

Mechanische Eigenschaften, Kennwerte, Prüfungsmethoden

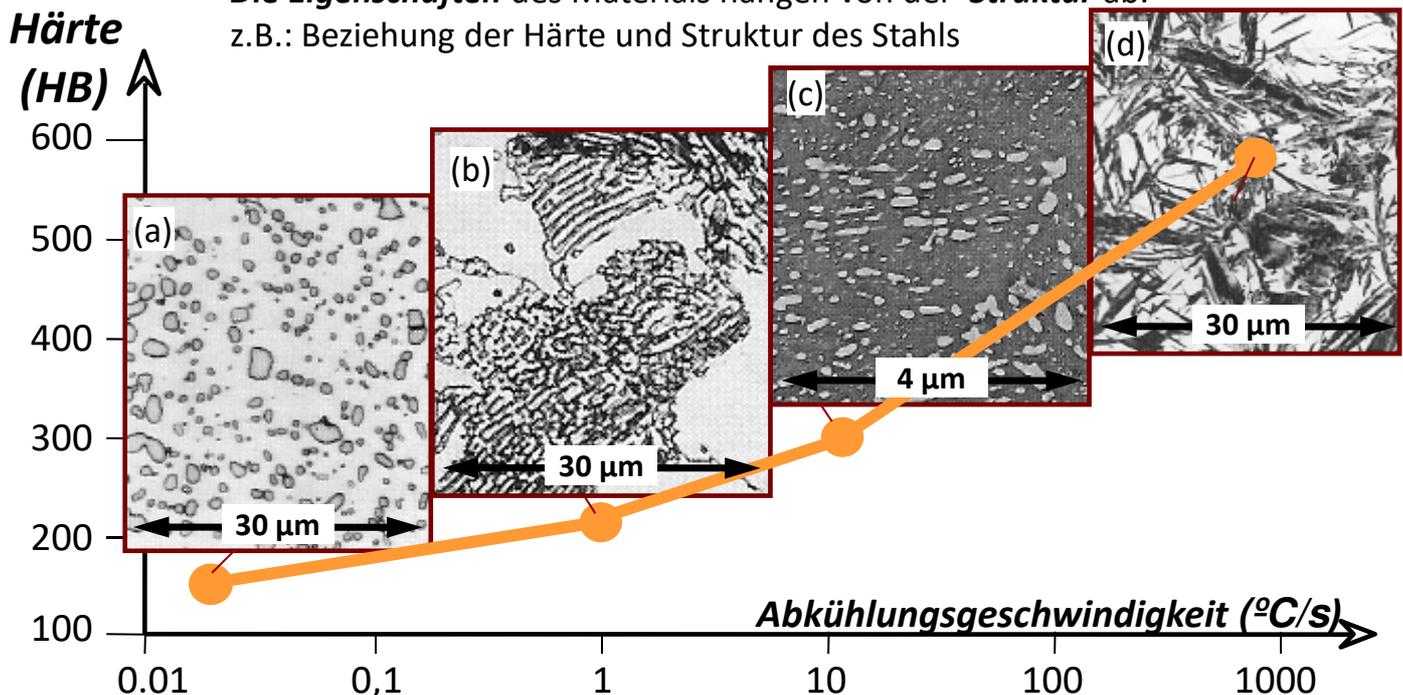
- Einführung,
- elastische, plastische Verformung
- einfache Beanspruchungen
- Zugprüfung und deren Kennzahlen
- Druck-, Biege-, und Drehversuch
- Härteprüfungen und deren Anwendungsbereiche

- 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

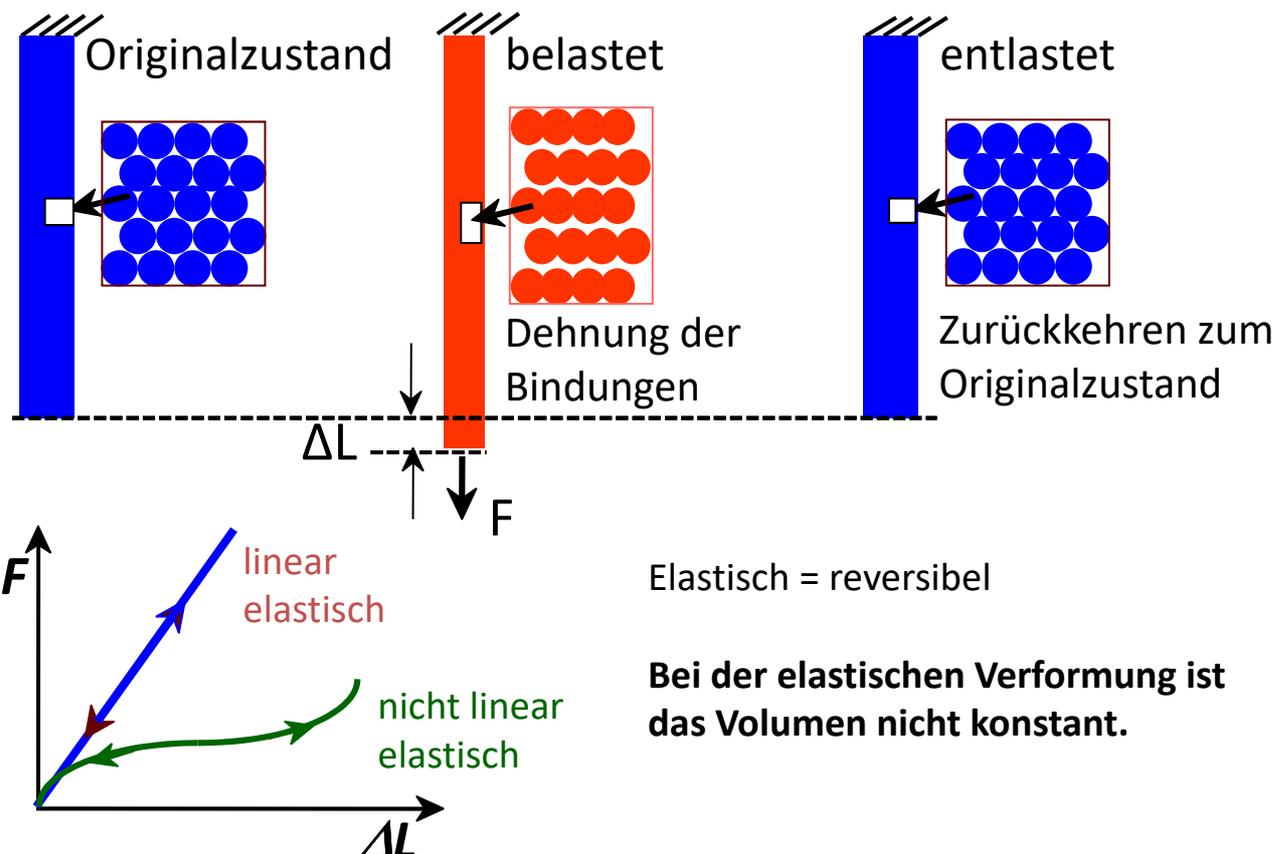


Prozeß kann **die Struktur** ändern. (z.B.: Strukturänderung abhängig von der Abkühlungsgeschwindigkeit)

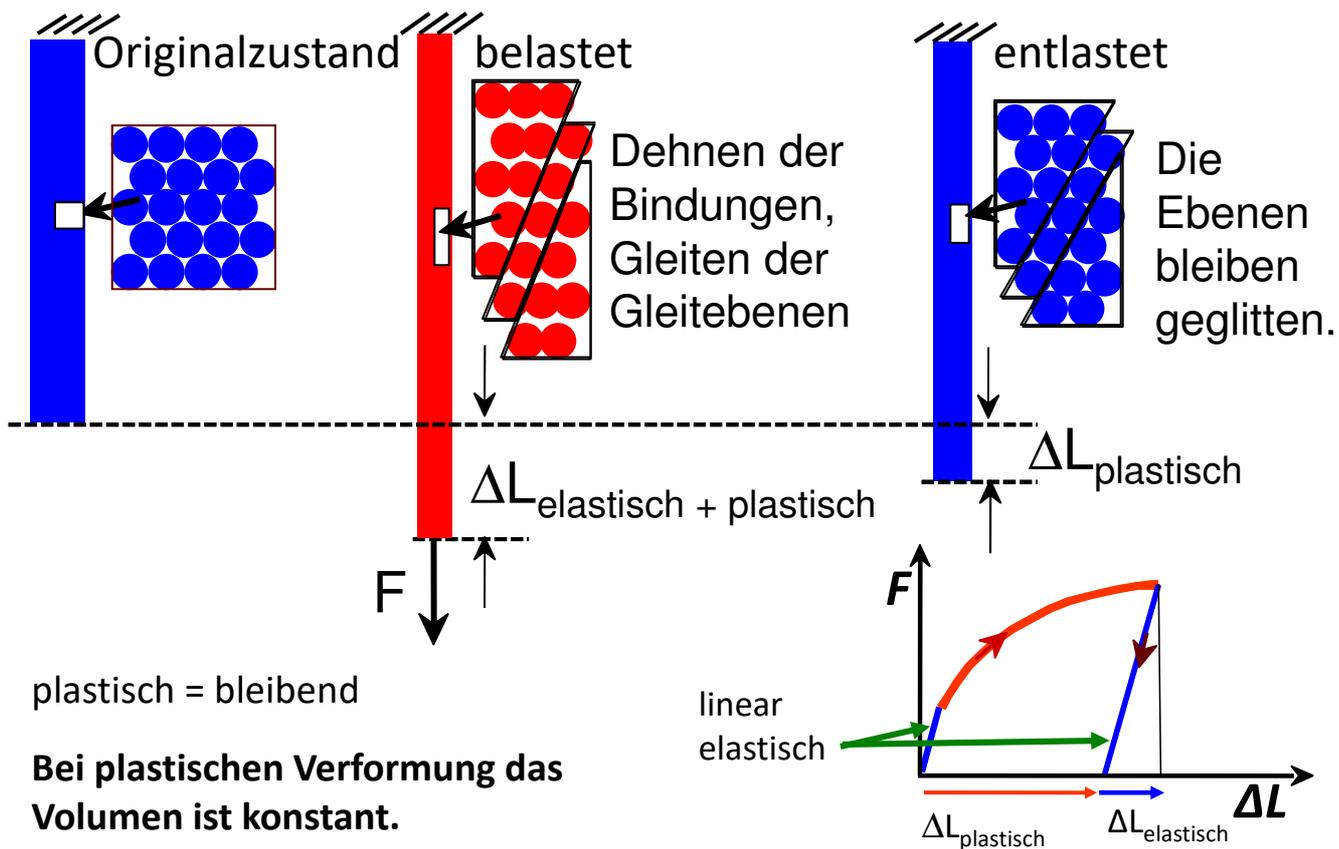
Folie: 4

- **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

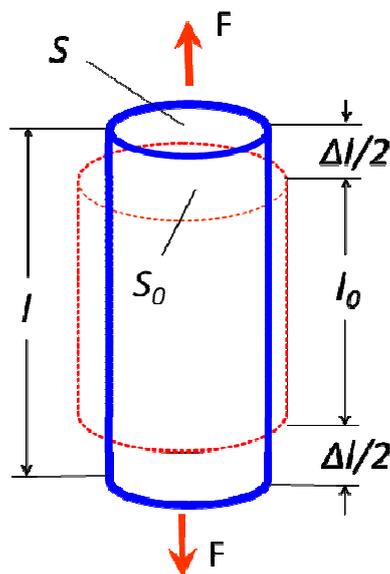
$$\sigma = \frac{F}{S_0} \approx \frac{F}{S}$$

elastischer Zustand

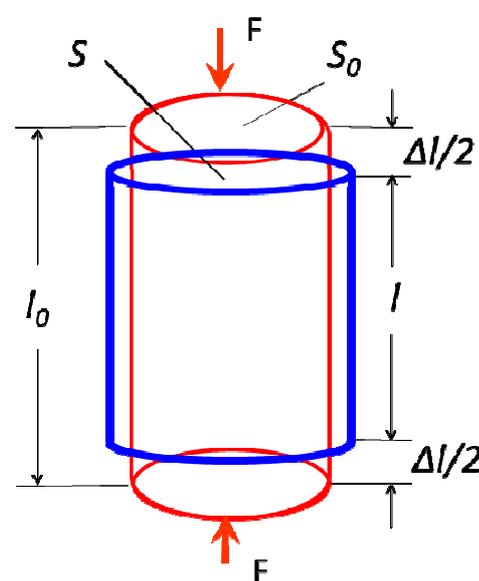
$$\sigma = E \varepsilon$$

(Hookesche-Gesetz)

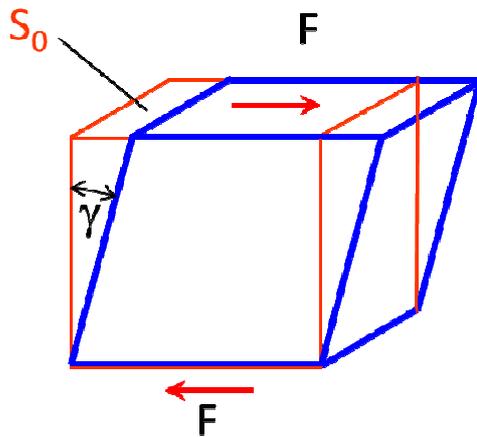
Zug



Druck



Scheren (einfaches)

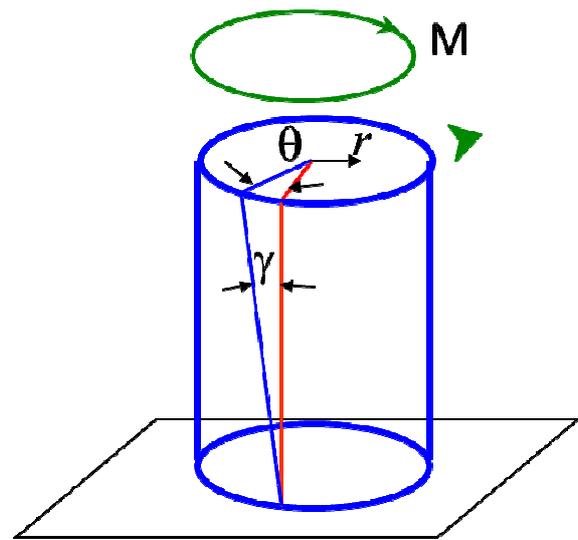


$$\tau = \frac{F}{S} \approx \frac{F}{S_0}$$

elastischer Zustand

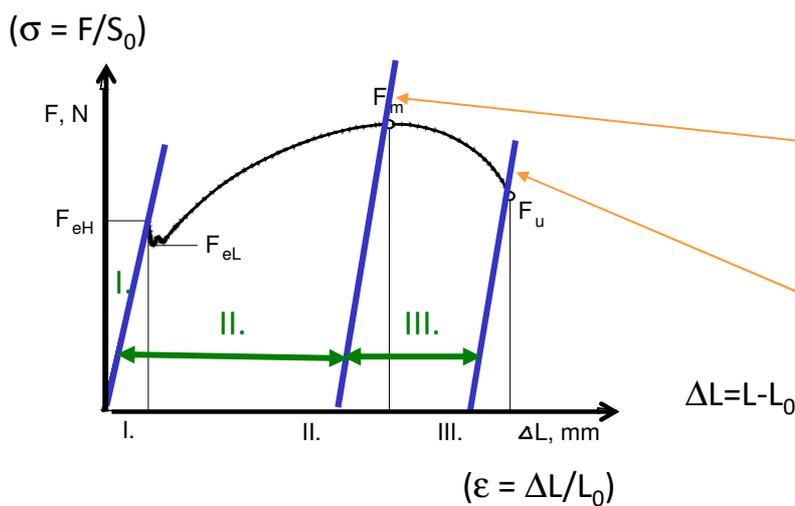
$$\tau = G\gamma$$

Drehen

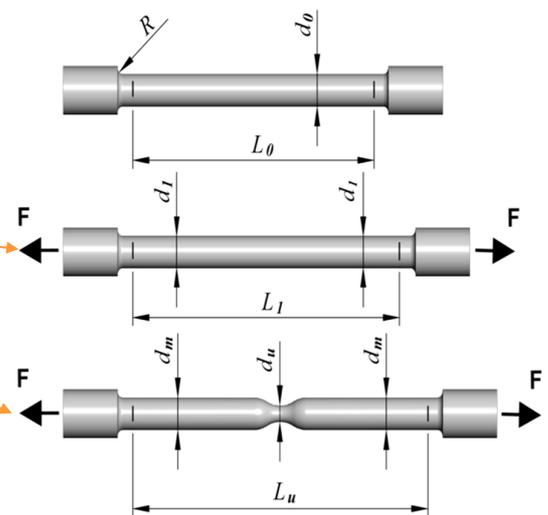


$$\tau = \frac{M}{I_p} r$$

Zugversuchsdiagramm



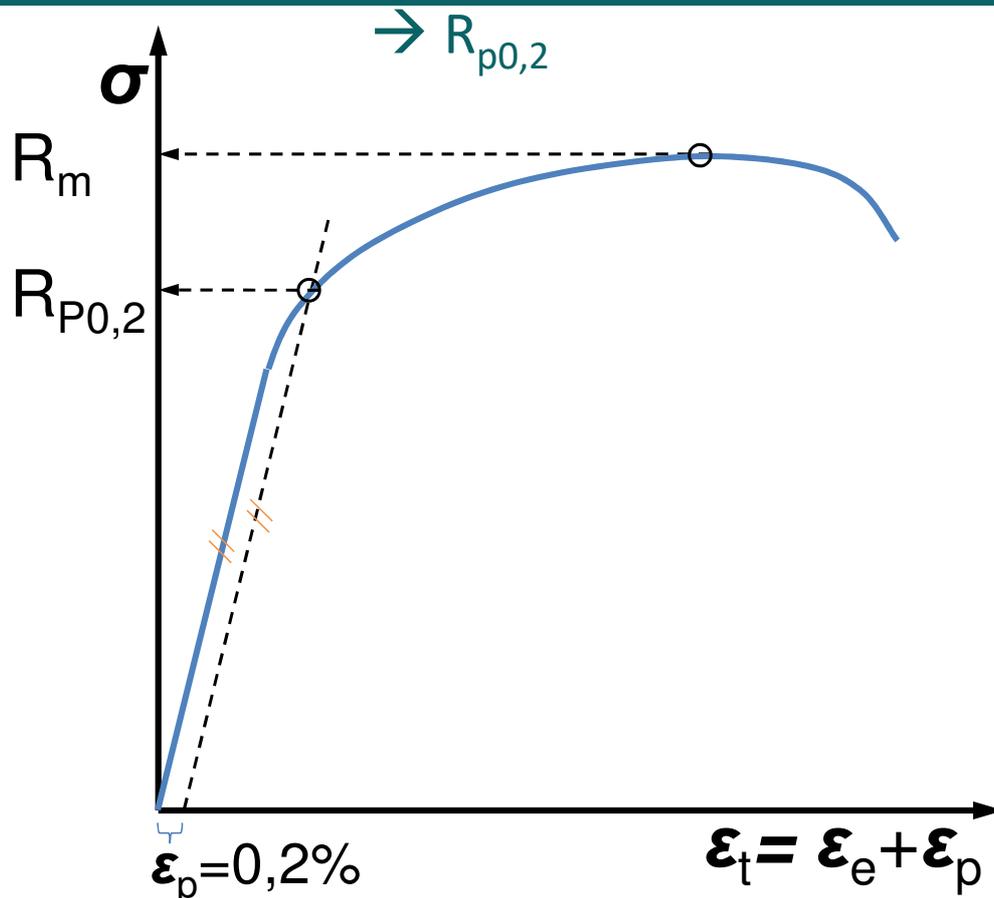
- I. elastische Verformung
- II. gleichmäßige plastische Verformung
- III. Einschnürung



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

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

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



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

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

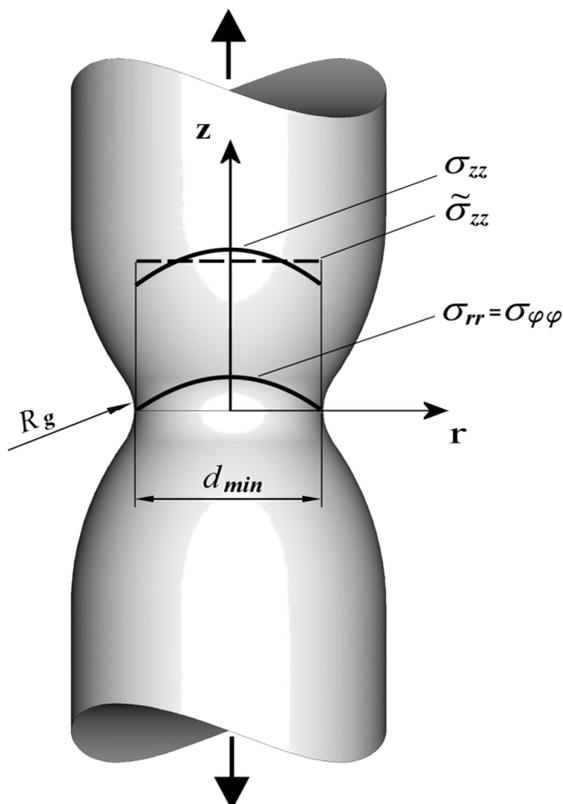
$$\varphi = \ln \frac{S_0}{S}$$

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

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

Folie: 13

Spannungs- und Verformungszustand bei der Einschnürung



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

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

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

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

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

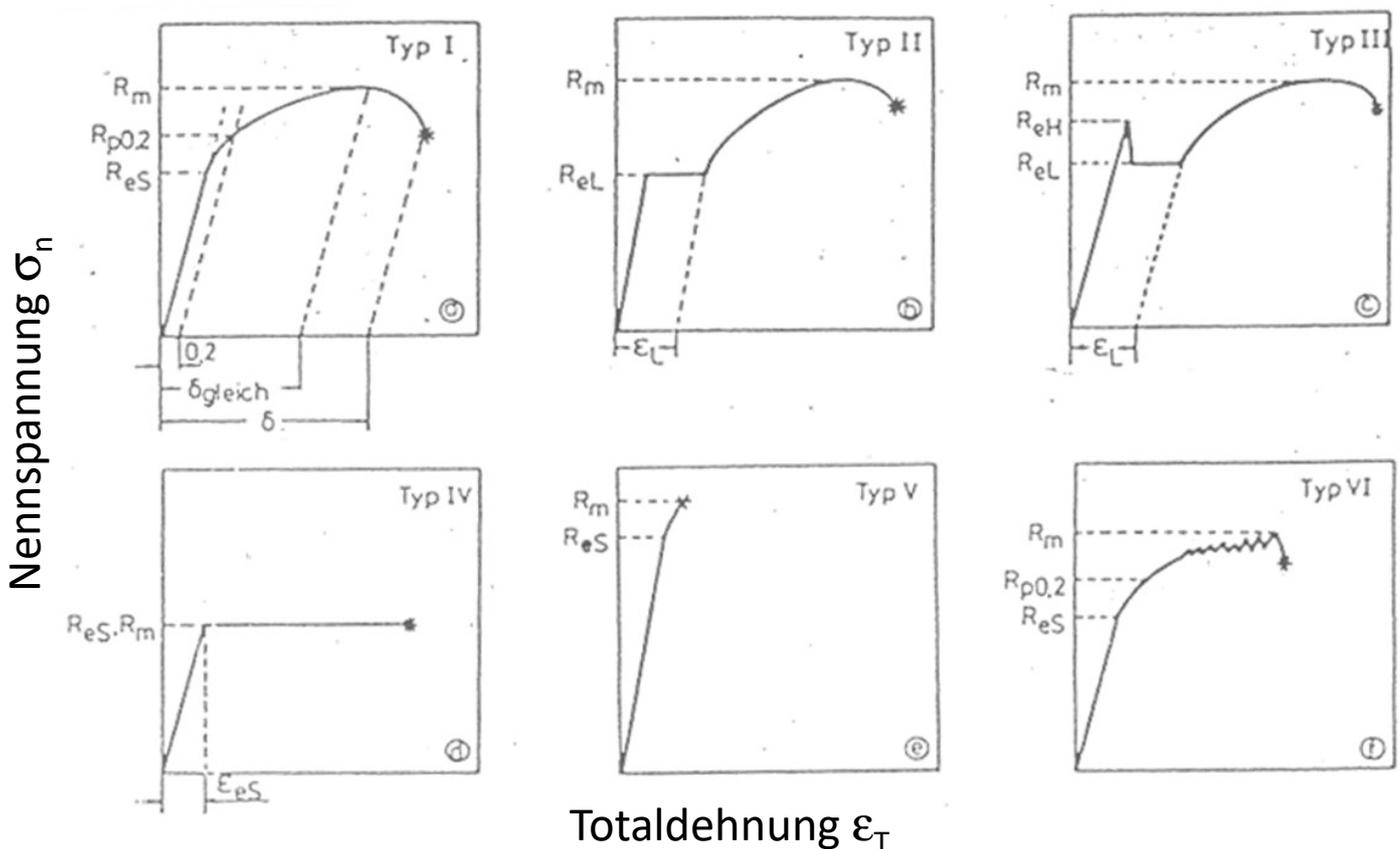
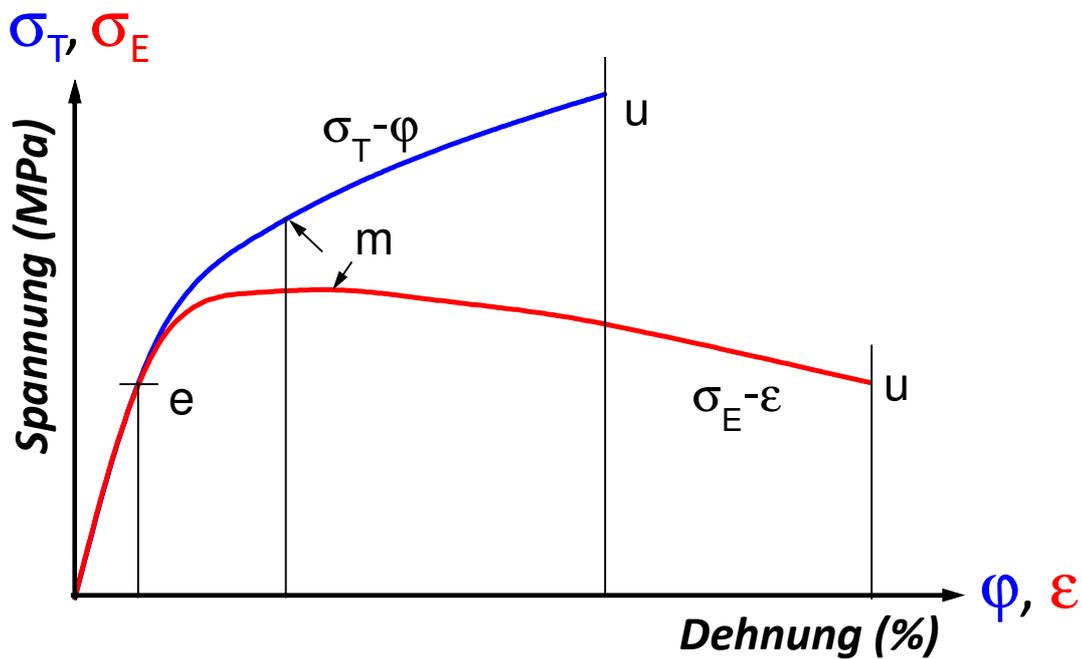
$\bar{\sigma}$ – gleichmäßige Spannung,

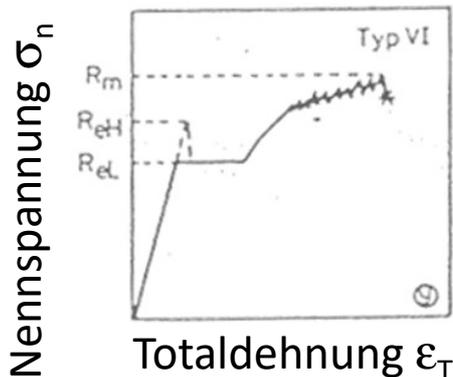
$\bar{\varphi}$ – gleichmäßige Verformung

Folie: 14

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

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





- 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:

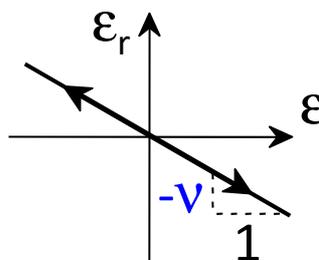
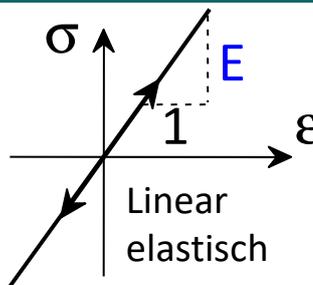
$$\sigma = E \epsilon$$

Poisson-Faktor, ν :

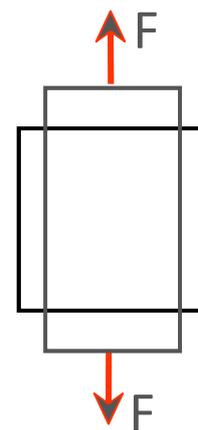
$$\nu = -\frac{\epsilon_{\text{quer}}}{\epsilon_{\text{längs}}}$$

- 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:

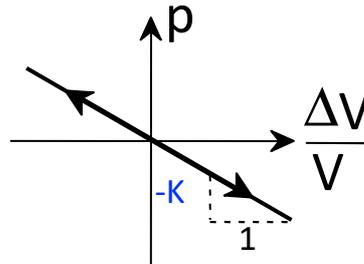
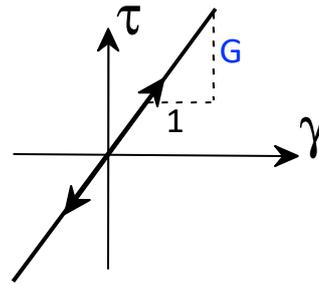
$$\tau = G \gamma$$

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

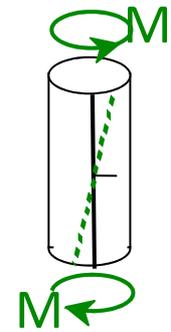
Kompressionsmodul, K

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

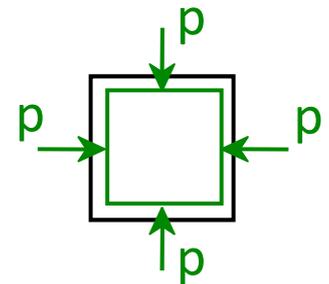
$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}$$



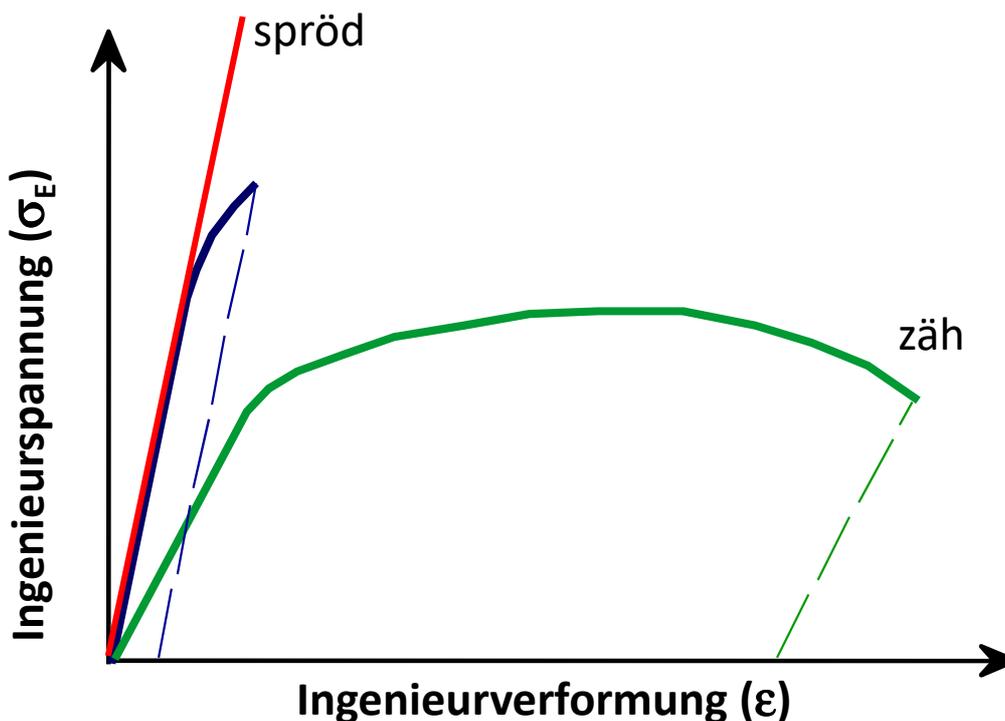
Hydrostatischer Druck
Ausgangsvolumen : V_0
Volumenänderung: ΔV



Drehunter-
suchung



Folie: 19



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

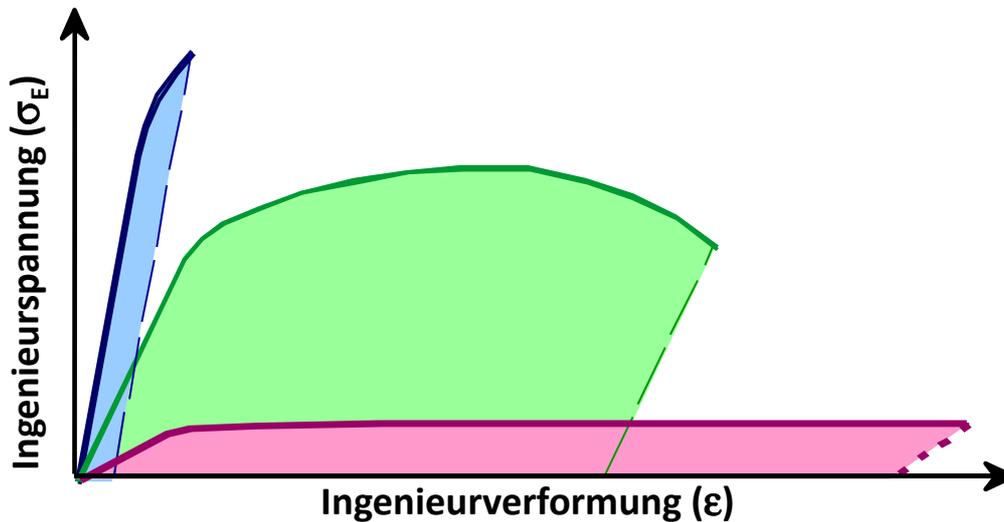
Folie: 20

Die Energieabsorptionsfähigkeit bis zum Bruch

Keramik: kleine Zähigkeit (große Festigkeit, sprödes Benehmen)

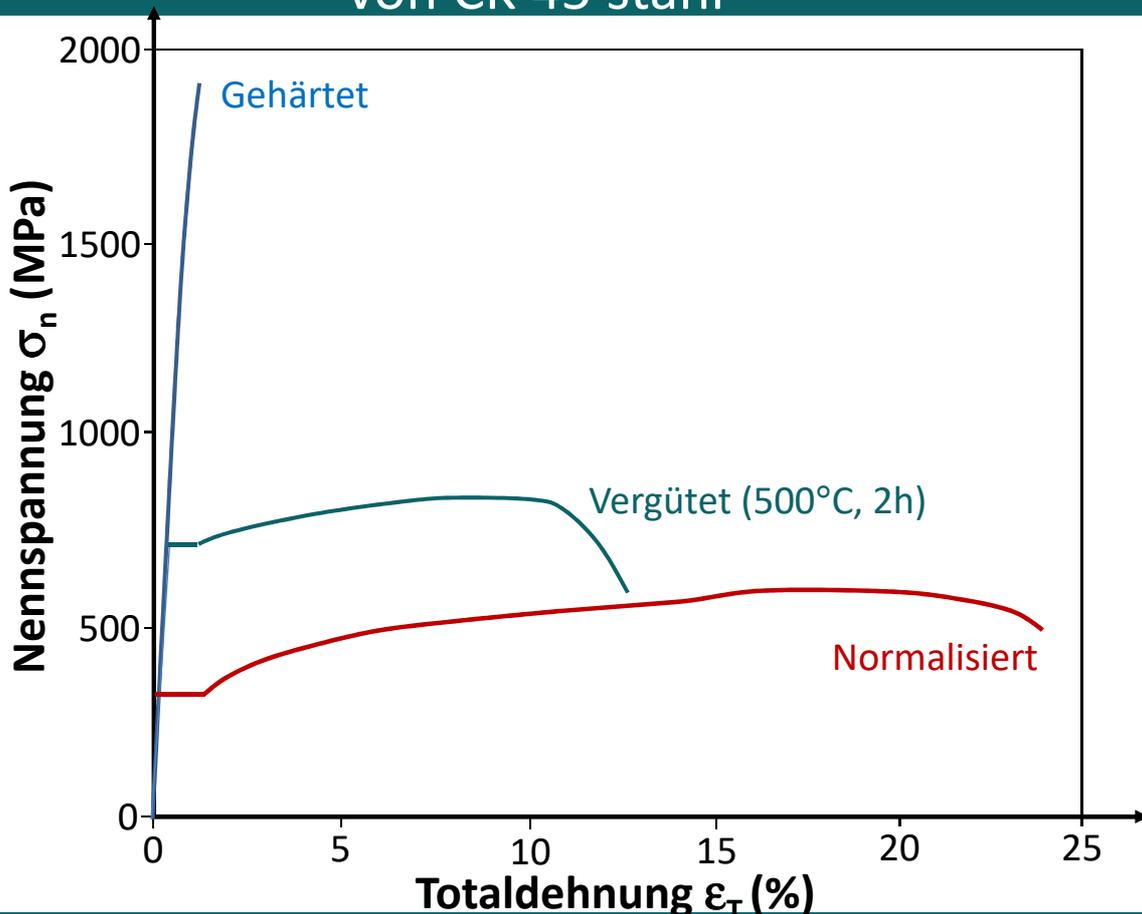
Metall: große Zähigkeit (mittlere Festigkeit, plastisches Benehmen)

Polymer: kleine Zähigkeit (kleine Festigkeit, plastisches Benehmen)



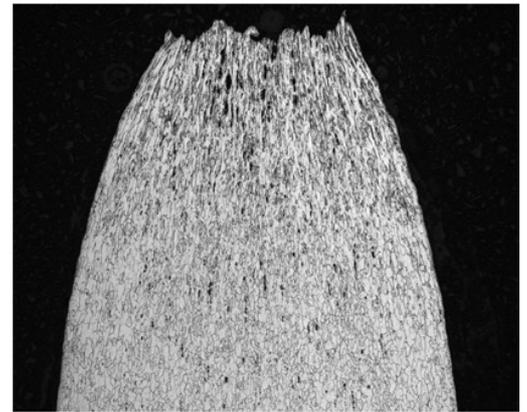
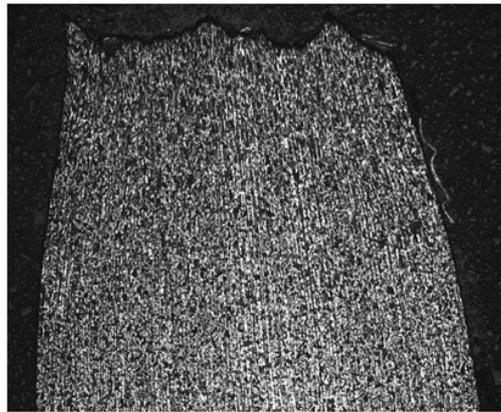
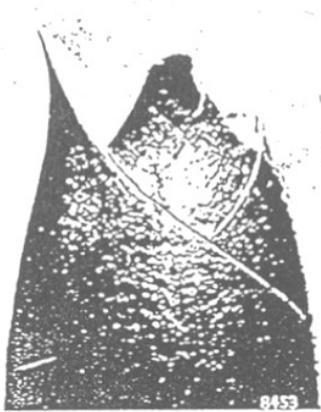
Folie: 21

Zugverfestigungskurven von CK 45 stahl



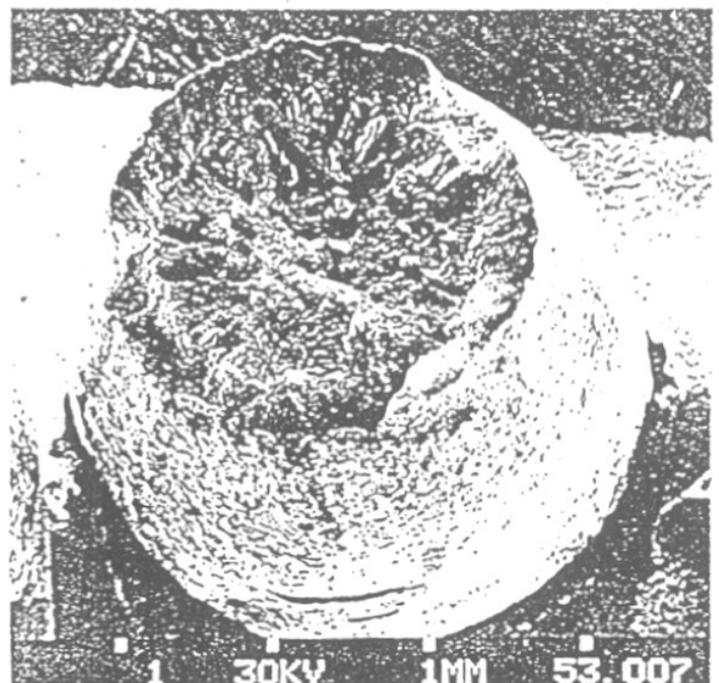
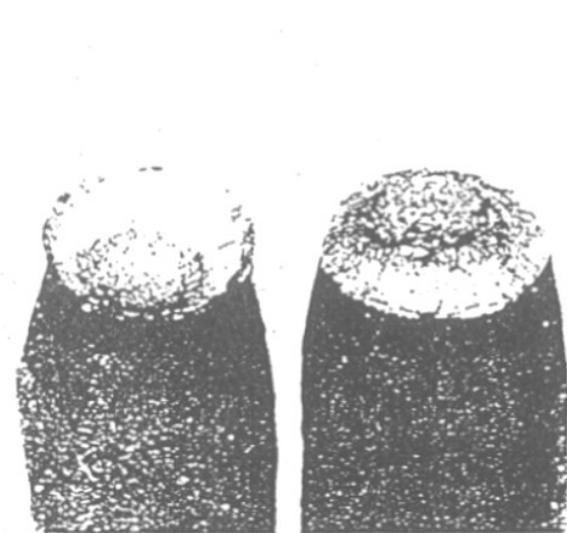
Folie: 22

Verformungsreiche Brüche ("Zähbruch")



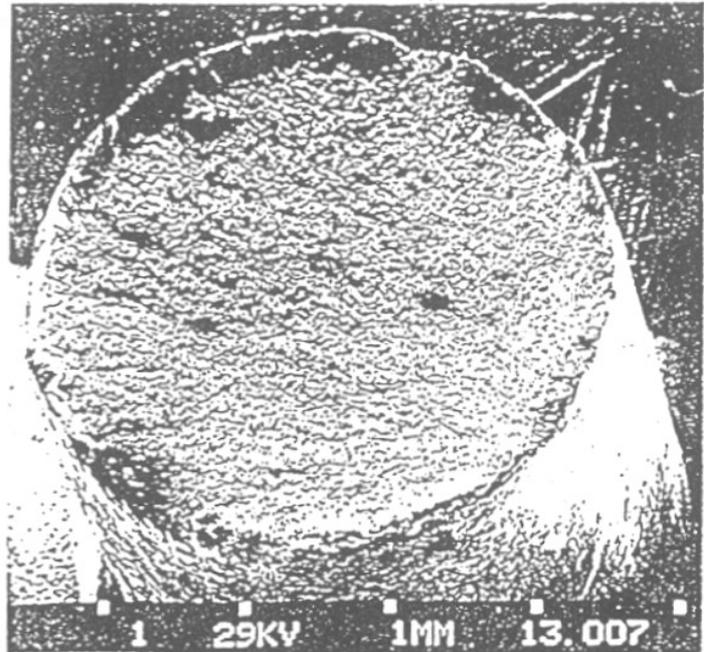
Folie: 23

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



Folie: 24

Verformungslose Brüche ("Sprödbbruch")

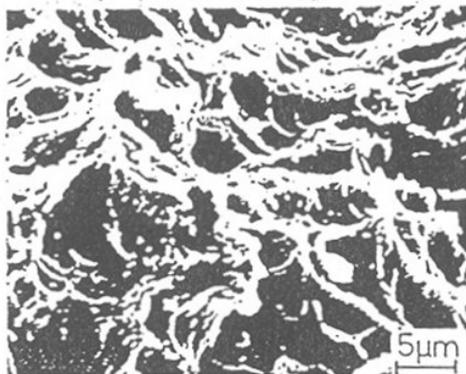


Folie: 25

Nach dem mikroskopischen Erscheinungsbild ergibt sich folgende Unterteilung:

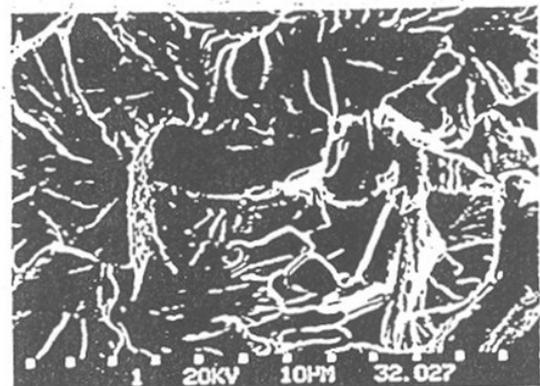
Betrachtung der Bruchfläche

Gleitbruch



örtliche Verformungen unter Schubspannungseinwirkung

Spaltbruch

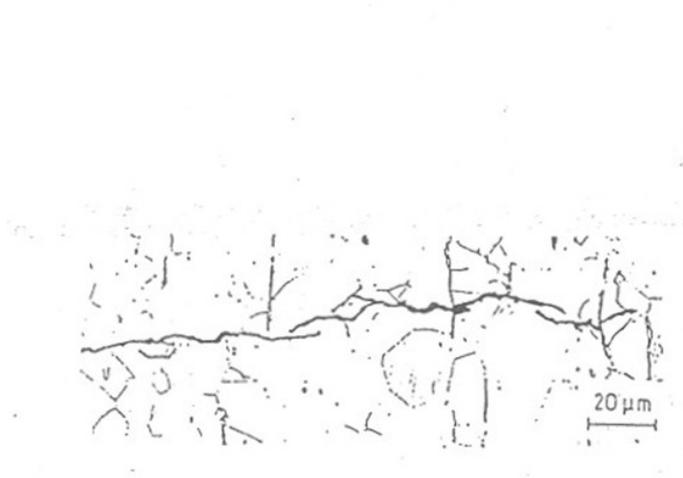


örtliche Trennung (Spaltungen längs definierter Flächen unter Normalspannungseinwirkung)

Folie: 26

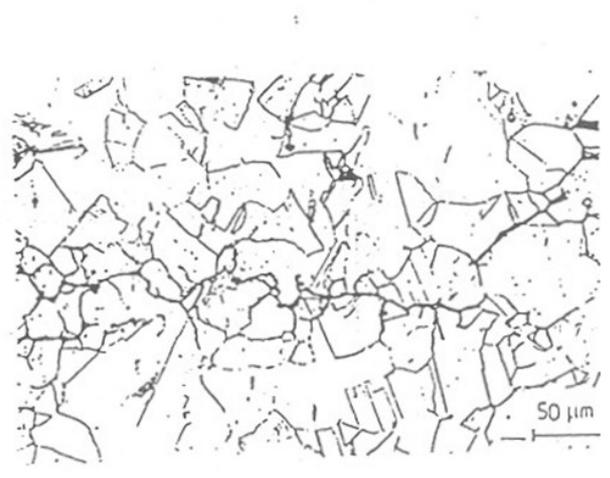
Betrachtung des kristallographischen Bruchverlaufs

Transkristalliner Bruch



Rißverlauf durch Körner

Interkristalliner Bruch



Rißverlauf längs Korngrenzen

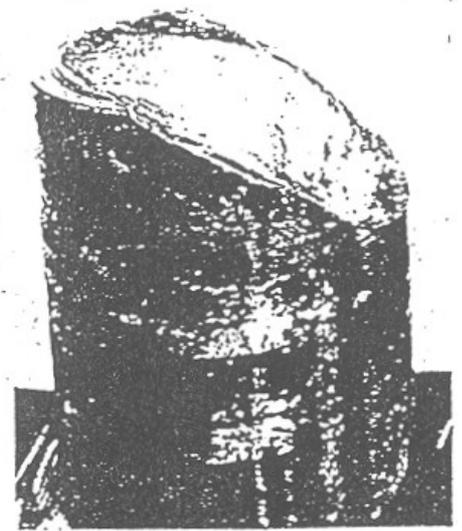
Folie: 27

Nach Orientierung der Bruchfläche zur Beanspruchungsrichtung ergibt sich

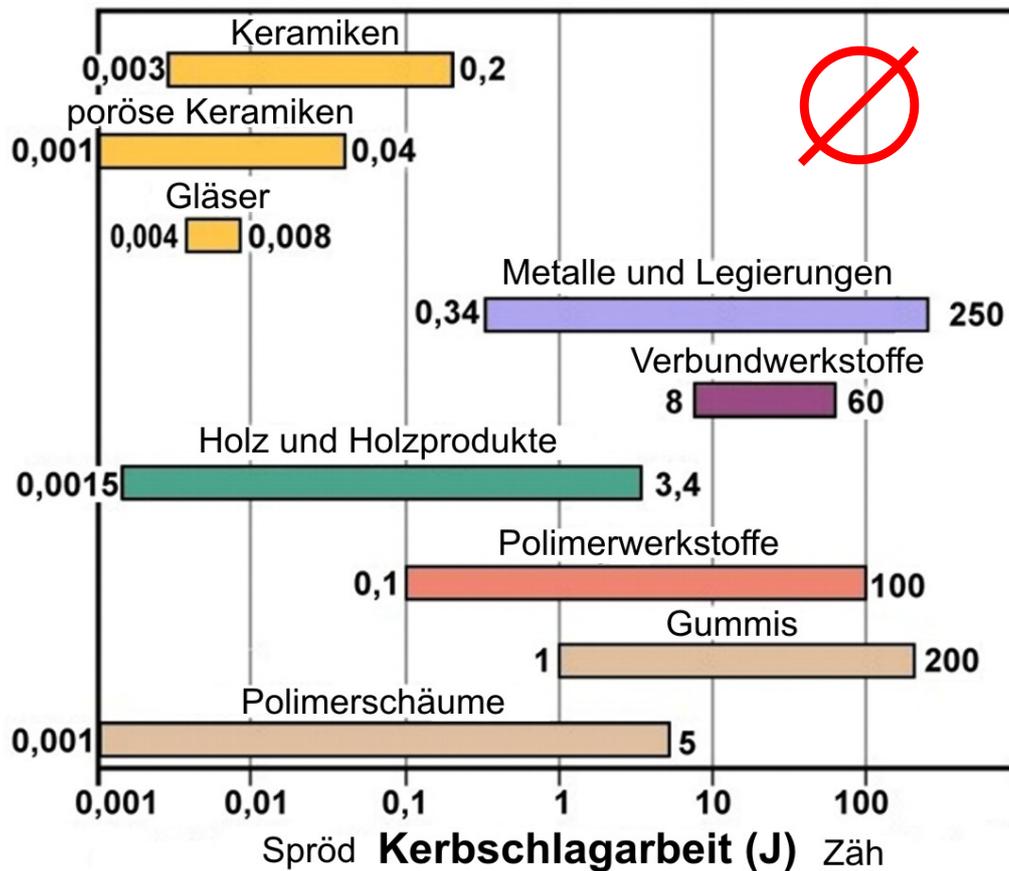
Normalspannungsbruch



Schubspannungsbruch



Folie: 28



Folie: 29

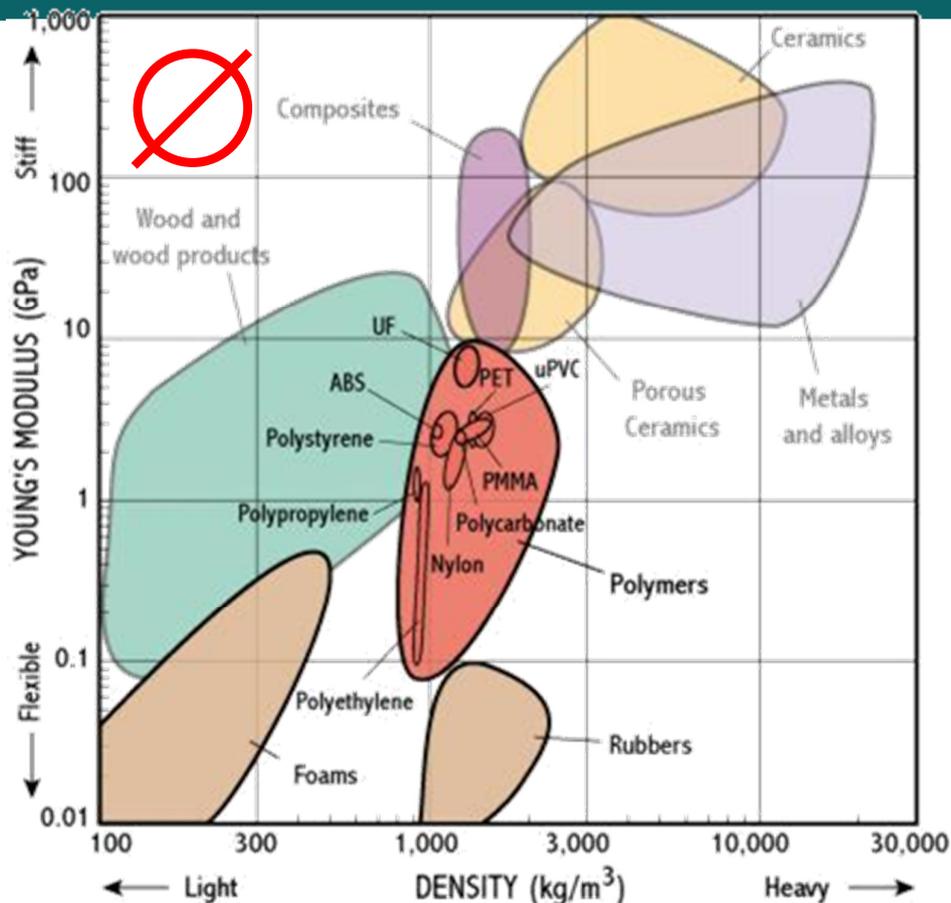
Materialien auf 20°C

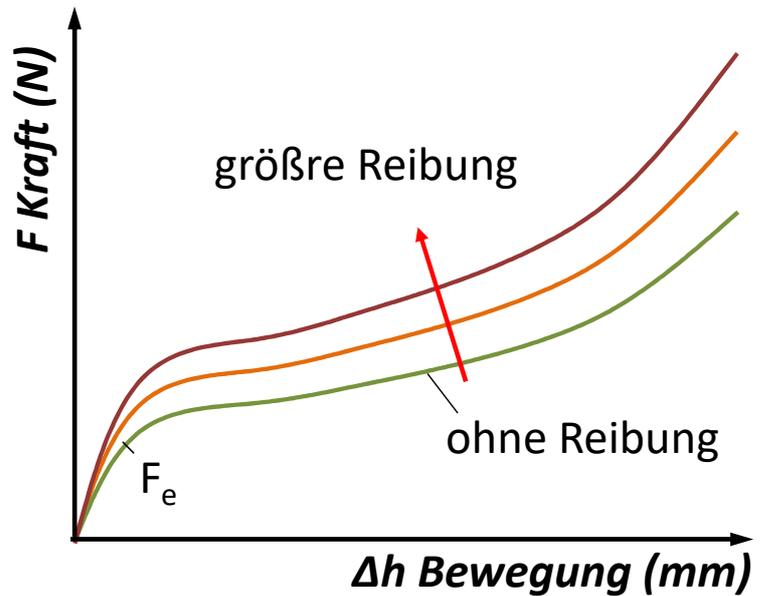
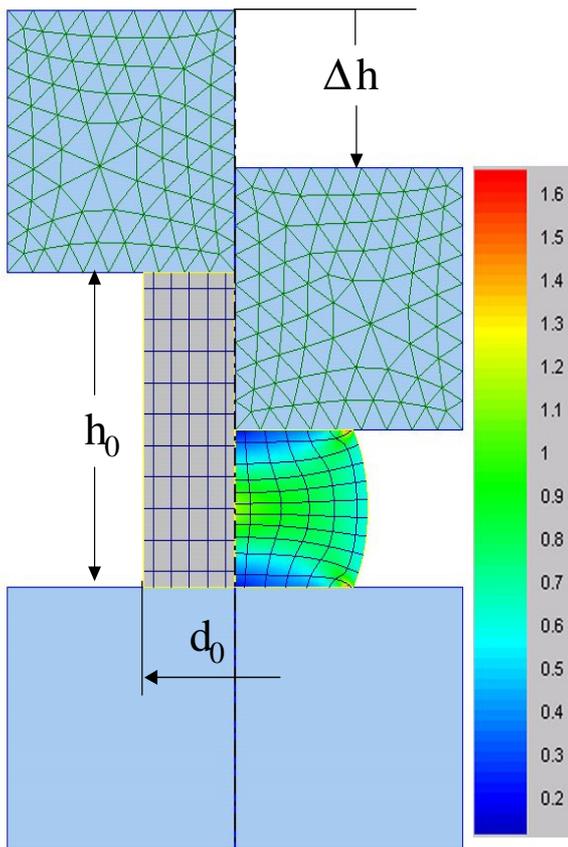
Material	E (GPa)	R _{p0.2} (MPa)	R _m (MPa)	A ₅ (%)
Stahl	190-210	200-1700	400-1800	65-2
Aluminium-Leg.	69-79	35-550	90-600	45-4
Kupfer und Leg.	105-150	75-1100	140-1300	65-3
Titan und Leg.	80-130	340-1400	410-1450	25-7
Keramik	70-1000	-	140-2600	0
Diamant	820-1050	-	-	-
Polymer	1,4-3,4	-	7-80	1000-5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

Folie: 30

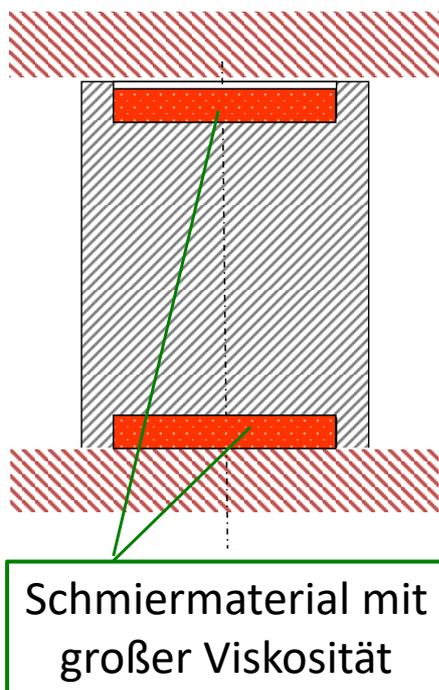
Material	R_m (MPa)	E (GPa)	ρ (kg/m^3)	R_m/ρ $\times 10^{-4}$	E/ρ $\times 10^{-4}$	USD/t
Gusseisen	200	110	7150	280	154	900
Stahl (weich)	450	210	7860	573	267	600
Stahl (hart)	1500	210	7800	1923	269	800
Stahl (korrosionsb.)	500	210	7930	631	265	2700
Aluminium (weich)	70	70	2710	258	258	2000
Aluminium (hart)	450	70	2800	1601	250	2500
Kupfer (weich)	140	120	8930	156	134	2000
Kupfer (hart)	400	120	8500	471	141	2000
Magnesium	250	42	1740	1436	241	6000
Titan (Legierung)	1200	120	4580	2620	262	20000

Spezifische Festigkeit \uparrow \uparrow spezifische Steifigkeit
(fajlagos szilárdság) (fajlagos merevség)





Folie: 33



Verformungen

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

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

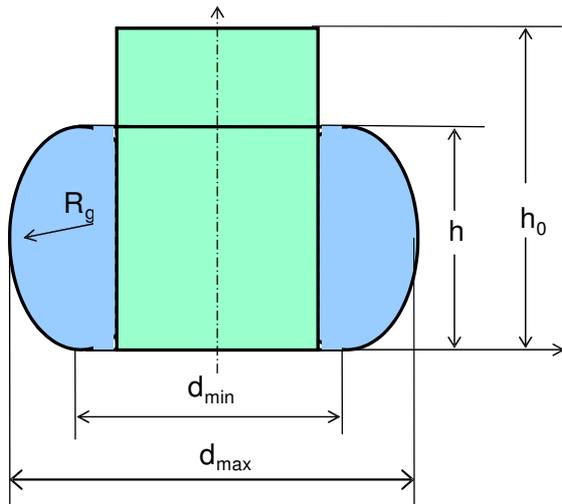
Spannungen

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

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

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

Folie: 34



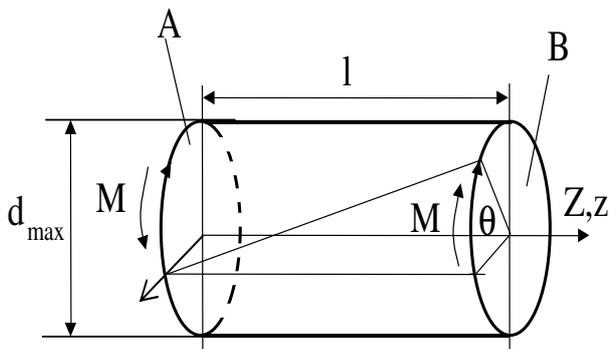
$$\sigma_{zz} = -\bar{\sigma} \left(1 - \ln \frac{d_{\max} R_g}{d_{\max} R_g - \frac{d_{\max}^2}{4} + r^2} \right)$$

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

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



Folie: 35

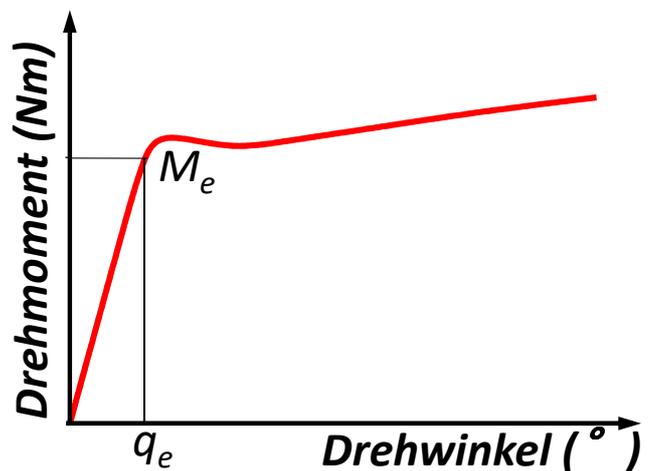


$$\bar{\epsilon} = \int_0^t \dot{\epsilon} dt = \int_0^t \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{r}{l} \frac{d\theta}{dt} dt = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{r}{l} \theta$$

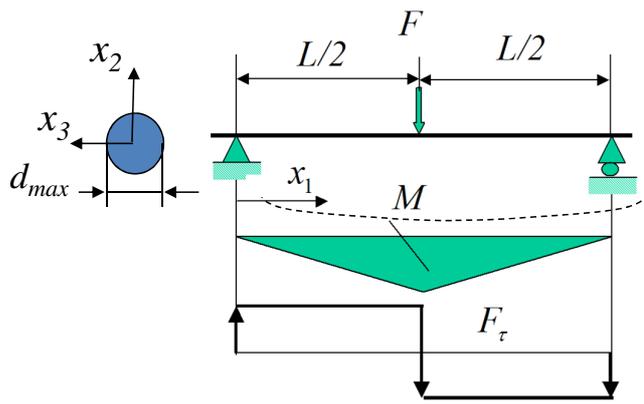
$$\sigma_{z\varphi} = \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}}$$

Drehstreckgrenze

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

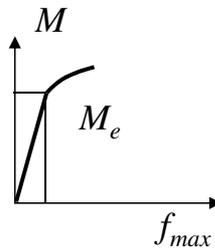


Folie: 36



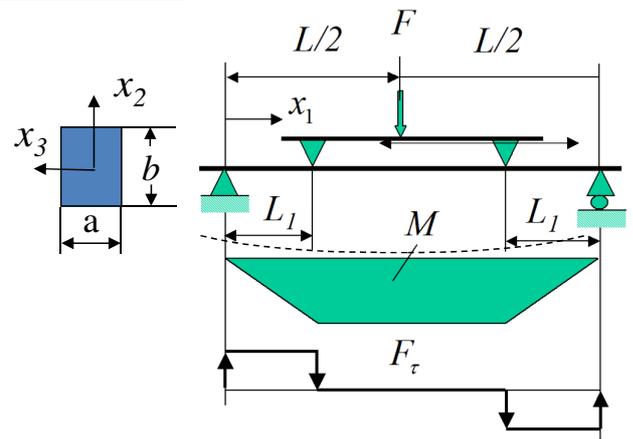
3-Punkt-Biegeprüfung

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



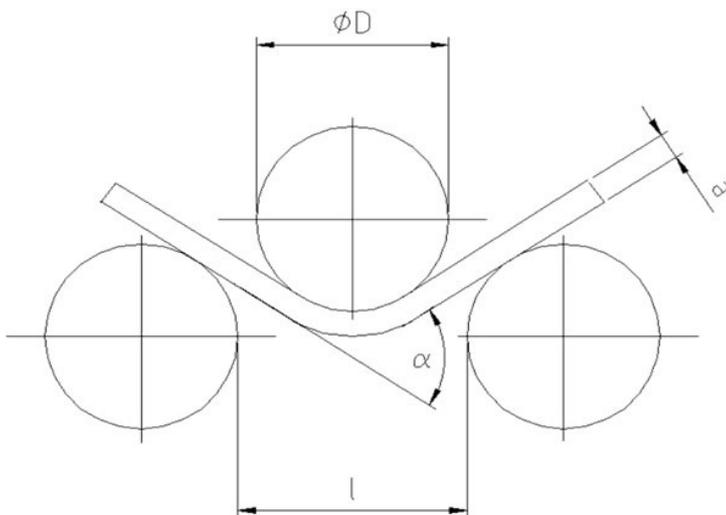
$$R_e = \frac{M_e}{I} r_{\max}$$

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



4-Punkt-Biegeprüfung

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

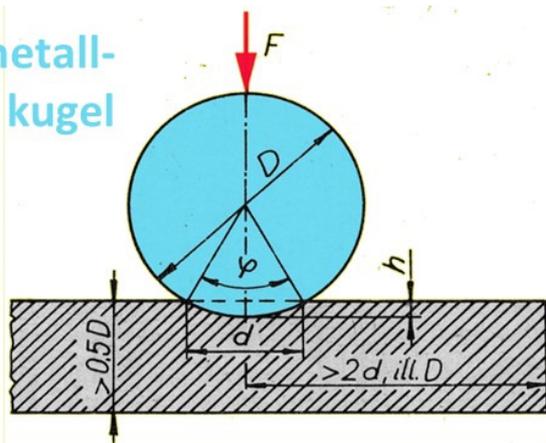


Das Biegen ist bis zum Risserscheinung durchgeführt, und der α Biegewinkel ist zu messen.

- (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: 39

Hartmetall-
kugel



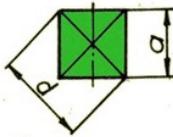
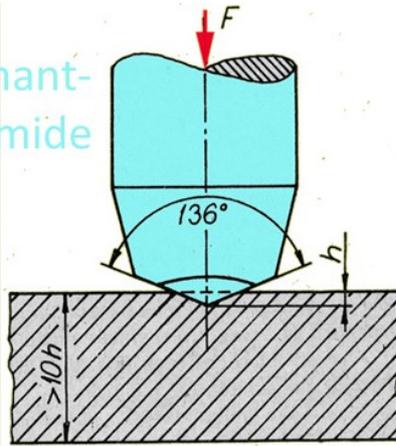
- F – Belastungskraft (N)
- A – Abdruckoberfläche (mm²)
- D – Kugeldurchmesser (mm)
- d – Abdruckdurchmesser (mm)
- h – Eindringtiefe (mm)

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

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

Folie: 40

Diamant-
pyramide



F – Belastungskraft (N)

A – Abdruckoberfläche (mm²)

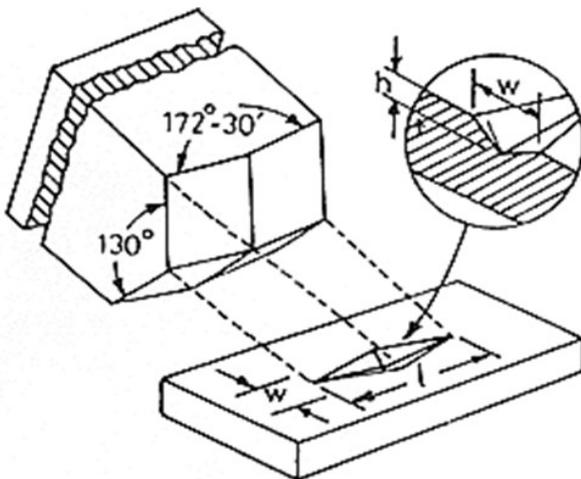
d – Abdruckdiagonale (mm)

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

Genaueres Messen der durchschnittlichen oder lokalen Härte.
Mit kleinerer Kraft (Mikrohärteprüfung) ⇒ Untersuchung von
Dünnschichten und einzelnen Gefügebestandteilen der
Gefügestruktur.

Folie: 41

Diamantpyramide



F – Belastungskraft (N)

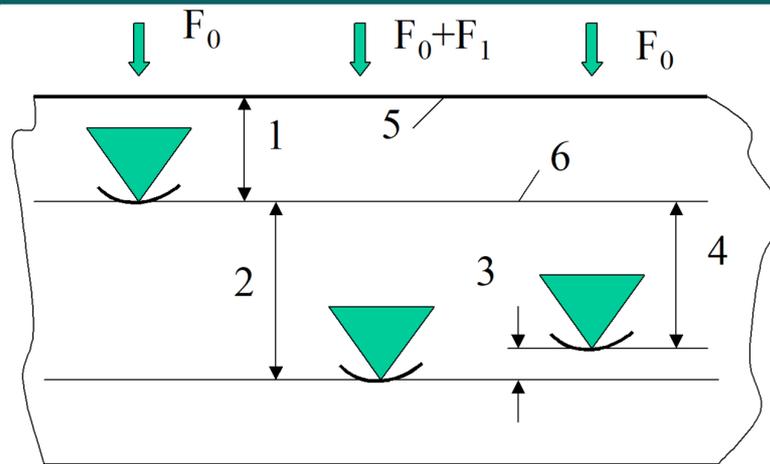
A – Abdruckoberfläche (mm²)

l – längerer Abdruck-
diagonale (mm)

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

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

Folie: 42



- 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

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

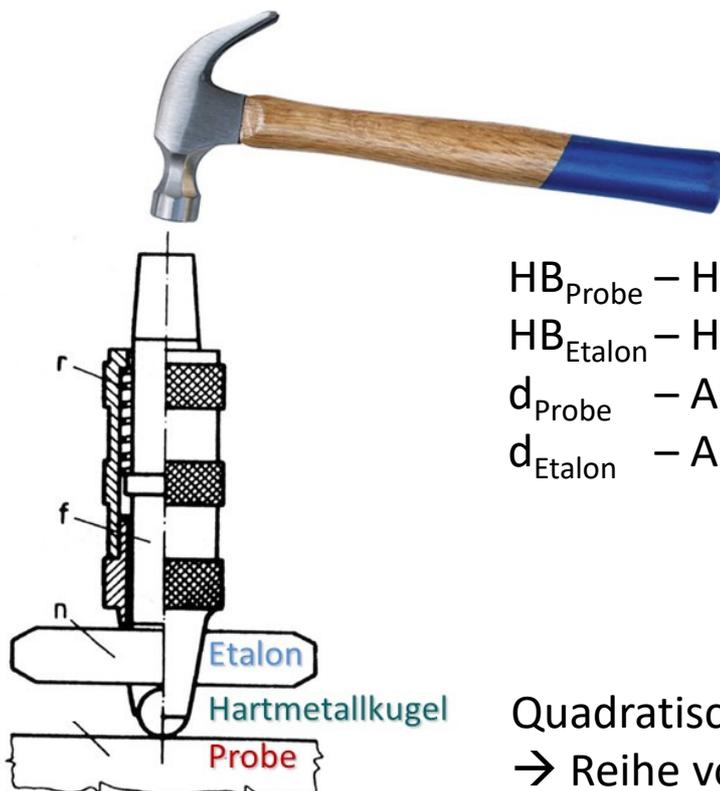
 - Diamantkegel

 - Stahl- oder Hartmetallkugel

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

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

Folie: 45



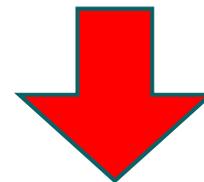
$$\frac{HB_{\text{Probe}}}{HB_{\text{Etalon}}} = \left(\frac{d_{\text{Etalon}}^2}{d_{\text{Probe}}^2} \right)$$

HB_{Probe} – Härte der Probe

HB_{Etalon} – Härte des Etalons

d_{Probe} – Abdruckdurchmesser auf der Probe

d_{Etalon} – Abdruckdurchmesser auf dem Etalon



Quadratisches Fehler beim Ablesen!

→ Reihe von Etalonen

Folie: 46

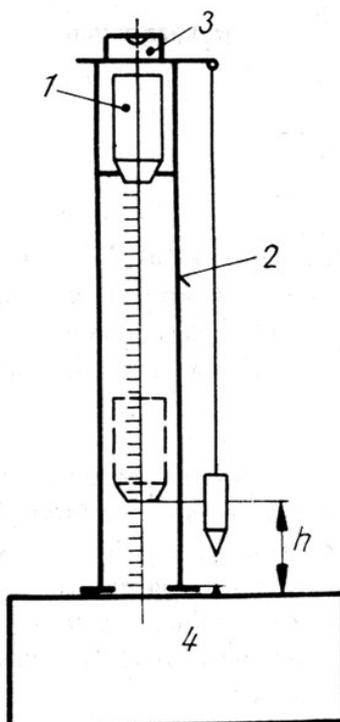
➤ Prinzip der Messung

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: 47

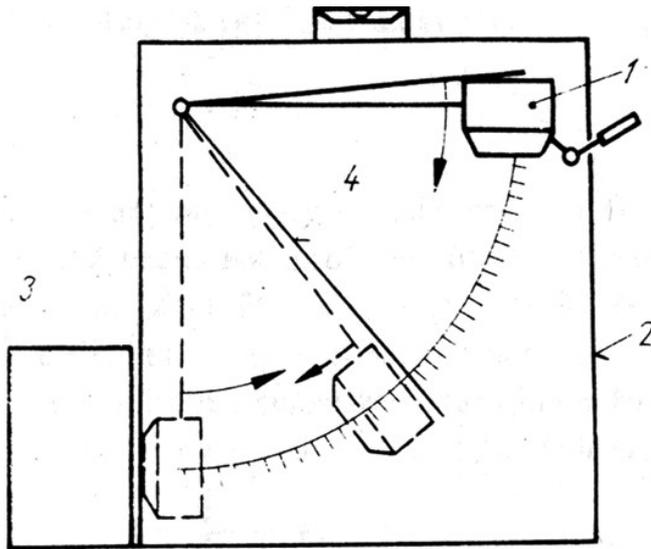


- zerstörungsfrei
- einfach
- schnell

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: 48

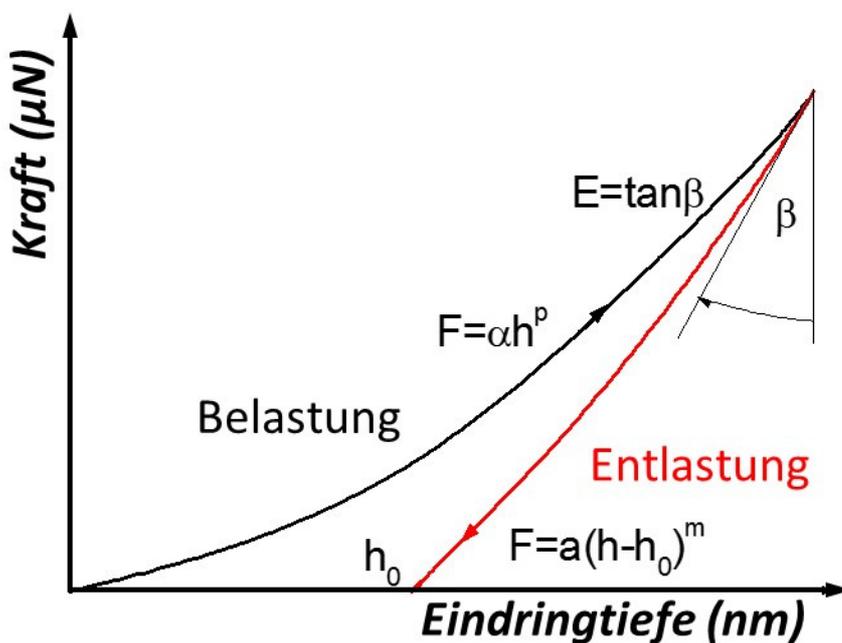


1. Messhammer
2. Halter
3. Probe
4. Schleppzeiger

Die Masse und die Qualität der Oberfläche haben Einfluss.

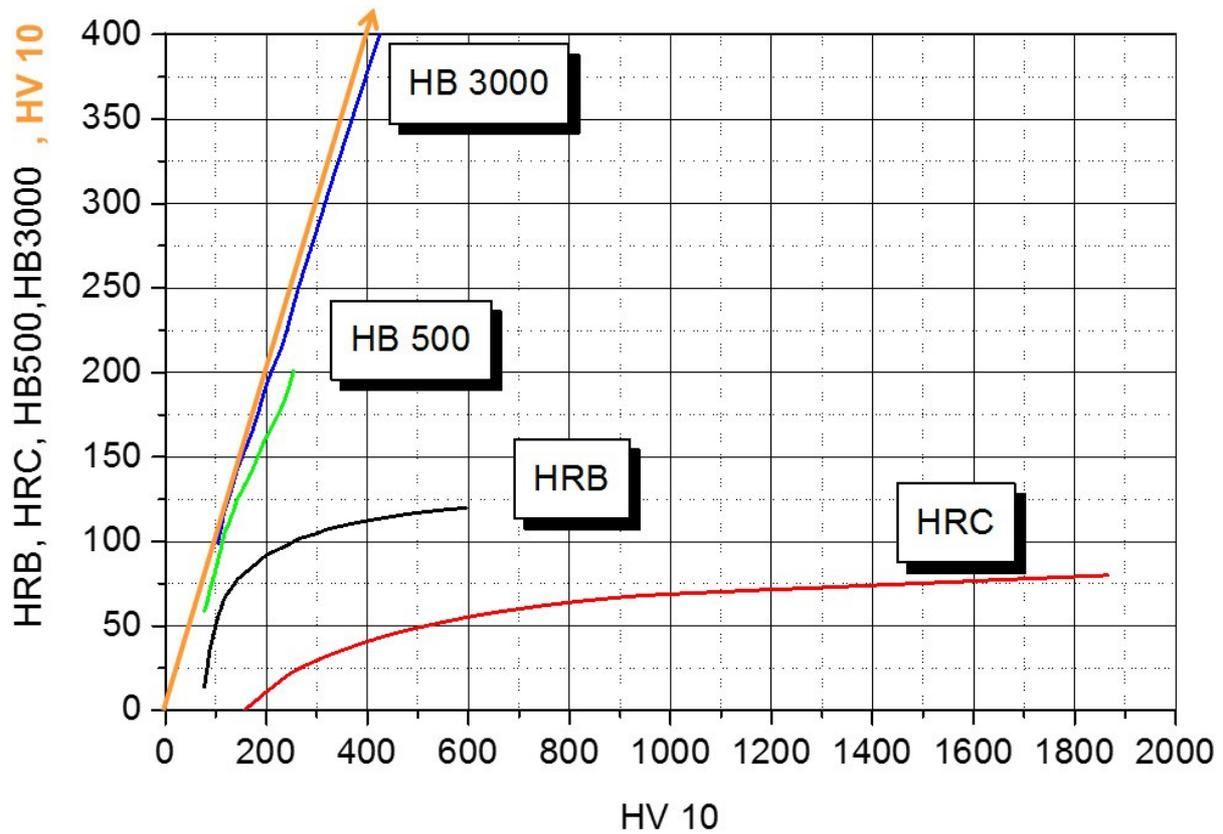
Folie: 49

Aufnahme der Kraft - Eindringtiefe Kurve



Messen von dünnen Schichten

Folie: 50



Danke für die Aufmerksamkeit!