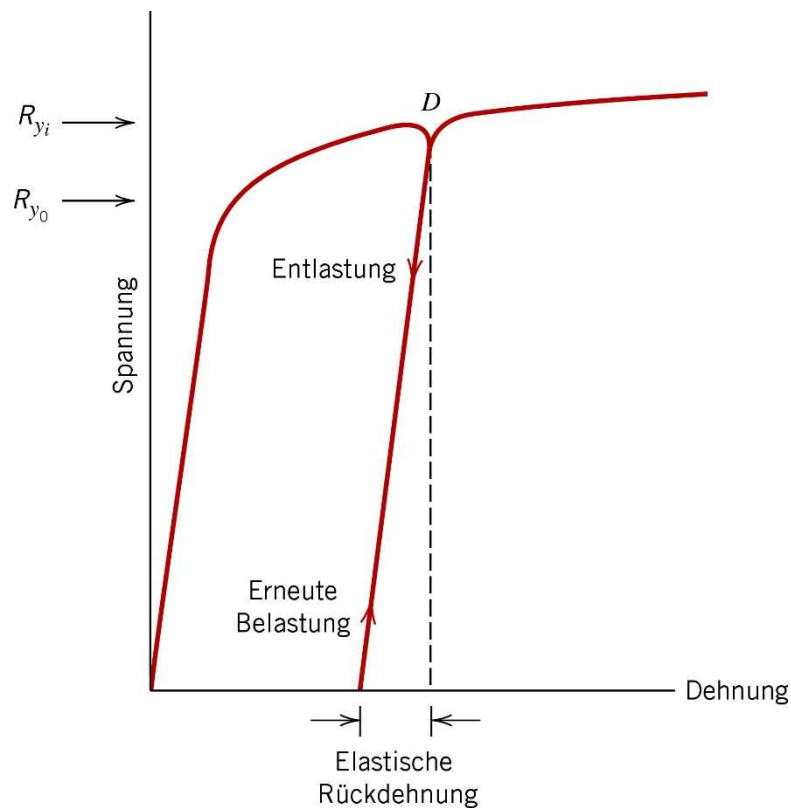
Berücksichtigung **anderer Spannungskomponenten**, wenn Einschnürung vorhanden  
→ **korrigierte axiale Spannung**

die wahre Spannung muss im Gegensatz zur technischen Spannung kontinuierlich erhöht werden, um die Probe letztlich zu zerreißen

Für den Konstrukteur ist die wahre Spannung jedoch uninteressant, da bei der Dimensionierung von Bauteilen ohnehin stets der unverformte Zustand zugrunde gelegt wird.



## 7.4 Elastische Erholung nach plastischer Verformung



Entlastung → elastische Erholung

- entlang nahezu geradlinigem Pfad
- Steigung ungefähr gleich Elastizitätsmodul
- Betrag der Dehnung, der während Entlastung zurückgewonnen wird: elastische Rückdehnung

Wiederanlegen der Last

→ Kurve nimmt denselben Verlauf

## 7.5 Härte

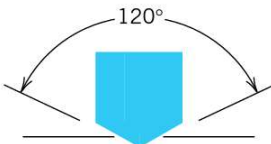



Ermittlung des **Widerstands des Materials gegen lokale plastische Verformung**,  
z. B. einen kleinen Eindruck oder einen Ritz

**Indenter** wird unter definierten Bedingungen (Prüfkraft, Prüfdauer)  
in Oberfläche des Materials gedrückt.

Tiefe oder Größe des Eindrucks → Härtewert

### z. B. Rockwell-Härteprüfung:

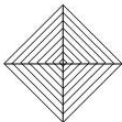
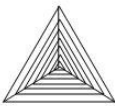


- Indenter: gehärtete Stahlkugeln  
(Durchmesser ca. 1,6-12,7 mm)
- Vergleich der Eindringtiefe  
bei geringer Vorlast und  
bei höherer Prüflast

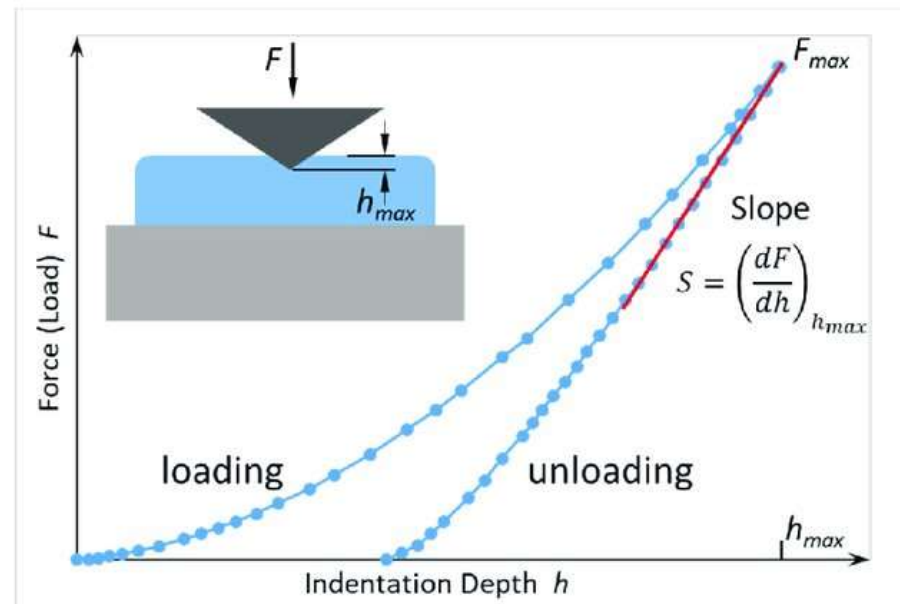
Form des Eindrucks			
Seitenansicht	Draufsicht	Last	
		60 kg	} Rockwell
		100 kg	
		150 kg	
		15 kg	} Rockwell modifiziert
		30 kg	
		45 kg	

# Nanoindentierung

## Berkovich-Type Diamant Nanoindenter



Vickers	Berkovich	Knoop	Grodzinski
			
136°	142°	172°30' 130°	

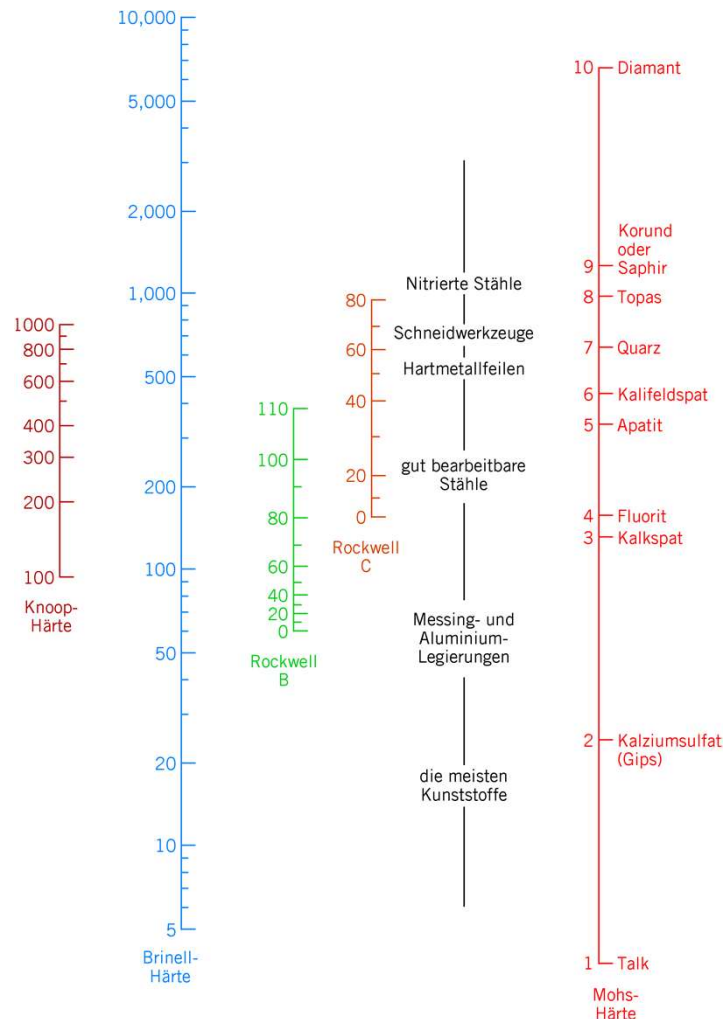


Härte  $H = \frac{F_{max}}{A_c}$  mit Kontaktfläche  $A_c$

reduzierter Elastizitätsmodul  $E_r = 0.5\sqrt{\pi}S/\sqrt{A_c}$

I. Utke et al.; *Micromachines* **11**, 397 (2020)

# Verschiedene Härteskalen



Härte ist keine exakt definierte Materialeigenschaft

es gibt für einige Materialklassen Umrechnungsverfahren für die verschiedenen Methoden

Härte und Zugfestigkeit sind annähernd proportional

## Brinell:

- Eindringen einer kleinen Stahlkugel
- Messen des Durchmessers des Eindrucks

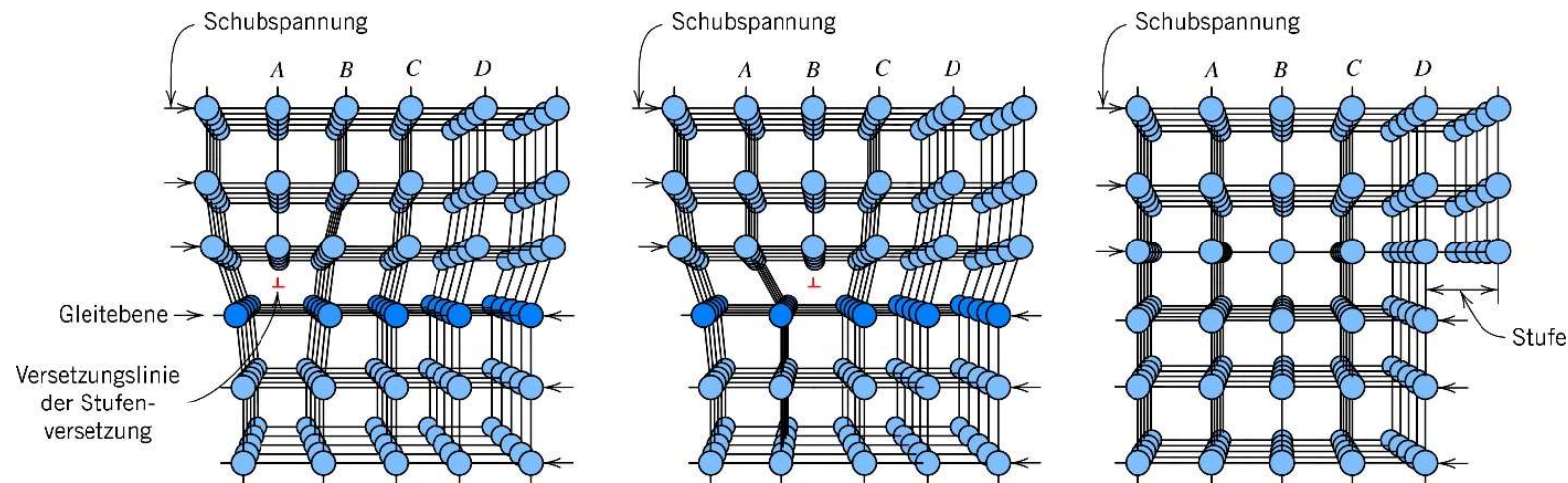
**Knoop, Vickers-Verfahren:** mikroskopisch

## 7.6 Versetzungen und plastische Verformung

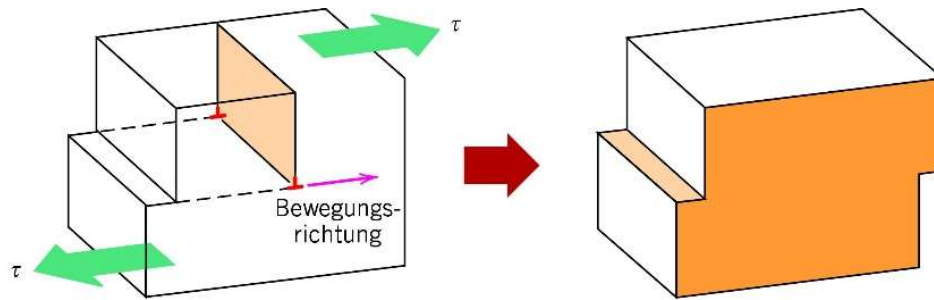
plastische Verformung:

- Bewegung großer Anzahl von Atomen
- Aufbrechen von Bindungen und Neubildung
- in kristallinen Festkörpern: meist Bewegung von Versetzungen

Schubspannung → Bewegung einer Stufenversetzung (Raupen-Bewegung)

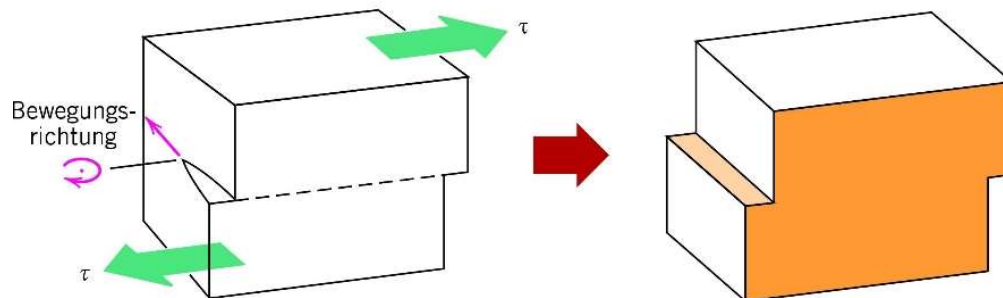


# Bewegung einer Schraubenversetzung



bei Stufenversetzung:

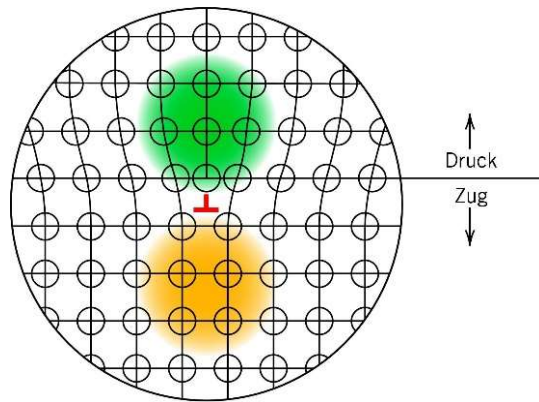
Bewegung der Versetzungslinie  
parallel zur Richtung der  
Schubspannung



bei Schraubenversetzung:

Bewegung senkrecht zur  
Richtung der Schubspannung

# Spannungen um Stufenversetzung



## Dehnungen um Versetzung

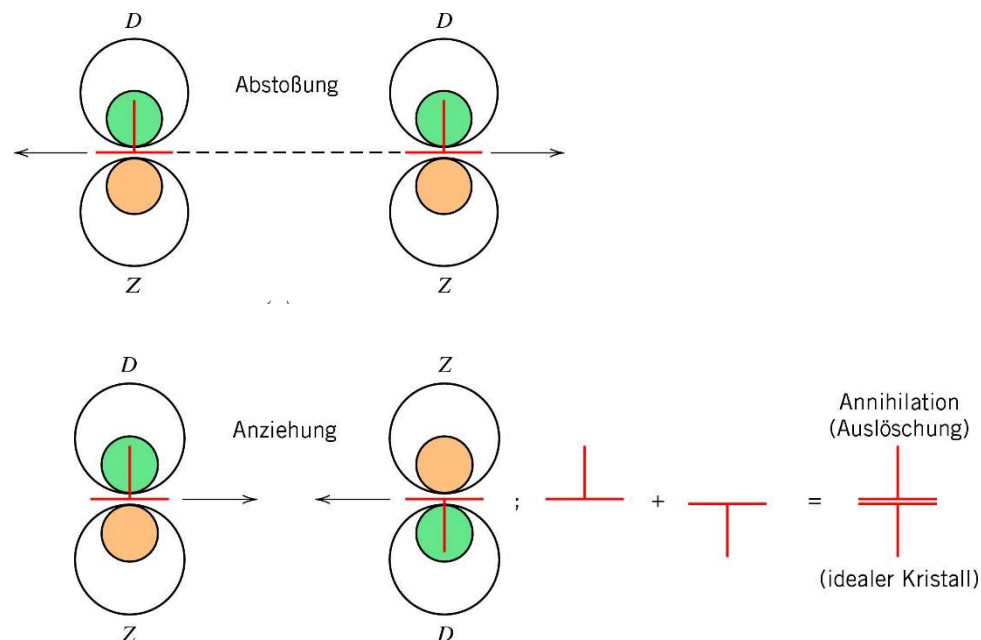
→ Einfluss auf deren Mobilität,  
Vervielfachung

um Versetzungslinie: **Gitterverzerrung**

→ Druckbeanspruchung der Atome  
oberhalb der Versetzungslinie  
→ Zugbeanspruchung unterhalb

# Spannungen um Stufenversetzung

- Versetzungen nah beieinander → Kräfte setzen sich zusammen
- Ausrichtung der Versetzungen zueinander wichtig



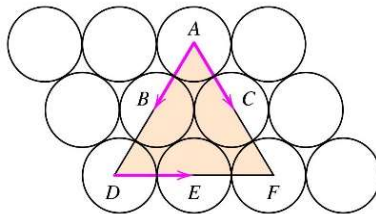
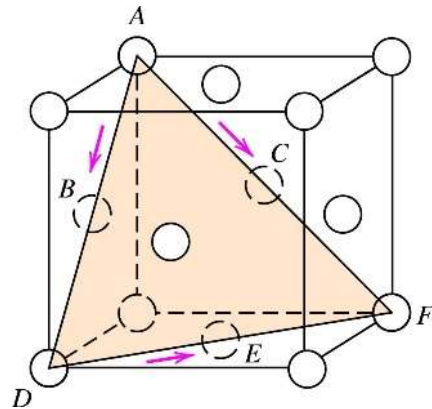
Versetzungsannihilation  
→ ideales Gitter



# Gleitsysteme

- Bewegung von Versetzungen bevorzugt entlang von Gleitebenen in Gleitrichtung (= Gleitsystem)
- Verschiebung von Atomen auf neue Gitterplätze bei Bewegung von Versetzungen am geringsten
- Gleitebene = dichtest gepackte Ebene
- Gleitrichtung = dichtest gepackte Richtung

# Gleitsysteme

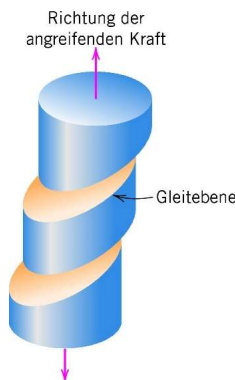


## Beispiel: fcc-Struktur

- Ebenen Schar  $\{111\}$  dichtgepackt
- Gleiten entlang  $\langle 110 \rangle$  Richtungen innerhalb  $\{111\}$ -Ebene
- Gleitsystem:  $\{111\} \langle 110 \rangle$
- es gibt mehrere Gleitrichtungen/-systeme
- mehr Gleitsysteme  $\rightarrow$  höhere Duktilität

# Fließen im Einkristall

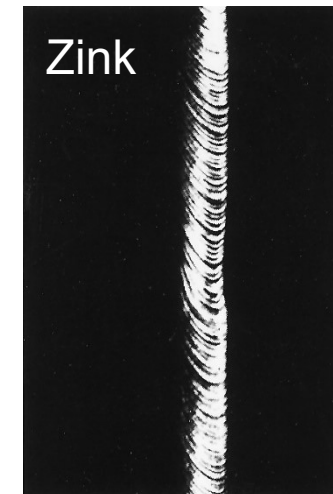
- Richtung des **Burgers-Vektors** = Versetzungsgleitrichtung
- für **fcc**-Struktur:  $\vec{b} = \frac{a}{2} \langle 110 \rangle$ ,  $a$ : Länge einer Elementarzelle
- **Winkel** zwischen der Normalen der Gleitebene und Richtung der angelegten Spannung wichtig
- Gleiten beginnt im am **günstigsten orientierten Gleitsystem**, wenn Spannung einen kritischen Wert überschreitet  
→ Fließen setzt ein



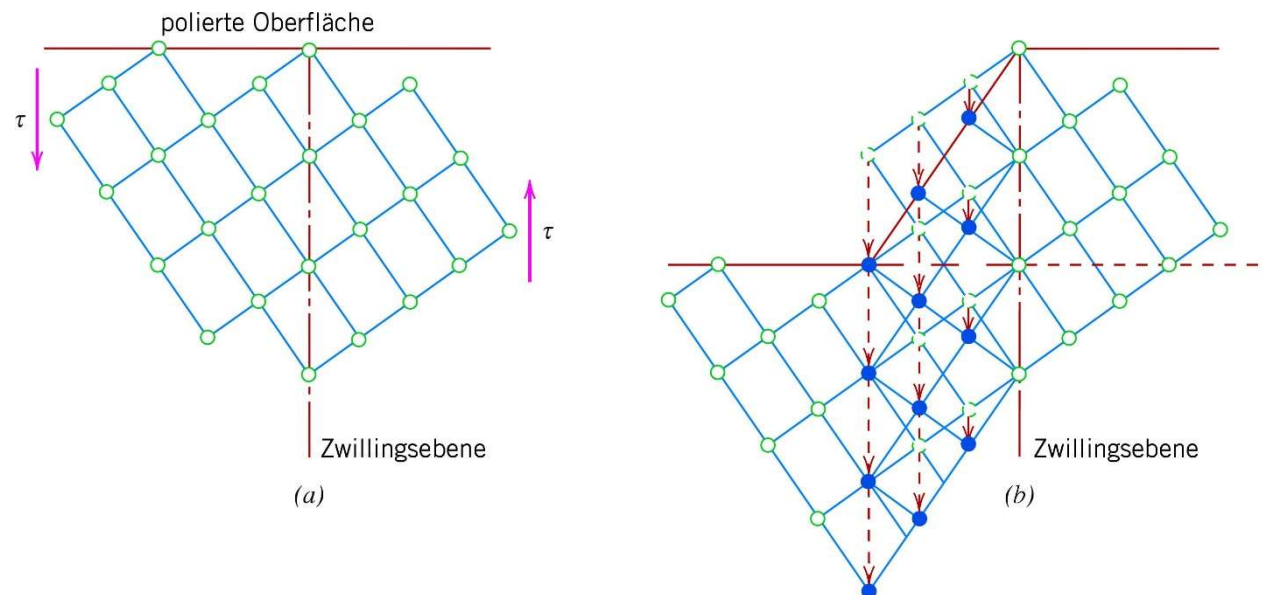
Verformung einer einkristallinen Probe unter Zugbelastung

→ Gleiten entlang günstig orientierter Ebenen und Richtungen

→ Stufen an Oberfläche

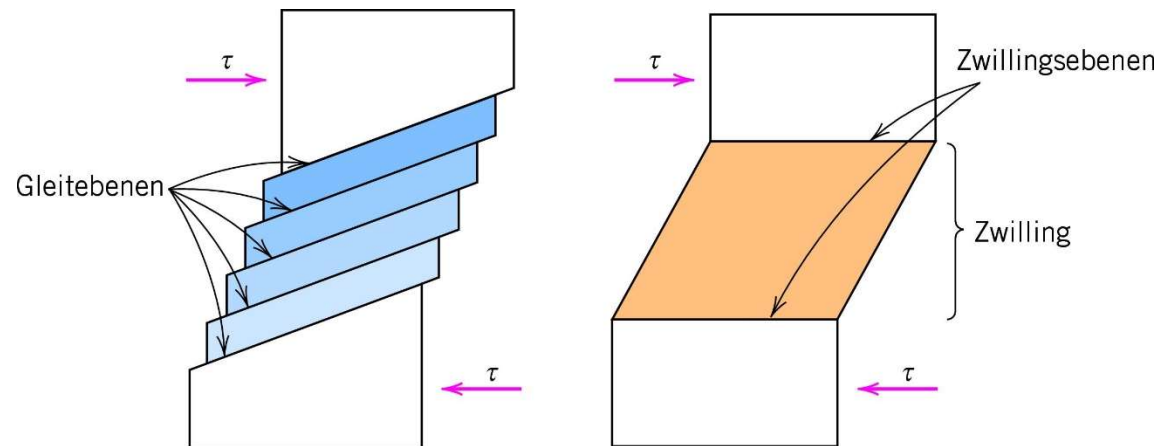


# Verformung durch Zwillingsbildung



- Schubkraft  $\rightarrow$  Atome werden auf einer Seite so auf Positionen verschoben, dass sie einen Zwilling bilden
- Verschiebung proportional zum Abstand von der Zwillingssebene
- bcc-Struktur: Zwillingssebene ist (111)-Ebene, Richtung [112]

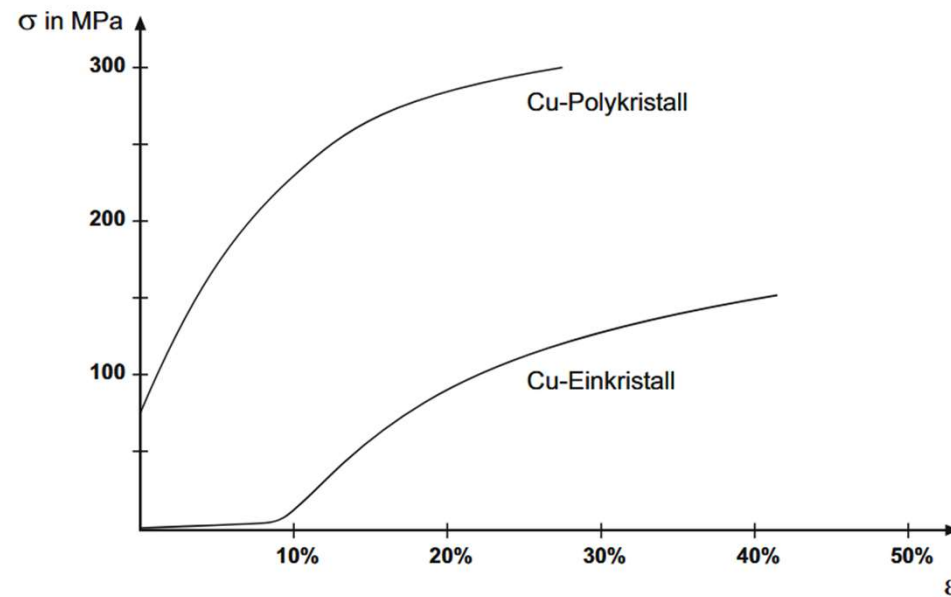
# Verformung durch Zwillingsbildung



- im Kontrast zu den Gleitbändern (links) ist die Schubverformung bei der Zwillingsbildung homogen (rechts)
- Zwillingsbildung tritt auf, wenn Gleiten eingeschränkt ist, z.B. bei Stoßbeanspruchung
- Zwillingsbildung → kristalline Neuorientierung  
→ Entstehung neuer, günstig orientierter Gleitsysteme

# Plastische Verformung von Polykristallen

für Polykristalle werden für die plastische Verformung höhere Spannungen benötigt als für Einkristalle

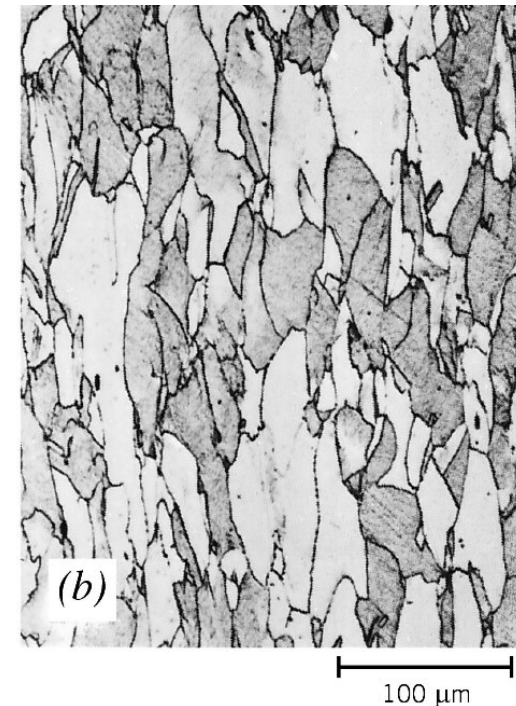
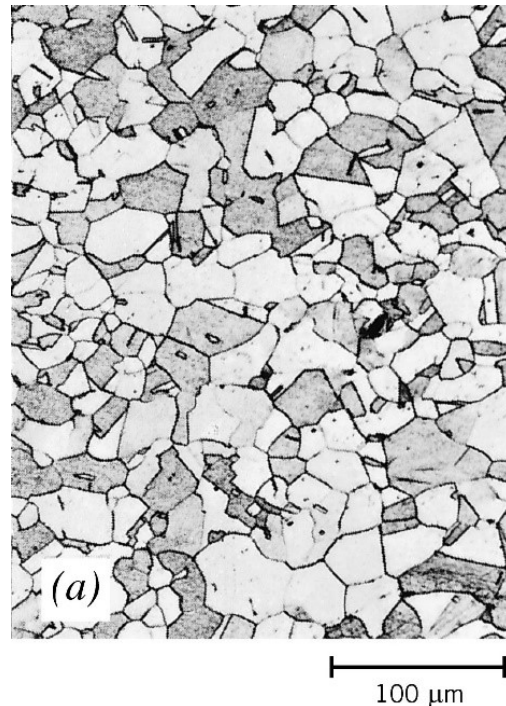


# Plastische Verformung von Polykristallen

polykristallines Kupfer



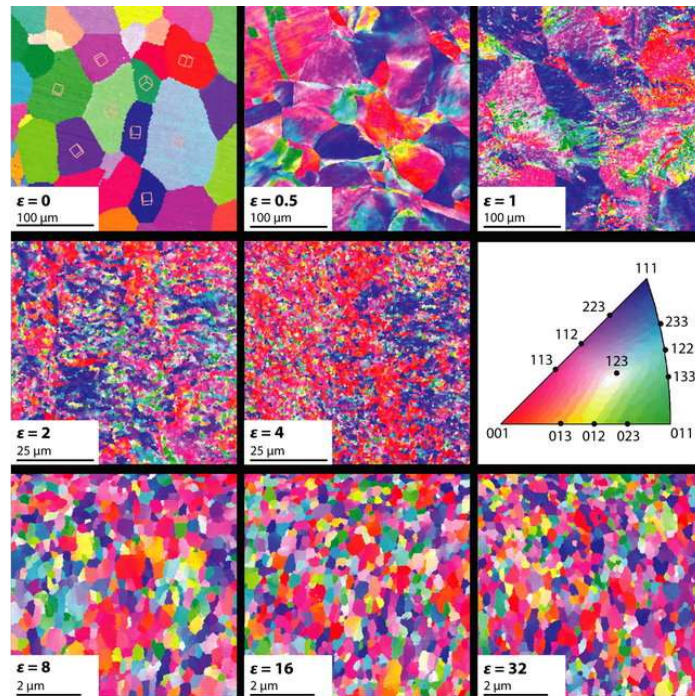
- Gleitrichtung variiert von einem Korn zum andern
- Verformung der einzelnen Körner durch Gleiten, dabei bleiben Körner und Korngrenzen intakt, lediglich Verlängerung der Körner






# Mikrostrukturfragmentierung unter plastischer Deformation

Kristallorientierungskarten (oft als inverse Polfigurenkarten bezeichnet) von HPT-verformtem polykristallinem reinem Ni bei verschiedenen Dehnungen



Verformung durch Hochdrucktorsion (HPT):  
Benachbarte Kristalle üben Spannungen  
aufeinander aus, so dass die lokale Spannung  
innerhalb eines Korns variiert.

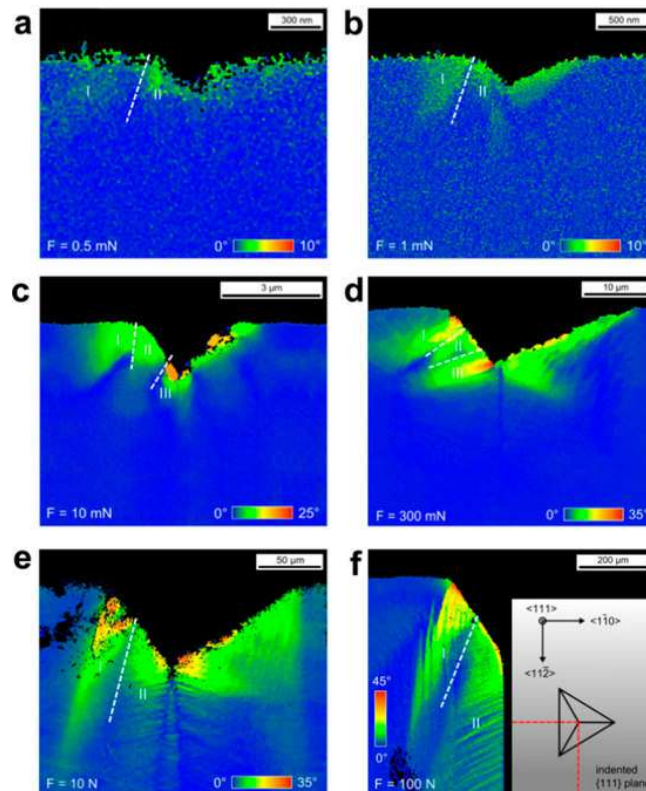
Dehnungen von 0,5 und 1: Fläche von  $400 \times 400 \mu\text{m}$ ,  
Dehnungen von 8 – 32: Fläche von  $7 \mu\text{m} \times 7 \mu\text{m}$ .

 Pippan R, et al. 2010.  
Annu. Rev. Mater. Res. 40:319–43



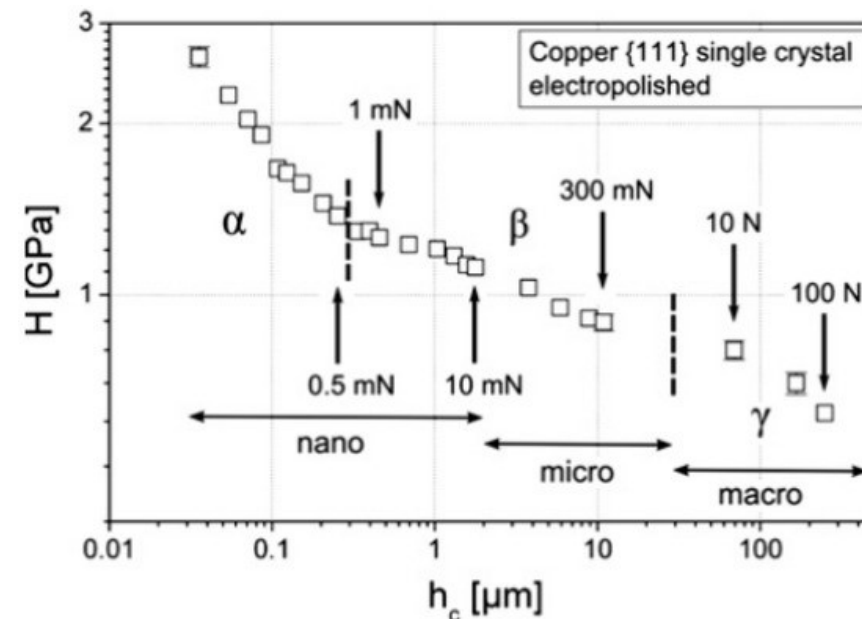
# Indenter induzierte plastische Zonen

Fehlorientierungskarten von Indentierungen (Vertiefungen) in Kupfer



Belastungen von (a-d) 0,5, 1, 10, 300 mN;  
(e) 10 N und (f) 100 N

Änderungen in der Entwicklung des Mikrogefüges spiegeln sich in der Härtekurve wider

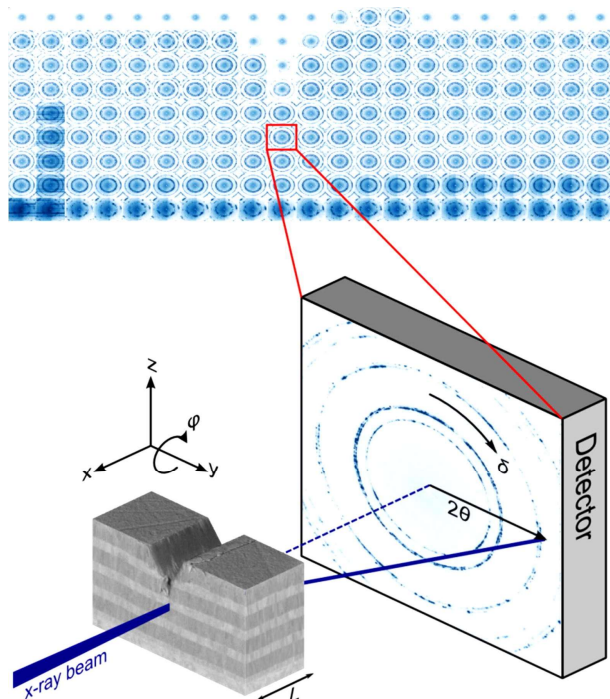


Härte eines Materials variiert mit der Größe des Eindrucks

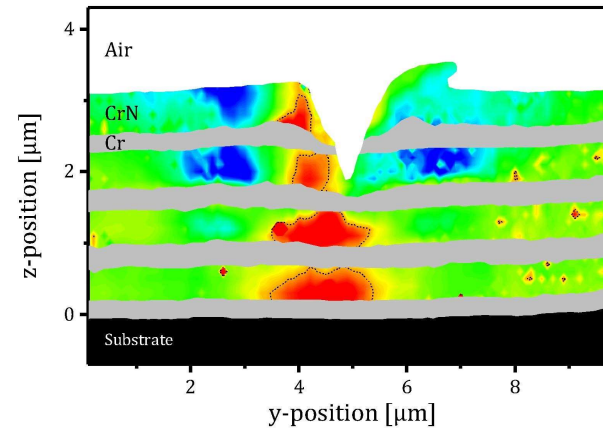
# Dünnschichtsystem

Spannungsverteilung in einer indentierten mehrschichtigen CrN-Cr-Dünnschicht

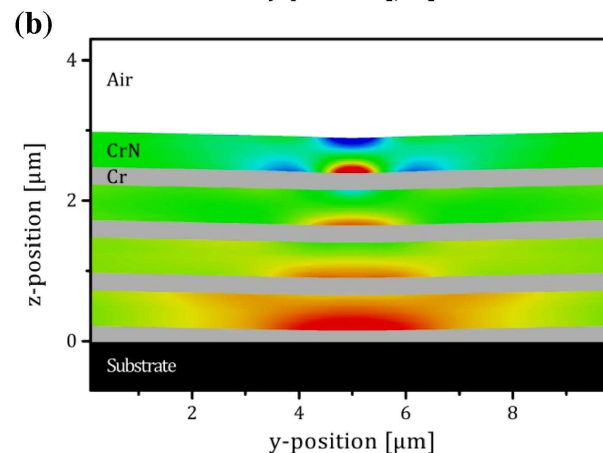
lokales Röntgenstreuexperiment



(a) Stress [GPa] 2 0 -2 -4 -6 -8 -10



experimentelle



und  
modellierte

Eigenspannungs-  
verteilung in  
CrN-  
Subschichten

## 7.7 Zusammenfassung

Kriechexperimente im Zugversuch

→ plastische Verformung, Streckungsgrenze, Bruch

spröde und duktile Materialien

elastische Rückfederung, Zähigkeit

wahre Spannung und wahre Dehnung

elastische Erholung

Härte

Bewegung von Versetzungen bei plastischer Verformung

- im Einkristall u.U. Annihilation von Versetzungen, Bewegung in Gleitsystemen
- im Polykristall Verformung der Kristallite oder Zwillingsbildung