

Mechanische Eigenschaften, Kennwerte, Prüfungsmethoden

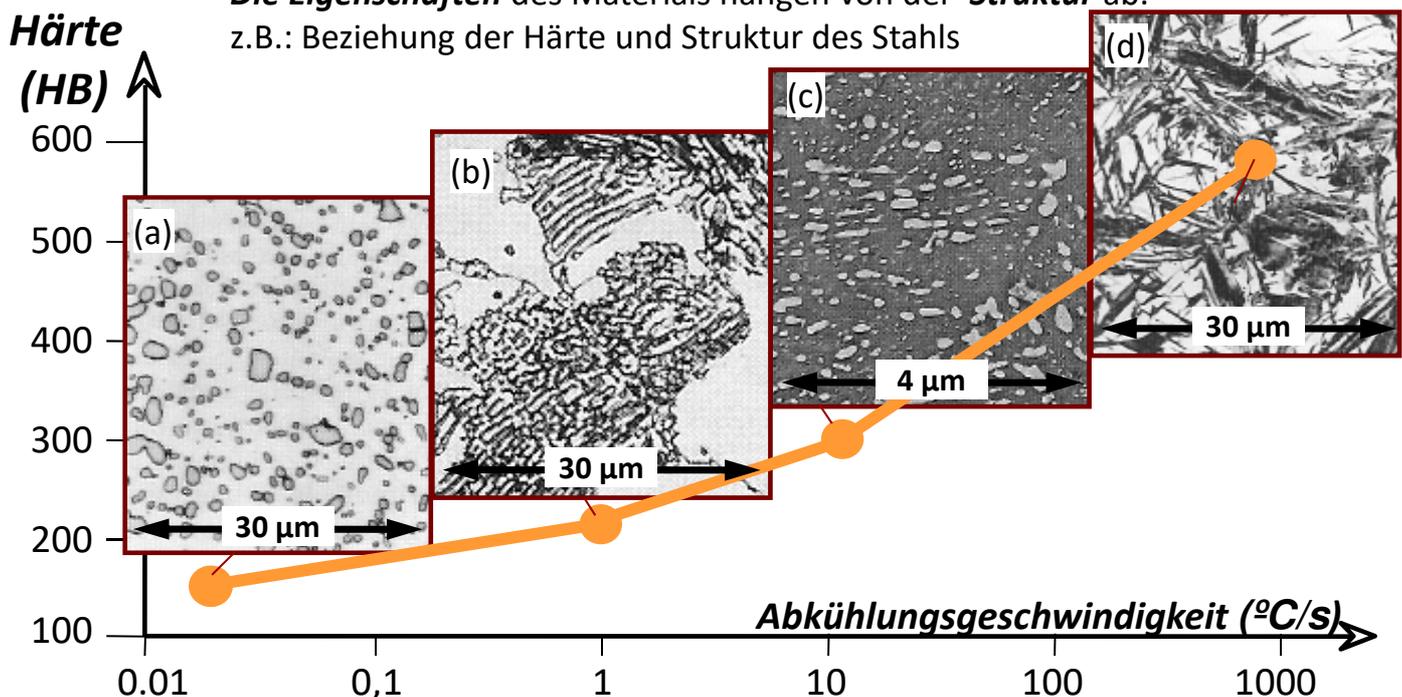
- Einführung,
- elastische, plastische Verformung
- einfache Beanspruchungen
- Zugprüfung und deren Kennzahlen
- Druck-, Biege-, und Drehversuch
- Härteprüfungen und deren Anwendungsbereiche

- Die grundlegende Gruppierung der Materialeigenschaften,
- die Eigenschaften der elastische, plastische Verformung,
- die Begriffe reelle und Ingenieur Spannung und System,
- die Materialeigenschaften der elastischen Körper,
- mit der Zugversuch ermittelbare Verformungs-, Spannungs-, und Zähigkeitskennzahlen,
- die statischen und dynamische Härteprüfungen und die Kennzahlen der einzelnen Methoden kennenlernen.

Folie: 3

Die Eigenschaften des Materials hängen von der **Struktur** ab.

z.B.: Beziehung der Härte und Struktur des Stahls

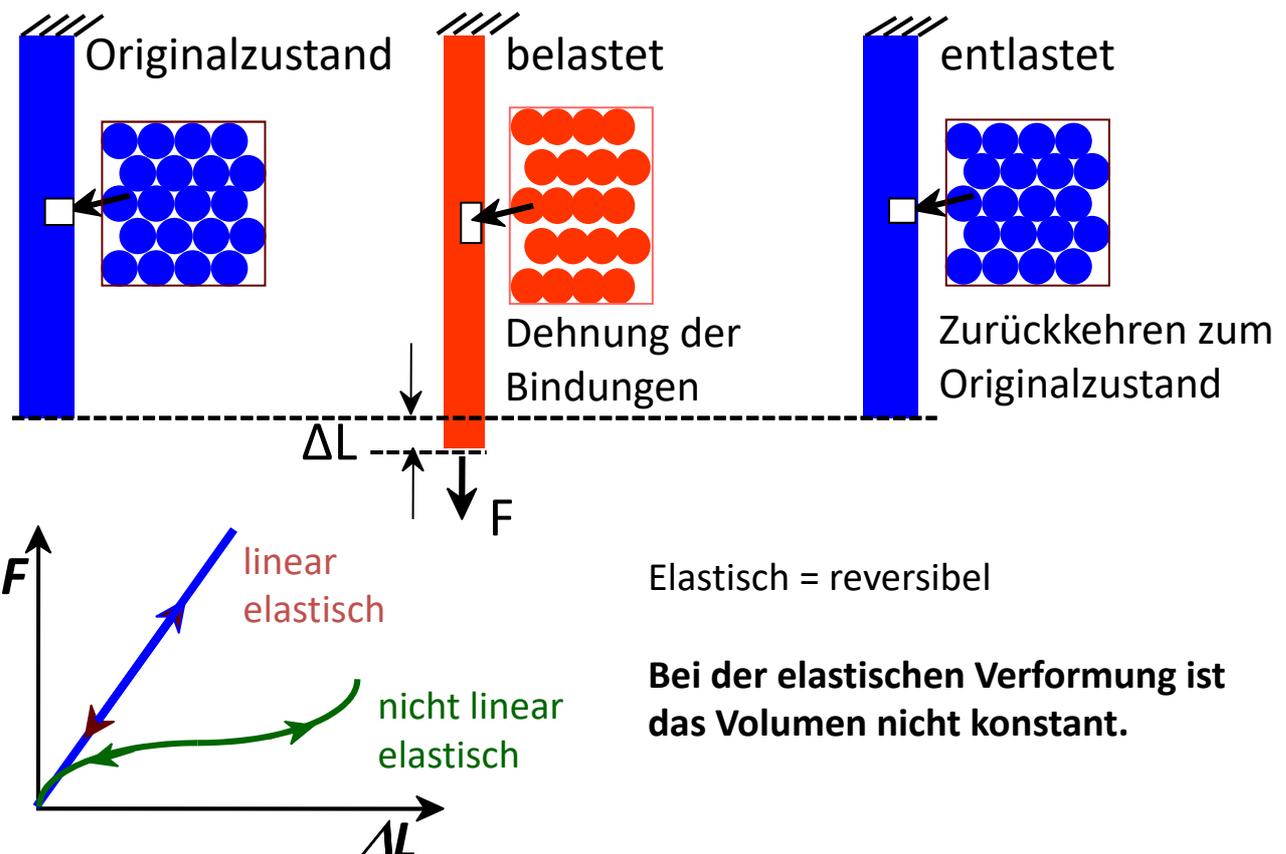


Prozeß kann **die Struktur** ändern. (z.B.: Strukturänderung abhängig von der Abkühlungsgeschwindigkeit)

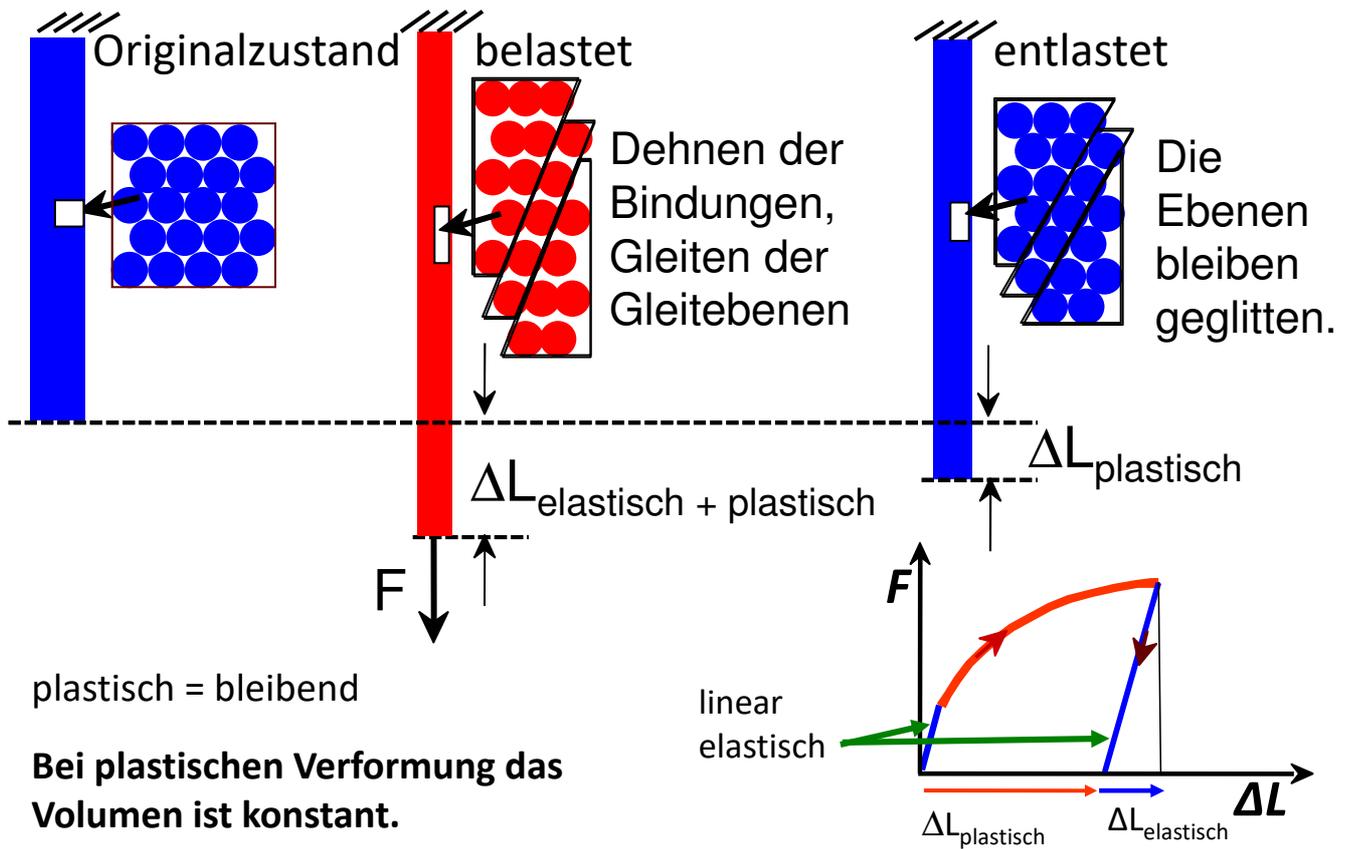
Folie: 4

- **Mechanische** (Belastung und Verformung)
- **Elektrische** (elektrisches Feld)
- **Thermophysische** (Temperaturfeld)
- **Magnetische** (magnetisches Feld)
- **Optische** (elektromagnetisches Feld)
- **Chemisch**

Folie: 5



Folie: 6



Verformung

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0}$$

Spannung

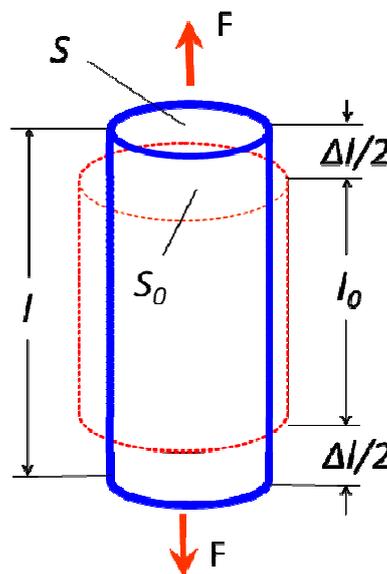
$$\sigma = \frac{F}{S_0} \approx \frac{F}{S}$$

elastischer Zustand

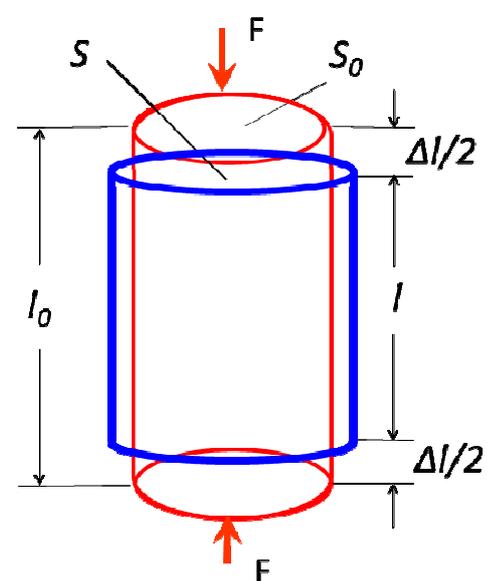
$$\sigma = E \varepsilon$$

(Hookesche-Gesetz)

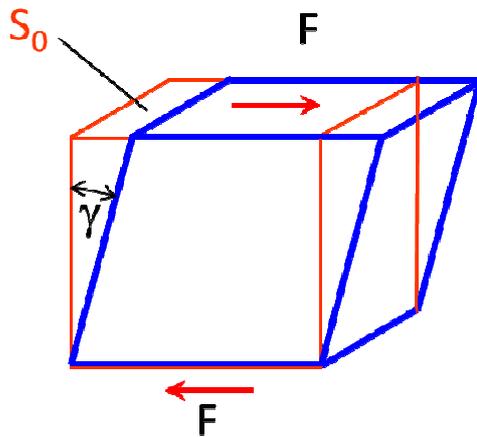
Zug



Druck



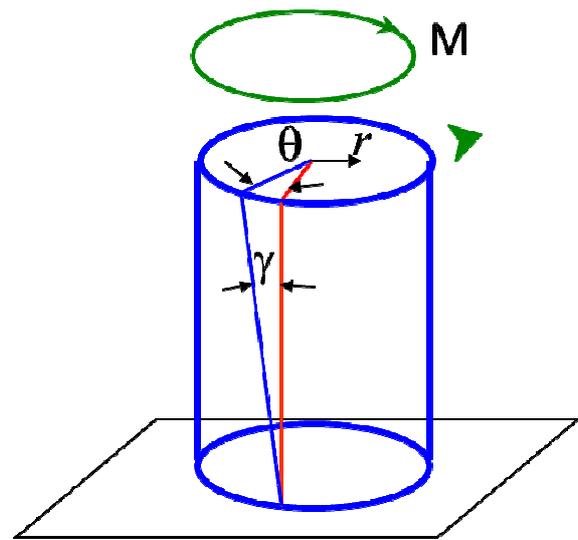
Scheren (einfaches)



$$\tau = \frac{F}{S} \approx \frac{F}{S_0} \quad \text{elastischer Zustand}$$

$\tau = G\gamma$

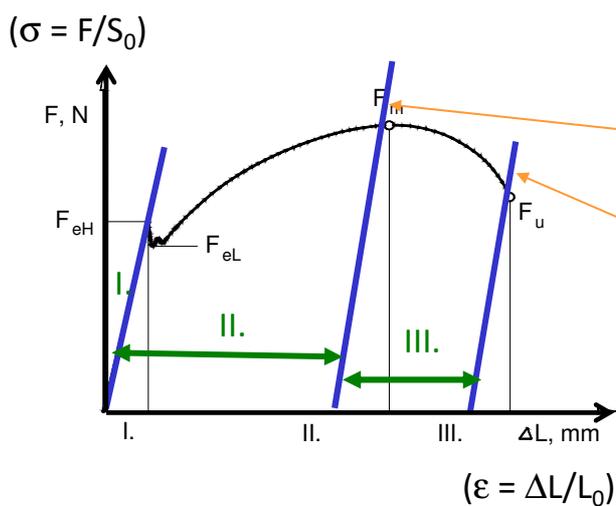
Drehen



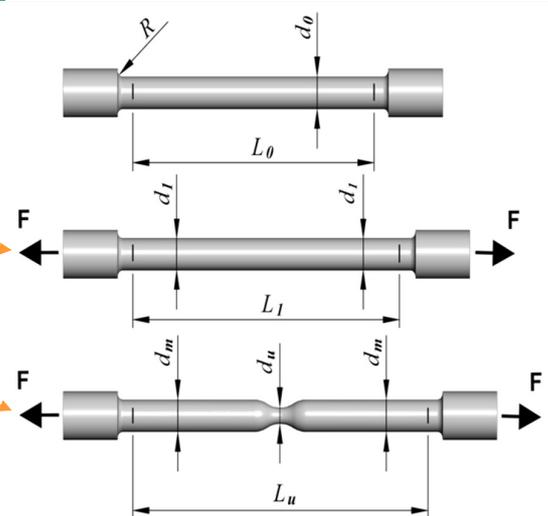
$$\tau = \frac{M}{I_p} r$$

Zugversuch

Zugversuchsdiagramm



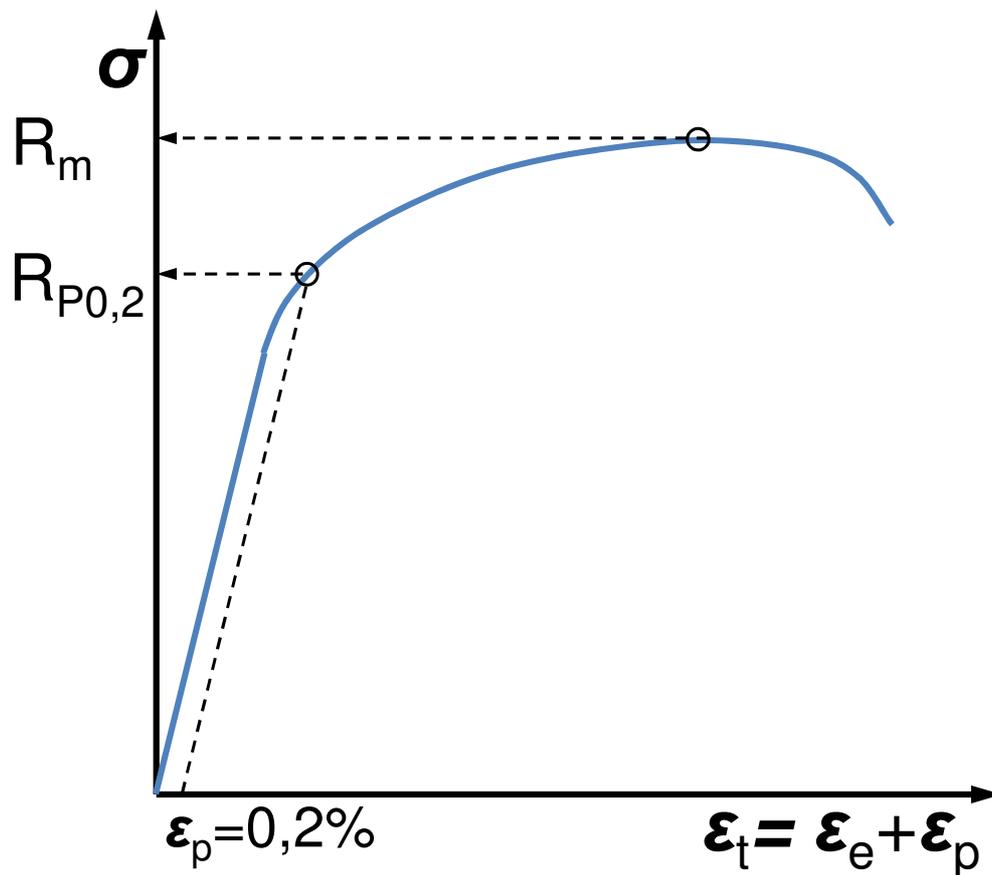
- I. elastische Verformung
- II. gleichmäßige plastische Verformung
- III. Einschnürung



$$s_0 = \frac{(d_0)^2 \pi}{4}$$

$$s_m = \frac{(d_m)^2 \pi}{4}$$

$$s_u = \frac{(d_u)^2 \pi}{4}$$



Folie: 11

Spannungskennzeichen

Streckgrenze (MPa)

$$R_e = \frac{F_e}{S_0}$$

$$R_{eH} = \frac{F_{eH}}{S_0}, \quad R_{eL} = \frac{F_{eL}}{S_0}$$

$$R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_0}$$

Zugfestigkeit (MPa)

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}$$

Verformungskennzeichen

Einschnürung

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} 100 \quad (\%)$$

Bruchdehnung

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} 100 \quad (\%)$$

Folie: 12

Ingenieursystem

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0}$$

$$\varepsilon = \frac{S_0}{S} - 1$$

$$\sigma_E = \frac{F}{S_0}$$

$$W_c = \int_0^{\varepsilon_u} \sigma_E d\varepsilon$$

Verformung
(-)

Spannung
(MPa)

**spezifische
Brucharbeit**
(J/cm³)

wahres System

$$\varphi = \ln \frac{l}{l_0}$$

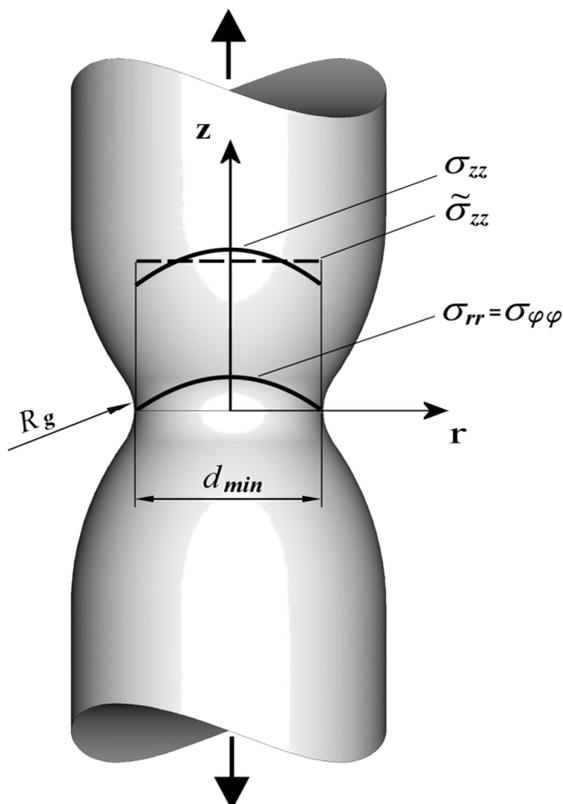
$$\varphi = \ln \frac{S_0}{S}$$

$$\sigma_T = \frac{F}{S}$$

$$W_c = \int_0^{\varphi_u} \sigma_T d\varphi$$

Folie: 13

Spannungs- und Verformungszustand bei der Einschnürung



$$\sigma_{zz} = \bar{\sigma} \left[1 + \ln \left(1 + \frac{r_{\min}^2 - r^2}{2r_{\min} R_g} \right) \right]$$

$$\sigma_{rr} = \sigma_{\varphi\varphi} = \sigma_{zz} - \bar{\sigma}$$

$$\varphi_z = 2 \ln \frac{d_0}{d_{\min}}$$

$$\varphi_r = \varphi_{\varphi} = \ln \frac{d_{\min}}{d_0}$$

$$\bar{\varphi} = \varphi_z$$

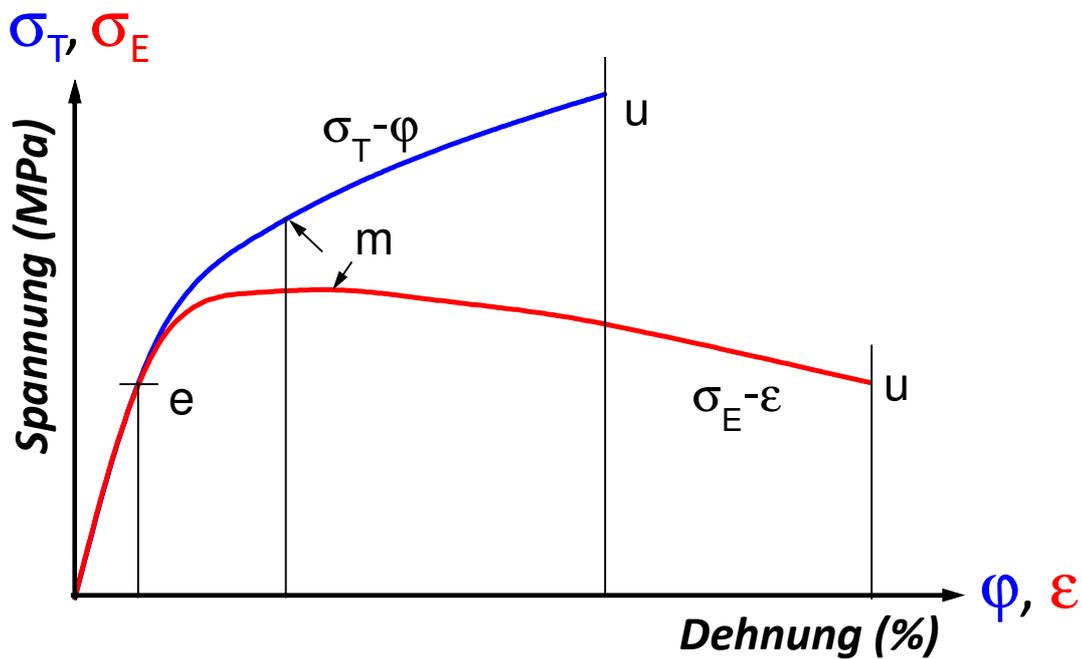
$\bar{\sigma}$ – gleichmäßige Spannung,

$\bar{\varphi}$ – gleichmäßige Verformung

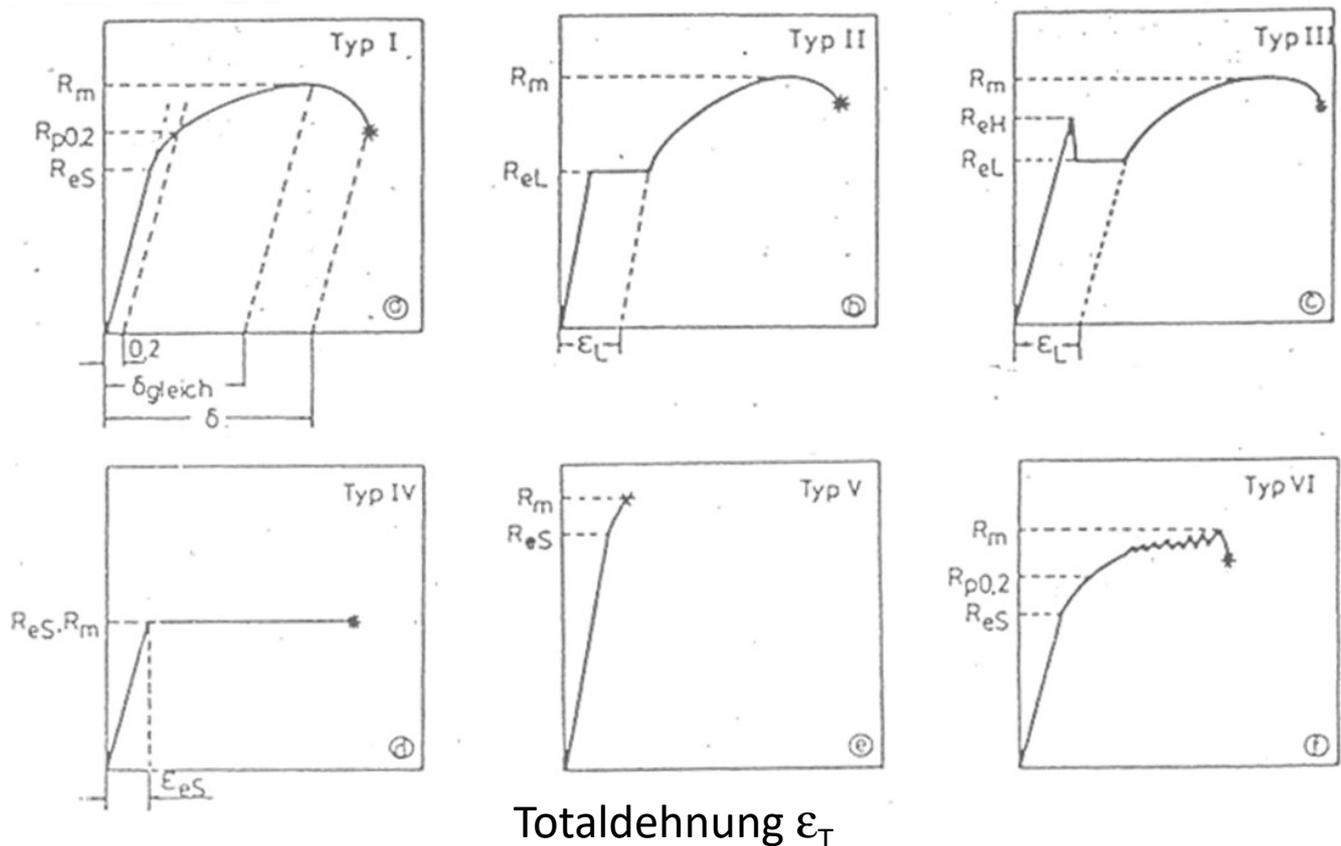
Folie: 14

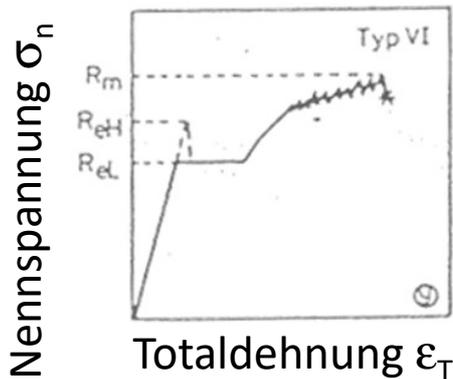
$$F = \sigma_T S = \sigma_E S_0 \Rightarrow \sigma_T = \sigma_E (1 + \varepsilon)$$

$$\varphi = \ln(1 + \varepsilon)$$



Nennspannung σ_n





- Typ I : Ohne Streckgrenzenerscheinungen
- Typ II : Mit ausgeprägter Streckgrenze und inhomogenem Dehnungsbereich
- Typ III : Mit oberer und unterer Streckgrenze und inhomogenem Dehnungsbereich
- Typ IV : Mit ideal elastisch-plastischem Dehnungsverhalten
- Typ V : Mit extrem reduziertem elastisch-plastischen Dehnungsbereich
- Typ VI : Mit unregelmäßigen Spannungsabfällen im elastisch-plastischen Dehnungsbereich

Beispiele:

- Typ I : Reine Kfz. Metalle (Cu, Ni, Al)
Austenitische Stähle (X2CrNi18 8)
Vergüteter Stahl (Ck60)
- Typ II : Viele Cu-Basislegierungen
Al-Basislegierungen
- Typ III : Ferritisch-perlitische Stähle
VA- und VIA-Metalle mit Zusätzen von C, N, H
- Typ IV : Viele metallische Werkstoffe bei hinreichend hohen Temperaturen
- Typ V : Martensitisch gehärtete unlegierte Stähle
- Typ VI : Legierungen mit hinreichend großen Konzentrationen an Interstitions- oder/und Substitutionsatomen in bestimmten Temperaturbereichen

Elastizitätsmodul
E (Young Modul)

Hookesche-Gesetz:

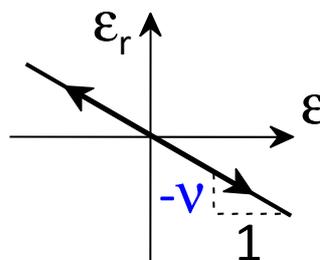
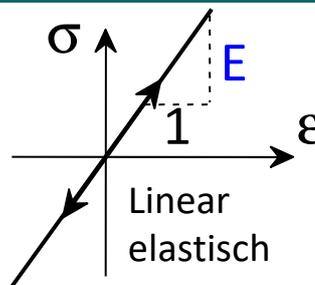
$$\sigma = E \epsilon$$

Poisson-Faktor, ν :

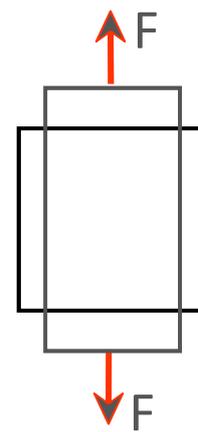
$$\nu = - \frac{\epsilon_{\text{quer}}}{\epsilon_{\text{längs}}}$$

- Metalle: $\nu \sim 0,33$
- Keramik : $\nu \sim 0,25$
- Polymere : $\nu \sim 0,40$

Maßeinheiten: E: (GPa) oder (MPa)
 ν : dimensionslos



ϵ_r - radiale Verformung



einachsige Beanspruchung

$$E_{\text{Keramik}} > E_{\text{Metall}} \gg E_{\text{Polymer}}$$

Schubmodul, G

Hookesche-Gesetz:

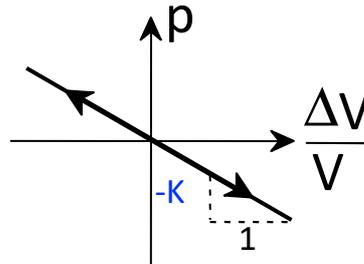
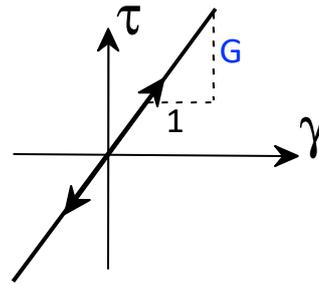
$$\tau = G \gamma$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

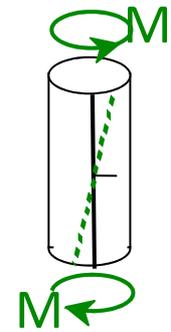
Kompressionsmodul, K

$$K = -\frac{p}{\Delta V / V}$$

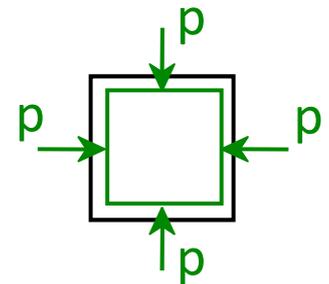
$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}$$



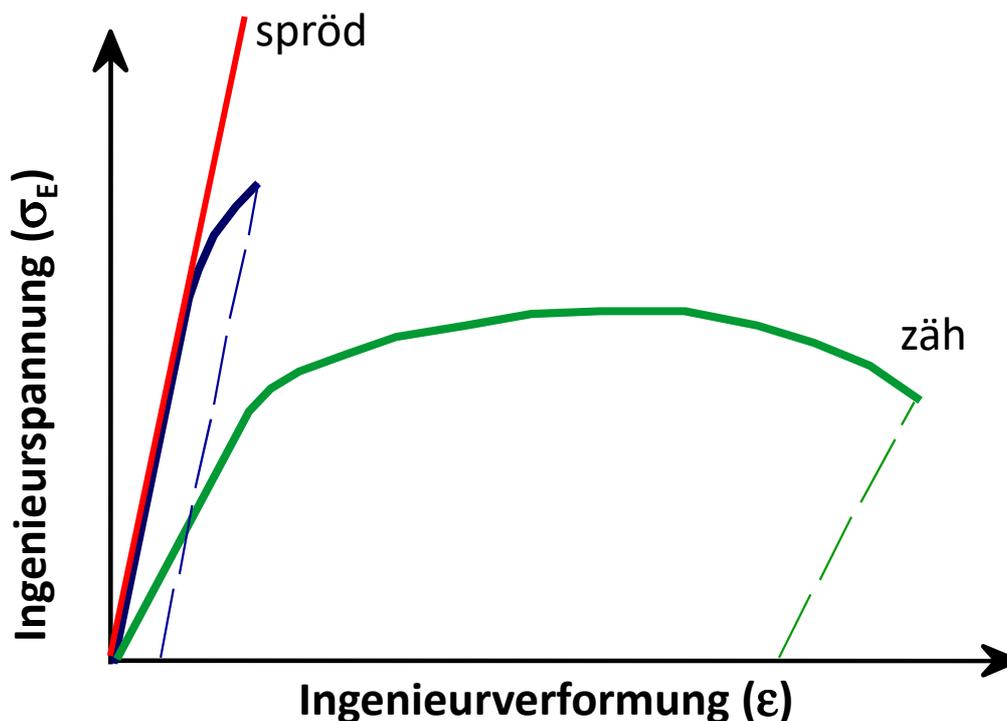
Hydrostatischer Druck
Ausgangsvolumen : V_0
Volumenänderung: ΔV



Drehunter-
suchung



Folie: 19



plastische Verformung nahe der Null \Rightarrow **spröd**
plastische Verformung bedeutend \Rightarrow **zäh**

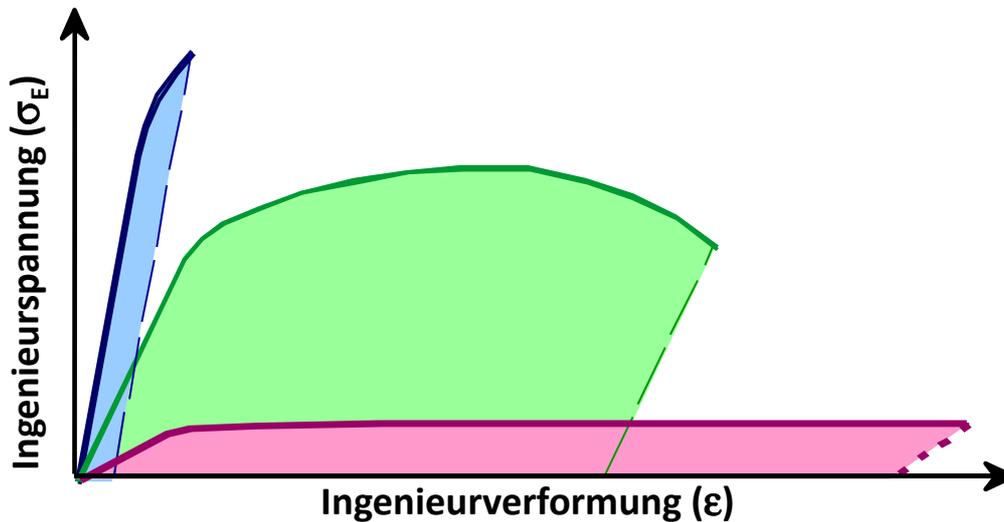
Folie: 20

Die Energieabsorptionsfähigkeit bis zum Bruch

Keramik: kleine Zähigkeit (große Festigkeit, sprödes Benehmen)

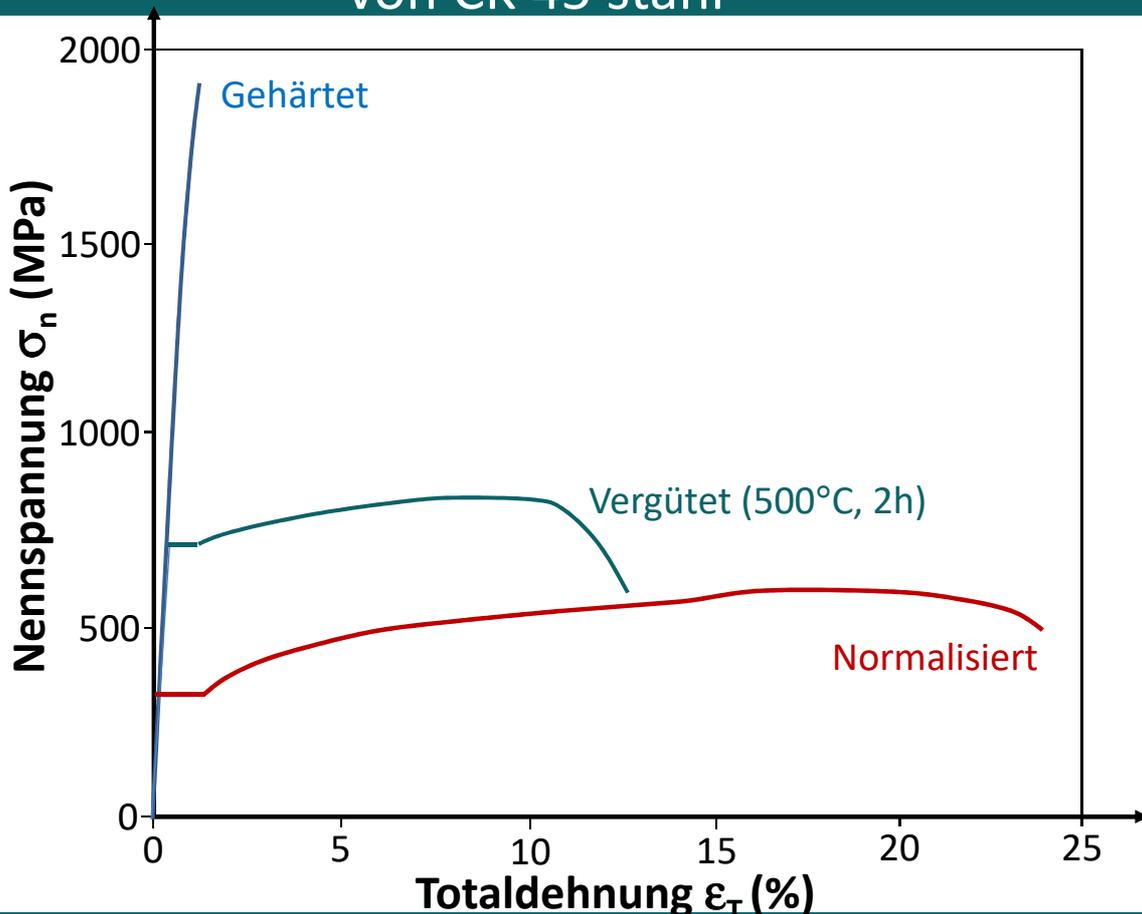
Metall: große Zähigkeit (mittlere Festigkeit, plastisches Benehmen)

Polymer: kleine Zähigkeit (kleine Festigkeit, plastisches Benehmen)



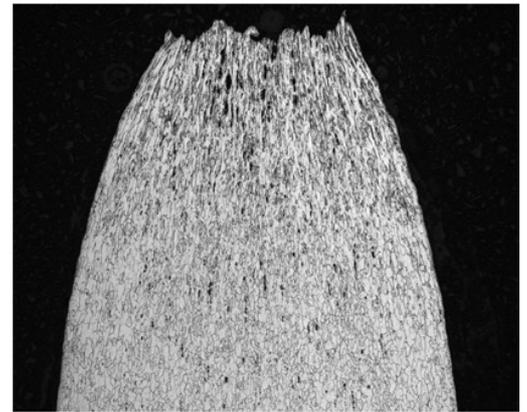
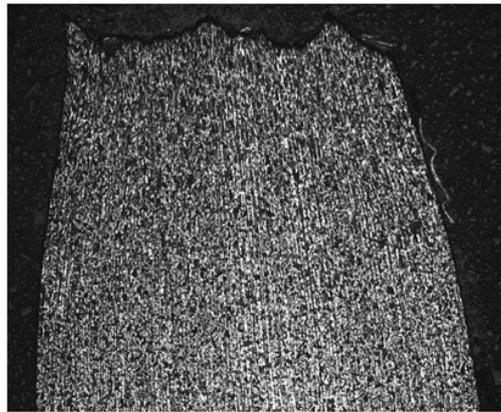
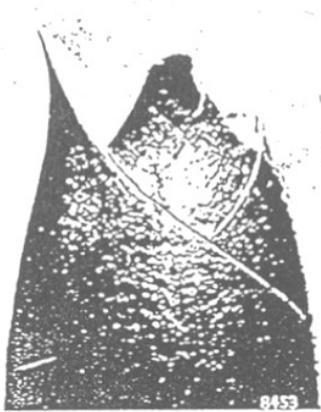
Folie: 21

Zugverfestigungskurven von CK 45 stahl



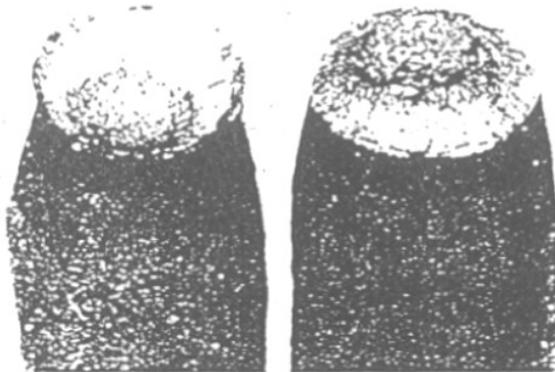
Folie: 22

Verformungsreiche Brüche ("Zähbruch")



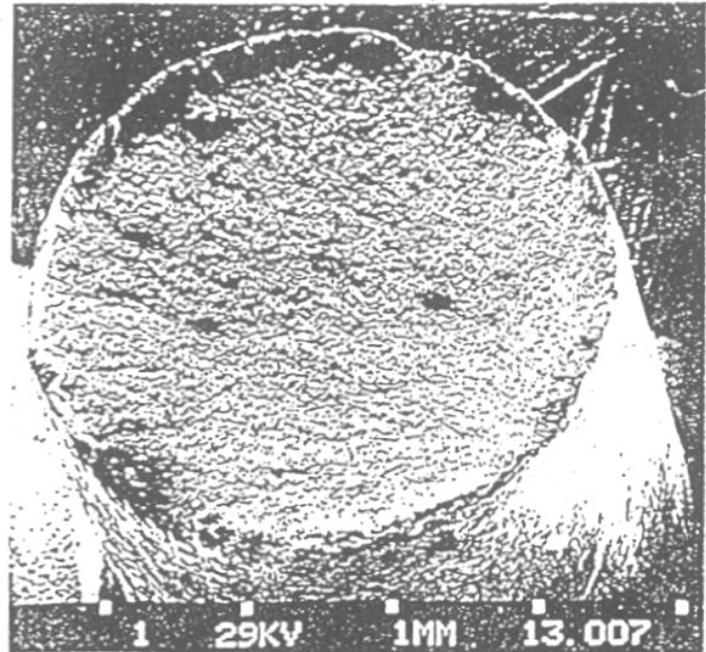
Folie: 23

Verformungsarme Brüche ("Tassen-Teller-Bruch, Sprödbbruch")



Folie: 24

Verformungslose Brüche ("Sprödbbruch")

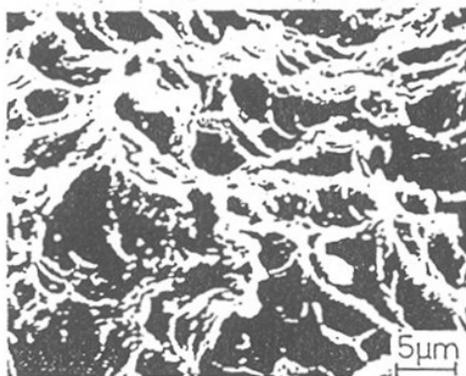


Folie: 25

Nach dem mikroskopischen Erscheinungsbild ergibt sich folgende Unterteilung:

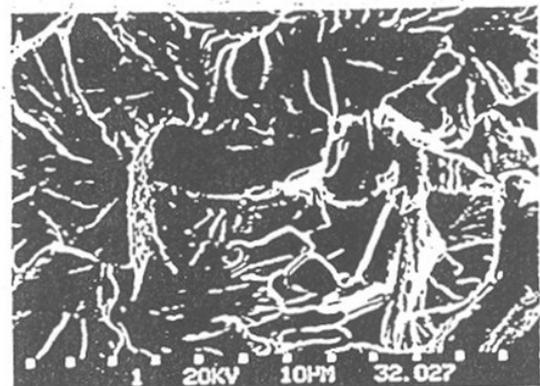
Betrachtung der Bruchfläche

Gleitbruch



örtliche Verformungen unter Schubspannungseinwirkung

Spaltbruch

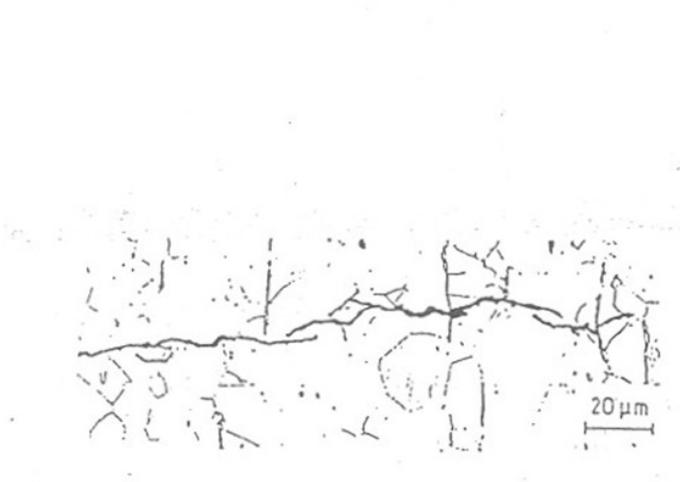


örtliche Trennung (Spaltungen längs definierter Flächen unter Normalspannungseinwirkung)

Folie: 26

Betrachtung des kristallographischen Bruchverlaufs

Transkristalliner Bruch



Rißverlauf durch Körner

Interkristalliner Bruch



Rißverlauf längs Korngrenzen

Folie: 27

Nach Orientierung der Bruchfläche zur Beanspruchungsrichtung ergibt sich

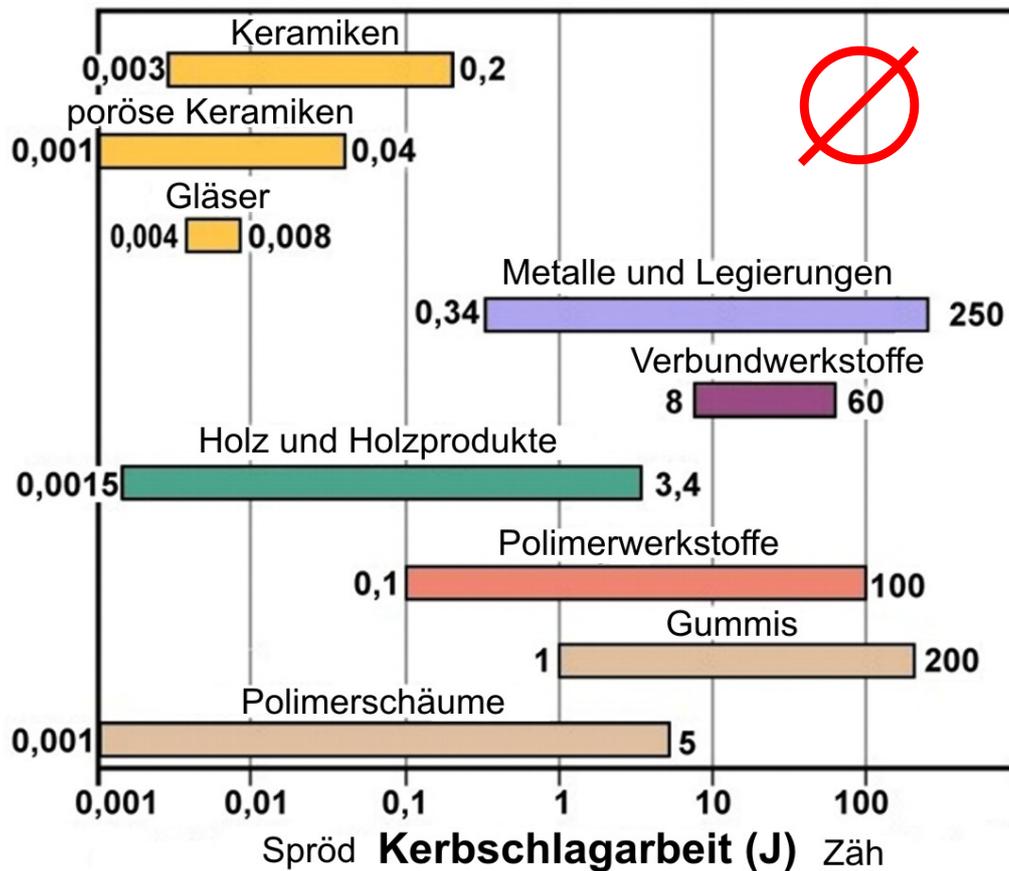
Normalspannungsbruch



Schubspannungsbruch

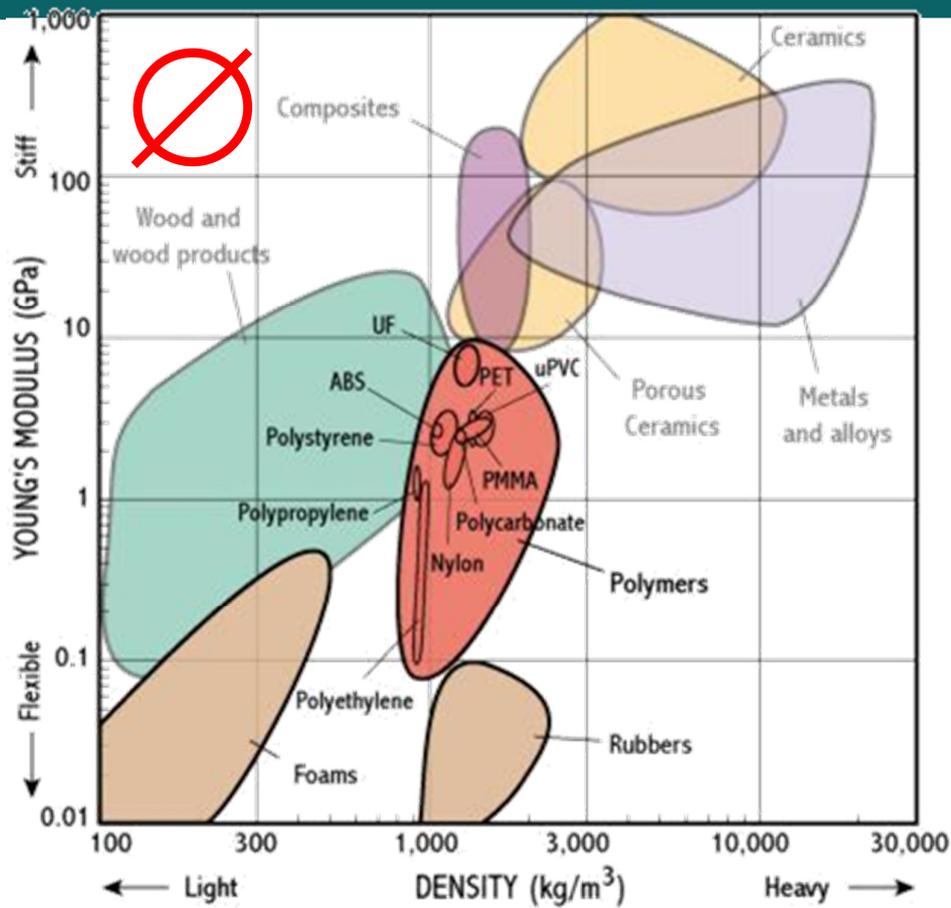


Folie: 28



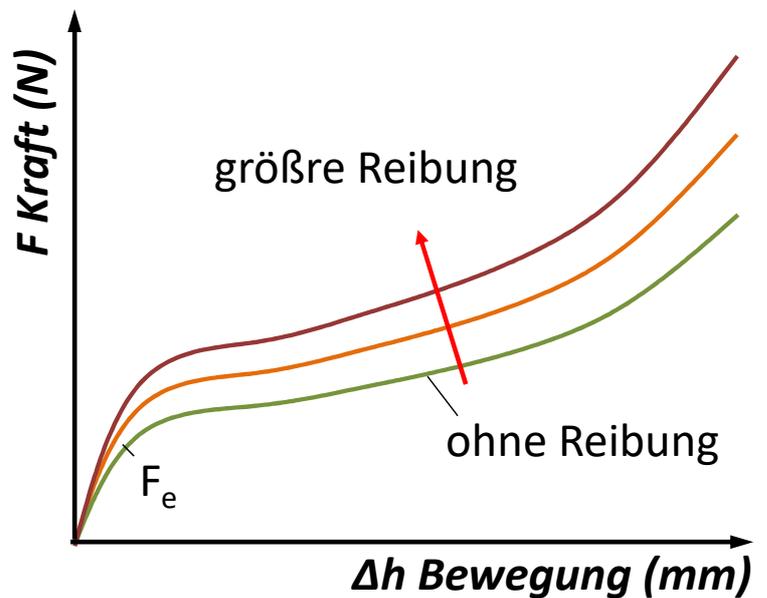
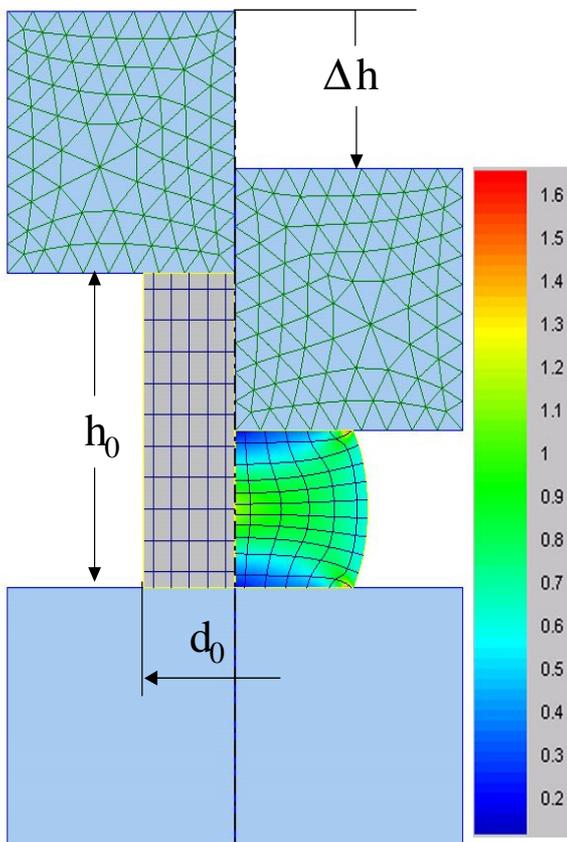
Materialien auf 20° C

Material	E (GPa)	R _{p0.2} (MPa)	R _m (MPa)	A ₅ (%)
Stahl	190-210	200-1700	400-1800	65-2
Aluminium-Leg.	69-79	35-550	90-600	45-4
Kupfer und Leg.	105-150	75-1100	140-1300	65-3
Titan und Leg.	80-130	340-1400	410-1450	25-7
Keramik	70-1000	-	140-2600	0
Diamant	820-1050	-	-	-
Polymer	1,4-3,4	-	7-80	1000-5
Karbonfaser	275-415	-	2000-3000	0
Kevlarfaser	62-120	-	2800	0

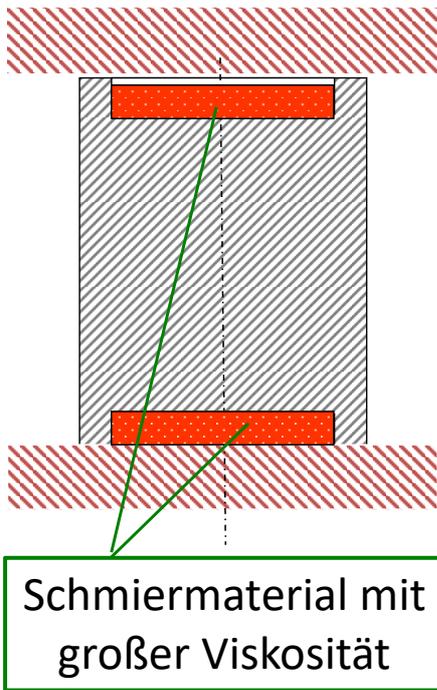


Quelle: Ashby

Folie: 31



Folie: 32



Verformungen

$$\varepsilon = \frac{h - h_0}{h_0}, \quad \varphi = \ln \frac{h}{h_0}$$

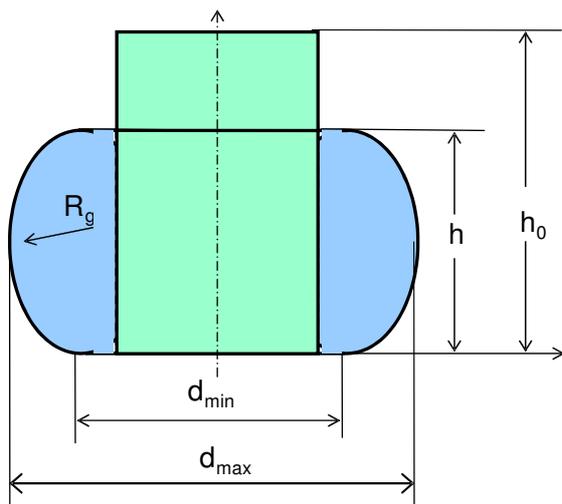
$$\bar{\dot{\varepsilon}} = \left| \frac{v_{\text{Stauch}}}{h} \right|$$

Spannungen

$$\sigma_T = \frac{F}{S} = \frac{4F}{d^2\pi}, \quad \sigma_E = \frac{F}{S_0} = \frac{4F}{d_0^2\pi}$$

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \quad \text{Druckstreckgrenze}$$

Viskositätsbeiwert $\rightarrow \tau = \eta \left(\frac{d\varphi}{dt} \right) \leftarrow$ Fließgeschwindigkeit

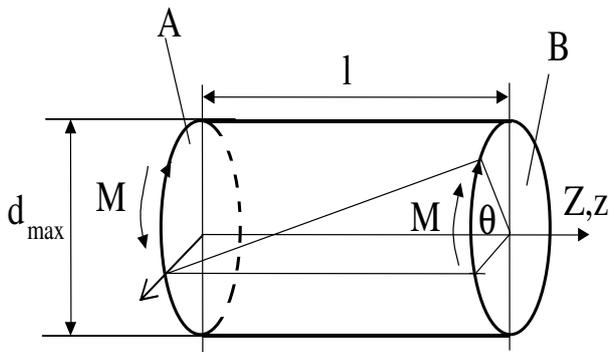


$$\sigma_{zz} = -\bar{\sigma} \left(1 - \ln \frac{d_{\max} R_g}{d_{\max} R_g - \frac{d_{\max}^2}{4} + r^2} \right)$$

$$\sigma_{\varphi\varphi} = \sigma_{rr} = \bar{\sigma} + \sigma_{zz}$$

$$\varphi_z = 2 \ln \frac{d_0}{d_{\max}}, \quad \varphi_r = \varphi_\varphi = \ln \frac{d_{\max}}{d_0}, \quad \bar{\varphi} = |\varphi_z|$$



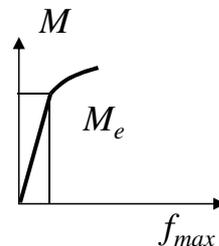
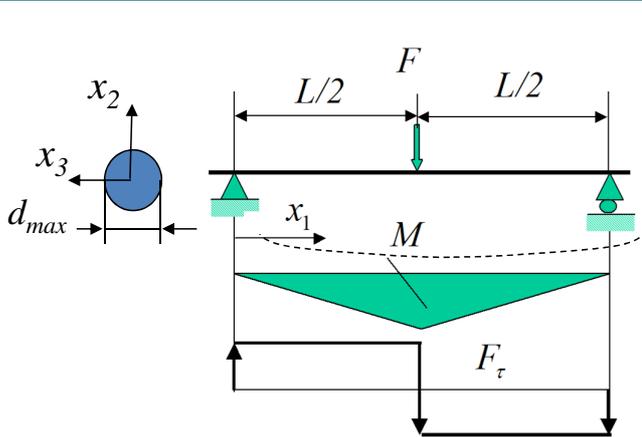
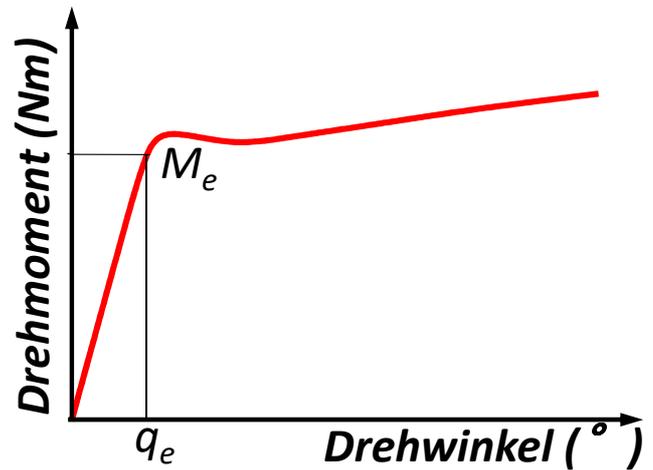


$$\bar{\epsilon} = \int_0^t \dot{\bar{\epsilon}} dt = \int_0^t \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{r}{l} \frac{d\theta}{dt} dt = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{r}{l} \theta$$

$$\sigma_{z\varphi} = \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}}$$

Drehstreckgrenze

$$R_e = \frac{2\sqrt{3}M_e}{\pi r_{\max}^3}$$

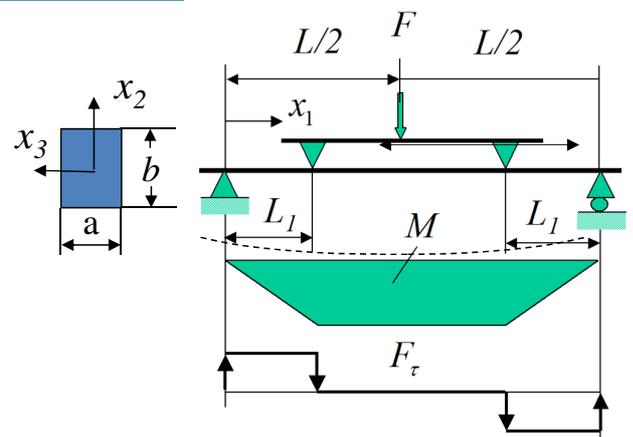


3-Punkt-Biegeprüfung

$$E = \frac{FL}{4f_{\max}} \left(\frac{L^2}{12I} + \frac{\kappa}{A} \right)$$

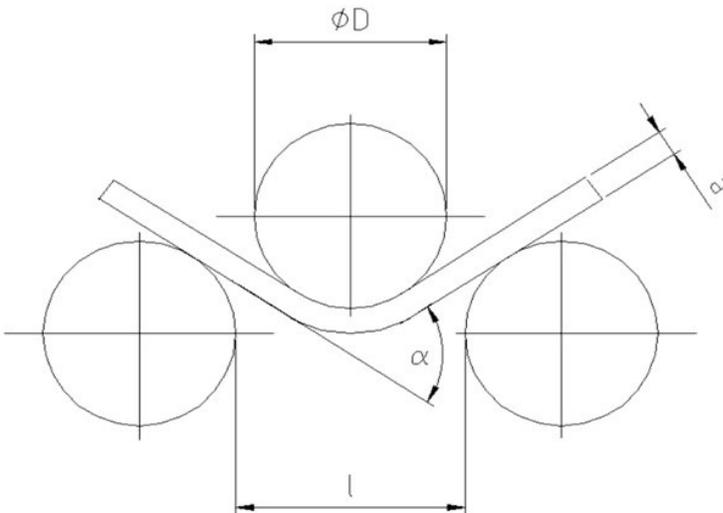
$$R_e = \frac{M_e}{I} r_{\max}$$

$$R_e = \frac{M_e b}{2I}$$



4-Punkt-Biegeprüfung

$$E = \frac{FL_1(3L^2 - 4L_1^2)}{48If_{\max}}$$



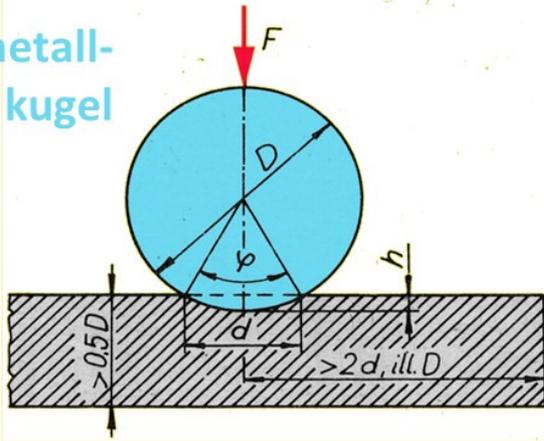
Das Biegen ist bis zum Risserscheinen durchgeführt, und der α Biegewinkel ist zu messen.

Folie: 37

- (statische) **Härte:**
 - Der Widerstand gegen eines sehr harten Werkzeugs mit definierten Geometrie.
- **Beziehung mit anderen Eigenschaften:**
 - Von Härtewerten kann man einige Festigkeits- und Technologieeigenschaften schätzen.
- **Ausführung der Härteprüfung:**
 - durch Verformungen
 - durch physischen Einfluss

Folie: 38

Hartmetall-
kugel



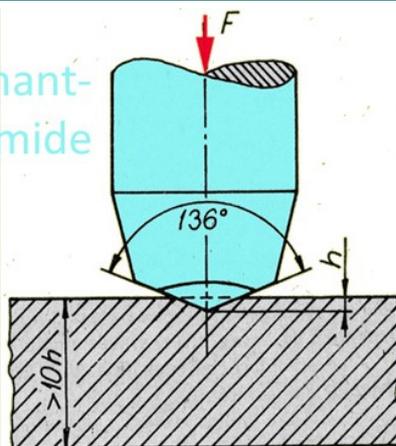
- F – Belastungskraft (N)
- A – Abdruckoberfläche (mm²)
- D – Kugeldurchmesser (mm)
- d – Abdruckdurchmesser (mm)
- h – Eindringtiefe (mm)

$$HBW = \frac{0.102F}{A} = \frac{0.102F}{D\pi h} = \frac{0.204F}{\pi D \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)}$$

Durchschnittliche Härtewerten (Vorteil bei der Prüfung heterogener Materialien). Folgern auf die Festigkeit des Materials. Anwendungsbereich: Gußeisen, Al, Cu Legierungen, weicher Stahl.

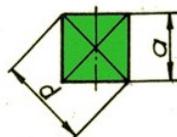
Folie: 39

Diamant-
pyramide



- F – Belastungskraft (N)
- A – Abdruckoberfläche (mm²)
- d – Abdruckdiagonale (mm)

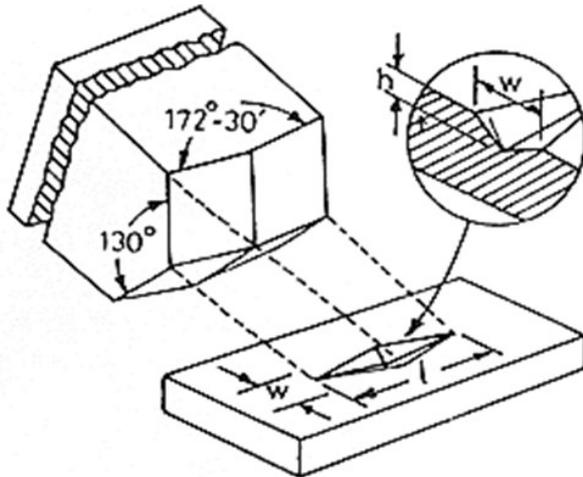
$$HV = \frac{0.102F}{A} = 0.189 \frac{F}{d^2}$$



Genaueres Messen der durchschnittlichen oder lokalen Härte. Mit kleinere Kraft (Mikrohärteprüfung) ⇒ Untersuchung von Dünnschichten und einzelne Gefügebestandteile der Gefügestruktur.

Folie: 40

Diamantpyramide



F – Belastungskraft (N)

A – Abdruckoberfläche (mm^2)

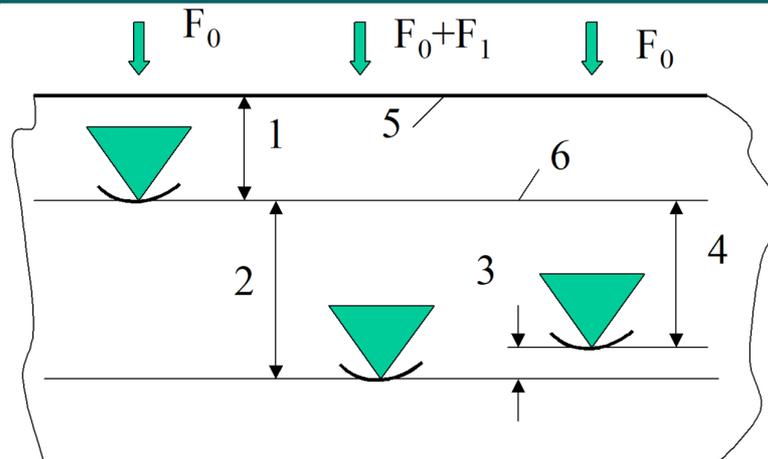
l – längerer Abdruck-
diagonale (mm)

$$HK = \frac{0,102 F}{A} = \frac{1,14487 F}{l^2}$$

Genaueres Verfahren. Ähnlich zur Härteprüfung nach Vickers.
Anwendungsbereich: Metalle und sehr spröde Materialien
(z.B. Glas, technische Keramik).

Folie: 41

Härteprüfung nach Rockwell



- 1 – Eindringtiefe bei der Vorlast F_0
- 2 – Eindringtiefe bei der $F_0 + F_1$ Belastung
- 3 – elastische Zurückfedern nach dem Abnehmen der Hauptkraft F_1
- 4 – Maß der bleibende Eindringtiefe h
- 5 – Oberfläche der Probe
- 6 – Referenzebene der Messung

Folie: 42

Zeichen	Werkzeug	Vorlast	Hauptlast	Härte
HRA	 120°	98,07 N	490,3 N	100-h/0,002
HRB	 1,5875 mm	98,07 N	882,6 N	130-h/0,002
HRC	 120°	98,07 N	1373 N	100-h/0,002
HRH	 3,175 mm	98,07 N	490,3 N	130-h/0,002
...
HR15N	 120°	29,42 N	117,7 N	100-h/0,001
HR45T	 1,5875 mm	29,42 N	411,9 N	100-h/0,001

 - Diamantkegel

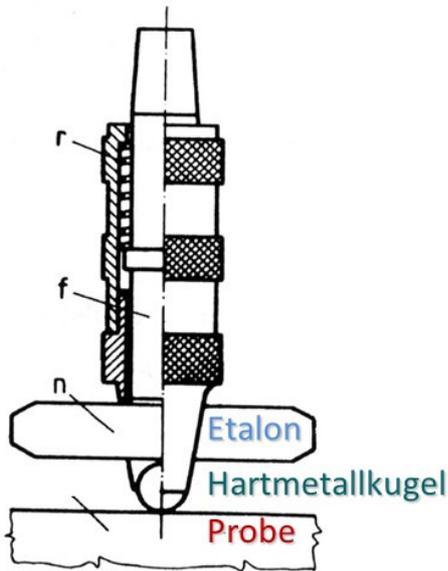
 - Stahl- oder Hartmetallkugel

Schnell, einfach, nicht so genau, für alle Materialien und geometrische Form.

Folie: 43

- **Schnell, mit schlagartiger Krafteinwirkung**
- **Ausführung**
 - Eindringkörper und Messung des Eindringdurchmessers
 - Messung des elastischen Zurückprallens

Folie: 44



HB_{Probe} – Härte der Probe

HB_{Etalon} – Härte des Etalons

d_{Probe} – Abdruckdurchmesser auf der Probe

d_{Etalon} – Abdruckdurchmesser auf dem Etalon

$$\frac{HB_{\text{Probe}}}{HB_{\text{Etalon}}} = \left(\frac{d_{\text{Etalon}}^2}{d_{\text{Probe}}^2} \right)$$

Folie: 45

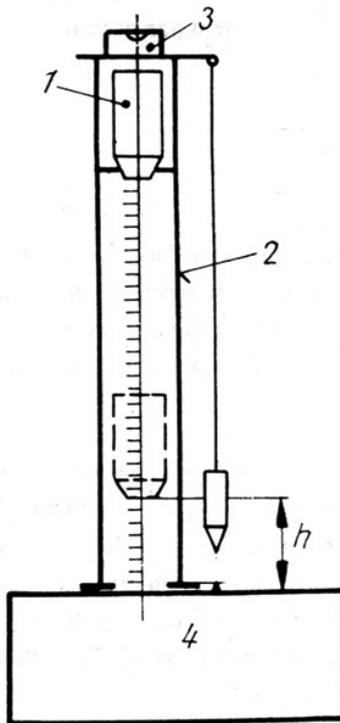
➤ Prinzip der Messung

Die Härte ist proportional zur Höhe des Zurückprallens vom Kugel oder Hammer, der die Oberfläche des Objekts mit bestimmter Energie schlägt.

➤ Anlagen

- Skleroskop
- Durosokop

Folie: 46

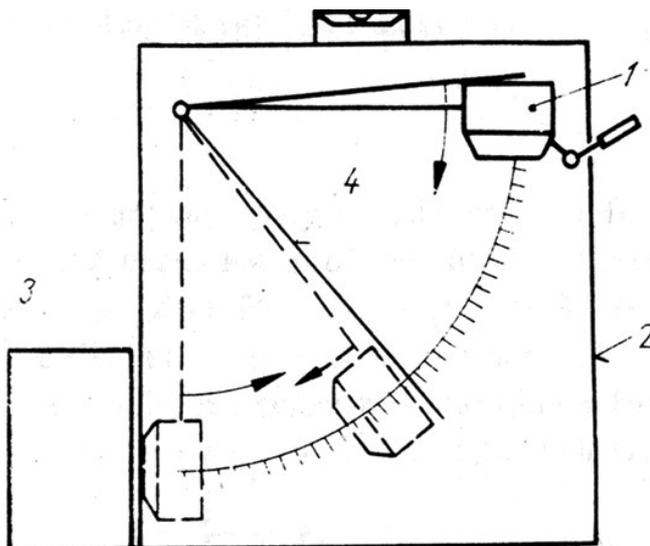


- zerstörungsfrei
- einfach
- schnell

1. Fallendes Gewicht (Diamantende)
2. Glasrohr
3. Libelle
4. Probe

Die Masse der Probe hat Einfluss auf das Messergebnis:
 kleine Masse → Schwingungen → kleineres Zurückprallen.

Folie: 47

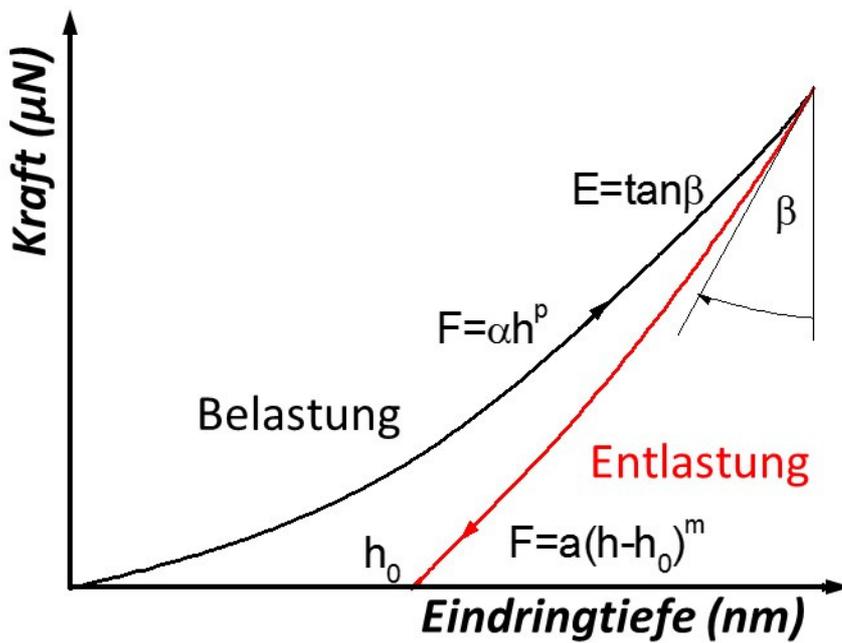


1. Messhammer
2. Halter
3. Probe
4. Schleppezeiger

Die Masse und die Qualität der Oberfläche haben Einfluss.

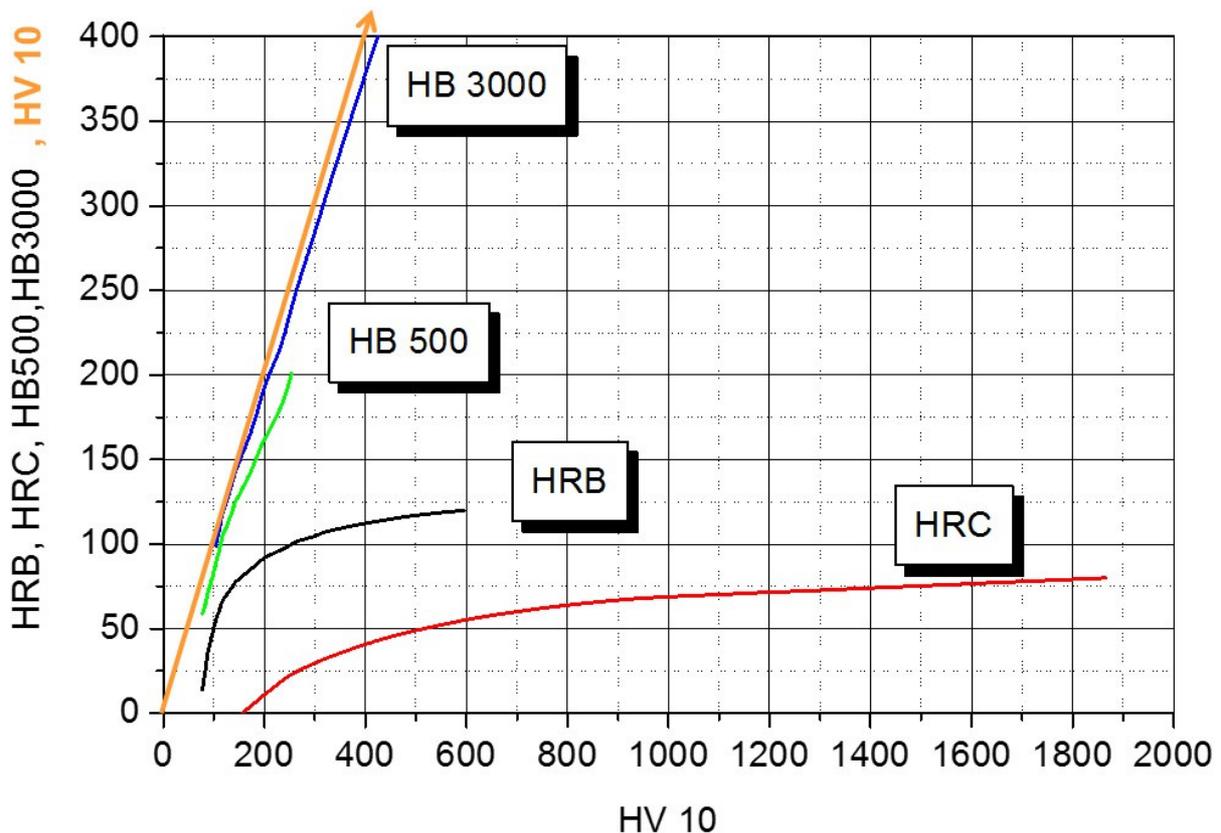
Folie: 48

Aufnahme der Kraft - Eindringtiefe Kurve



Messen von dünnen Schichten

Härtekonzersion



Danke für die Aufmerksamkeit!