

# Werkstofftechnik I

## Werkstoffprüfung

Verfasser:

Prof. Dr.-Ing. habil. Hans-Jürgen Christ

Datum: 24.11.2017



# Motivation

Jedes technische System wird durch die beiden Merkmale Struktur und Funktion gekennzeichnet, weshalb es üblich ist, alle Werkstoffe entsprechend ihrer Gebrauchseigenschaften in diese zwei große Gruppen einzuteilen:

**Strukturwerkstoffe**  
(mechanisch-technologische Eigenschaften stehen im Vordergrund)

Beispiele:



Flugzeugturbinenschaufel



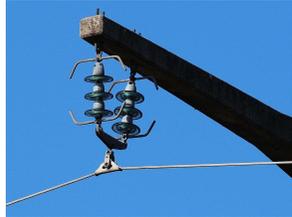
Stahl (Brückenbau)

**Funktionswerkstoffe**  
(funktionelle Eigenschaften stehen im Vordergrund)

Beispiele:



Dauermagnet



Isolator (Keramik, Kunststoff)

# Motivation

- Hier sollen Strukturwerkstoffe betrachtet werden
- Eine sichere Auslegung von Bauteilen aus diesen Werkstoffen erfordert die genaue Kenntnis der Werkstoffkennwerte (z.B. Festigkeit), die durch geeignete Prüfverfahren ermittelt werden

## Zerstörende Werkstoffprüfverfahren

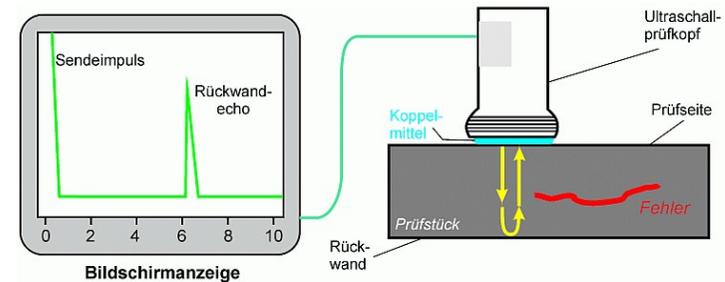
Beispiel:



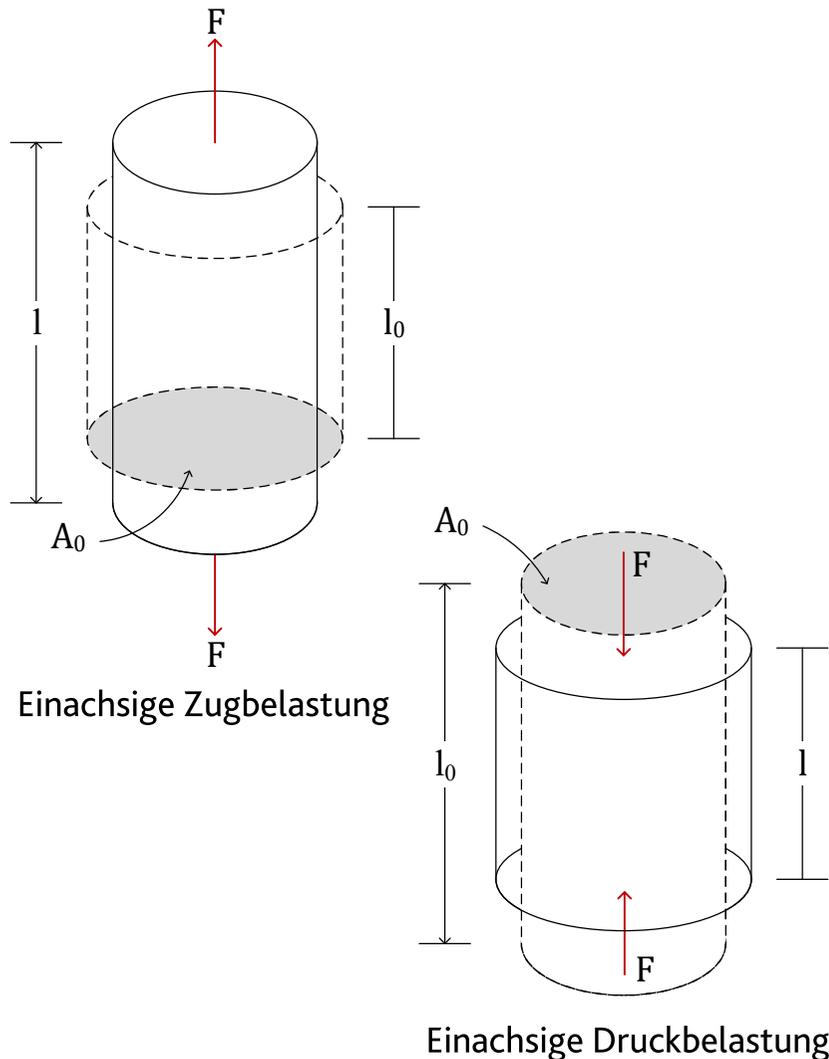
Zugversuch

## Zerstörungsfreie Werkstoffprüfverfahren

Beispiel:



# Einachsige Belastung



- (Nenn-) Spannung  $\sigma$  :  
(auch technische Spannung)

$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$

mit:

- $\sigma$  = Spannung in N/mm<sup>2</sup>
- F = Kraft in N
- A<sub>0</sub> = Ausgangsquerschnittsfläche in mm<sup>2</sup>

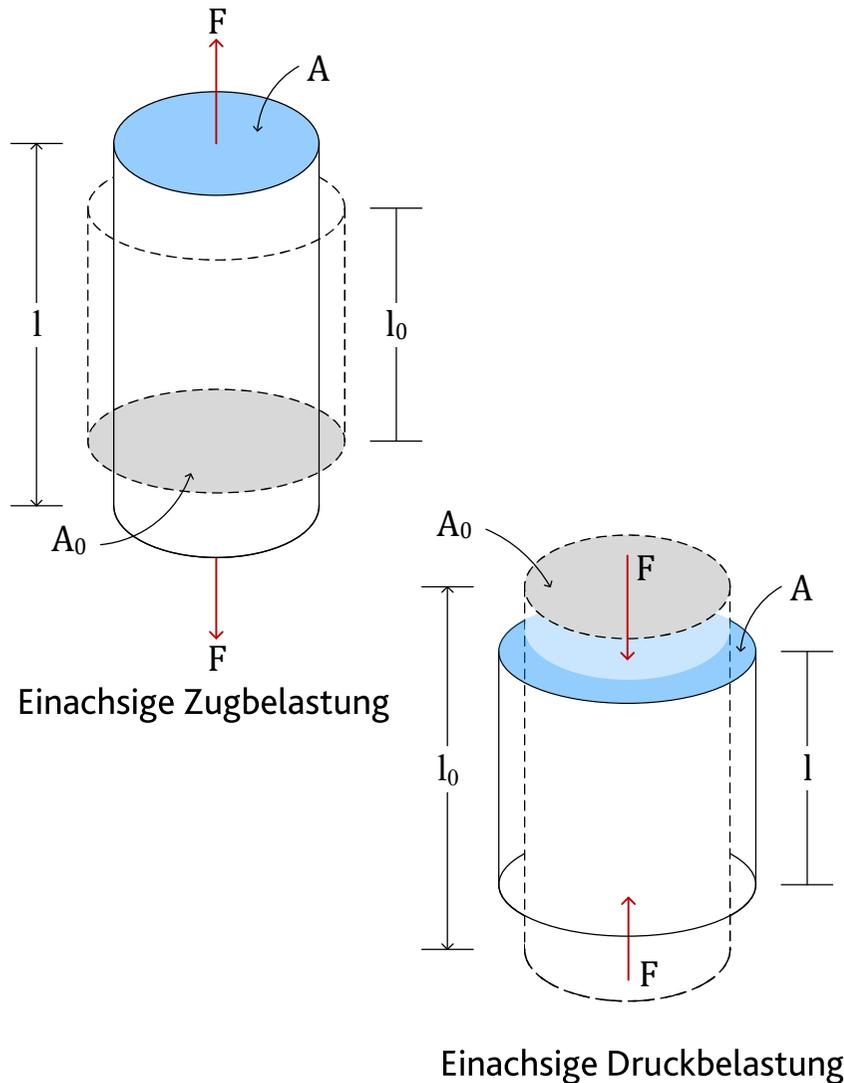
- Dehnung  $\varepsilon$  :  
(auch technische Dehnung)

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

mit:

- $\varepsilon$  = Dehnung
- l = Aktuelle Länge in mm
- l<sub>0</sub> = Ausgangslänge in mm
- $\Delta l$  = Verlängerung in mm

# Einachsige Belastung



- Für die wahre (physikalische) Spannung und Dehnung gilt:

$$\sigma_w = \frac{F}{A} \quad \text{und} \quad d\varepsilon_w = d\varepsilon = \frac{dl}{l}$$

mit:

- $\sigma_w$  = wahre Spannung in N/mm<sup>2</sup>
- $\varepsilon_w$  = wahre Dehnung
- F = Kraft in N
- A = Aktuelle Querschnittsfläche in mm<sup>2</sup>
- l = Aktuelle Länge in mm

## Umrechnung in wahre Größen

Umrechnung von den technischen in die wahren Größen:

$$\varepsilon = \varepsilon(l) = \frac{\Delta l}{l_0} \text{ und } \varepsilon(l = l_0) = 0$$

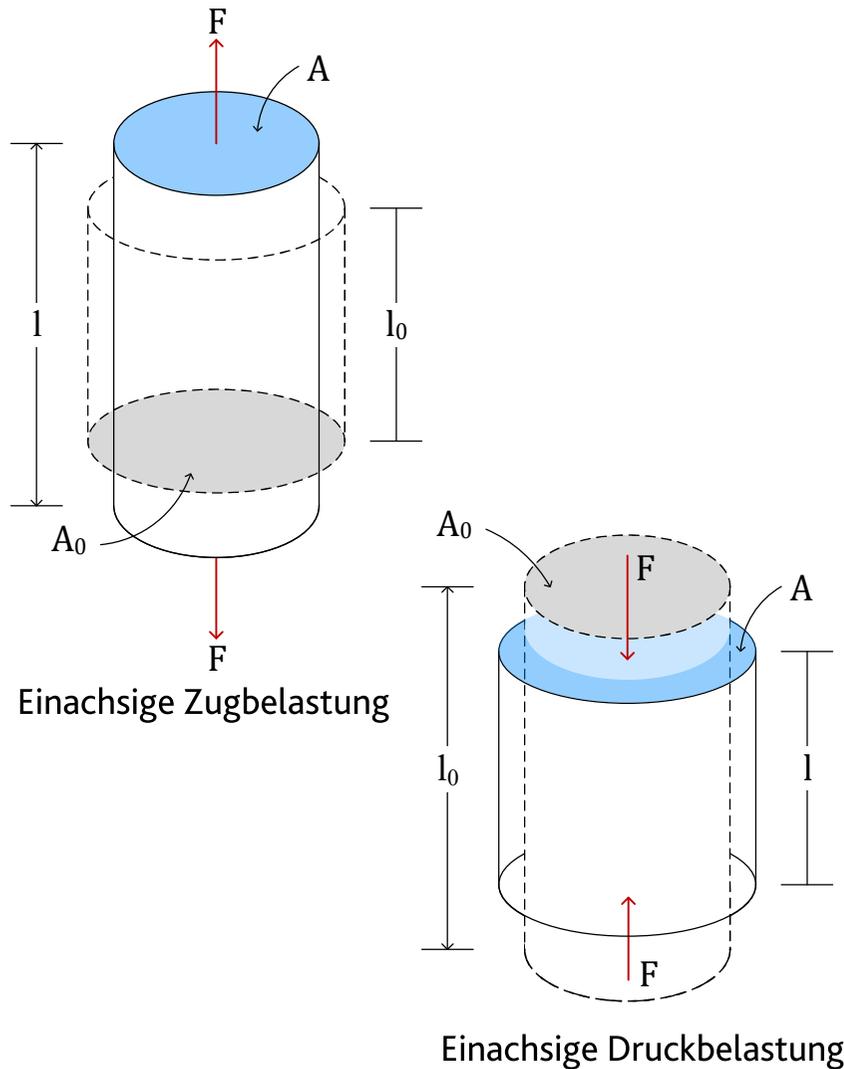
$$\varepsilon_w = \int_{l_0}^l d\varepsilon_w = \int_{l_0}^l \frac{1}{l'} \cdot dl' = \ln \frac{l}{l_0} = \ln \frac{l_0 + \Delta l}{l_0} = \ln(1 + \varepsilon)$$

$$\sigma_w = \frac{F}{A} = \frac{F}{A} \cdot \frac{A_0}{A_0} = \frac{F}{A_0} \cdot \frac{A_0}{A} = \frac{F}{A_0} \cdot \frac{l}{l_0} = \sigma \cdot (1 + \varepsilon)$$

bei Berücksichtigung der Volumenkonstanz

$$A \cdot l = A_0 \cdot l_0 \rightarrow \frac{A_0}{A} = \frac{l}{l_0}$$

# Einachsige Belastung



- Für die wahre (physikalische) Spannung und Dehnung gilt:

$$\sigma_w = \frac{F}{A} \quad \text{und} \quad d\varepsilon_w = \frac{dl}{l}$$

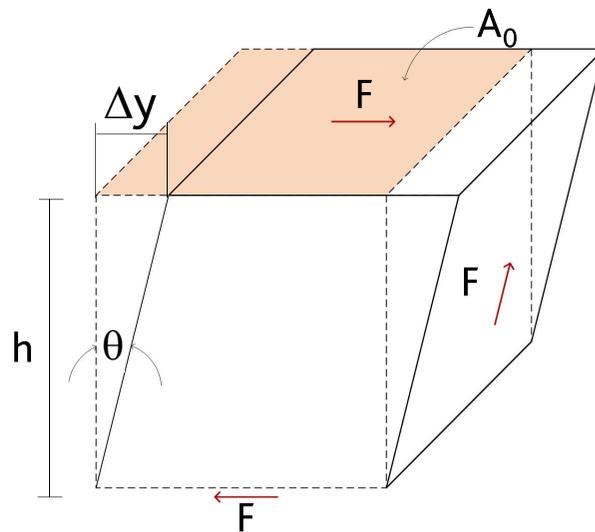
mit:

- $\sigma_w$  = wahre Spannung in N/mm<sup>2</sup>
- $\varepsilon_w$  = wahre Dehnung
- F = Kraft in N
- A = Aktuelle Querschnittsfläche in mm<sup>2</sup>
- l = Aktuelle Länge in mm

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

$$\sigma_w = \sigma \cdot (1 + \varepsilon)$$

# Zweiachsige Belastung - Scherbeanspruchung



## ■ Schubspannung:

$$\tau = \frac{F}{A_0}$$

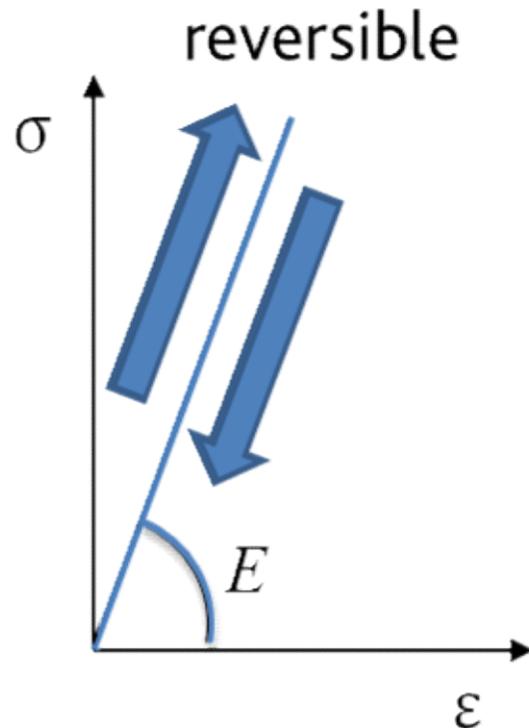
mit:  $\tau$  = Schubspannung in N/mm<sup>2</sup>  
 $F$  = Scherkraft in N  
 $A_0$  = Ausgangsquerschnittsfläche in mm<sup>2</sup>

## ■ Scherung:

$$\gamma = \tan \theta = \frac{\Delta y}{h} \rightarrow \Delta y = h \cdot \gamma$$

mit:  $\gamma$  = Scherung  
 $\theta$  = Scherwinkel im Bogenmaß  
 $\Delta y$  = Verschiebung in mm  
 $h$  = Höhe in mm

## Elastisches Verhalten



- Vollständige Reversibilität bei Entlastung
- Linearer Zusammenhang zwischen Spannung und Formänderung (Hookesches Gesetz)
- Beschränkt sich meist auf kleine Formänderungen (<1%)
- Hookesches Gesetz:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

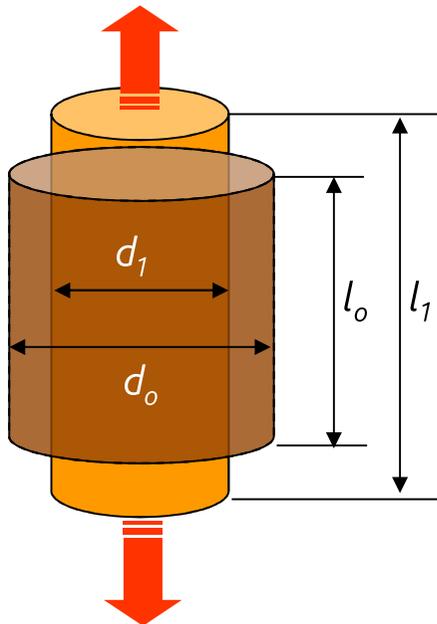
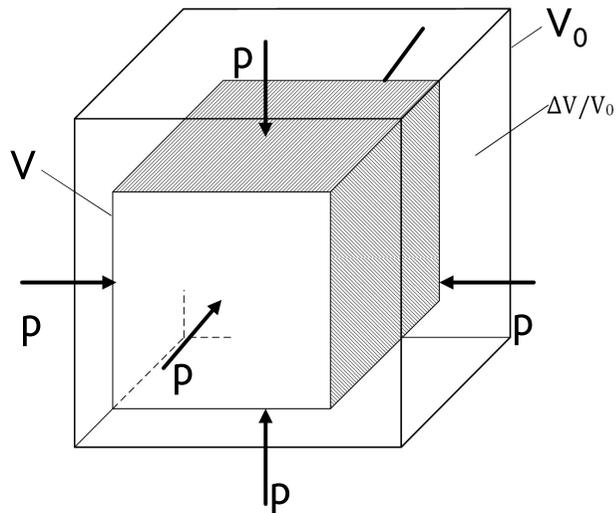
$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

(E: Elastizitätsmodul)

$$\tau = G \cdot \gamma$$

(G: Schubmodul)

# Elastische Konstanten



- Bei allseitigem Druck p:

$$p = -K \cdot \frac{\Delta V}{V_0}$$

(K: Kompressionsmodul)

- Als vierte elastische Konstante dient die Querkontraktionszahl (Poisson-Zahl)  $\nu$ :

$$\epsilon_{\text{quer}} = \frac{d_1 - d_0}{d_0} \quad \text{und} \quad \epsilon_{\text{längs}} = \frac{l_1 - l_0}{l_0}$$

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

# Elastische Konstanten

Werkstoff	E-Modul E in GPa	Schubmodul G in GPa	Poisson- Zahl $\nu$	Kompressions- modul K in GPa
Stahl	<b>210</b>	79	0,27 – 0,3	160
Aluminium	<b>70</b>	25	0,34	75
Kupfer	125	46	0,35	139
Eisen	173	84	0,28	170
Aluminiumoxid	<b>400</b>	148	0,25	240
Polymere	<b><math>\approx 1</math></b>	< 1	< 0,5	$G \ll K$

- Von den vier elastischen Konstanten (E, G, K und  $\nu$ ) sind nur zwei unabhängig, d.h. sind zwei bekannt, können die Fehlenden aus diesen berechnet werden
- Umrechnungen der Konstanten:

$$E = 2(1 + \nu)G$$

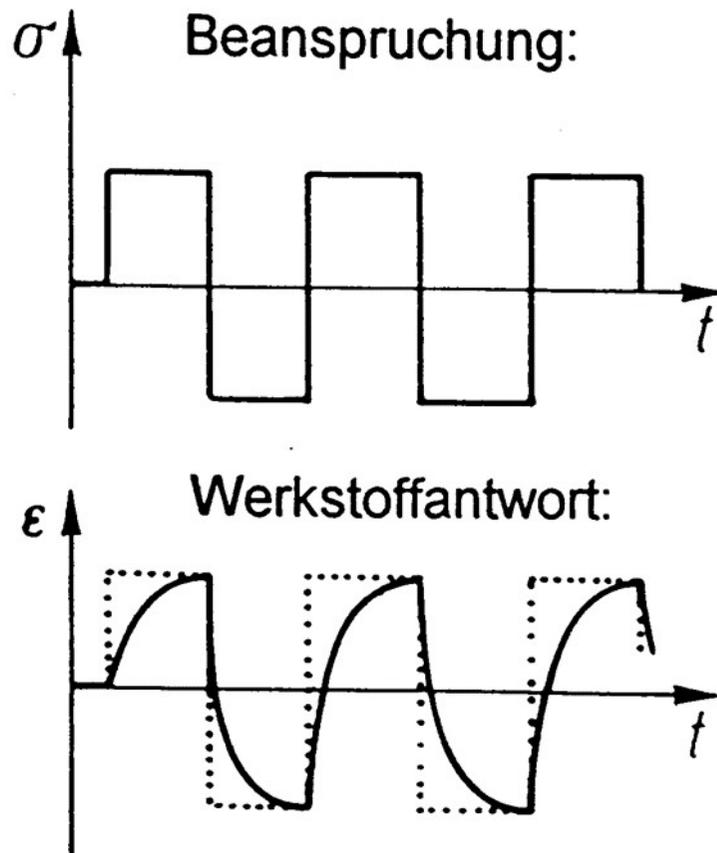
$$E = 3(1 - 2\nu)K$$

### Faustformeln

$$\nu = \frac{1}{3}$$

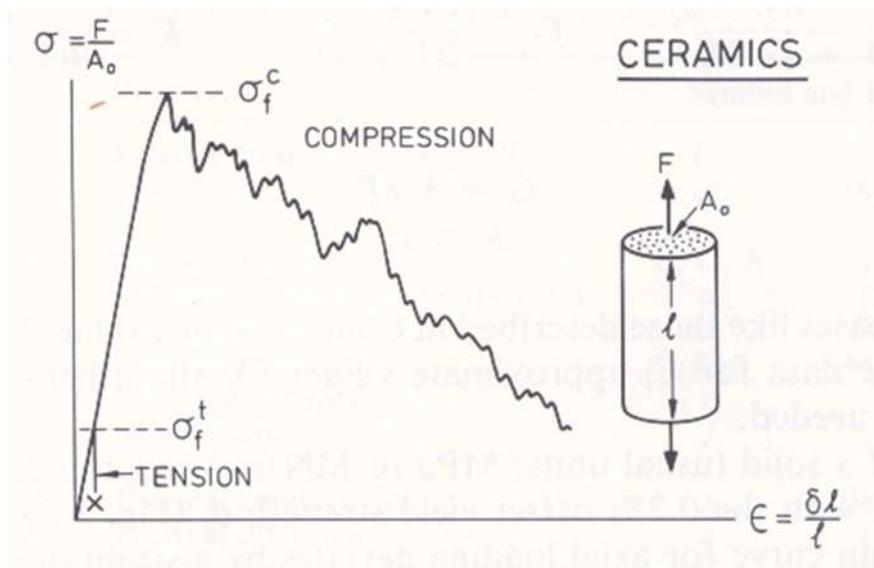
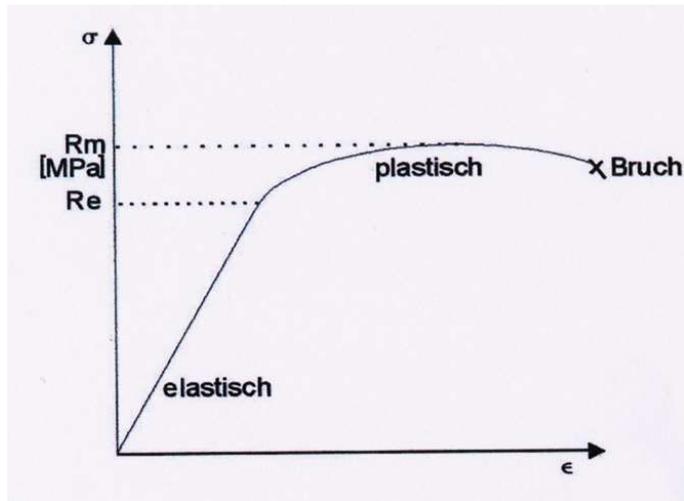
$$G = \frac{3}{8}E$$

## Werkstoffverhalten unter Beanspruchung



- **Anelastisches Verhalten,**  
Dämpfung: Darunter versteht man ein zeitabhängiges, elastisches Verhalten (Formänderung ist zwar reversibel, "hinkt" aber der Be- und Entlastung "nach").

# Werkstoffverhalten unter Beanspruchung



- **Plastisches Verhalten:** Setzt oberhalb einer Grenzspannung (=Fließspannung) ein. Plastische Verformung ist irreversibel.
- **Duktiles/sprödes Verhalten:** Sprödes Verhalten liegt vor, wenn der Werkstoff (praktisch) ohne plastische Verformung ( $\epsilon_{plast} < 10^{-3}$ ) - d.h. im elastischen Bereich - bricht.
- **Viskose Verformung:** Irreversibel, aber ohne Fließgrenze
- **Kriechverformung:** Bei  $T > 0,3 T_m$  ( $T_m$ : absolute Schmelztemperatur). Zeitabhängige Verformung.

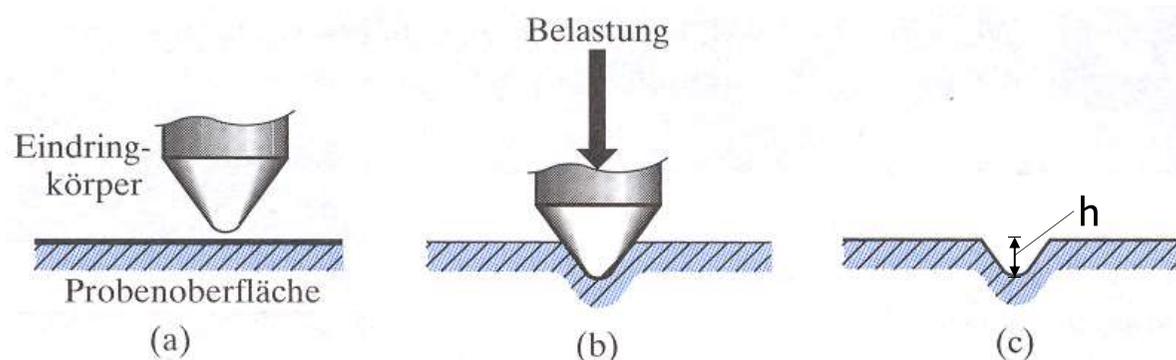
## Definition

- **Unter Härte versteht man den Widerstand eines Stoffes gegen das Eindringen eines anderen Körpers.** Bei den am häufigsten benutzten Härteprüfverfahren erfolgt das Eindringen unter statischer Belastung (Gegensatz: stoßartig).
  - Vorteil: schnell, einfach, praktisch zerstörungsfrei
  - Nachteil: nicht quantitativ, abhängig vom Härteprüfverfahren
- Grundsätzlich: Eine Prüfkraft wird stossfrei mithilfe eines Eindringkörpers auf einen polierten Oberflächenbereich der Probe aufgebracht und wirkt eine bestimmte Zeit ruhend ein. Nach Entlastung wird entweder die **Fläche des**

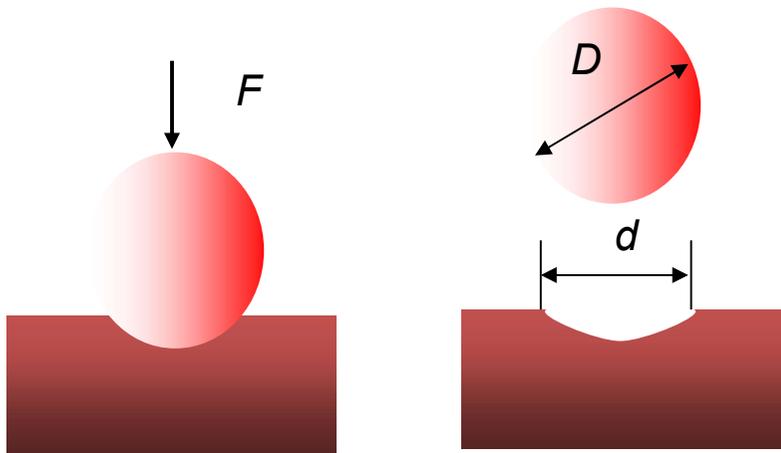
$$H = \frac{\text{Last}}{\text{Fläche}} = \frac{\text{Last}}{a \cdot h}$$

gtiefe h ausgewertet.

a = geometrische Konstante



# Härteprüfung nach Brinell (DIN EN ISO 6506-1 bis -3)

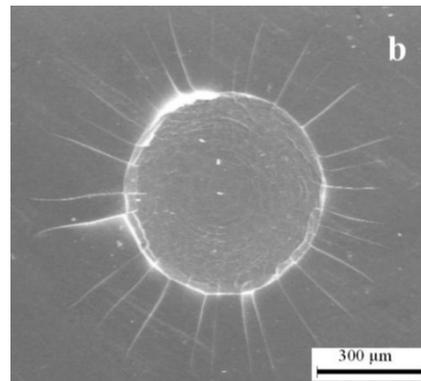


Vorgehensweise:

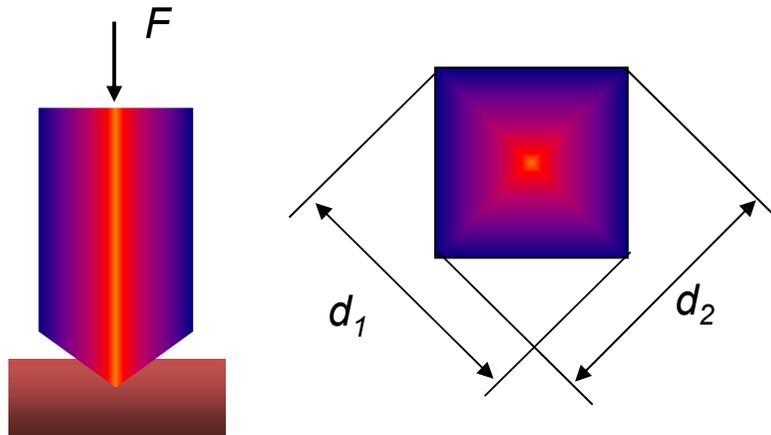
- Eine Kugel aus gehärtetem Stahl mit dem Durchmesser  $D$  ( $1\text{mm} \leq D \leq 10\text{mm}$ ) wird mit einer Prüfkraft  $F$  in die Probe eingedrückt.
- Ermittelt wird der Eindruckdurchmesser  $d$  nach Entlastung.  $d$  sollte zwischen  $0,2 D$  und  $0,7 D$  liegen, da dann der ermittelte Härtewert weitgehend unabhängig von  $D$  und  $F$  ist.

$$HB = \frac{0,102F}{0,5\pi D \left( D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)}$$

- Beispiel: **315 HB 2,5/187,5** bedeutet einen Härtewert von 315, gemessen nach Brinell mit  $D = 2,5 \text{ mm}$  und  $F = 187,5 \text{ kp}$  (1839 N)



# Härteprüfung nach Vickers(DIN EN ISO 6507-1 bis -3)



## Vorgehensweise:

- Als Eindringkörper wird eine Diamantpyramide mit quadratischem Grundriss und einem Spitzenwinkel von  $136^\circ$  benutzt.
- Die Eindruckfläche wird aus dem Mittelwert  $d$  der Diagonalen  $d_1$  und  $d_2$  ermittelt und die Prüfkraft  $F$  auf diese Fläche bezogen.

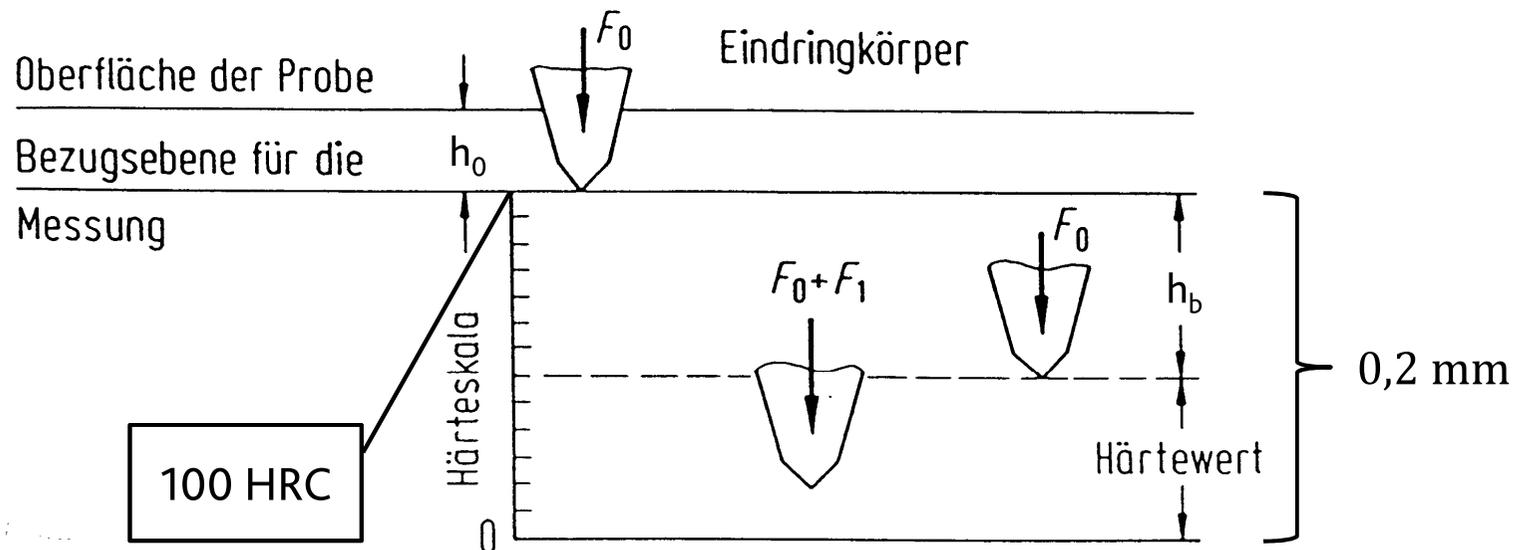
$$HV = \frac{0,102F \cdot 2 \cdot \cos 22^\circ}{d^2}$$

- Beispiel: **600 HV 50** bedeutet eine Härte von 600, gemessen nach Vickers mit  $F = 50 \text{ kp}$  (490,5 N).
- Man unterscheidet:
  - Makrohärte:  $F > 50 \text{ N}$
  - Kleinlasthärte:  $2 \text{ N} < F < 50 \text{ N}$
  - Mikrohärte:  $F < 2 \text{ N}$

## Härteprüfung nach Rockwell (DIN EN ISO 6508-1 bis -3)

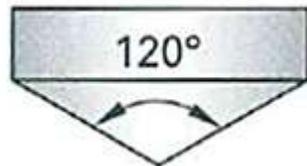
### Vorgehensweise:

- Durch Aufbringen einer Vorkraft  $F_0$  ( $10 \text{ kp} = 98,1 \text{ N}$ ) wird ein sicherer Kontakt zwischen Prüfstück und Eindringkörper gewährleistet.
- Die Prüfkraft  $F_1$  erzeugt die **bleibende** Eindringtiefe  $h_b$ .
- Härtenullpunkt ist  $h_b = 0,2 \text{ mm}$  (entspricht 0 HRC);  $h_b = 0$  entspricht dem Maximalwert von 100 HRC (d.h. je  $2 \mu\text{m}$  je Härteeinheit).

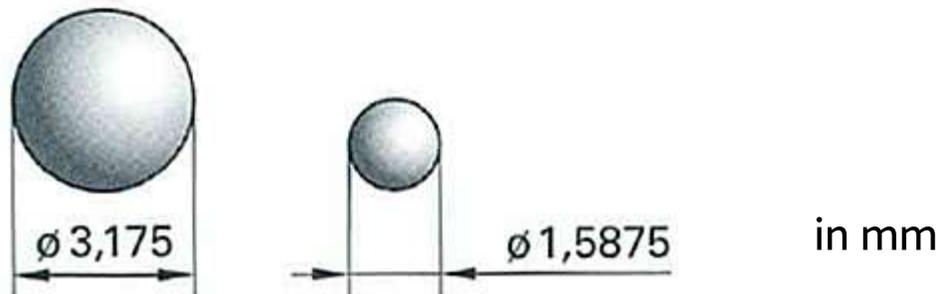


## Härteprüfung nach Rockwell (DIN EN ISO 6508-1 bis -3)

- Hier dient die bleibende Eindringtiefe als Kenngröße zur Bestimmung der Härte
- Zwei Varianten werden unterschieden:
  - HRC-Verfahren: Diamantkegel mit 120° Spitzenwinkel



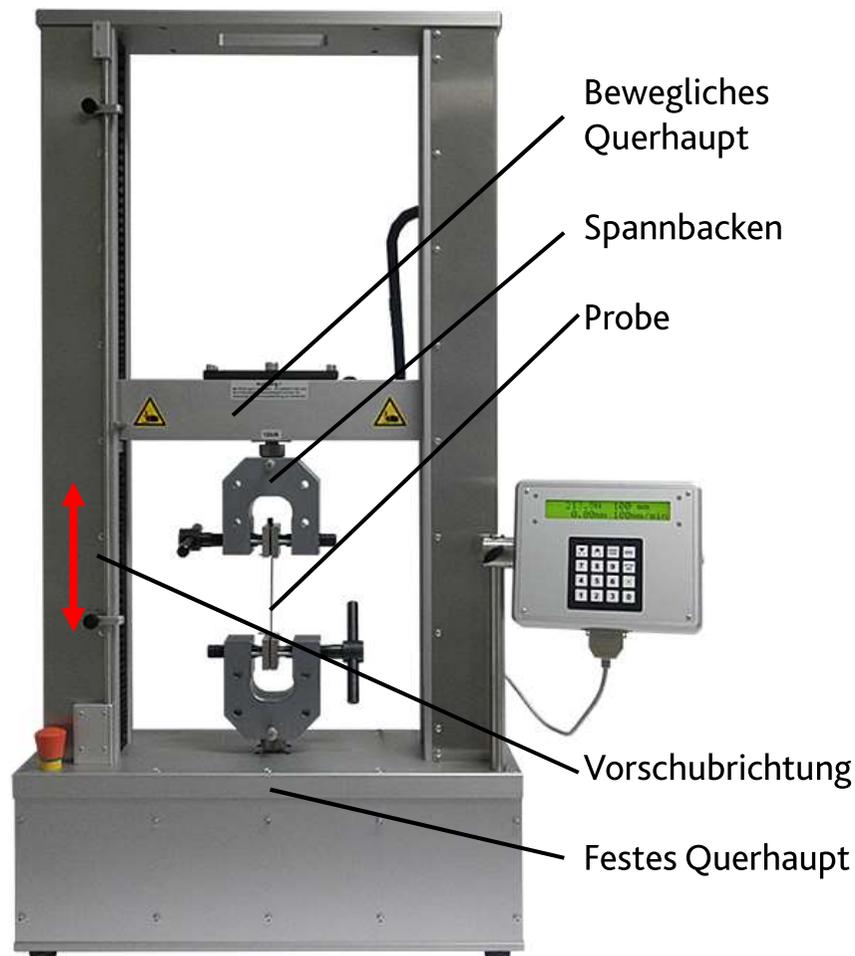
- HRB-Verfahren: Stahlkugel mit  $D=1/16$  inch oder  $1/8$  inch<sup>1</sup>



- Vorteil dieses Verfahrens ist seine Eignung zur vollautomatischen Messwerterfassung

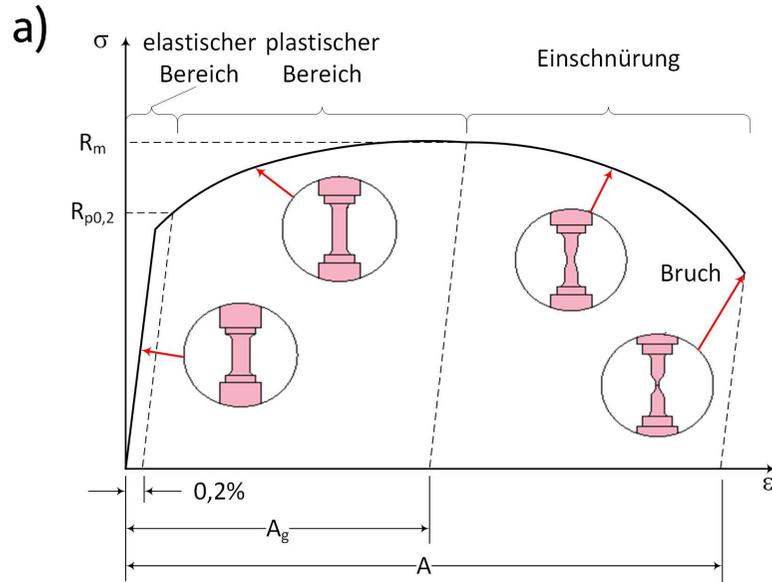
<sup>1</sup> 1 inch = 1 Zoll = 2,54 cm

# Zugversuch



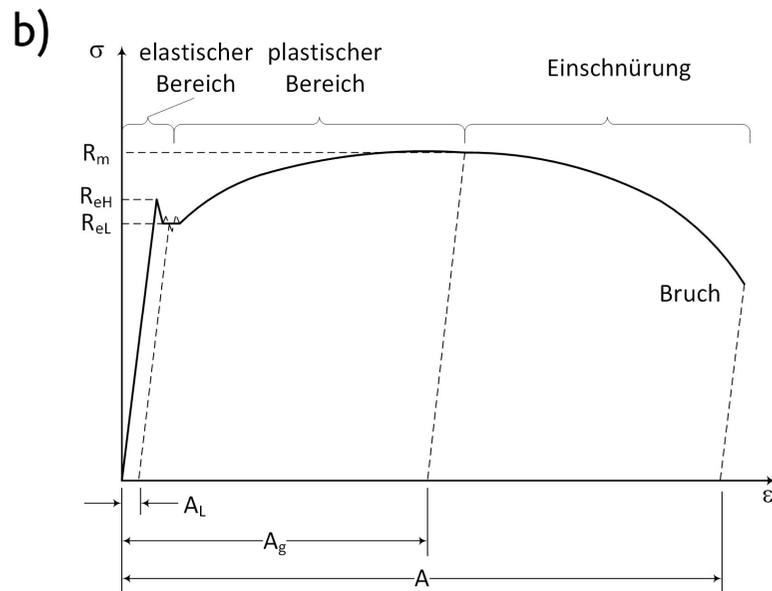
- Der Zugversuch liefert in quantitativer Weise wichtige Kennwerte der Festigkeit eines Werkstoffs, die für eine sichere Bauteilauslegung unumgänglich sind.
- Gemessen wird ein Kraft-Verlängerungs-Diagramm, welches in ein (technisches) Spannungs-Dehnungs-Diagramm umgerechnet wird.

# Spannungs-Dehnungskurven metallischer Werkstoffe



a) Kontinuierlicher Übergang von elastischer zu plastischer Verformung (Verhalten eines duktilen Werkstoffes)

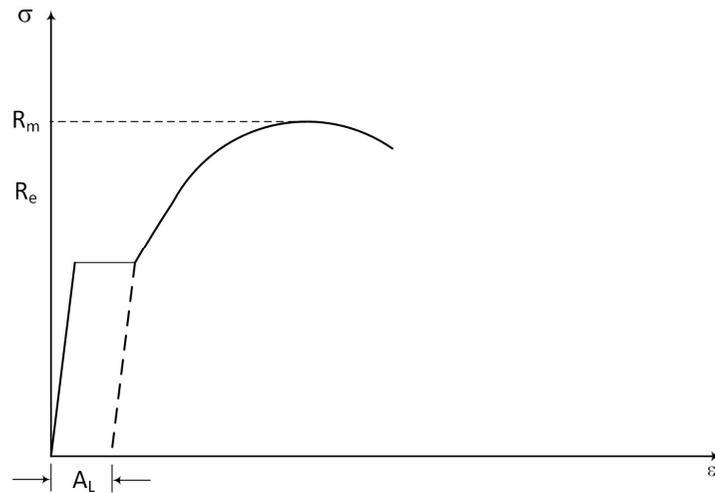
- (1) Elastischer Bereich
- (2) Plastischer Bereich



b) Diskontinuierlicher Übergang von elastischer zu plastischer Verformung, ausgeprägte obere und untere Streckgrenze

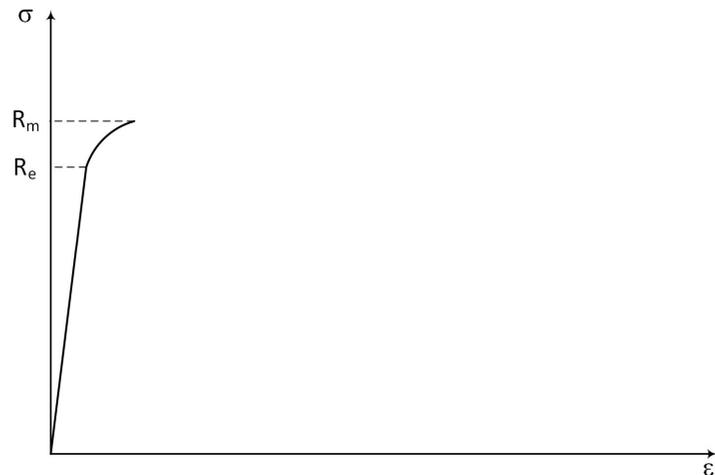
## Spannungs-Dehnungskurven metallischer Werkstoffe

c)



c) Ausgeprägter Fließbereich ohne obere und untere Streckgrenze

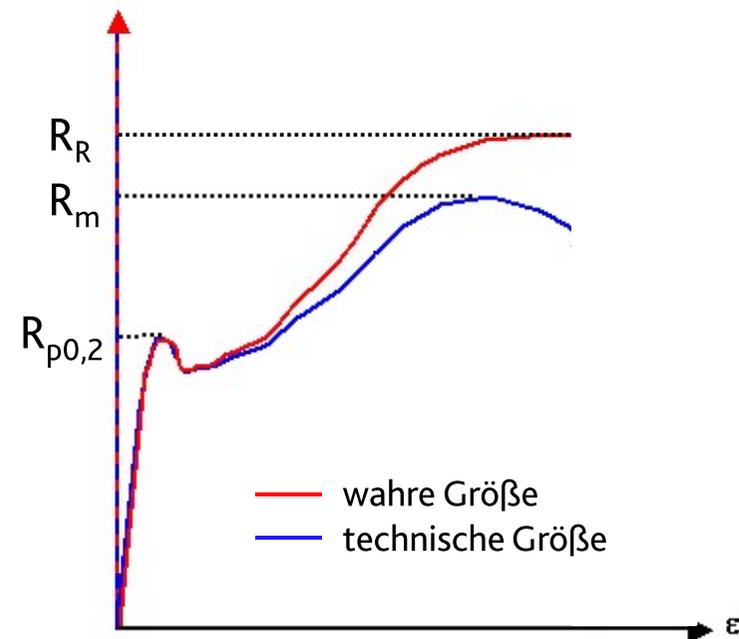
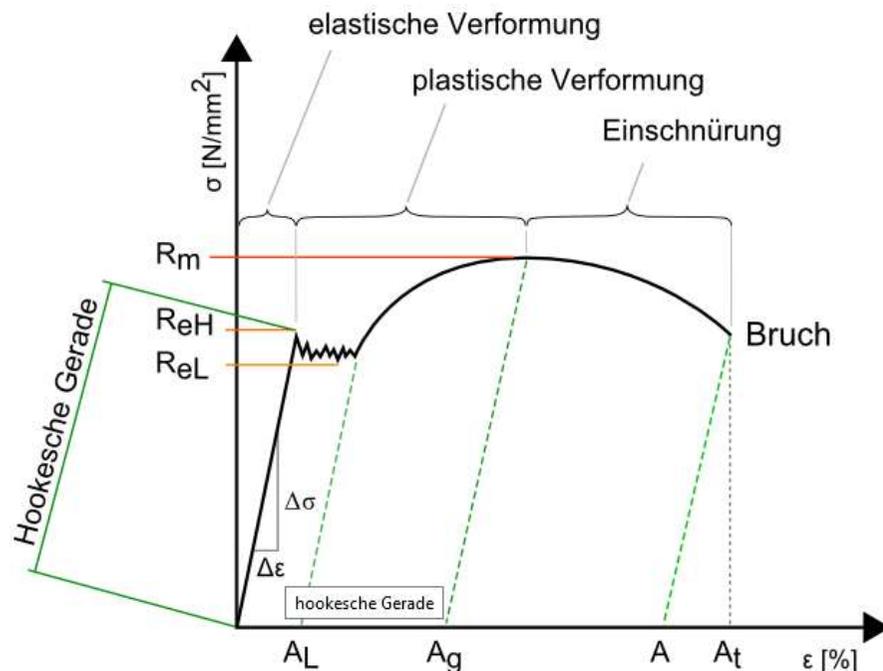
d)



d) Stark eingeschränktes plastisches Verformungsvermögen, d.h. spröder Werkstoff

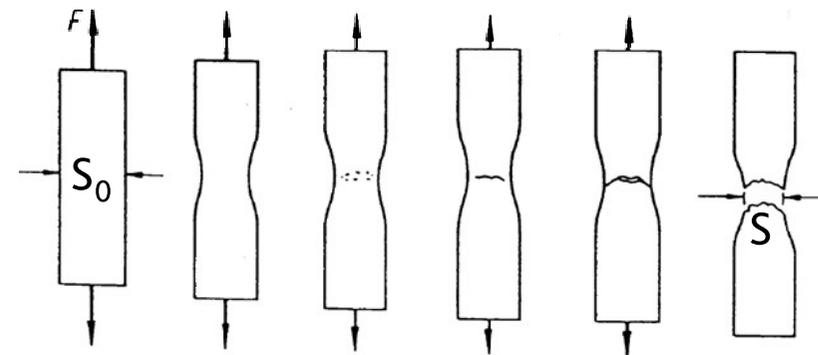
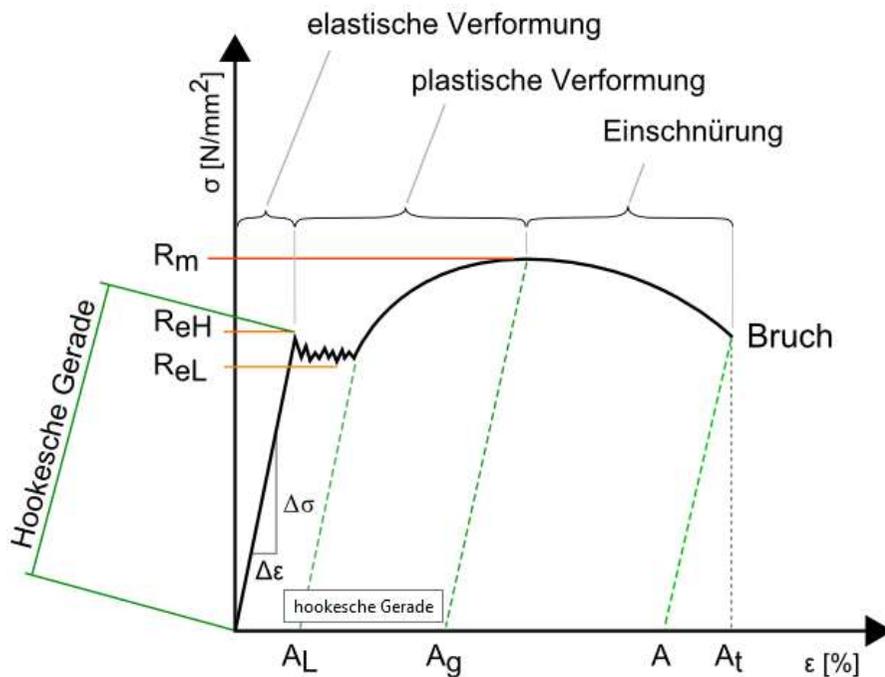
# Kenngrößen aus dem Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Symbol	Einheit	Bezeichnung	Beschreibung
$R_m$	N/mm <sup>2</sup>	Zugfestigkeit	Höchstkraft/Ausgangsquerschnitt
$R_e$	N/mm <sup>2</sup>	Elastizitätsgrenze	Ende des elastischen Bereiches
$R_{eL}$	N/mm <sup>2</sup>	untere Streckgrenze	Tritt bei Werkstoffen mit Fließbereich auf (z.B. Stahl).
$R_{eH}$	N/mm <sup>2</sup>	obere Streckgrenze	
$R_{p0,2}$	N/mm <sup>2</sup>	0,2%-Dehngrenze	Spannung, bei plastischer Dehnung von 0,2%
$R_R$	N/mm <sup>2</sup>	Reißfestigkeit	wahre Spannung beim Bruch

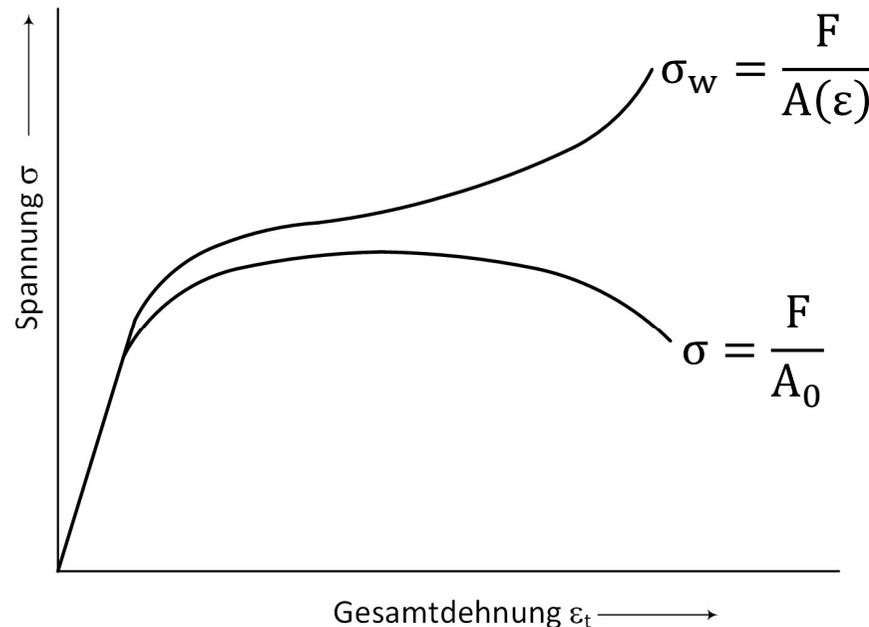


# Kenngrößen aus dem Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Symbol	Einheit	Bezeichnung	Beschreibung
A	%	Bruchdehnung	bleibende Längenänderung bei Bruch bezogen auf $L_0$
$A_g$	%	Gleichmaßdehnung	Dehnung bei Höchstkraft, bezogen auf $L_0$
$A - A_g$	%	Einschnürdehnung	aus A und $A_g$ zu ermitteln
$A_L$	%	Lüdersdehnung	Dehnung am Ende der konstanten Beanspruchung
Z	%	Brucheinschnürung	$Z = (-\Delta S/S_0) \cdot 100\%$ (S: Querschnittsfläche)



# Vergleich der technischen und wahren Spannung



Fazit:

- Kontinuierlicher Festigkeitsanstieg
- Verformungsverfestigung oder Kaltverfestigung

Faustregel:

- Für Stähle mit Härtewerten zwischen 80 HV und 650 HV gilt in guter Näherung:  $R_m \approx 3,5 \text{ HV}$
- Für Nichteisenmetalle gilt diese Umrechnung nicht!

# Kriechversuch

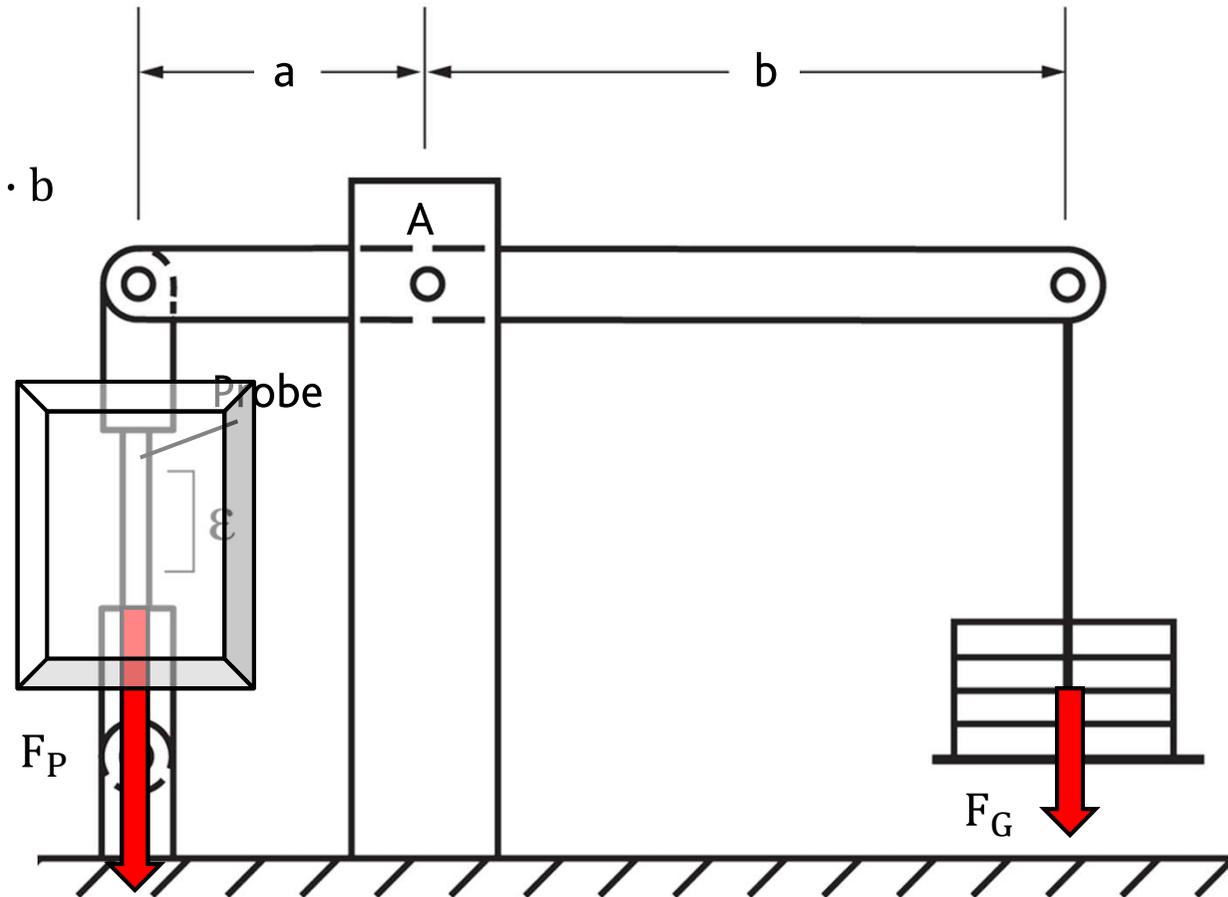
Es gilt das Hebelgesetz:

$$\sum M_i = 0 = F_P \cdot a - F_G \cdot b$$

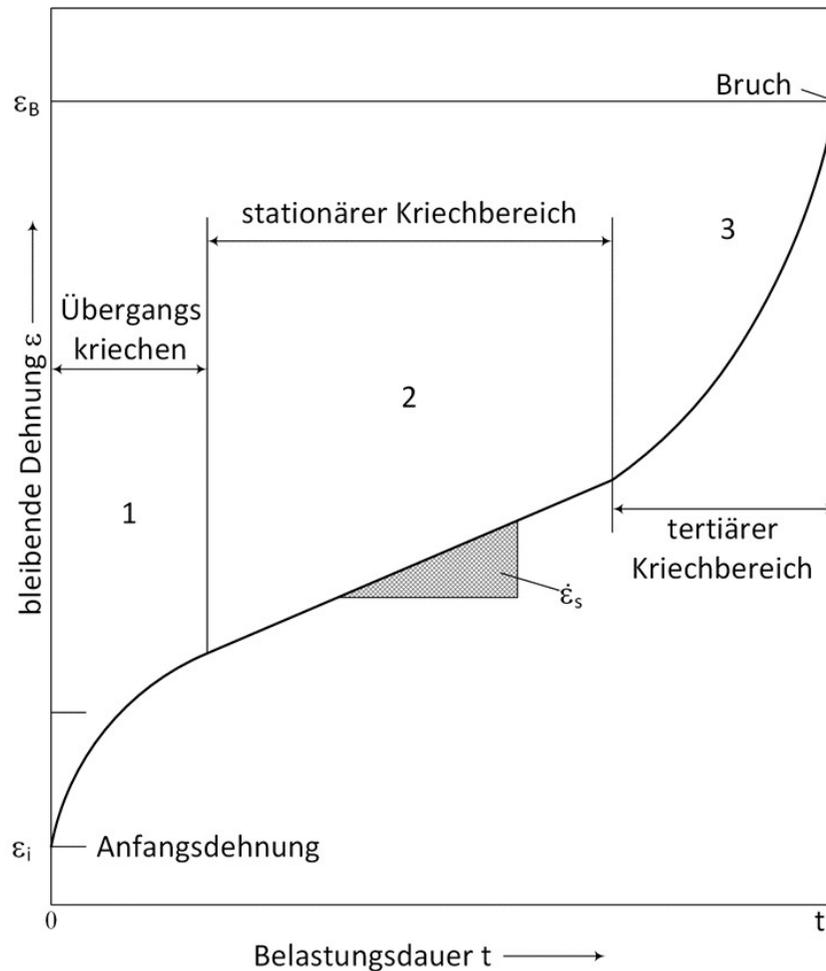
$$\Rightarrow F_P = F_G \cdot \frac{b}{a}$$

$F_P$ : Kraft in der Probe  
 $F_G$ : Gewichtskraft

Ofen

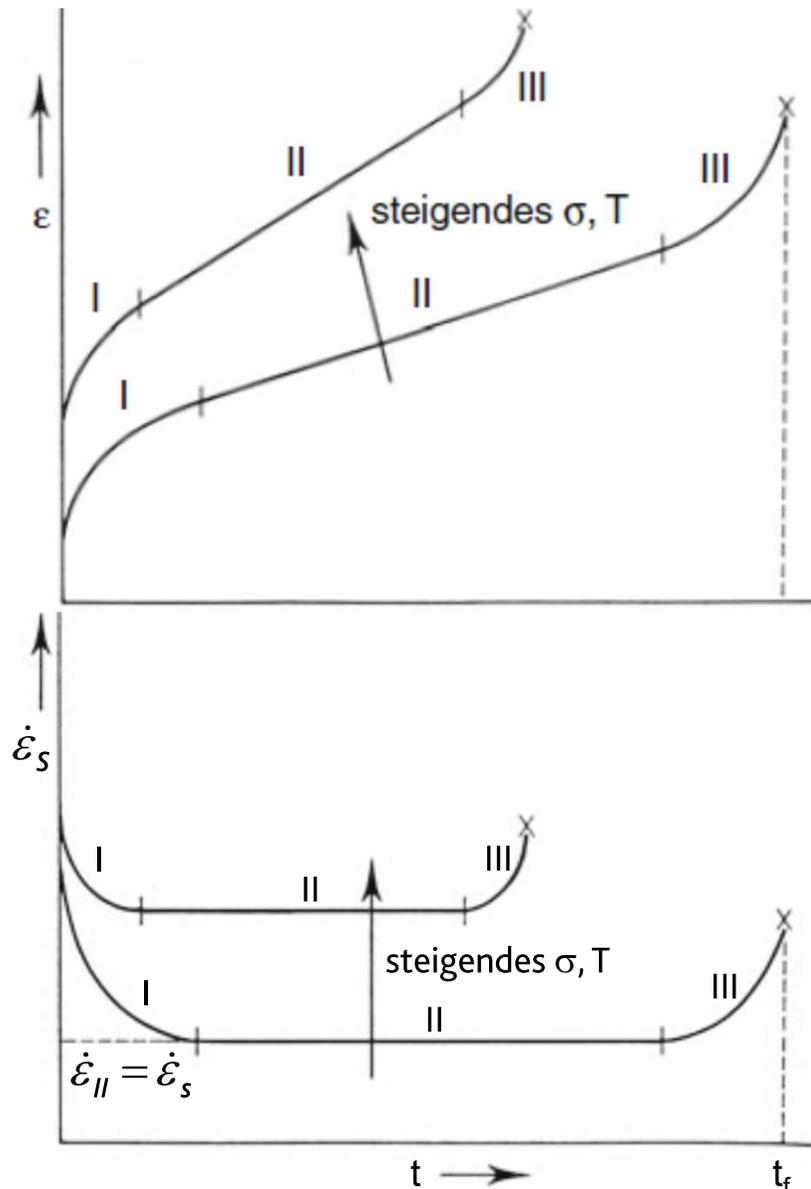


## Typischer Verlauf einer Kriechkurve



- Verformungsverhalten von Werkstoffen bei hohen Temperaturen (Kriechversuche)
- Dazu wird meist eine Zugprobe in einem Ofen bei konstanter Temperatur unter konstanter Last beansprucht und die Dehnung in Abhängigkeit von der Zeit verfolgt.
- Typischer Verlauf einer Kriechkurve
  - Bereich 1: Übergangskriechen (primäres Kriechen)
  - Bereich 2: Stationäres Kriechen (sekundäres Kriechen)
  - Bereich 3: Tertiäres Kriechen bis zum Kriechbruch

# Stationäre Kriechgeschwindigkeit

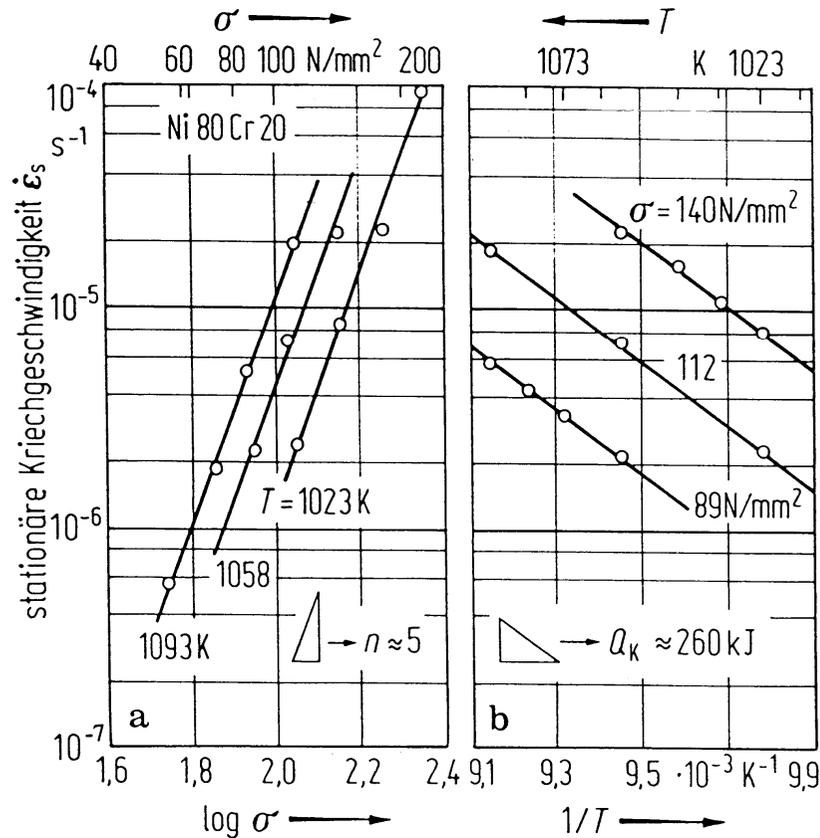


- Für die Auslegung von Bauteilen, die bei hohen Temperaturen einer konstanten Belastung ausgesetzt sind, ist die stationäre Kriechgeschwindigkeit von besonderer Bedeutung, da diese in einem großen Teil der Lebensdauer vorliegt.
- Vielfach gilt die Beziehung:

$$\dot{\epsilon}_s(\sigma, T) = \dot{\epsilon}_0 \cdot \sigma^n \cdot e^{-\frac{Q_K}{RT}}$$

- mit:
- $\dot{\epsilon}_0$  : Materialkonstante in 1/s
  - $\sigma$  : Nennspannung in MPa
  - $Q_K$  : Aktivierungsenergie in J
  - $R$  :  $8,314 \frac{J}{mol \cdot K}$  (allg. Gaskonstante)
  - $T$  : absolute Temperatur in K
  - $n$  : Spannungsexponent (oft  $n \approx 5$ )

# Stationäre Kriechgeschwindigkeit



$$\dot{\epsilon}_s(\sigma, T) = \dot{\epsilon}_0 \cdot \sigma^n \cdot e^{-\frac{Q_k}{RT}}$$

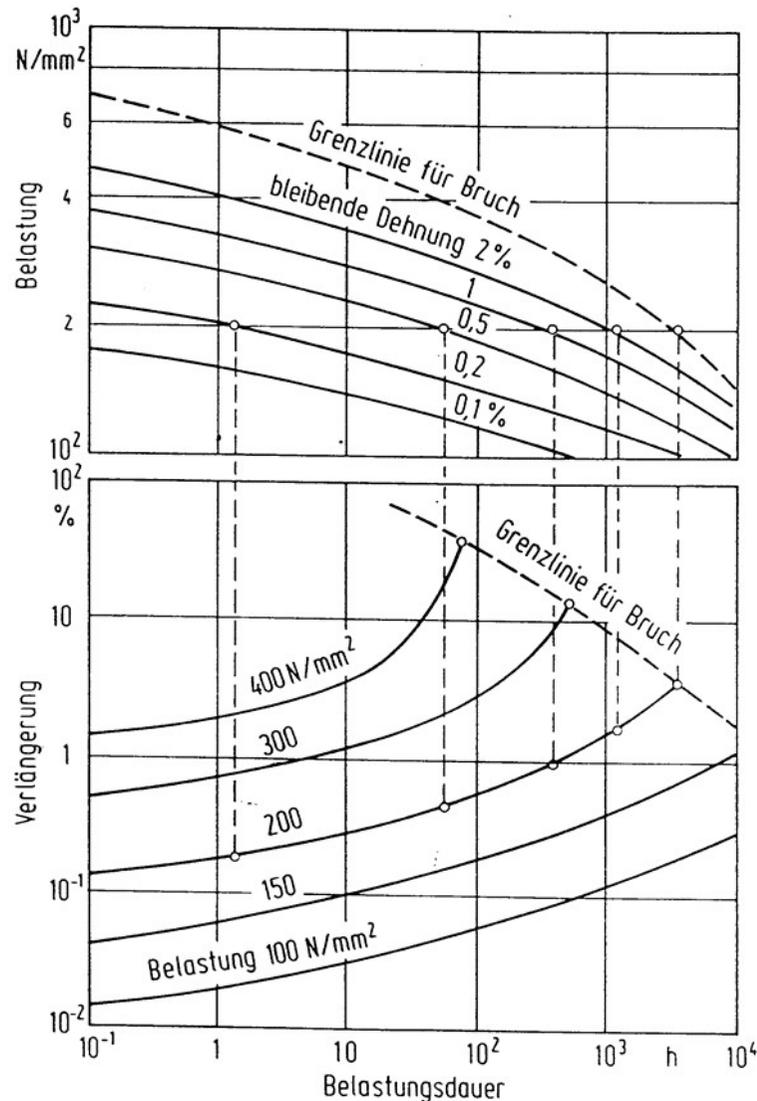
- Für die Spannungsabhängigkeit gilt somit ein Potenzgesetz, so dass n aus der doppellogarithmischen Auftragung von  $\dot{\epsilon}_s$  über  $\sigma$  bei konstanter Temperatur ermittelt werden kann.

$$T = \text{const: } \ln \dot{\epsilon}_s = K_1 + n \cdot \ln \sigma$$

- Für die Temperaturabhängigkeit gilt ein Arrhenius-Ausdruck, der die Ermittlung von  $Q_k$  aus der Auftragung von  $\ln \dot{\epsilon}_s$  gegen  $1/T$  bei konstanter Spannung erlaubt.

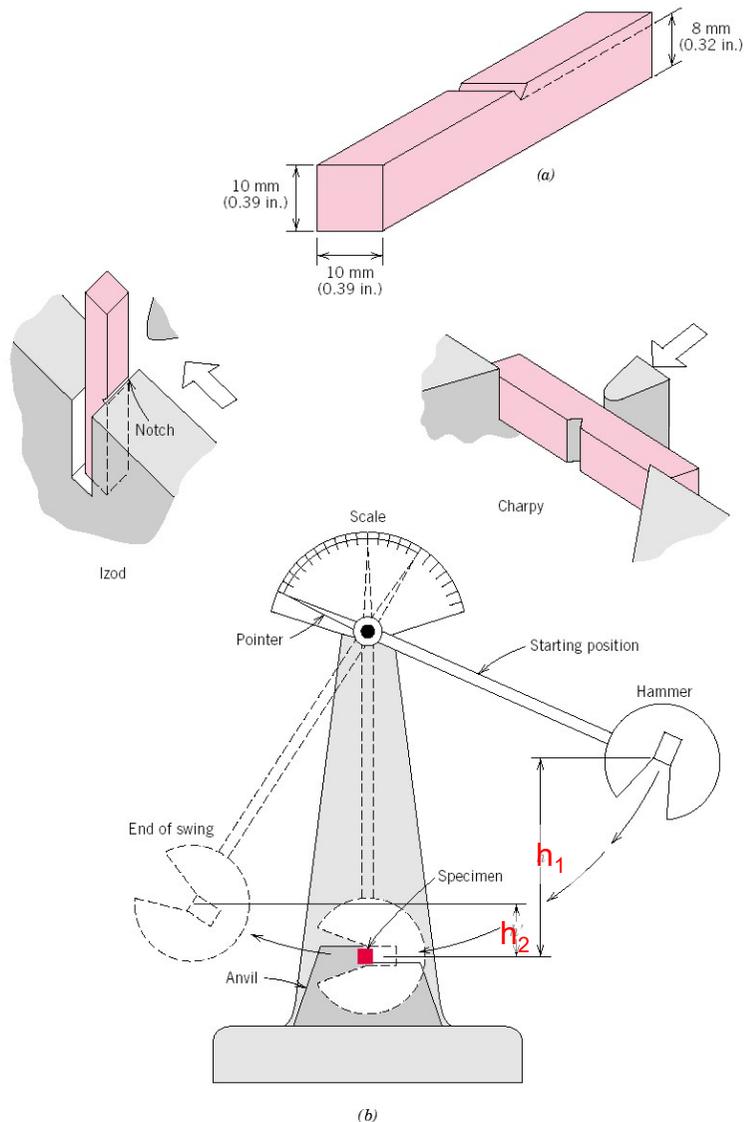
$$\sigma = \text{const: } \ln \dot{\epsilon}_s = K_2 - \frac{Q_k}{RT}$$

# Zeitstanddiagramm



- Zur Abschätzung der Lebensdauer eines Bauteils, bis eine vorgegebene Dehnung erreicht wird oder Bruch erfolgt, dient das Zeitstanddiagramm. Dieses lässt sich für eine bestimmte Temperatur aus Kriechkurven für verschiedene Spannungen bestimmen.
- Zeitdehnlinien (für bestimmte Dehnungswerte) und die Zeitbruchlinie
  - Zur Charakterisierung der Kriechfestigkeit mit einem Zahlenwert kann die Spannung angegeben werden, die nach einer vorgegebenen Zeit (z.B. 1.000h) zu einer bestimmten Dehnung (z.B. 0,1% oder 2%) oder zum Bruch führt.
  - Beispiel:  $R_{1.000h/2\%} \approx 200 \text{ MPa}$

# Kerbschlagbiegeversuch

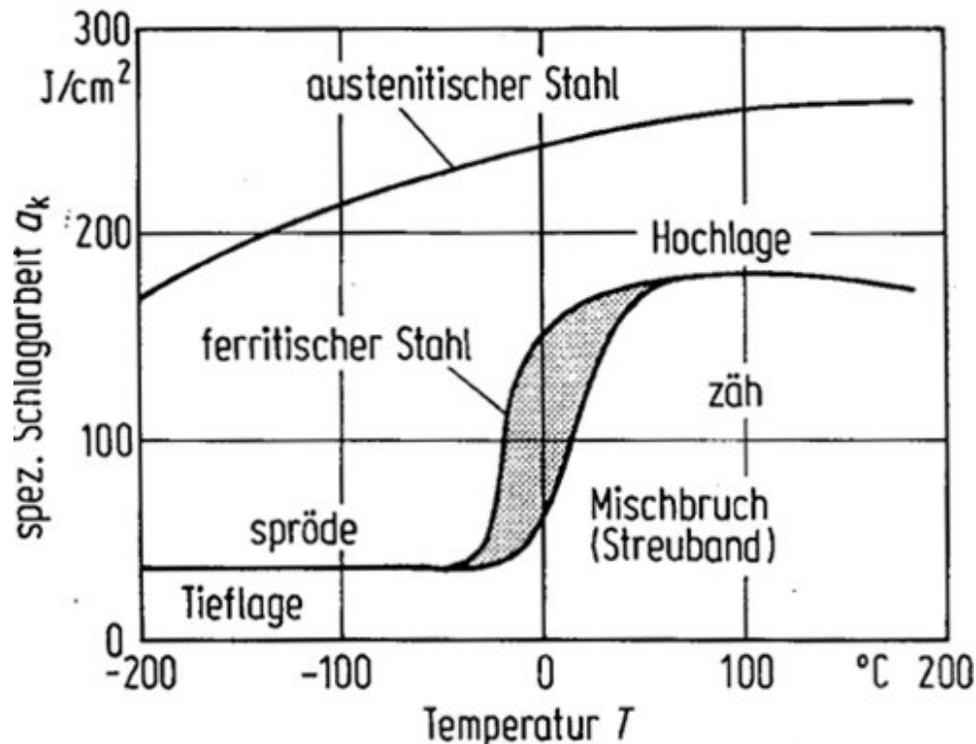


- Dient zur Bestimmung der Kerbschlagzähigkeit (spezifische Kerbschlagarbeit)  $a_K$  [J/cm<sup>2</sup>], die ein Maß für die Werkstoffzähigkeit darstellt.
- Sie wird ermittelt in einem Pendelschlagwerk als die durch eine gekerbte Probe genormter Geometrie beim Zerschlagen aufgenommene Arbeit  $A_V$  [J], bezogen auf die Fläche des Restquerschnitts  $S$  [mm<sup>2</sup>].

$$a_K = \frac{A_V}{S} = \frac{m \cdot g \cdot (h_1 - h_2)}{S}$$

mit  $m$ : Masse in kg  
 $g$ : 9,81 m/s<sup>2</sup> (Gravitationskonstante)  
 $h$ : Fallhöhen in m

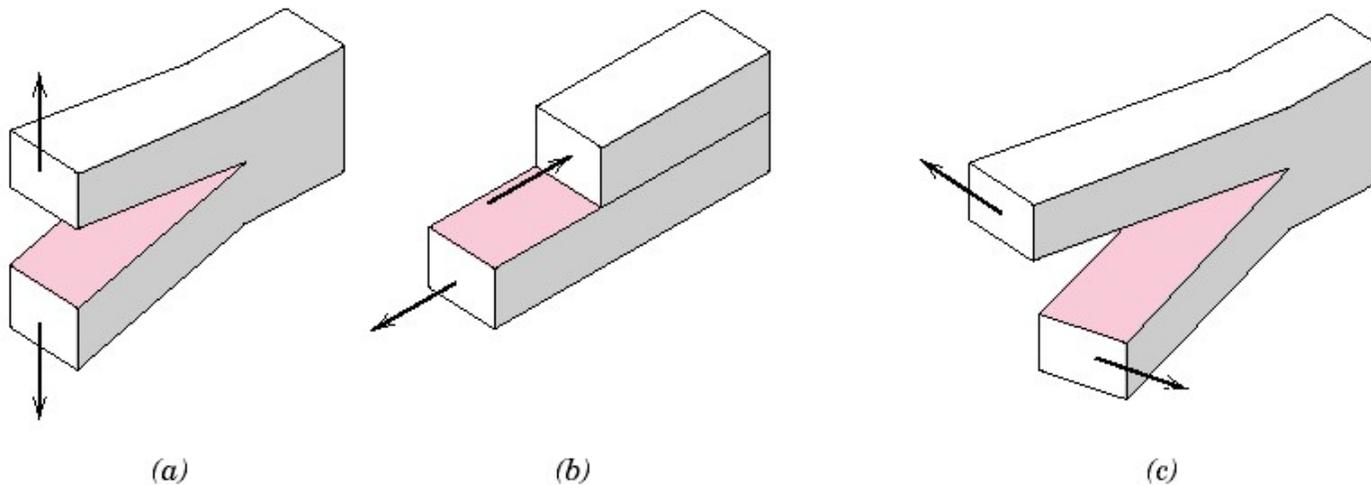
## Technische Relevanz



- Ein spröder, verformungsarmer Bruch stellt ein Risiko für viele Anwendungen dar, d.h. der Wert von  $\alpha_k$  sollte einen sinnvoll definierten Grenzwert nicht unterschreiten.
- Wichtige Begriffe: Tieflage, Hochlage, Übergangstemperatur.
- Konsequenz: Verwendung von ferritischen Stählen möglichst oberhalb der Übergangstemperatur. Für kryotechnische Anwendungen sind austenitische Stähle zu bevorzugen.

## Bruchmechanikprüfung: Bestimmung von $K_{Ic}$

- Für duktile, rissfreie Werkstoffe gilt, dass der Bruch bei Erreichen von  $R_m$  erfolgt. Zur Bauteilberechnung wird für diese Fälle meist  $R_{p0,2}$  verwendet.
- In Bauteilen können aber bereits (werkstoff-, fertigungs- oder konstruktionsbedingt) Risse vorliegen. Diese führen zu einer Spannungskonzentration an der Rissspitze.
- Frage: Wann wird ein Anriss instabil, so dass er sich schlagartig verlängert und das Bauteil bricht?
- Die mathematische Behandlung dieses Problems erfolgt durch die Bruchmechanik:



Hauptbeanspruchungsfälle [Moden I (a), II (b) und III (c)]

## Bruchmechanikprüfung: Bestimmung von $K_{Ic}$

- Für jeden Modus lässt sich ein Spannungsintensitätsfaktor  $K_I$ ,  $K_{II}$  oder  $K_{III}$  berechnen. Als schärfstes Beurteilungskriterium wird meist der Rissöffnungsmodus I betrachtet.

- Unter vereinfachten Bedingungen gilt mit  $a$  als Risslänge:

$$K_I = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad [\text{Nm}^{-3/2}]$$

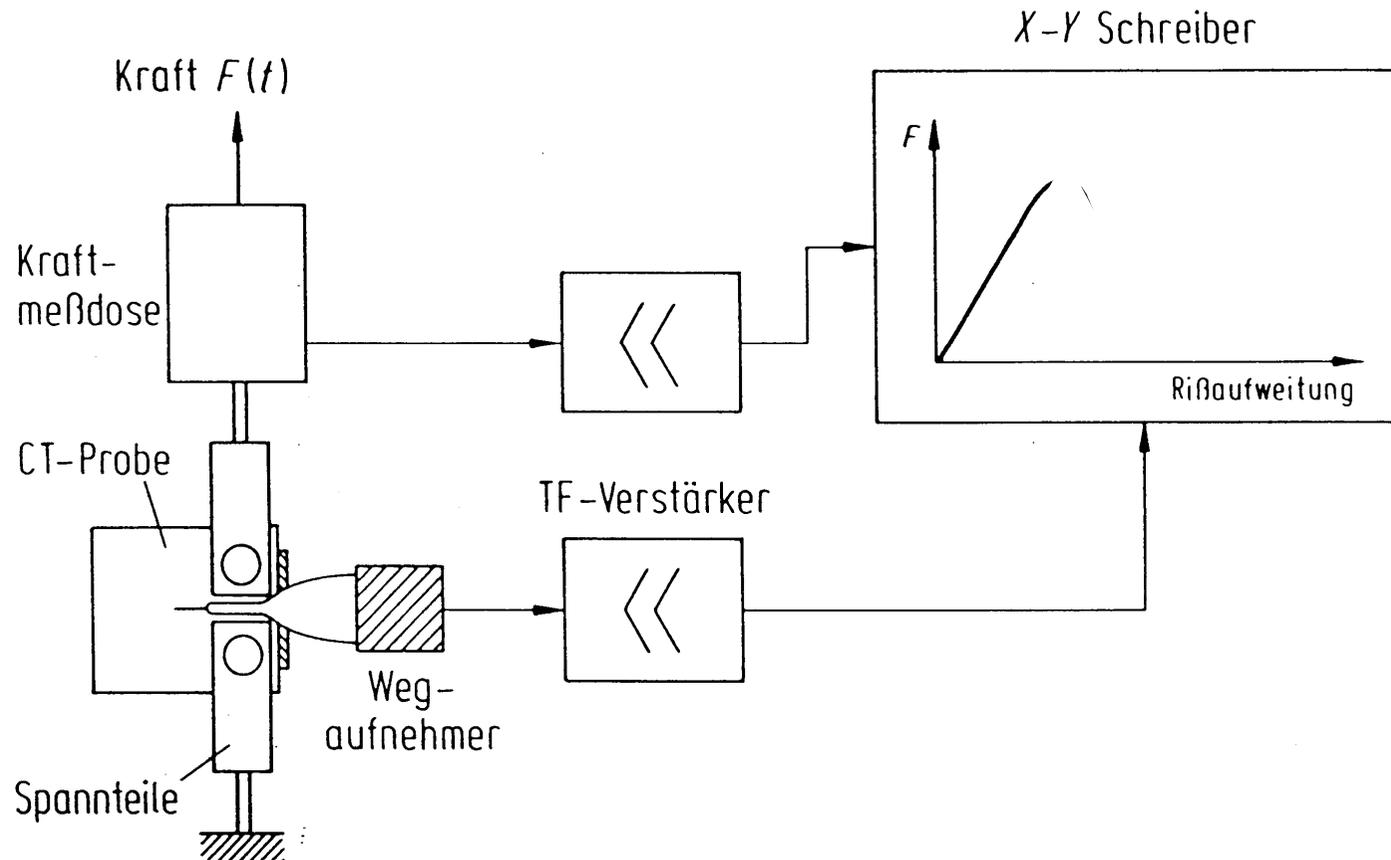
- Instabile Rissausbreitung erfolgt, wenn  $K_I$  größer ist als ein kritischer Spannungsintensitätsfaktor  $K_{Ic}$ :

$$K_I \geq K_{Ic}$$

(Belastungskenngröße  $\geq$  Werkstoffkenngröße)

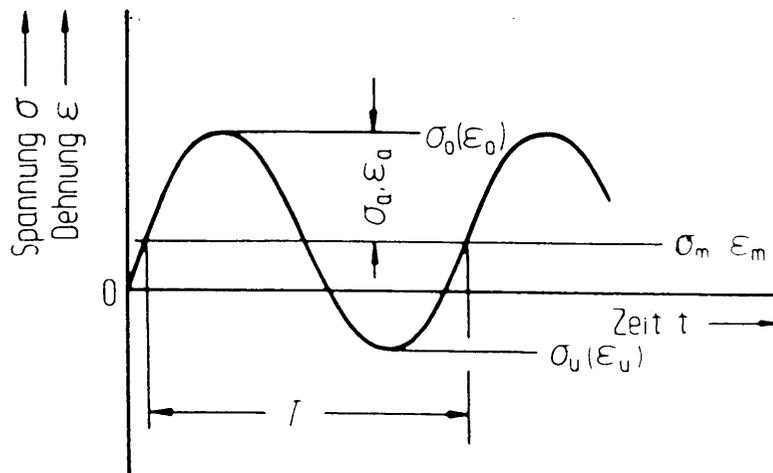
- Konsequenz: Unzureichende Bruchsicherheit, wenn  $K_{Ic}$  klein und/oder die Anrisslänge groß ist (Problematik der Keramik durch große Streuung in  $a$ ; gegensätzliche Forderungen von hoher Zugfestigkeit und großer Bruchzähigkeit bei metallischen Werkstoffen)

## Versuchsdurchführung



Aus der Maximalkraft, ab der der Riss instabil wächst, und der Risslänge bei Beginn der Rissausbreitung wird  $K_{Ic}$  errechnet.

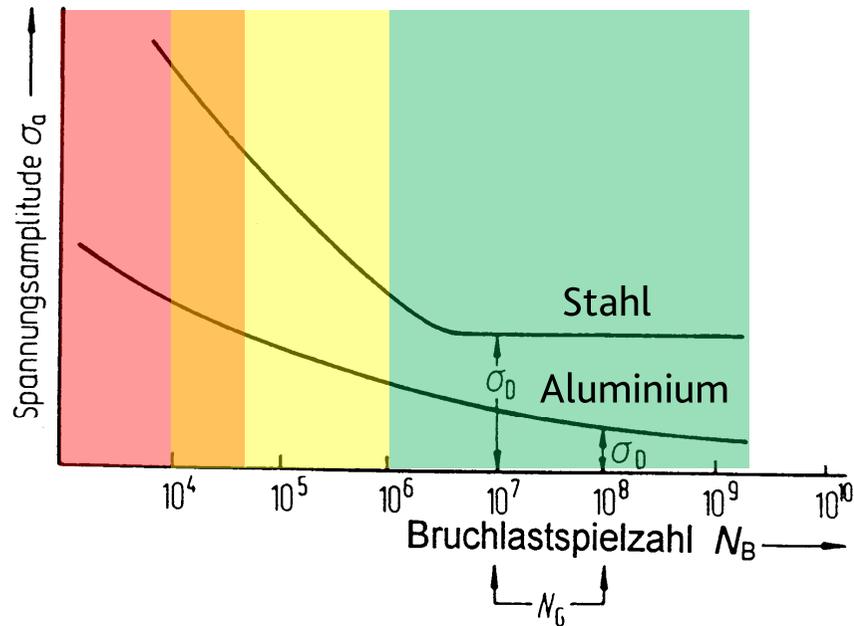
## Wechselbelastung: Ermüdungsversuch



### Beobachtung:

- Liegt eine zeitlich veränderliche (periodische oder unregelmäßige) Belastung vor, so kann es zum Werkstoffversagen durch Materialermüdung kommen, obwohl u. U. der statische Festigkeitswert (z.B.  $R_{p0,2}$ ) nicht überschritten wird.
- Unterspannung:  $\sigma_U(\epsilon_U)$
- Oberspannung:  $\sigma_O(\epsilon_O)$
- Spannungsamplitude:  $\sigma_a = \frac{\sigma_O - \sigma_U}{2}$
- Mittelspannung:  $\sigma_m = \frac{\sigma_O + \sigma_U}{2}$
- Eine volle Schwingung mit der Periodendauer T ist ein Schwingenspiel.

# Wöhler-Kurve



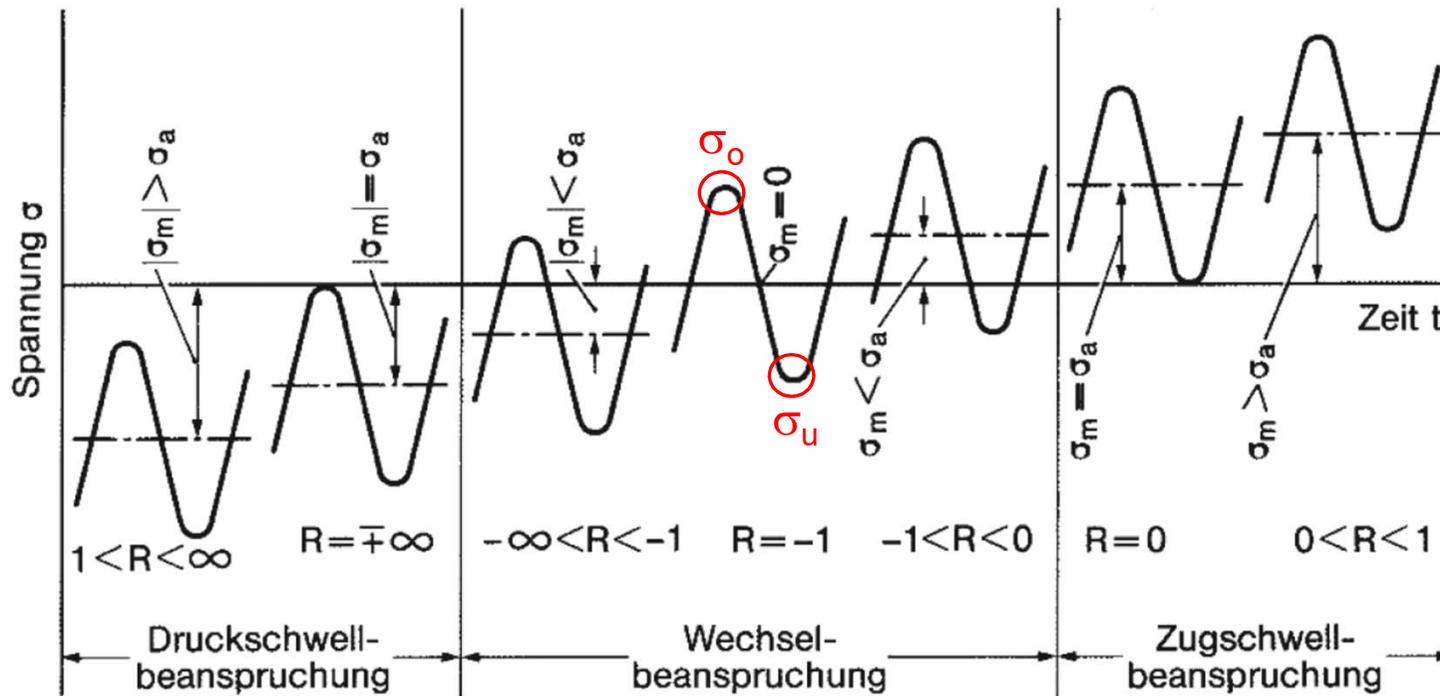
- Im einfachsten Fall werden Versuche mit unterschiedlichen (im Versuch konstant gehaltenen) Spannungsamplituden durchgeführt und die Bruchschwingspielzahlen  $N_B$  ermittelt.
- Hierbei ist  $N_G$  eine sinnvoll zu wählende Grenzwahlspielzahl, die zur Definition der Dauerfestigkeit  $\sigma_D$  dient.

- Kurzzeitfestigkeit ( $N_B < 10^4$ ) oft auch  $N_B < 5 \cdot 10^4$
- Zeitfestigkeit ( $10^4 < N_B < 10^6$ ) oder  $N_B > 5 \cdot 10^4$
- Wechselfestigkeit ( $\sigma_m = 0$ ) bzw. Dauerfestigkeit ( $\sigma_m \neq 0$ ) ( $N_B > 10^6$ )

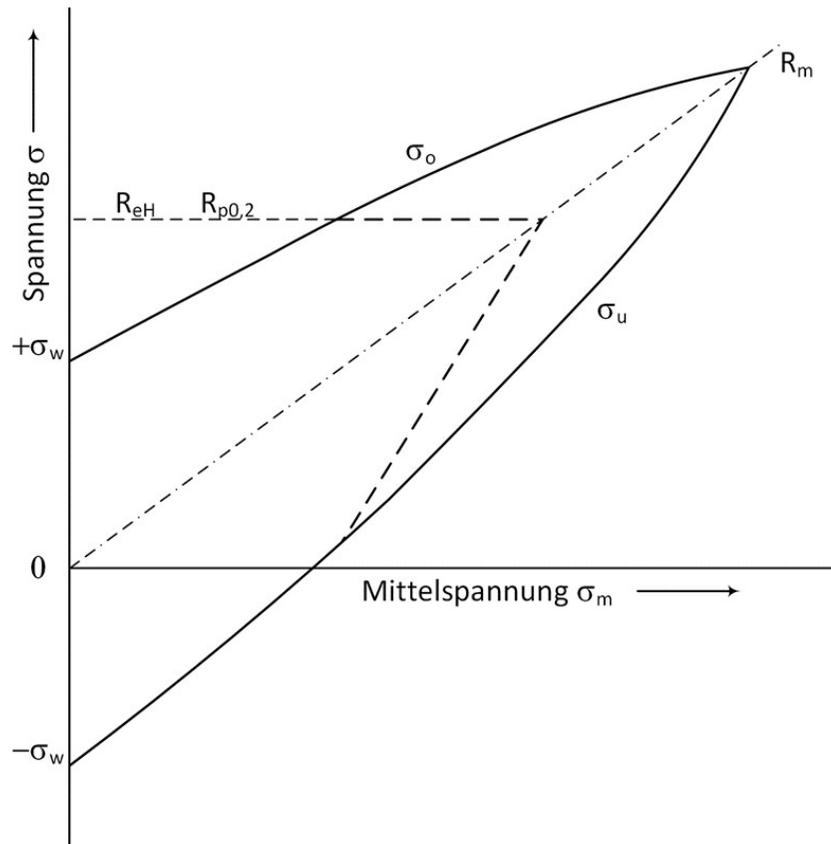
# Mittelspannungseinfluss

Spannungsverhältnis:

$$R = \frac{\sigma_u}{\sigma_o}$$



## Beschreibung des Mittelspannungseinflusses



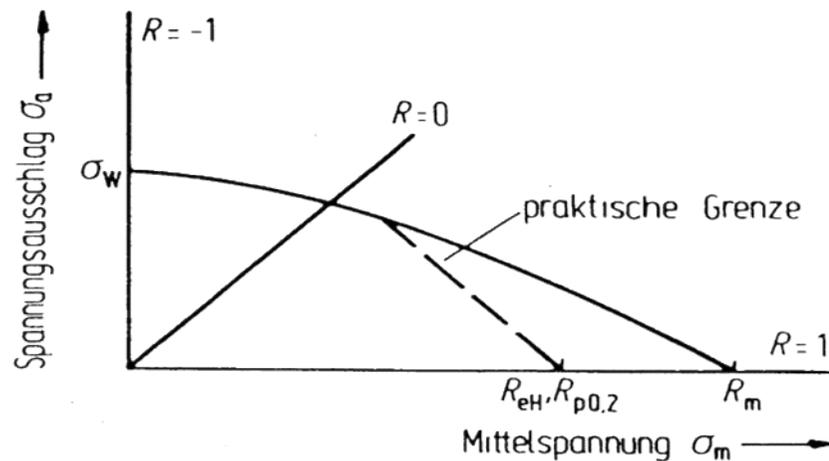
### Dauerfestigkeitsschaubild nach Smith (Smith-Diagramm)

Aufgetragen sind für eine vorgegebene Lebensdauer (z.B.  $N_B=10^6$ ) die zulässige Ober- und Unterspannung in Abhängigkeit von der Mittelspannung.

Da in Konstruktionsteilen meist keine plastische Verformung zulässig ist, wird zusätzlich zum ermittelten Werkstoffverhalten eine "praktische Grenze" eingezeichnet, die die Maximalspannung auf  $R_{eH}$  oder  $R_{p0,2}$  begrenzt.

## Beschreibung des Mittelspannungseinflusses

### Dauerfestigkeitsschaubild nach Haigh (Haigh-Diagramm)



Aufgetragen sind für eine vorgegebene Lebensdauer (z.B.  $N_B=10^6$ ) die zulässige Spannungsamplitude in Abhängigkeit von der Mittelspannung.

Da in Konstruktionsteilen meist keine plastische Verformung zulässig ist, wird zusätzlich zum ermittelten Werkstoffverhalten eine "praktische Grenze" eingezeichnet, die die Maximalspannung auf  $R_{eH}$  oder  $R_{p0,2}$  begrenzt.

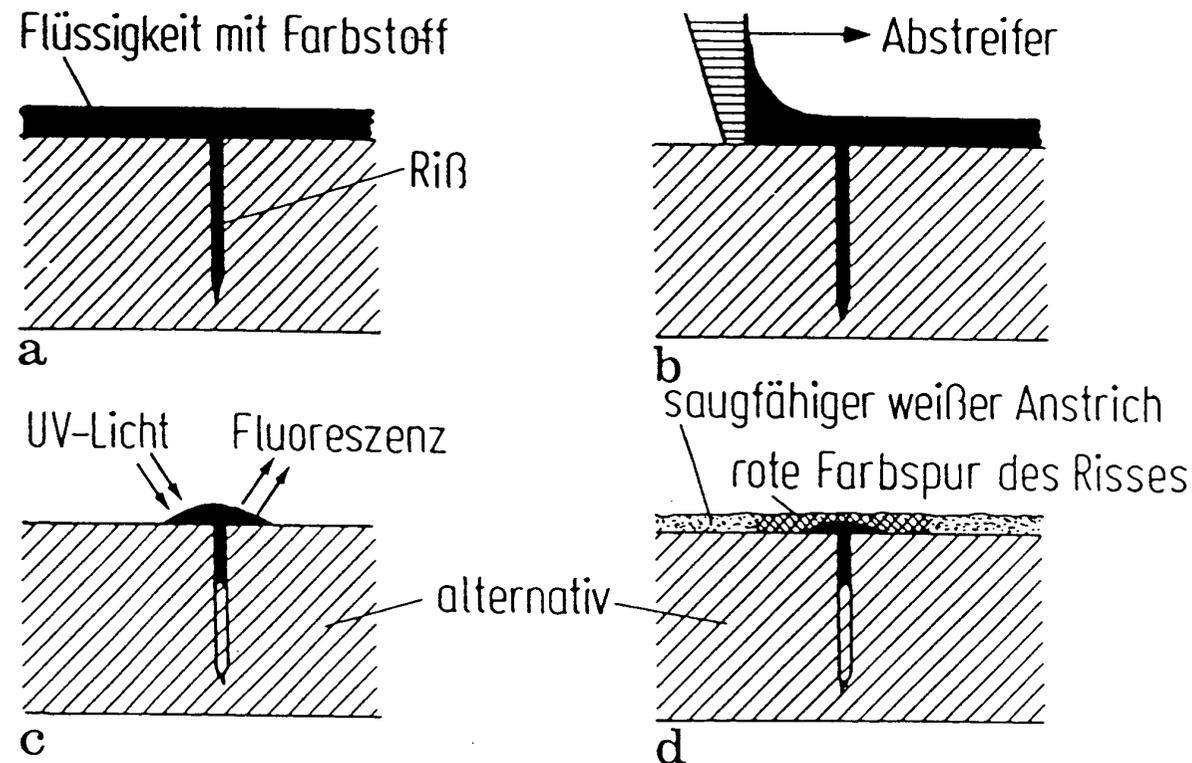
## Zerstörungsfreie Prüfverfahren: Grundsätzliches

- Meist dienen diese Prüfverfahren nicht zur Werkstoffprüfung (=Ermittlung von Werkstoffeigenschaften), sondern zur Werkstückprüfung. In der Regel sollen Fehler wie Risse, Gussporen, Schweißfehler etc. vor oder während des Betriebes erfasst werden.
  
- Zu den zerstörungsfreien Prüfverfahren gehören:
  - Flüssigkeitseindringverfahren
  - Magnet-und Wirbelstromverfahren
  - Durchstrahlung mit Röntgen- und Gammastrahlen

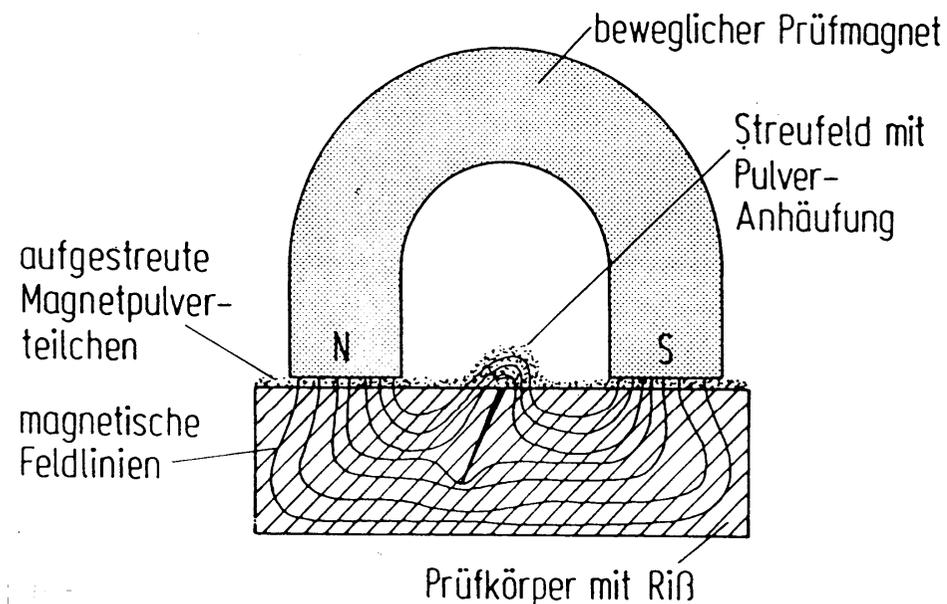
# Flüssigkeitseindringverfahren

Wirkungsweise: Kapillarkraft saugt Detektorflüssigkeit in offene Risse und erzeugt eine breite Spur auf der Oberfläche. Diese kann durch Anfärben oder Fluoreszenz verstärkt werden.

Anwendung: Anrisse in metallischen Werkstoffen, z.B. vergütete Stäbe oder Rohre.



# Magnetverfahren



Wirkungsweise: Ein von außen an einen ferromagnetischen Werkstoff angelegtes Magnetfeld wird durch Inhomogenitäten in Oberflächennähe (z.B. Risse) gestreut. Das Streufeld wird durch auf die Oberfläche aufgebraachte Magnetpulverteilchen sichtbar gemacht. Verstärkung durch Anfärben/Fluoreszenz

Anwendung: Anrisse und oberflächennahe Fehler in ferromagnetischen Werkstoffen. Der Fehler muss quer zur Richtung des Magnetfeldes liegen.

# Röntgenverfahren

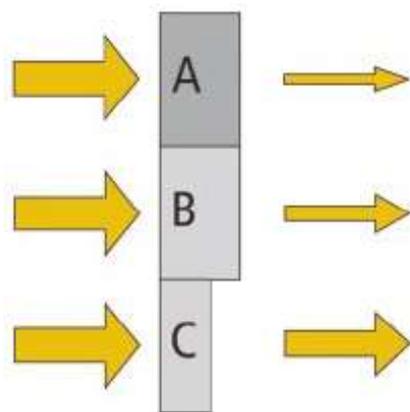
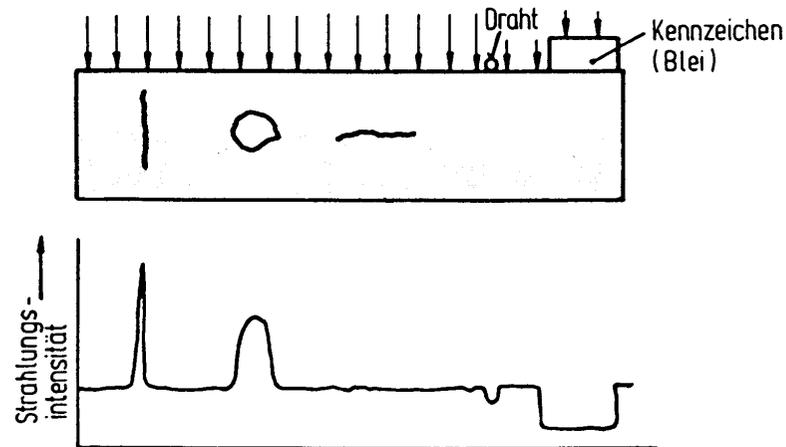


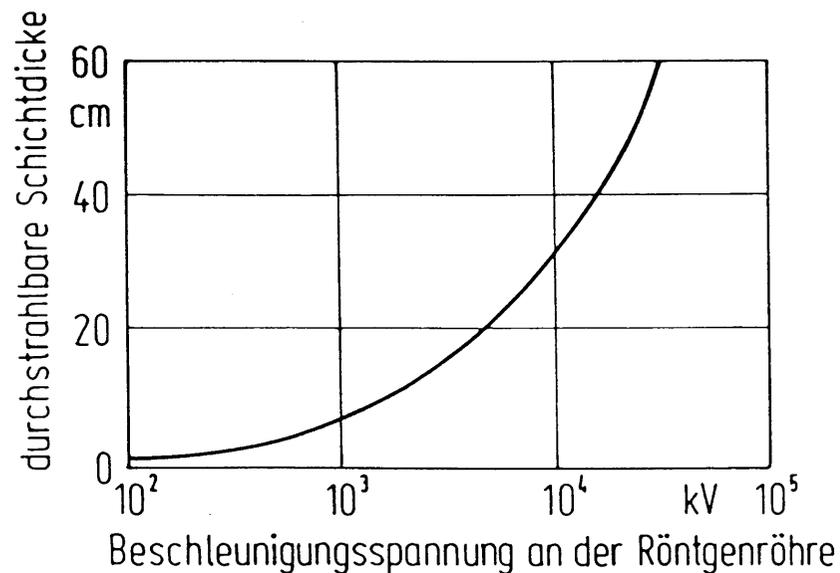
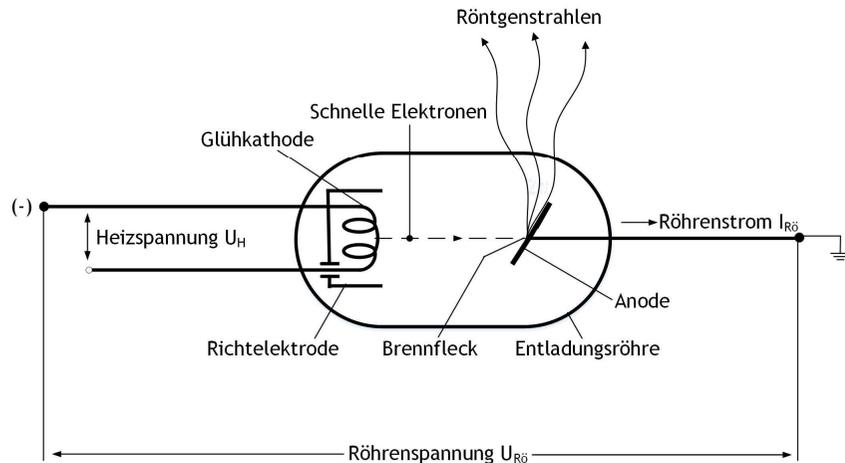
Abb. 2: Kontrastentstehung im Röntgenbild: Körper A ist gleich dick wie Körper B, hat aber eine höhere Absorption wegen höherer Dichte oder höherer Ordnungszahl. Körper C besteht aus demselben Material wie Körper B absorbiert aber weniger als der dickere Körper B.

- Dringt elektromagnetische Strahlung in einen Festkörper ein, so erfolgt Absorption. Für die Intensität  $I$  des Strahles nach Durchlaufen einer Durchstrahltiefe  $x$  gilt:

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

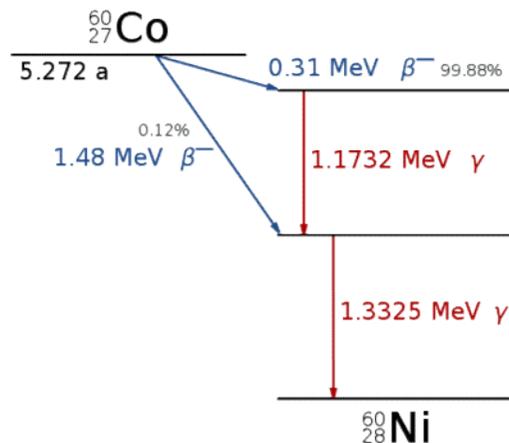
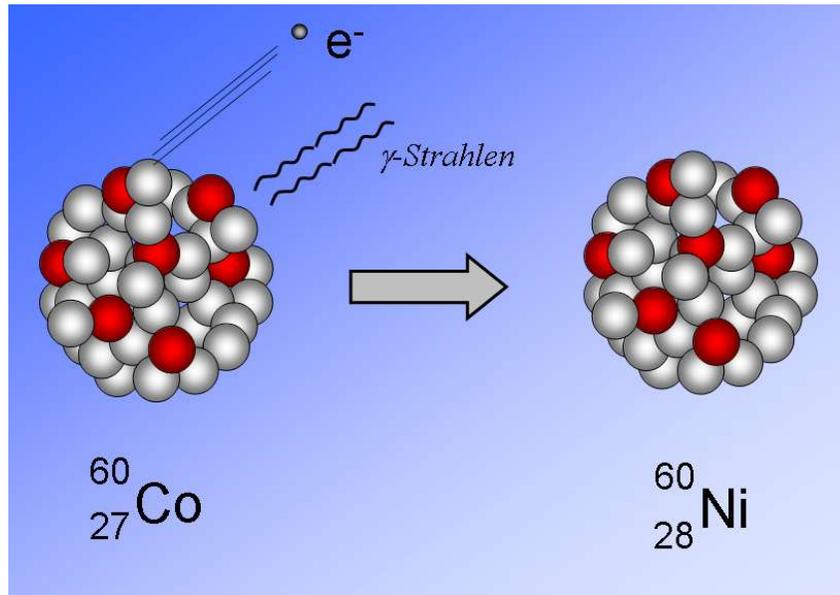
- Der Schwächungskoeffizient  $\mu$  in diesem exponentiellen Abklinggesetz hängt ab von
  - Absorptionsvermögen des Werkstoffes sowie
  - der Energie der verwendeten Strahlung.
- Registriert werden unterschiedliche Massendichten.

# Röntgenstrahlung



- Die Strahlung wird in einer Röntgenröhre erzeugt (Bremsstrahlung und charakteristische Strahlung). Die maximale Energie (kleinste Wellenlänge) wird durch die Beschleunigungsspannung (<1.000kV) bestimmt. Dadurch ergeben sich technische Grenzen hinsichtlich der durchstrahlbaren Dicke.
- Röntgengrobstrukturanalyse ≠ Röntgenfeinstrukturanalyse

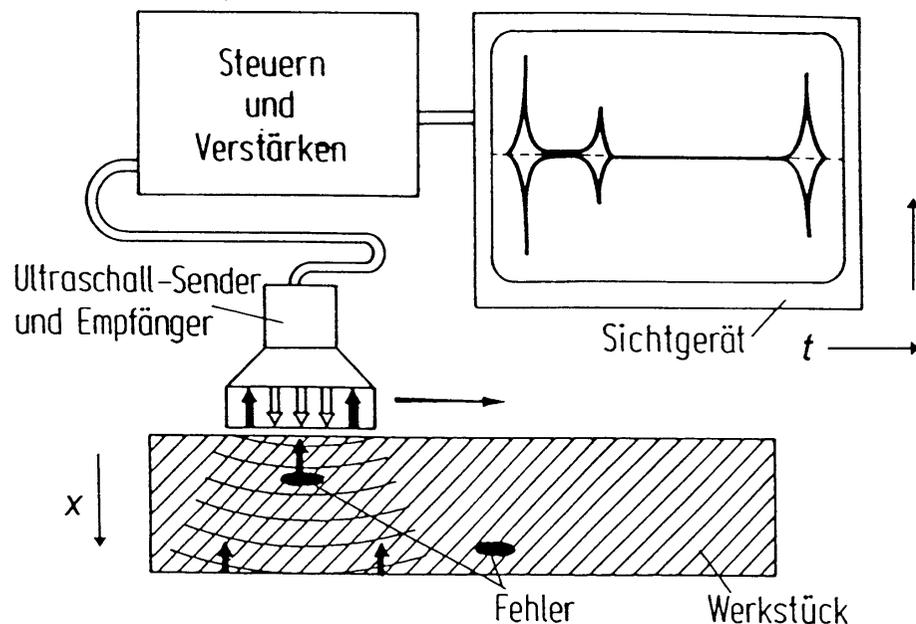
# Gammastrahlung



- Gammastrahlung: Weniger aufwendig ist die Verwendung radioaktiver Isotope, die unter Emission von Gammaquanten zerfallen (häufig  ${}^{60}\text{Co}$ : emittierte Energie beträgt 1,17 bzw. 1,33 MeV; Das Elektronenvolt eV ist die Zunahme der kinetische Energie eines Elektrons nach Durchlaufen eines Spannungsfeldes von 1 Volt).
- Hinweis: Strahlenschutz!

# Ultraschallprüfung

- Ähnlich wie bei der Durchstrahlung wird eine "Durchschallung" durchgeführt. Die Schallwellen breiten sich in Festkörpern relativ schnell aus (z.B.  $v = 6000 \text{ m/s}$  in Stahl). Da das Auflösungsvermögen durch die Wellenlänge  $\lambda$  bestimmt wird, ist es erforderlich ( $v = \lambda \cdot f$ ) hohe Frequenzen  $f$  zu verwenden (1 bis 25 MHz).
- Zur Fehlererkennung dient nicht die Absorption (relativ gering), sondern die Reflexion an Grenzflächen gegenüber Luft, Vakuum, ...



- Meistens wird das Impulsecho-Verfahren verwendet: Einzelne Impulswellenpakete werden ausgesandt. Während der "Sendepause" wird der reflektierte Schall empfangen und seine Intensität über der Laufzeit  $t = 2 \cdot x/v$  angezeigt. Liegt ein Fehler (besser: eine reflektierende Grenzfläche) vor, so wird neben dem Rückwandecho ein Fehlerecho erhalten.