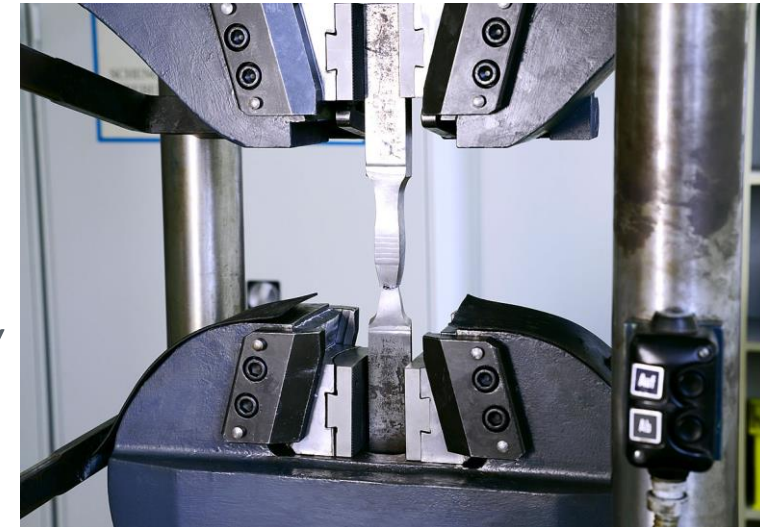


# Werkstofftechnik

Werkstoffeigenschaften und Werkstoffprüfung

Vorlesung „Mechanisch-Technologische Eigenschaften“



## Zerstörende Werkstoffprüfung

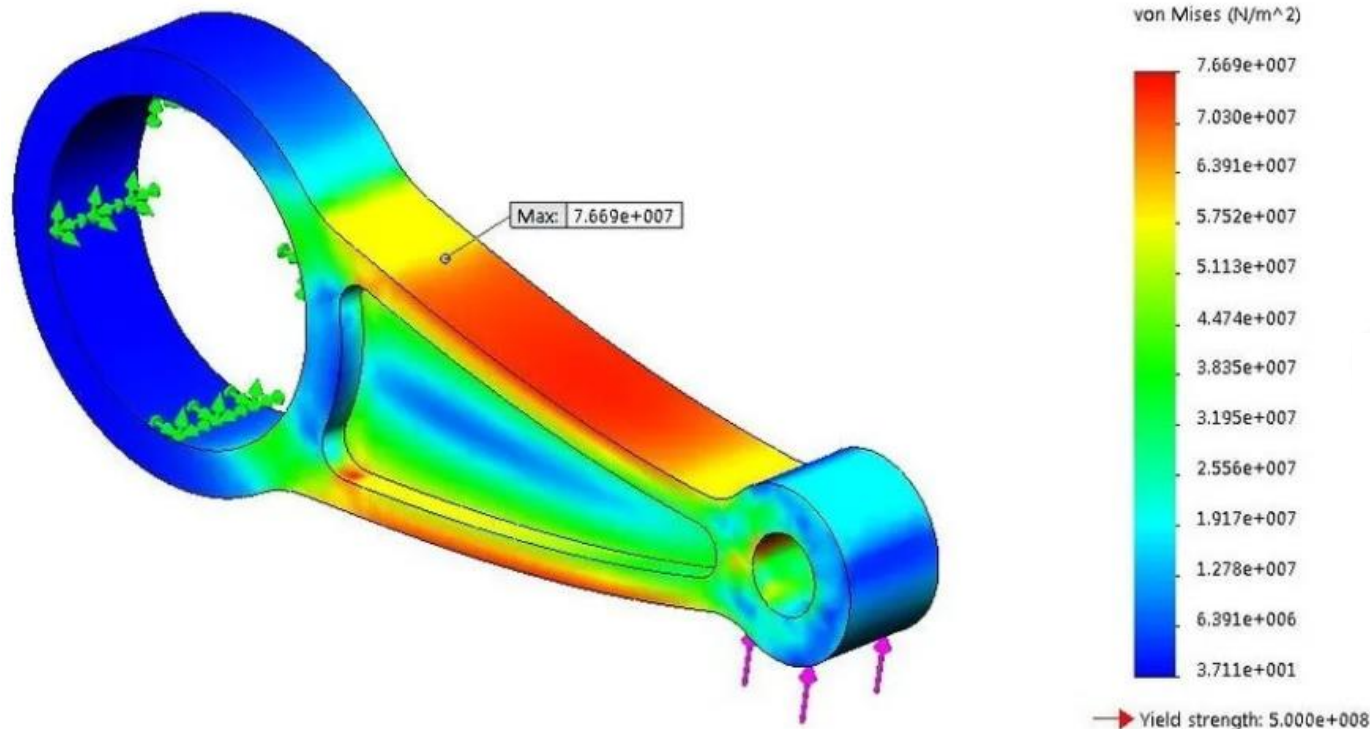
Diese Verfahren dienen zur Ermittlung der Werkstoffeigenschaften in Abhängigkeit des Beanspruchungszustandes:

- Zugversuch
- Härteprüfung
- Kerbschlagbiegeversuch
- Ermüdungsversuch

# Mechanisch-Technologische Werkstoffeigenschaften

## Spannung und Dehnung

Im Zusammenhang mit den Werkstoffeigenschaften fällt immer der Begriff der Spannung  $\sigma$  und der Dehnung  $\epsilon$ . Was ist das überhaupt?



Quelle: Indiamart

## Zugversuch

# Mechanisch-Technologische Werkstoffeigenschaften

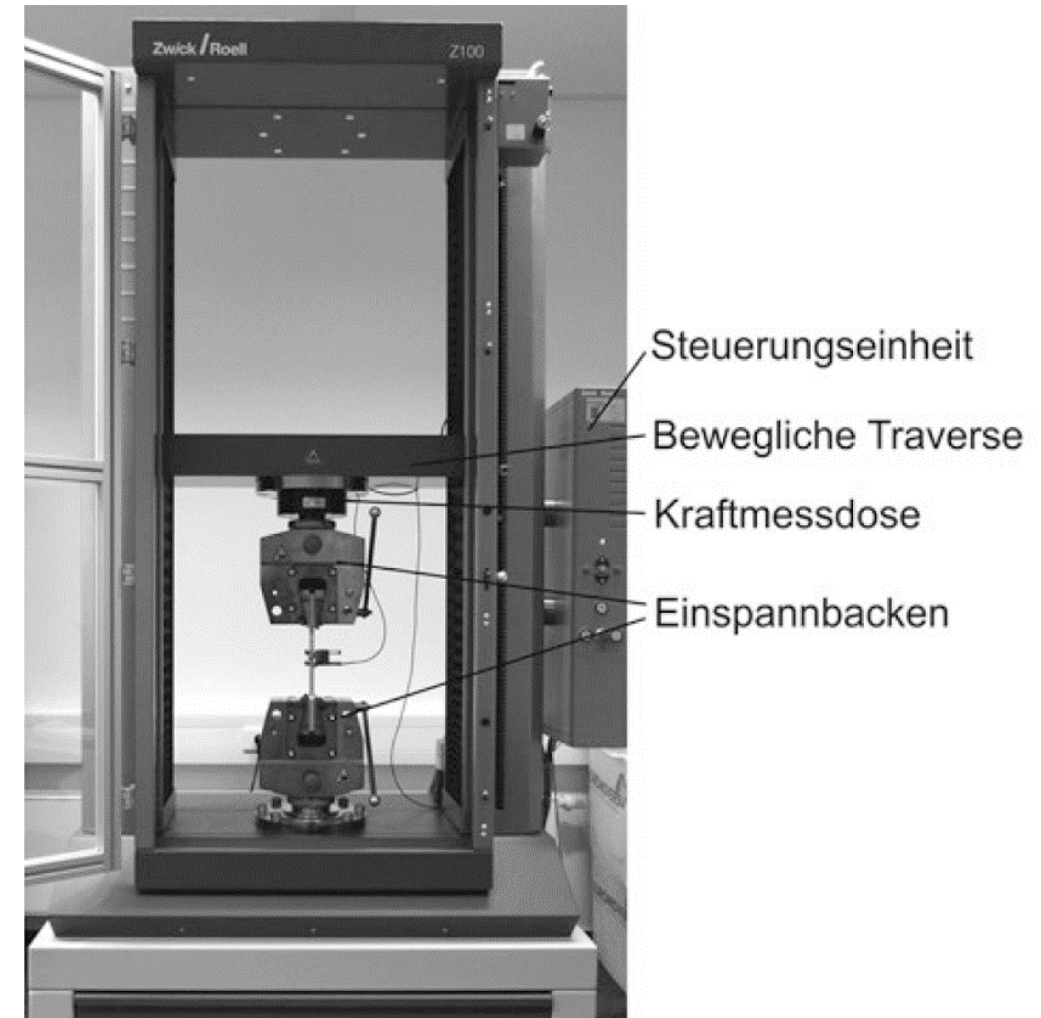
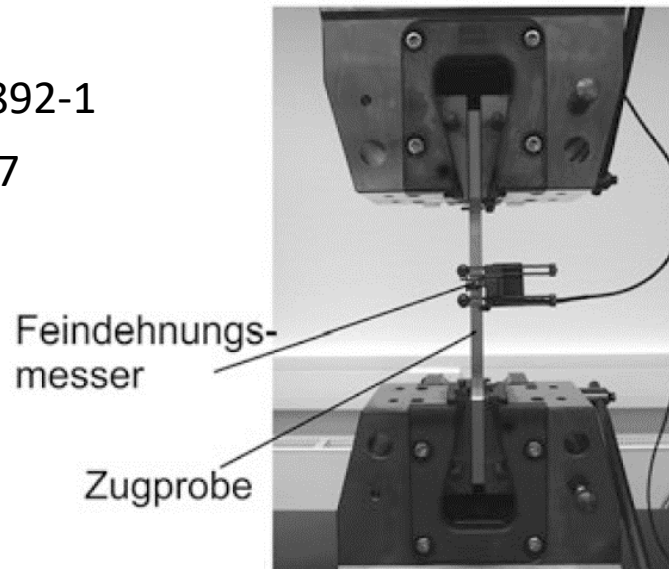
## Zugversuch - Vorgehensweise



# Mechanisch-Technologische Werkstoffeigenschaften

## Zugversuch - Versuchsaufbau

- Wichtigstes Prüfverfahren in der Werkstoffprüfung.
- Ermittlung der grundlegenden, statischen Kenngrößen des Werkstoffs.
- VORSICHT! Die Vergleichbarkeit von Versuchsergebnissen setzt vergleichbare Probengeometrien voraus.
- Normen zum Zugversuch:
  - Metalle: DIN EN ISO 6892-1
  - Kunststoffe: EN ISO 527

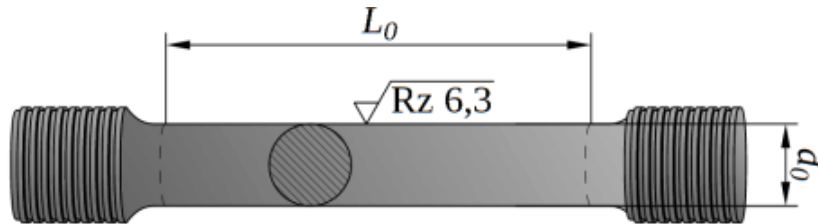


# Mechanisch-Technologische Werkstoffeigenschaften

## Zugversuch - Versuchsaufbau

- Die Probe wird unter Zugbelastung bis zum Bruch belastet. Währenddessen wird sowohl die Kraft als auch die Verlängerung der Probe gemessen.
- Gemessen wird die Kraft über piezoelektrische Kraftmessdosen.
- Die Messung der Verlängerung kann als Traversenwegmessung oder als Feindehnungsmessung erfolgen. Für die Feindehnungsmessung wird die Verlängerung der Messstrecke direkt an der Probe gemessen.

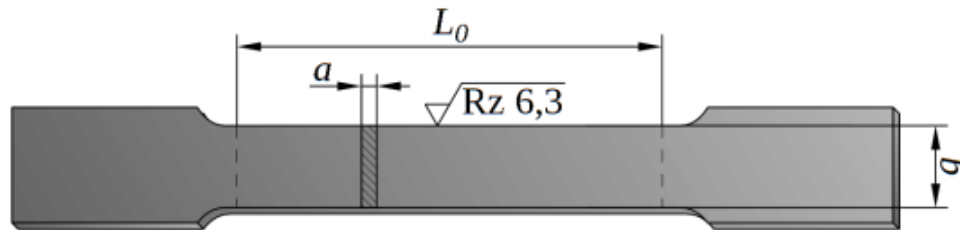
Rundzugprobe



Kurzer Proportionalstab:  $L_0 = 5 \cdot d_0$

Langer Proportionalstab:  $L_0 = 10 \cdot d_0$

Flachzugprobe



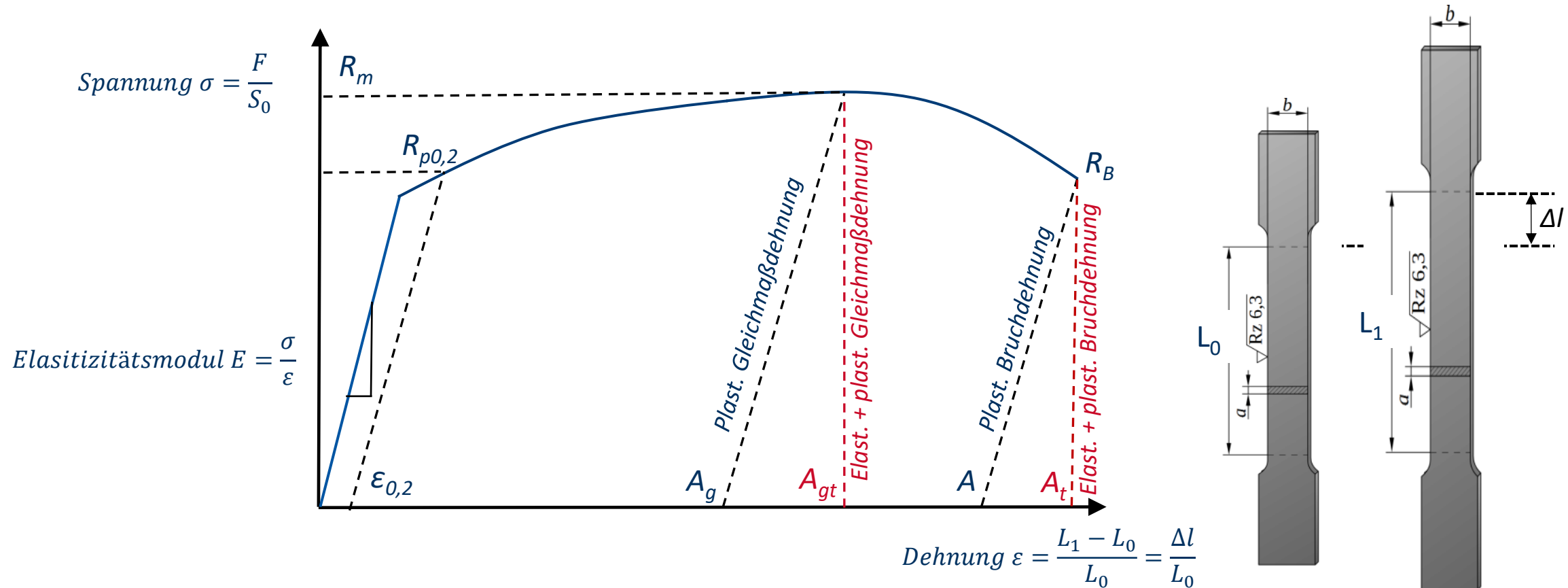
Kurzer Proportionalstab:  $L_0 = 5,65 \cdot \sqrt{S_0}$

Langer Proportionalstab:  $L_0 = 11,3 \cdot \sqrt{S_0}$

# Mechanisch-Technologische Werkstoffeigenschaften

## Zugversuch - Ergebnisse

Das technische Spannungs-Dehnungs-Diagramm (ohne Streckgrenze) und dessen Materialkenngrößen

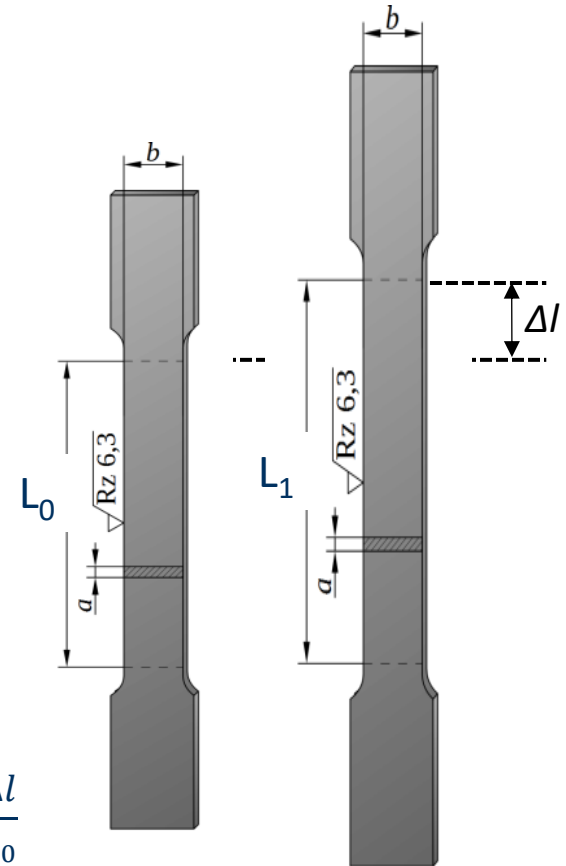
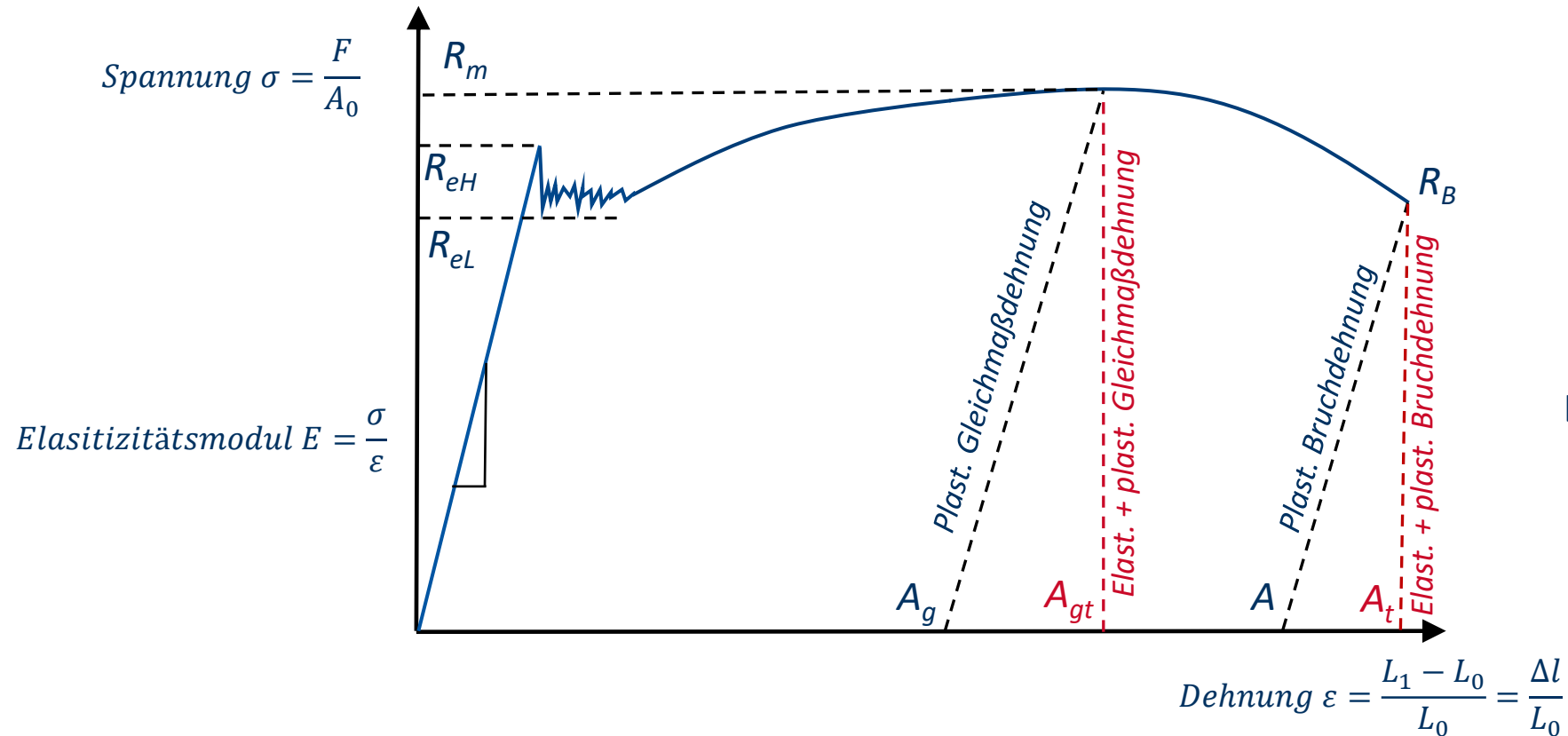


Spannungs-Dehnungs-Diagramm für duktile metallische Werkstoffe

# Mechanisch-Technologische Werkstoffeigenschaften

## Zugversuch - Ergebnisse

Das technische Spannungs-Dehnungs-Diagramm mit ausgeprägter Streckgrenze

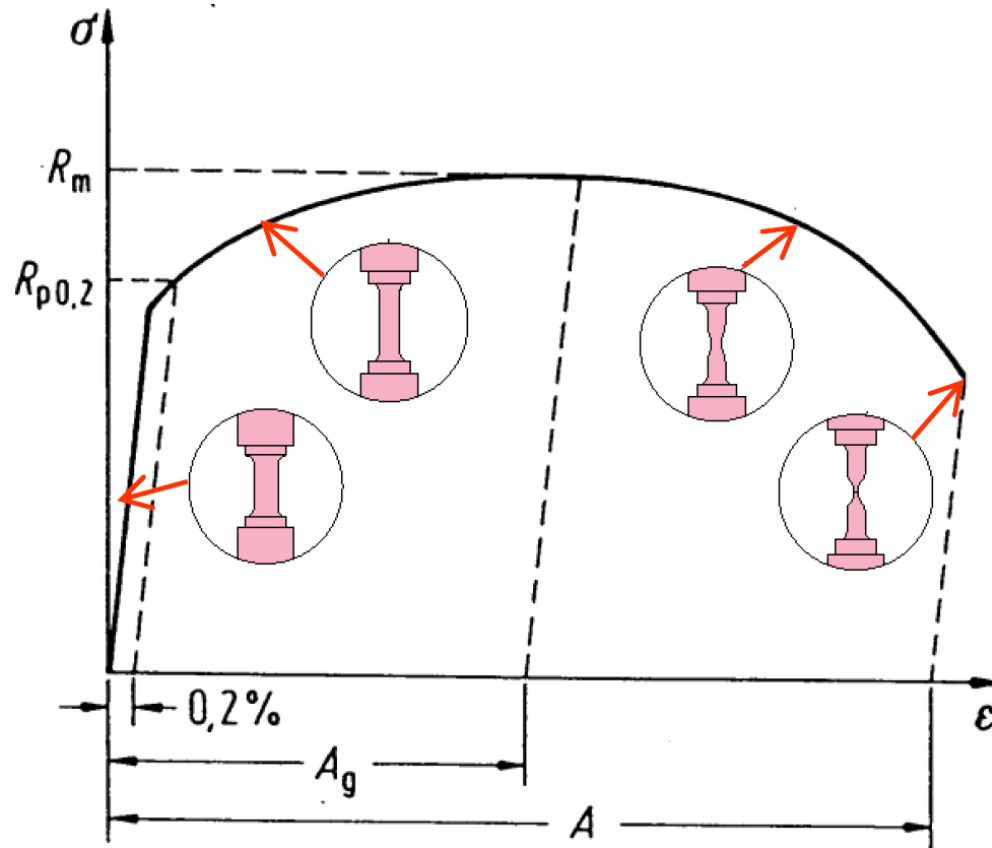


Spannungs-Dehnungs-Diagramm für duktile metallische Werkstoffe

# Mechanisch-Technologische Werkstoffeigenschaften

## Zugversuch – Zusammenfassung der erzielbaren Werte

Das technische Spannungs-Dehnungs-Diagramm (ohne Streckgrenze) und dessen Materialkenngrößen



Spannungs-Dehnungs-Diagramm für duktile metallische Werkstoffe

- E-Modul [ $\text{N/mm}^2$ ]; Steigung der Hook'schen Geraden und gibt die Elastizität des Werkstoffs wieder.
- $R_e$  [ $\text{N/mm}^2$ ]; Elastizitätsgrenze, d.h. Ende des elastischen Bereichs
- $R_{p0,2}$  [ $\text{N/mm}^2$ ]; 0,2% Dehngrenze, d.h. Spannung, bei der nach Entlastung eine plastische Dehnung von 0,2% bleibt
- $R_m$  [ $\text{N/mm}^2$ ]; Maximale Zugfestigkeit, bezogen auf den Ausgangsquerschnitt
- $R_B$  [ $\text{N/mm}^2$ ]; Bruchfestigkeit, bezogen auf den Ausgangsquerschnitt
- $A_g$  [%]; Gleichmaßdehnung
- $A$  [%]; Bruchdehnung
- $Z$  [%]; Brucheinschnürung, mit  $Z = (-\Delta S/S_0)$  wobei  $S$ : Querschnittsfläche

# Mechanisch-Technologische Werkstoffeigenschaften

## Zugversuch – Der E-Modul und das Hooke'sche Gesetz

- Je höher der E-Modul, desto höhere Spannungen bauen sich in einem Werkstoff auf, wenn Sie ihn um einen bestimmten Betrag dehnen.
- Je höher der E-Modul, desto weniger dehnt er sich, wenn Sie ihn mit einer bestimmten Spannung belasten.
- Der E-Modul beeinflusst ganz wesentlich das Rückfederungsverhalten bei Umformprozessen.
- Der E-Modul wird über das Hooke'sche Gesetz beschrieben.

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

$$\frac{F}{S_0} = E \cdot \frac{\Delta l}{l_0}$$

$$\Delta l = \frac{F \cdot l_0}{S_0 \cdot E}$$

Werkstoff	E-Modul in N/mm <sup>2</sup>
Eisen	210.000
Unlegierter Stahl	210.000
Aluminium	70.000
Blei	17.000
Wolfram	400.000
Diamant	1.000.000

# Mechanisch-Technologische Werkstoffeigenschaften

## Zugversuch – Das Streckgrenzenverhältnis

- Das Streckgrenzenverhältnis ist der Quotient aus der oberen Streckgrenze zur Zugfestigkeit

$$\frac{R_{p0,2}}{R_m} \quad \text{bzw.} \quad \frac{R_{eL}}{R_m}$$

- Es ermöglicht eine Aussage zur plastischen Verformbarkeit des Werkstoffs, wobei ein geringer Wert eine hohe Verformungsfähigkeit zur Folge hat.
- Er ist ein Anhaltswert für den Konstrukteur, welches „Sicherheitspotential“ der Werkstoff bei unbeabsichtigter Überlastung oberhalb der zulässigen Spannung noch bietet.



### Festigkeitsklassen von Schrauben

	<u>Zugfestigkeit</u>	<u>Streckgrenze</u>
8.8	$8 \cdot 100 = 800 \text{ N/mm}^2$	$8 \cdot 8 \cdot 10 = 640 \text{ N/mm}^2$
4.6	$4 \cdot 100 = 400 \text{ N/mm}^2$	$4 \cdot 6 \cdot 10 = 240 \text{ N/mm}^2$

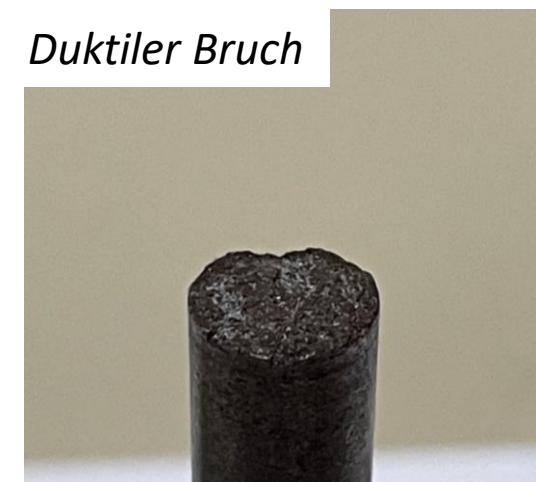
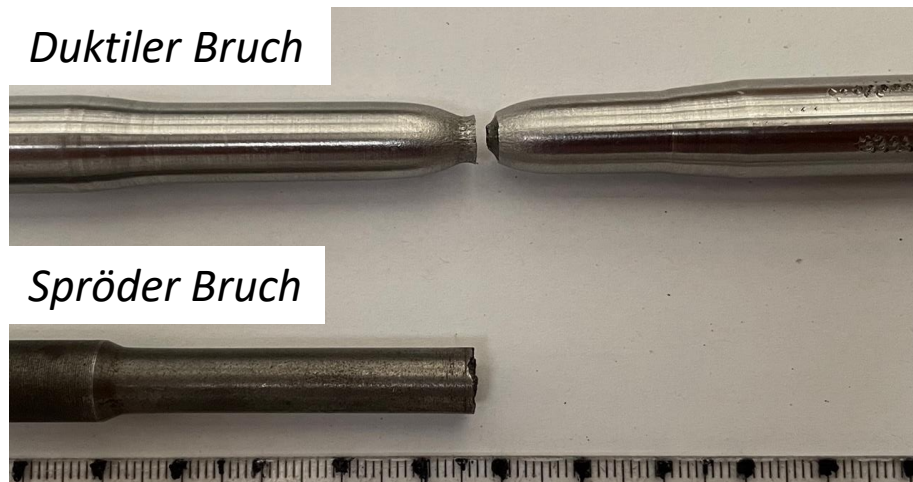
# Mechanisch-Technologische Werkstoffeigenschaften

## Zugversuch – Die Bruchzähigkeit Z

- Die Brucheinschnürung ist ein Zähigkeitswert, welcher die prozentuale Verminderung der Querschnittsfläche  $S_u$  an der Bruchstelle gegenüber der ursprünglichen Querschnittsfläche  $S_0$  beschreibt.

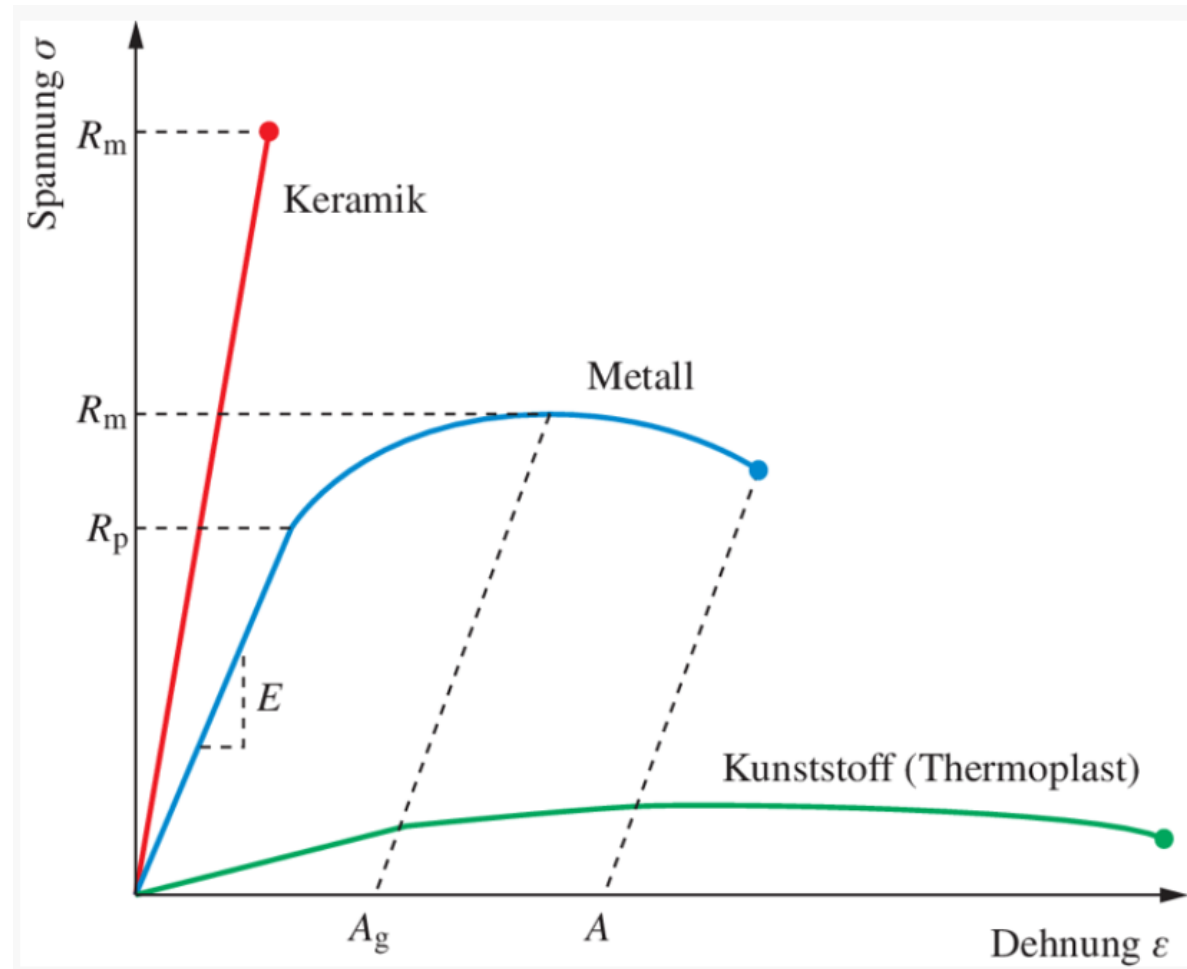
$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0}$$

- Je größer die Brucheinschnürung, desto zäher der Werkstoff.
- Die Brucheinschnürung wird zur Beschreibung der Werkstoffgüte bzw. –qualität herangezogen (z.B. S355J2+N-Z15)



# Mechanisch-Technologische Werkstoffeigenschaften

Typisches Spannungs-Dehnungs-Diagramm für Keramik, Metall und thermoplastischen Kunststoff



# Mechanisch-Technologische Werkstoffeigenschaften

Zugversuch – Ermittelte Kennwerte für unterschiedliche Werkstoffe

Werkstoff	Stahl C15 (Metall)	Aluminiumleg. (Metall)	Aluminiumoxid (Keramik)	Polyethylen (Polymer)
Elastizitätsmodul $E$ in GPa	210	70	360	0,6–0,9
Elastizitätsgrenze in MPa	380–890 ( $R_e$ )	30–500 ( $R_{p0,2}$ )	350–588 ( $R_m$ )	17–29 ( $R_e$ )
Zugfestigkeit $R_m$ in MPa	670–1240	60–550	350–588	20–45
Bruchdehnung $A$ in %	7–24	1–44	0	200–800

# Mechanisch-Technologische Werkstoffeigenschaften

## Zugversuch – Einige Fragen

Ein Al-Blech soll zu einem Karosserieteil umgeformt werden. Welche mechanischen Kennwerte des Zugversuchs sind für sie relevant und warum?

Was ist der Unterschied zwischen dem Elastizitätsmodul und der Steifigkeit eines Werkstoffs?

Die USA-Raumfähre „Spaceshuttle“ ist mit einem langen Manipulatorarm ausgerüstet, der zum Aussetzen und Bergen von Satelliten dient. Für dieses Bauteil ist ein geeignetes Material auszusuchen. Es stehen folgende Materialien zur Auswahl: Eisen, Wolfram, Beryllium, Aluminium, CFK.

## Härte

# Mechanisch-Technologische Werkstoffeigenschaften

## Härteprüfung

Die Härte ist der Widerstand eines Werkstoffs gegen das Eindringen eines anderen, härteren Körpers unter einer festgelegten Prüflast.

Mit Hilfe der Härte können indirekt andere Werkstoffeigenschaften beurteilt bzw. abgeschätzt werden, wie z.B. der Verschleißwiderstand oder die Festigkeit.

Es wurden eine Vielzahl unterschiedlicher Härteprüfverfahren entwickelt:

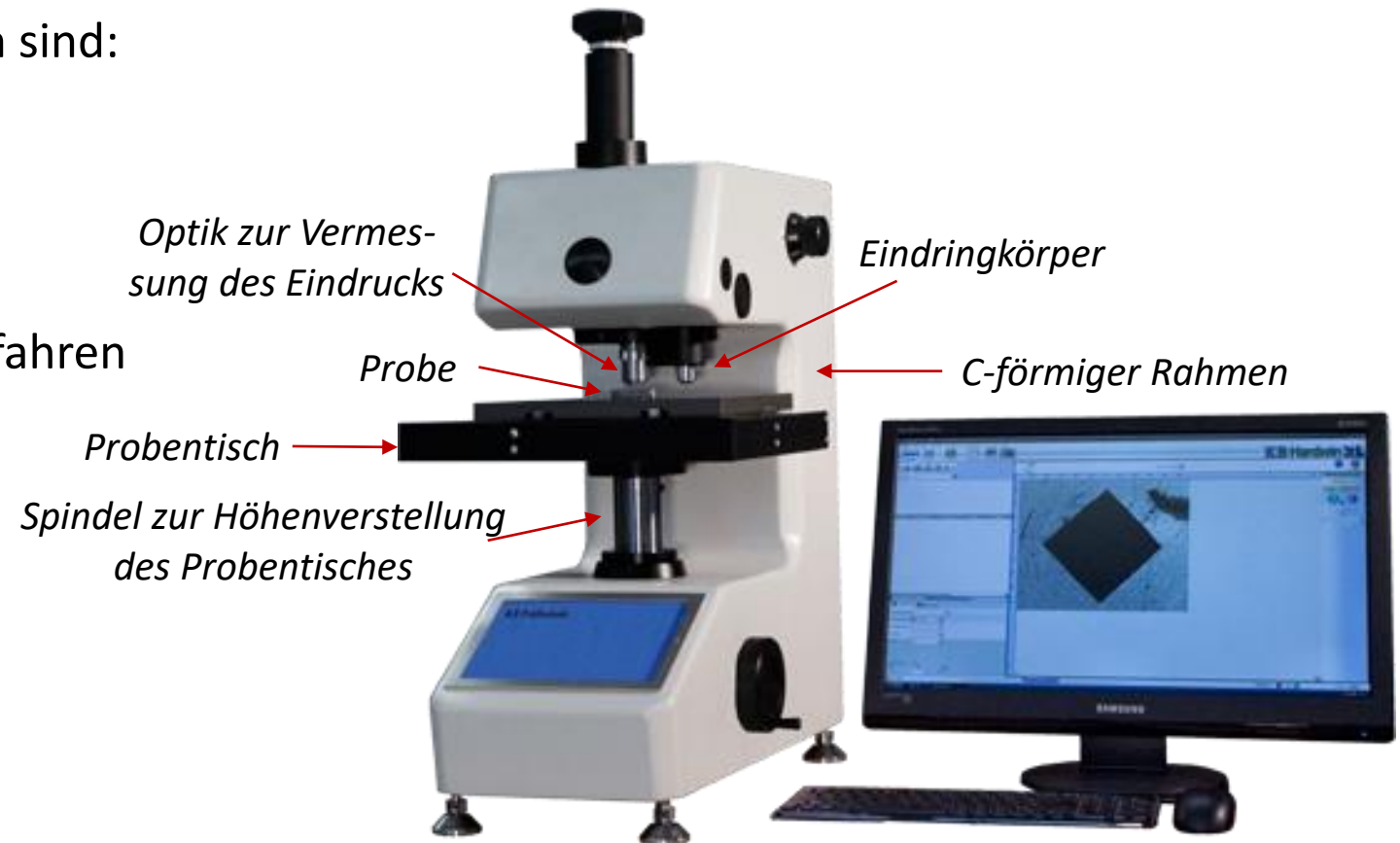
- Ritzhärteprüfung (Härtegrade 1 bis 10; nur Vergleich weich – hart)
- Rückprallhärteprüfung (schnell, leicht durchführbar, relativ ungenau)
- **Statische** und dynamische **Eindringhärteprüfung**

# Mechanisch-Technologische Werkstoffeigenschaften

## Härteprüfung

Die wichtigsten Eindringhärteprüfverfahren sind:

- Statische Härteprüfung nach Brinell
- Statische Härteprüfung nach Vickers
- Statische Härteprüfung nach Rockwell
- Mobile Härteprüfung nach dem UCI-Verfahren



*Statische Härteprüfeinrichtung nach Vickers*

# Mechanisch-Technologische Werkstoffeigenschaften

## Härteprüfung nach Brinell - Prüfablauf



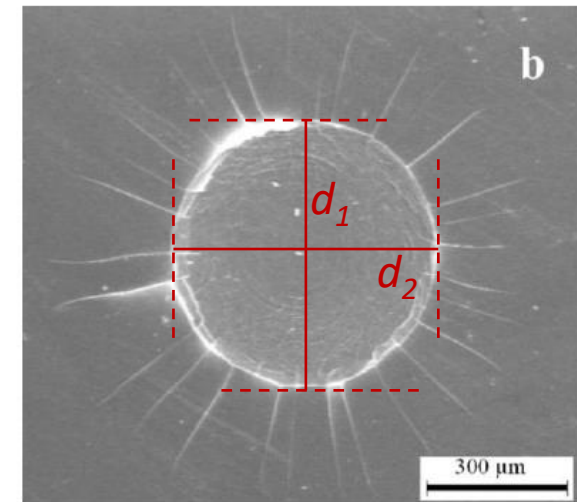
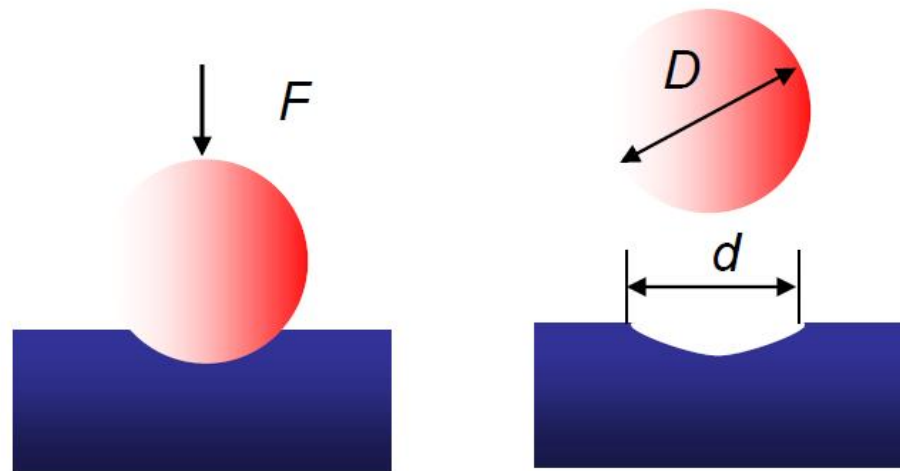
# Mechanisch-Technologische Werkstoffeigenschaften

## Härteprüfung nach Brinell - Prüfablauf

Eine Kugel aus Hartmetall (HBW) oder gehärtetem Stahl (HBS) mit dem Durchmesser  $D$  ( $1 \text{ mm} \leq D \leq 10 \text{ mm}$ ) wird mit einer Prüfkraft  $F$  in die Probe eingedrückt. Nach der Entlastung wird der Eindruckdurchmesser  $d$  ermittelt.

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

$d$  und  $D$  in mm



# Mechanisch-Technologische Werkstoffeigenschaften

Härteprüfung nach Brinell - Ergebnis

120 HBW 5/250/30

120HB	Brinellhärte: 120
W	Hartmetallkugel
5	Kugeldurchmesser: 5 mm
250	Prüfkraft: 2450 N
30	Einwirkdauer: 30 s

120 HBW

120HB	Brinellhärte: 120
W	Hartmetallkugel
	Kugeldurchmesser: 10 mm
	Prüfkraft: 29420 N
	Einwirkdauer: 10 s

Standardbedingung !

# Mechanisch-Technologische Werkstoffeigenschaften

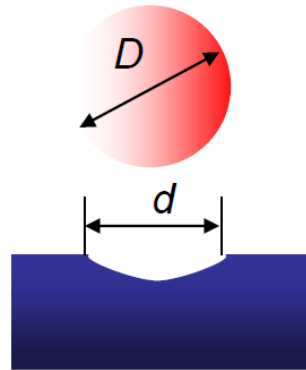
## Härteprüfung nach Brinell - Rahmenbedingungen

Der Belastungsgrad  $x$  ist so zu wählen, dass gilt:

$$0,24D \leq d \leq 0,6D$$

$d < 0,24 D$ : unscharfer Rand

$d > 0,60 D$ : Kugel sinkt zu tief ein



Der Belastungsgrad  $x$  ist definiert als:

$$x = \frac{0,102 \cdot F}{D^2}$$

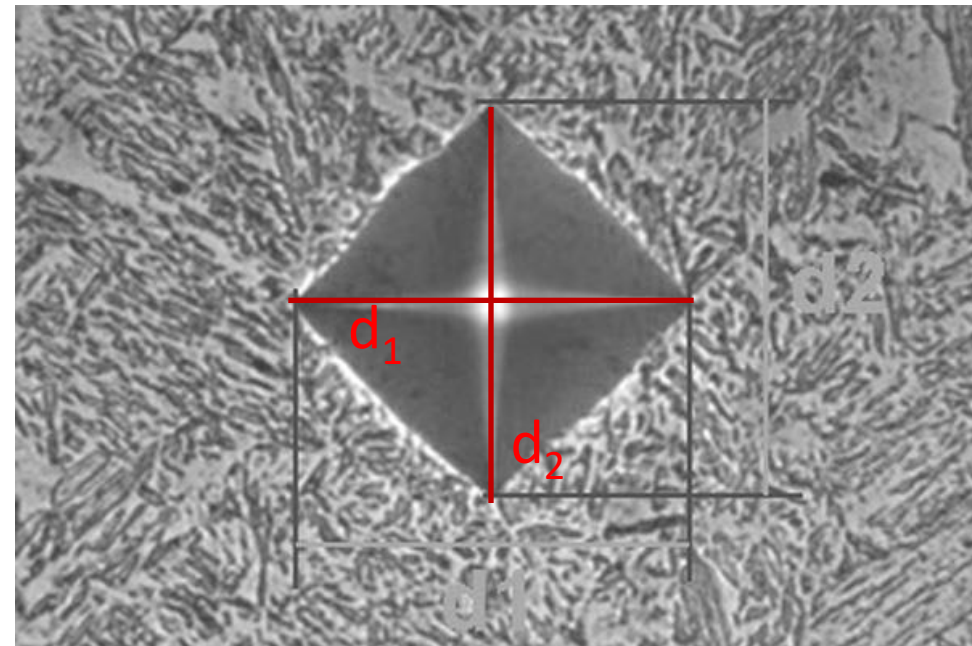
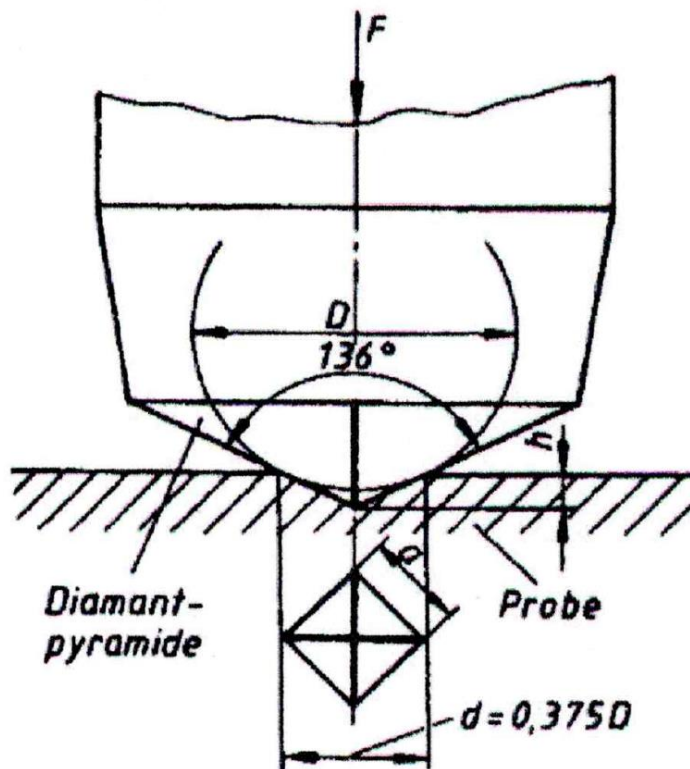
Werkstoff	Brinellhärte	Belastungsgrad $x$ $\frac{0,102 \cdot F}{D^2}$ 3)
Stahl		30,0
Grauguss	$< 140$	10
	$\geq 140$	30
Kupfer und Kupferlegierungen	$< 35$	5
	35 bis 200	10
	$> 200$	30
Leichtmetalle und ihre Legierungen	$< 55$	2,5; 5
	55 bis 130	10 ; 30
	$> 130$	10 ; 30
Blei, Zinn		1 1,25

Belastungsgrad bei der BRINELL – Härteprüfung für verschiedene Werkstoffe

# Mechanisch-Technologische Werkstoffeigenschaften

## Härteprüfung nach Vickers - Prüfablauf

Als Eindringkörper wird eine Diamantpyramide mit quadratischem Grundriss und einem Spitzenwinkel von  $136^\circ$  benutzt. Die Eindruckfläche wird aus dem Mittelwert der Diagonalen  $d_1$  und  $d_2$ .



# Mechanisch-Technologische Werkstoffeigenschaften

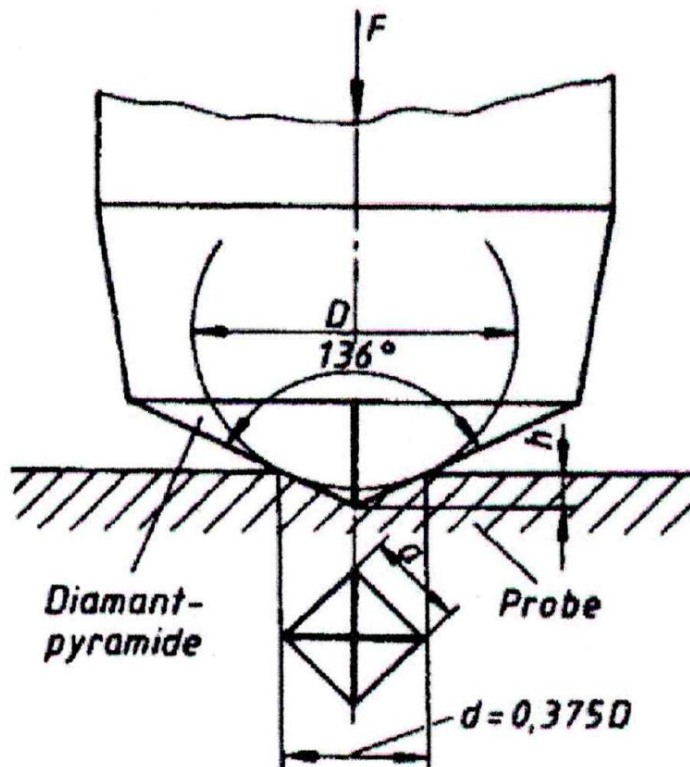
## Härteprüfung nach Vickers - Prüfablauf



# Mechanisch-Technologische Werkstoffeigenschaften

## Härteprüfung nach Vickers - Prüfablauf

Als Eindringkörper wird eine Diamantpyramide mit quadratischem Grundriss und einem Spitzenwinkel von  $136^\circ$  benutzt. Die Eindruckfläche wird aus dem Mittelwert der Diagonalen  $d_1$  und  $d_2$  ermittelt.



$$HV = \frac{0,102 \cdot 2 \cdot F \cdot \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2}$$

# Mechanisch-Technologische Werkstoffeigenschaften

Härteprüfung nach Vickers - Ergebnis

710 HV 30/20

710 HV	Vickershärte: 710
30	Prüfkraft: 294,2 N (30 kp)
20	Einwirkdauer: 20 s

120 HV 5

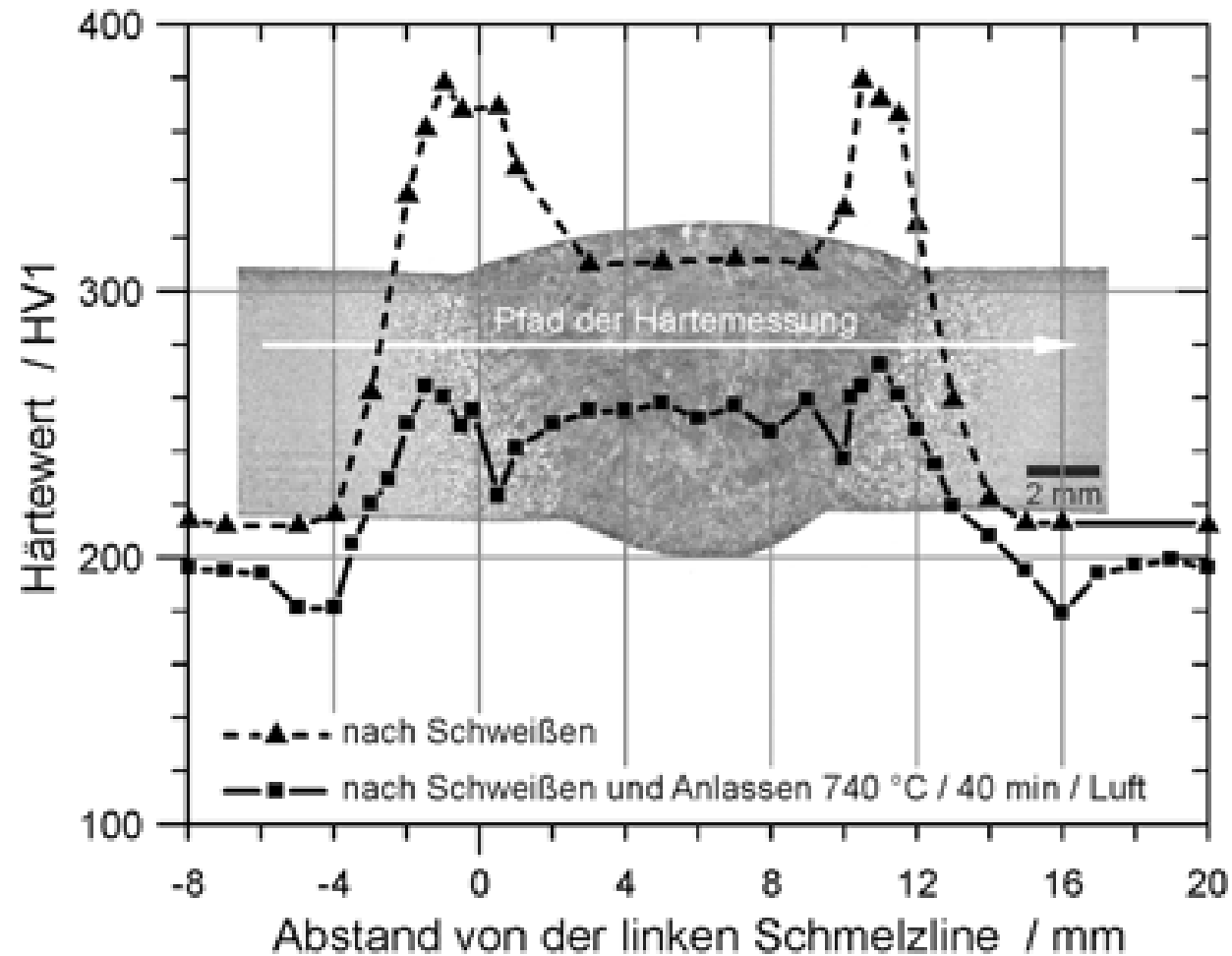
120HV	Vickershärte: 120
5	Prüfkraft: 49,05 N (5 kp)
	Einwirkdauer: 10 s

Bereiche der Prüfkraft F (N)	Härtesymbol	Frühere Bezeichnung
$F \geq 49,03$	$\geq \text{HV } 5$	Vickers-Härteprüfung
$1,961 \leq F < 49,03$	HV 0,2 bis HV 5	Vickers-Kleinkrafthärteprüfung
$0,09807 \leq F < 1,961$	HV 0,01 bis HV 0,2	Vickers-Mikrohärteprüfung

*Einteilung und Lastbereiche der Vickershärteprüfung*

# Mechanisch-Technologische Werkstoffeigenschaften

Härteprüfung nach Vickers – Beispiel: Härtemessung an einer Schweißnaht



# Mechanisch-Technologische Werkstoffeigenschaften

## Härteprüfung nach Rockwell - Prüfablauf

- Unterschieden wird die Härteprüfung nach Rockwell in die Verfahren A, B, C, F, N und T.
- Rockwell C: Gehärtete Stähle mit Härtebereich von 20 bis 70 HRC
- Rockwell A: Sehr harte Werkstoffe (Bsp. Wolframkarbid) mit Härtebereich von 60 bis 88 HRA.
- Bei HRA und HRC besteht der Eindringkörper aus einem Diamantkegel ( $120^\circ$ ) mit abgerundeter Spitze.
- Ermittelt wird die Eindringtiefe!



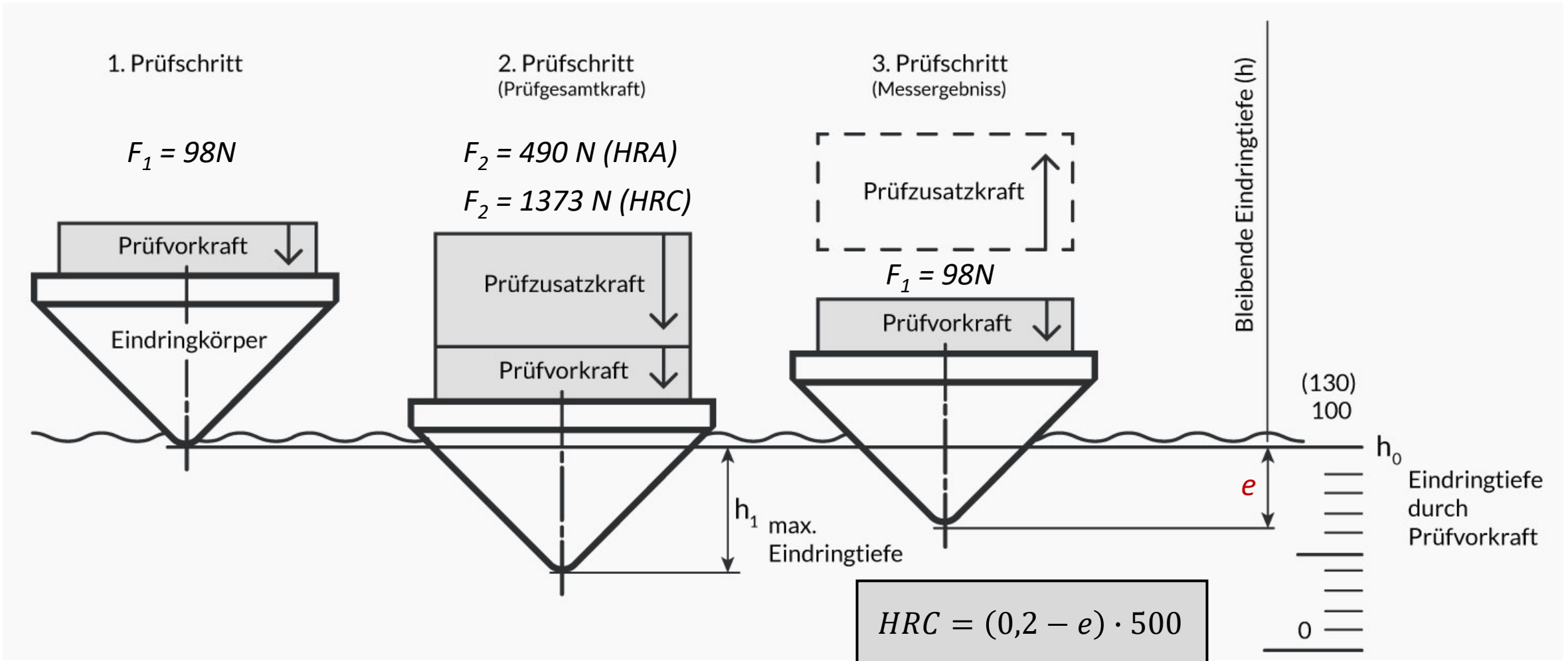
*Diamantkegel mit  $120^\circ$  Winkel*



*Rockwell Härteprüfgerät*

# Mechanisch-Technologische Werkstoffeigenschaften

## Härteprüfung nach Rockwell - Prüfablauf



# Mechanisch-Technologische Werkstoffeigenschaften

## Vergleich der Härteprüfverfahren

Härteprüfverfahren	Brinell	Vickers	Rockwell - C
Allgemeine Anwendung der Härteprüfverfahren, Besonderheiten	Weiche Werkstoffe, gute Mittelung bei heterogenem Gefüge	Universell, aber glatte Oberfläche notwendig	Harte Werkstoffe, leicht automatisierbar
Werkstoffgruppe	Typische Härtewerte		
	HB	HV	HRC
Unleg. Baustahl	100	100	zu weich
Vergüteter Stahl	300	300	30
Gehärteter Stahl	zu hart	800	64
Hartmetall	zu hart	1800	Beschädigung
Keramik	zu hart	2500	Beschädigung

# Mechanisch-Technologische Werkstoffeigenschaften

## Vergleich der Härteprüfverfahren

HBW	HV	HRC
-	900	67
-	800	64
-	700	60
618	650	58
570	600	55
523	550	52
475	500	49
428	450	45
380	400	41
333	350	35
285	300	30
238	250	22
190	200	-
143	150	-
95	100	-
48	50	-

# Mechanisch-Technologische Werkstoffeigenschaften

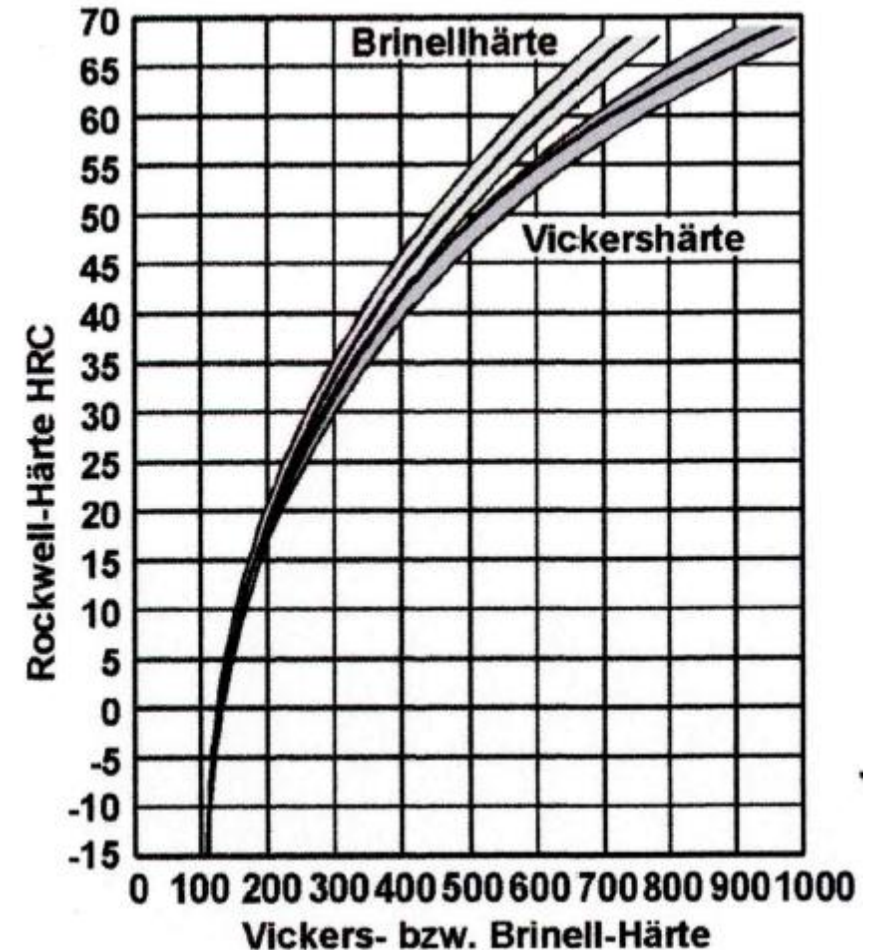
## Umrechnung Härte - Zugfestigkeit

- Für praktische Zwecke kann man mit ausreichender Genauigkeit annehmen, dass bis zu einem Zahlenwert von 400 der HB-Wert mit dem HV-Wert vergleichbar ist.
- Die Härte gibt eine Einschätzung der Zugfestigkeit des Werkstoffs (gilt genau genommen nur für unlegierte Stähle)
- Als Faustformel gilt daher:

$$R_m \sim 3,2 \dots 3,4 \times HV$$

oder

$$R_m \sim 3,2 \dots 3,4 \times HB$$

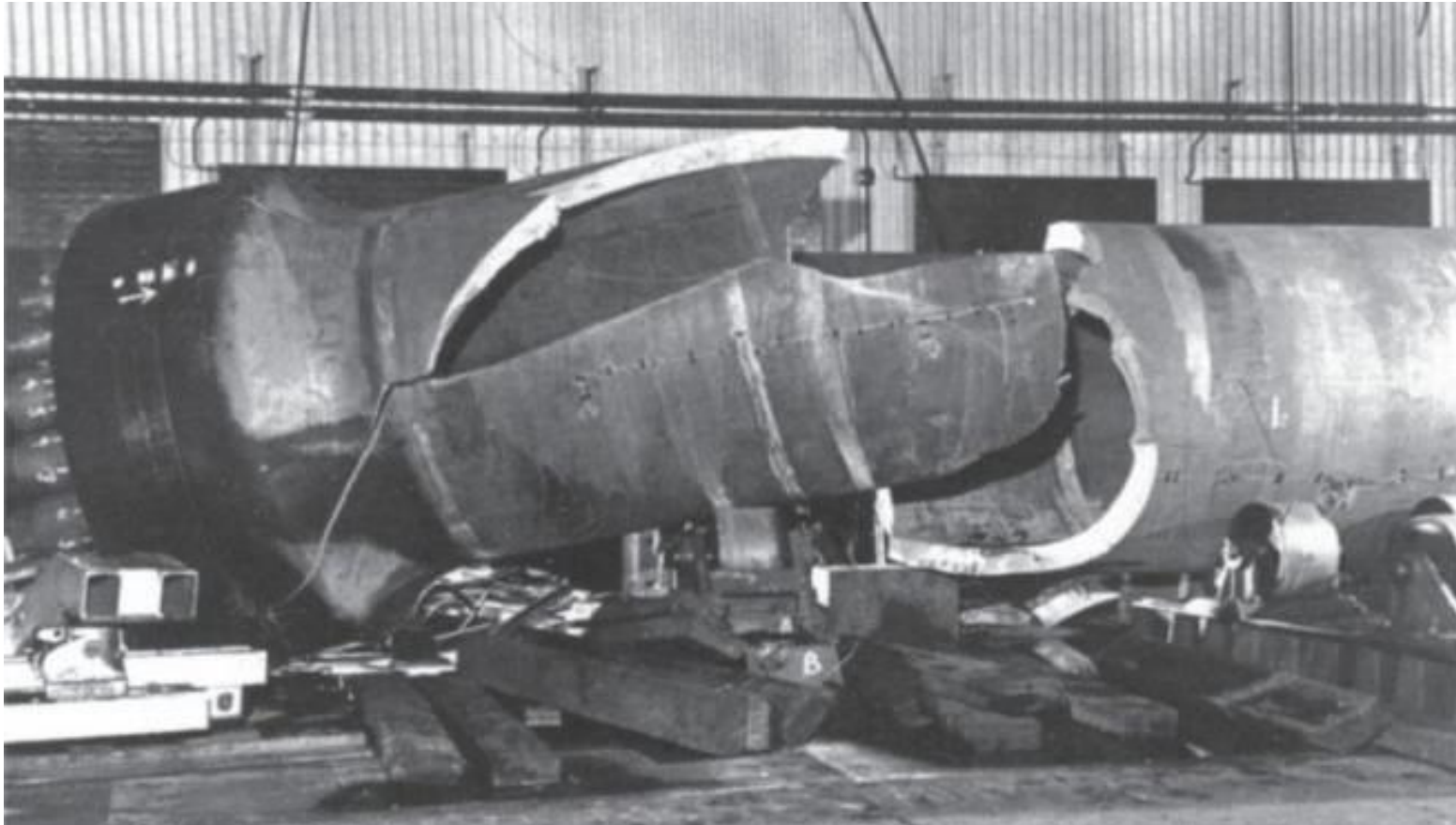


## Kerbschlagzähigkeit

# Mechanisch-Technologische Werkstoffeigenschaften

## Kerbschlagbiegeversuch

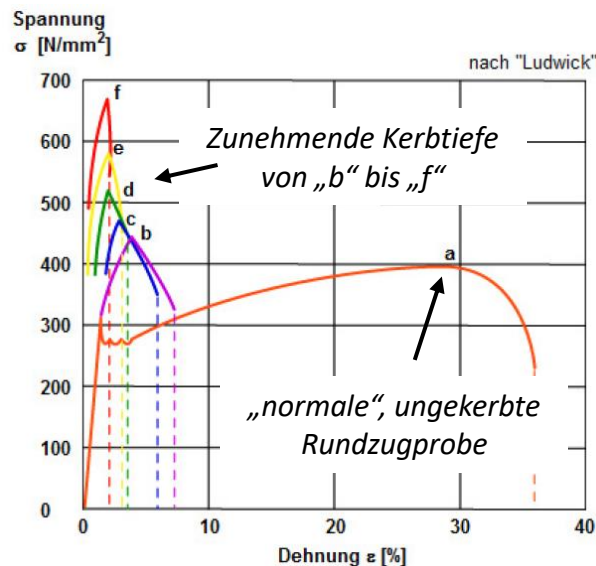
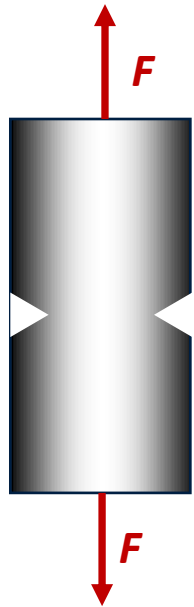
Ist der Zugversuch und die Härteprüfung zur Bestimmung der Werkstoffeigenschaften ausreichend?



# Mechanisch-Technologische Werkstoffeigenschaften

## Kerbschlagbiegeversuch

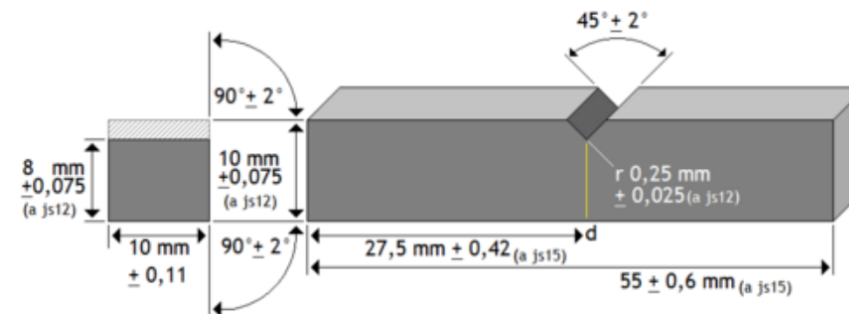
- Eine bislang nicht berücksichtigte Größe ist die Werkstoffzähigkeit bei einer schlagenden Beanspruchung. Je zäher ein Werkstoff ist, desto mehr plastische Verformung kann dieser aufnehmen.
- Zudem ist wichtig, wie sich der Werkstoff unter dem Einfluss von Kerben verhält, d.h. wie hoch ist die Kerbempfindlichkeit.



Einfluss einer Kerbe auf das Ergebnis einer Rundzugprobe beim Zugversuch

Quelle: SLV Duisburg

- d.h. also, eine Kerbe erhöht die Sprödbbruchanfälligkeit durch die Erzeugung eines dreiachsigen Spannungszustandes am Kerbgrund.
- Für den Kerbschlagbiegeversuch werden genormte Proben verwendet:



V-Probe nach ISO 148

# Mechanisch-Technologische Werkstoffeigenschaften

## Kerbschlagbiegeversuch

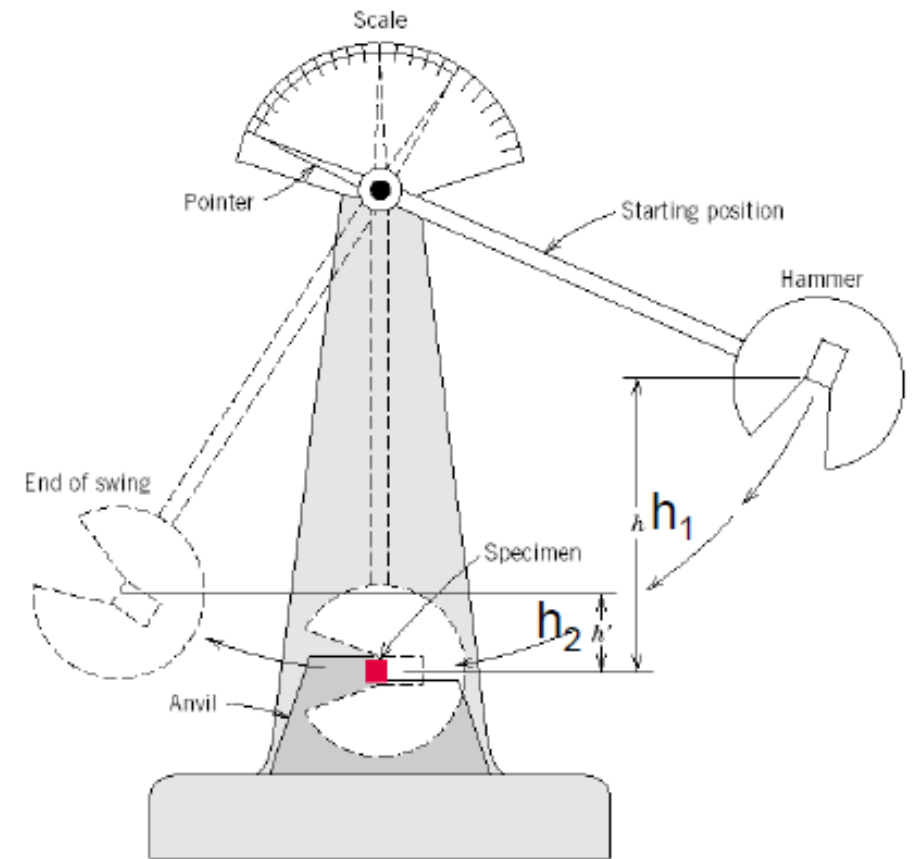
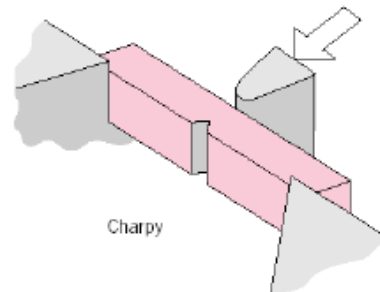
- Es wird ein Pendelschlagwerk eingesetzt.
- Ermittelt wird die beim Zerschlagen der Probe aufgenommene Kerbschlagarbeit  $K$  [J] bezogen auf die Fläche des Querschnitts  $S$ .
- Hierdurch erhält man die spezifische Kerbschlagarbeit  $K_C$  bzw. Kerbschlagzähigkeit [ $\text{J}/\text{cm}^2$ ].

$$K_C = \frac{K}{S} = \frac{m \cdot g \cdot (h_1 - h_2)}{S}$$

$S$ : Querschnitt am Kerb vor dem Versuch

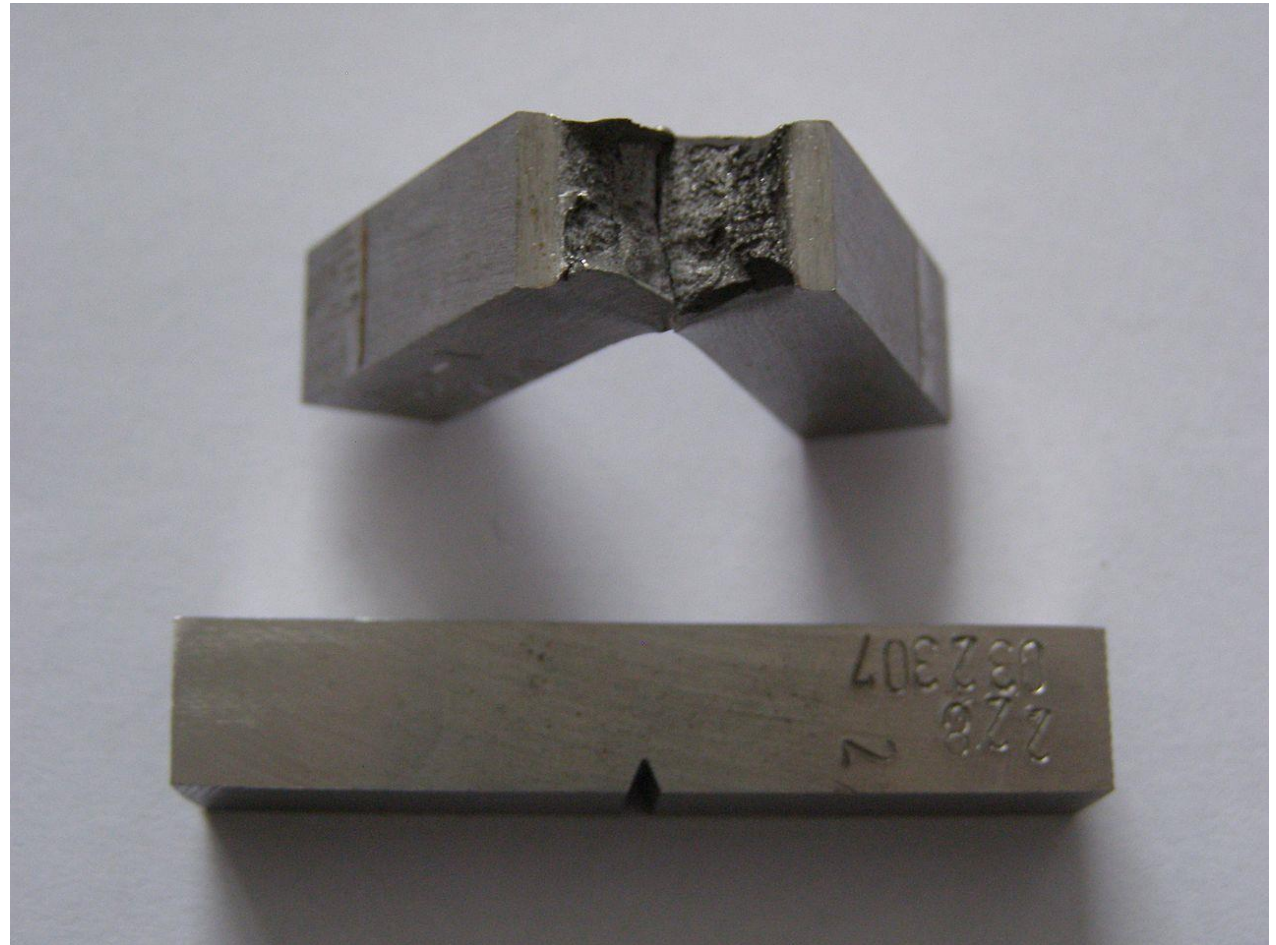
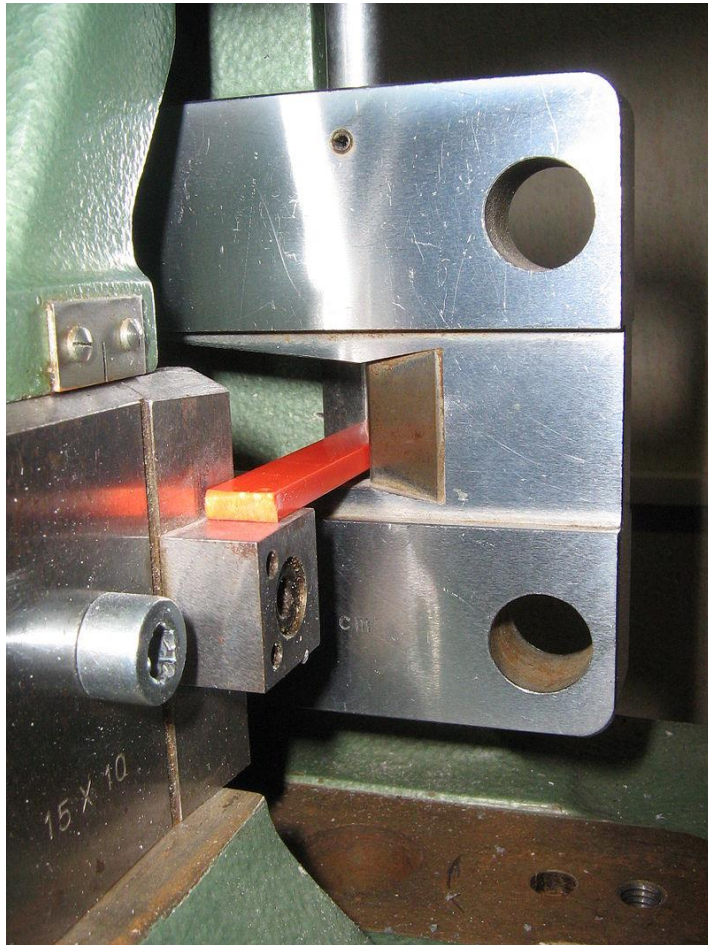
$m$ : Masse des Schlaghammers

$g$ : Erdbeschleunigung



# Mechanisch-Technologische Werkstoffeigenschaften

## Kerbschlagbiegeversuch



# Mechanisch-Technologische Werkstoffeigenschaften

## Kerbschlagbiegeversuch – Temperaturabhängigkeit der Kerbschlagzähigkeit

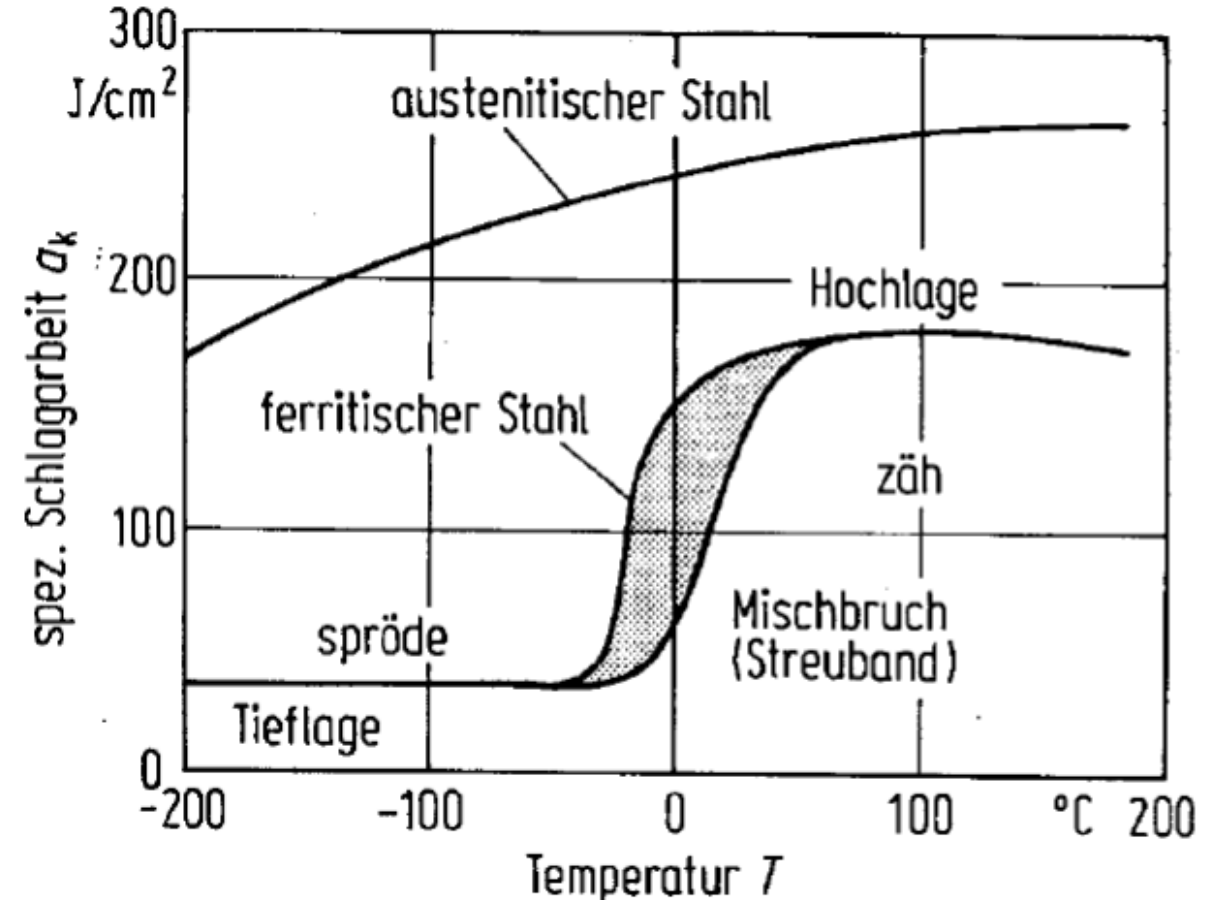
Ein spröder Werkstoff stellt ein Risiko für viele Anwendungen dar, d.h. die Kerbschlagarbeit bzw. –zähigkeit sollte einen sinnvoll definierten Grenzwert nicht unterschreiten.

### Wichtige Begriffe:

Tieflage, Hochlage, Übergangstemperatur

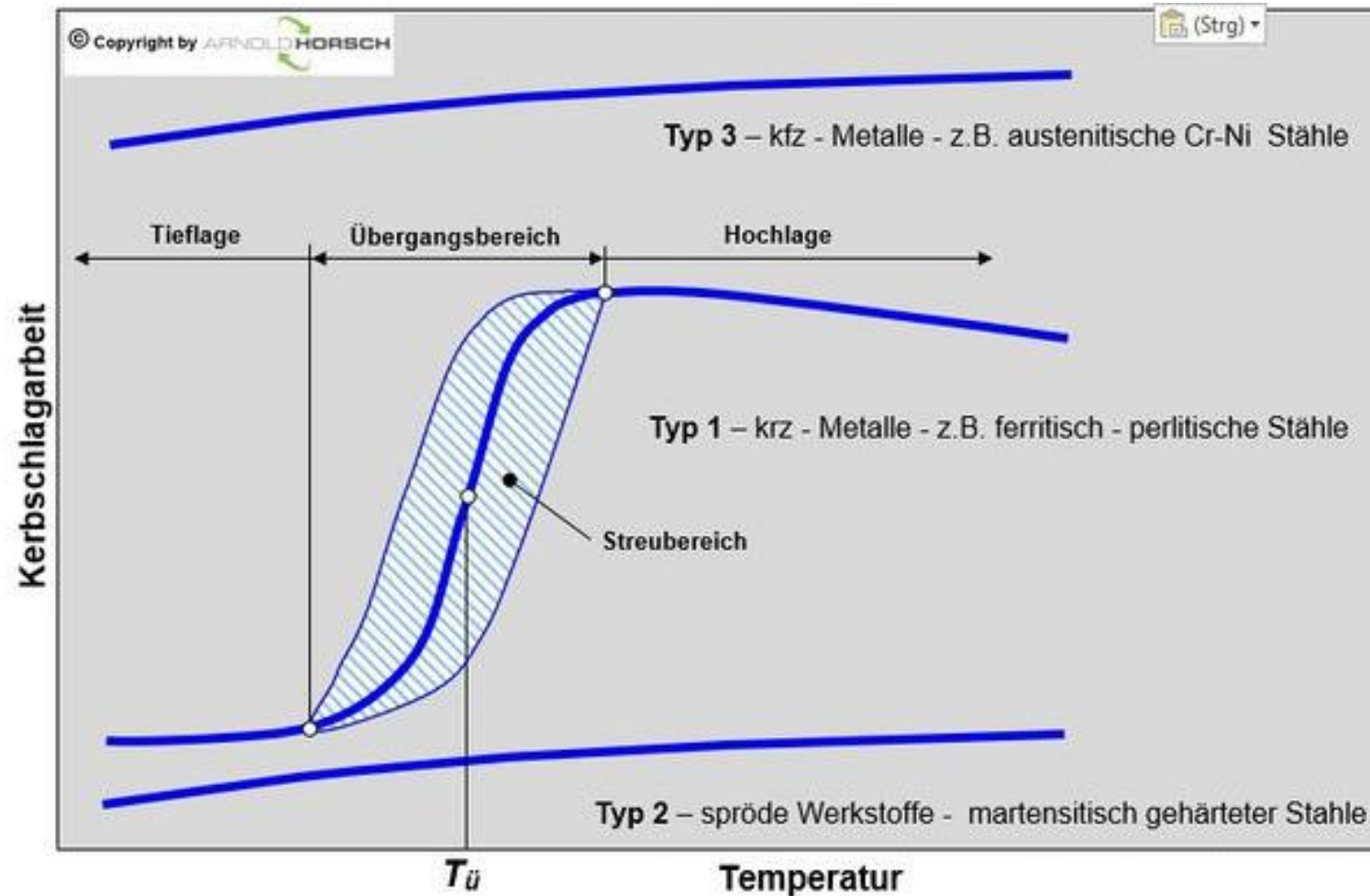
### Konsequenz:

- Verwendung von ferritischen Stählen möglichst oberhalb der Übergangstemperatur.
- Für kryotechnische Anwendungen sind austenitische Stähle zu bevorzugen.



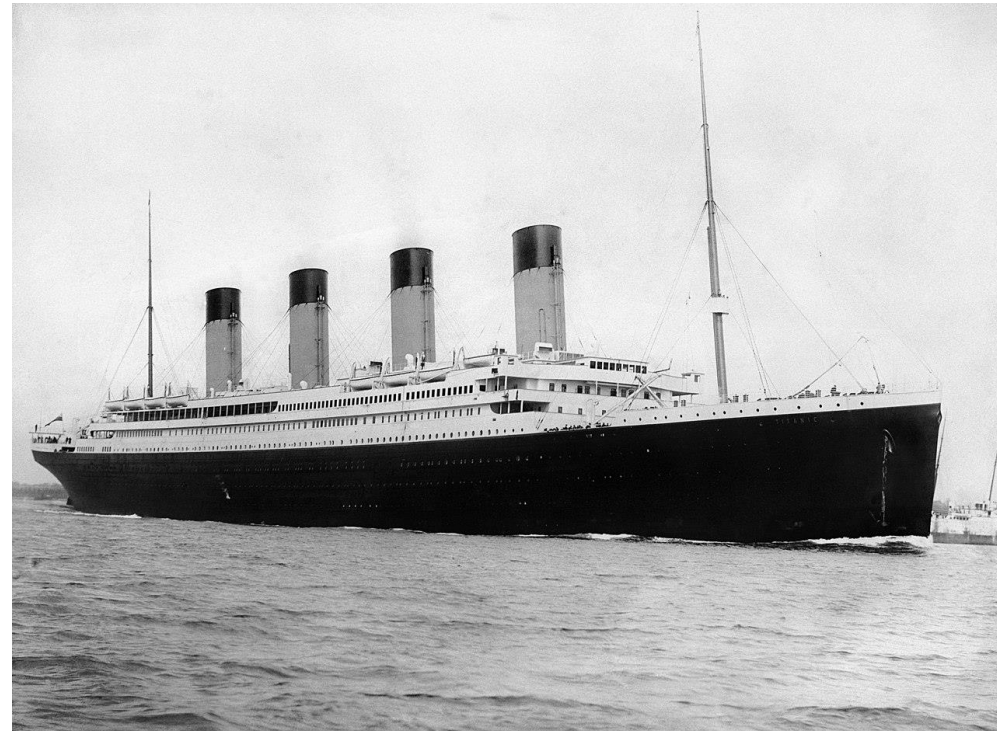
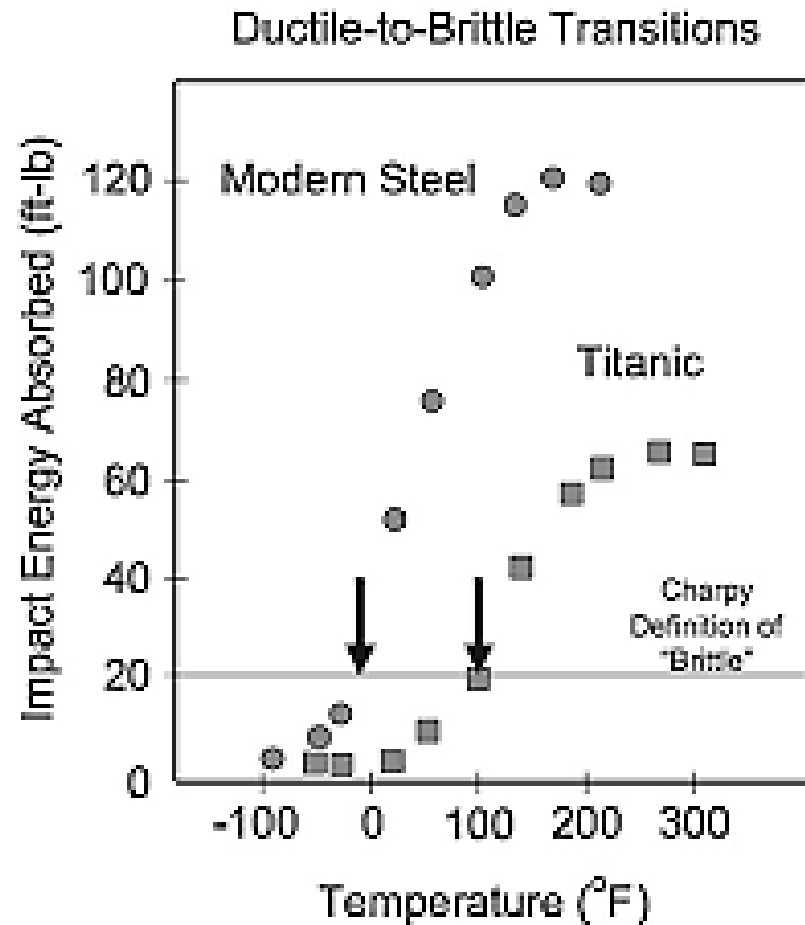
# Mechanisch-Technologische Werkstoffeigenschaften

## Kerbschlagbiegeversuch – Temperaturabhängigkeit der Kerbschlagzähigkeit



# Mechanisch-Technologische Werkstoffeigenschaften

Kerbschlagbiegeversuch – Temperaturabhängigkeit der Kerbschlagzähigkeit

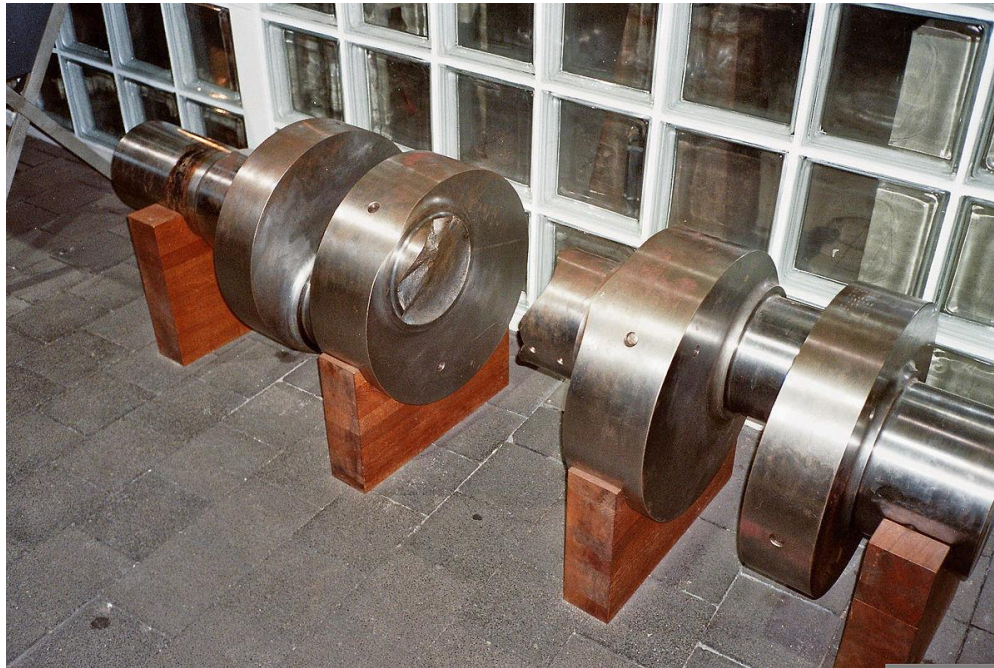


## Dauerfestigkeit

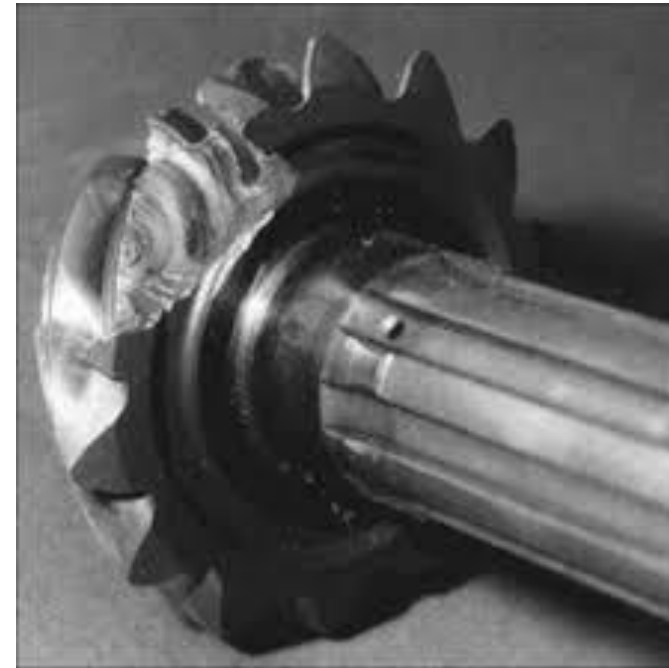
# Mechanisch-Technologische Werkstoffeigenschaften

## Materialermüdung

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.



*Ermüdungsbruch einer Kurbelwelle*



*Ermüdungsbruch einer Kurbelwelle*

# Mechanisch-Technologische Werkstoffeigenschaften

## Materialermüdung



# Mechanisch-Technologische Werkstoffeigenschaften

## Wechselbelastung - Dauerschwingversuch

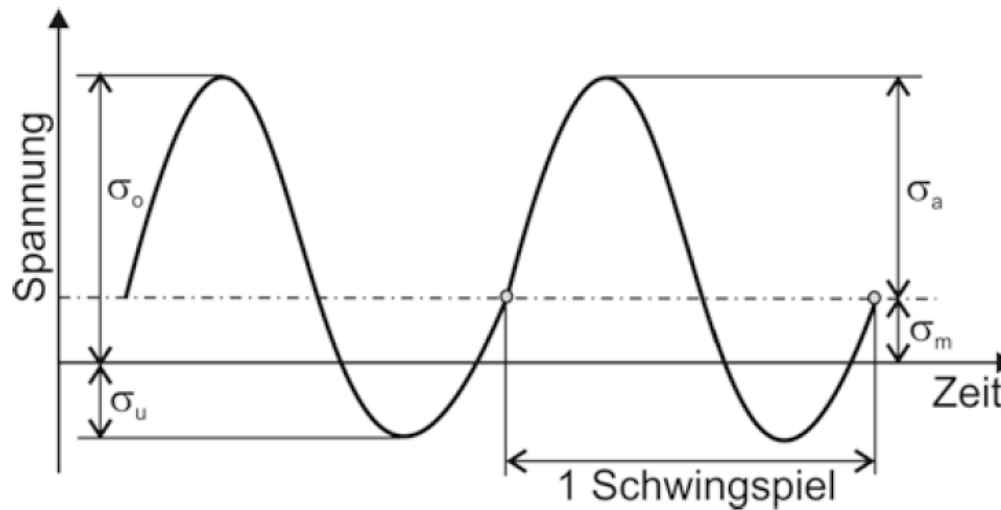


<https://www.youtube.com/watch?v=kLDDASHsRLg>

# Mechanisch-Technologische Werkstoffeigenschaften

## Wechselbelastung - Dauerschwingversuch

Typischer Spannungs-Zeit-Verlauf während eines Ermüdungsversuchs



$\sigma_a$ : Spannungsamplitude

$\sigma_m$ : Mittelspannung

$\sigma_u$ : Unterspannung

$\sigma_o$ : Oberspannung

$\Delta\sigma$ : Spannungsschwingbreite

R: Spannungsverhältnis

$$\sigma_a = \frac{1}{2} (\sigma_o - \sigma_u)$$

$$\Delta\sigma = \sigma_o - \sigma_u = 2\sigma_a$$

$$\sigma_m = \frac{1}{2} (\sigma_o + \sigma_u)$$

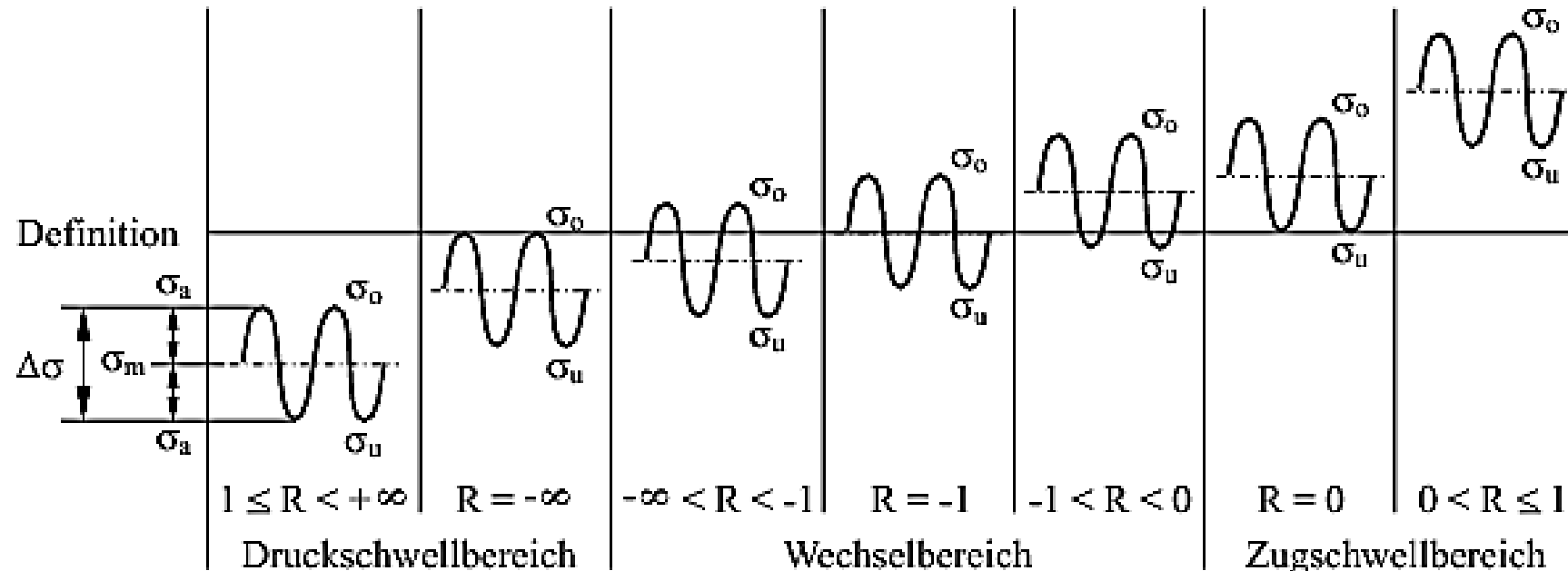
$$R = \frac{\sigma_u}{\sigma_o}$$

# Mechanisch-Technologische Werkstoffeigenschaften

## Wechselbelastung - Dauerschwingversuch

Bei periodischer Beanspruchung wird zwischen den Bereichen Zugschwell-, Wechsel- und Druckschwellbeanspruchung unterschieden. Idealfälle sind:

- Reine Wechselbeanspruchung mit  $R = -1$
- Reine Zugschwellbeanspruchung mit  $R = 0$
- Reine Druckschwellbeanspruchung mit  $R = \pm\infty$

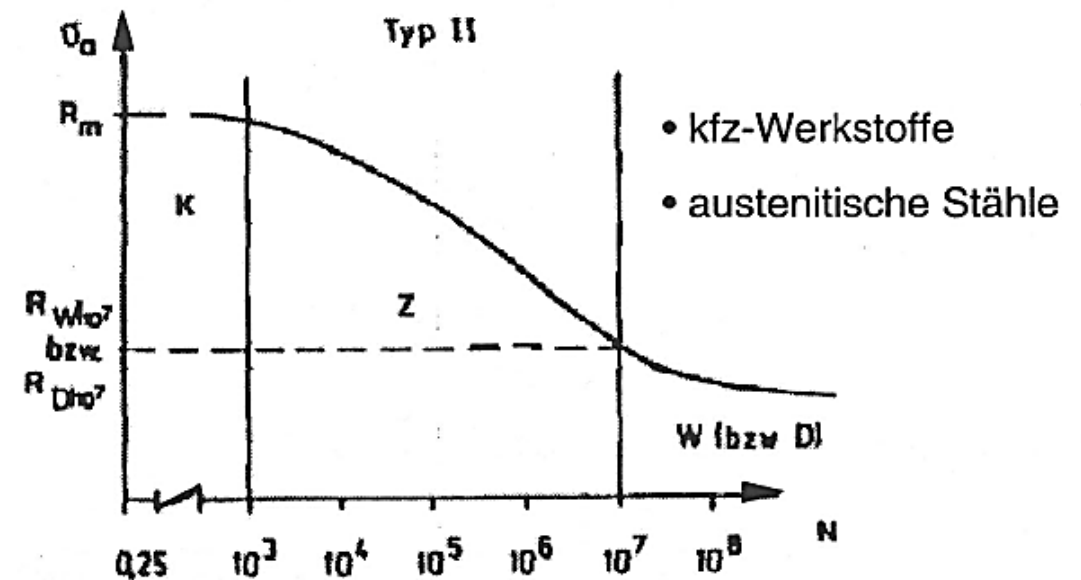
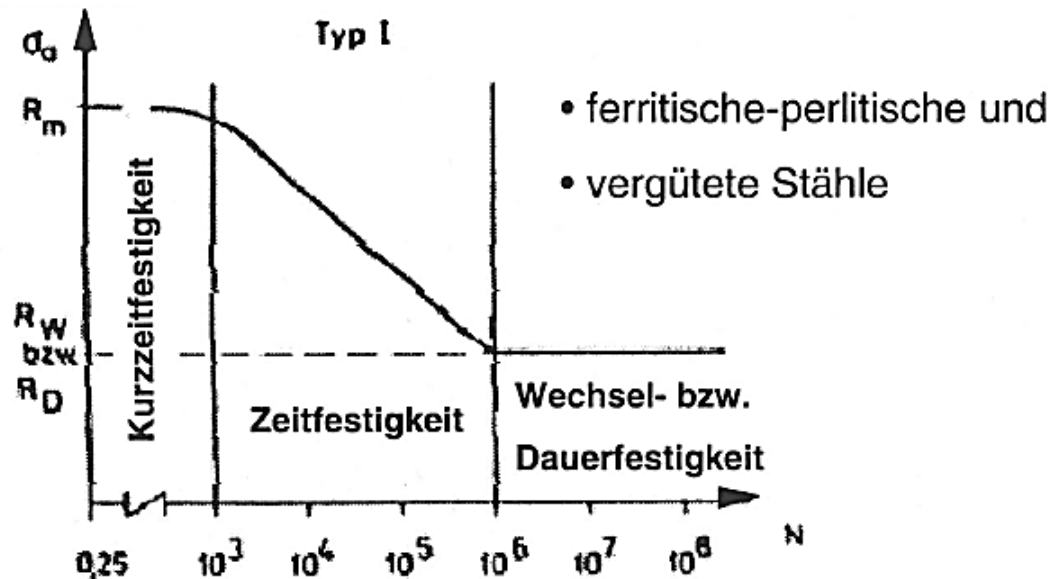


# Mechanisch-Technologische Werkstoffeigenschaften

## Wechselbelastung - Dauerschwingversuch

Die Versuchsergebnisse werden vorwiegend mit Hilfe der Wöhler-Kurve dargestellt:

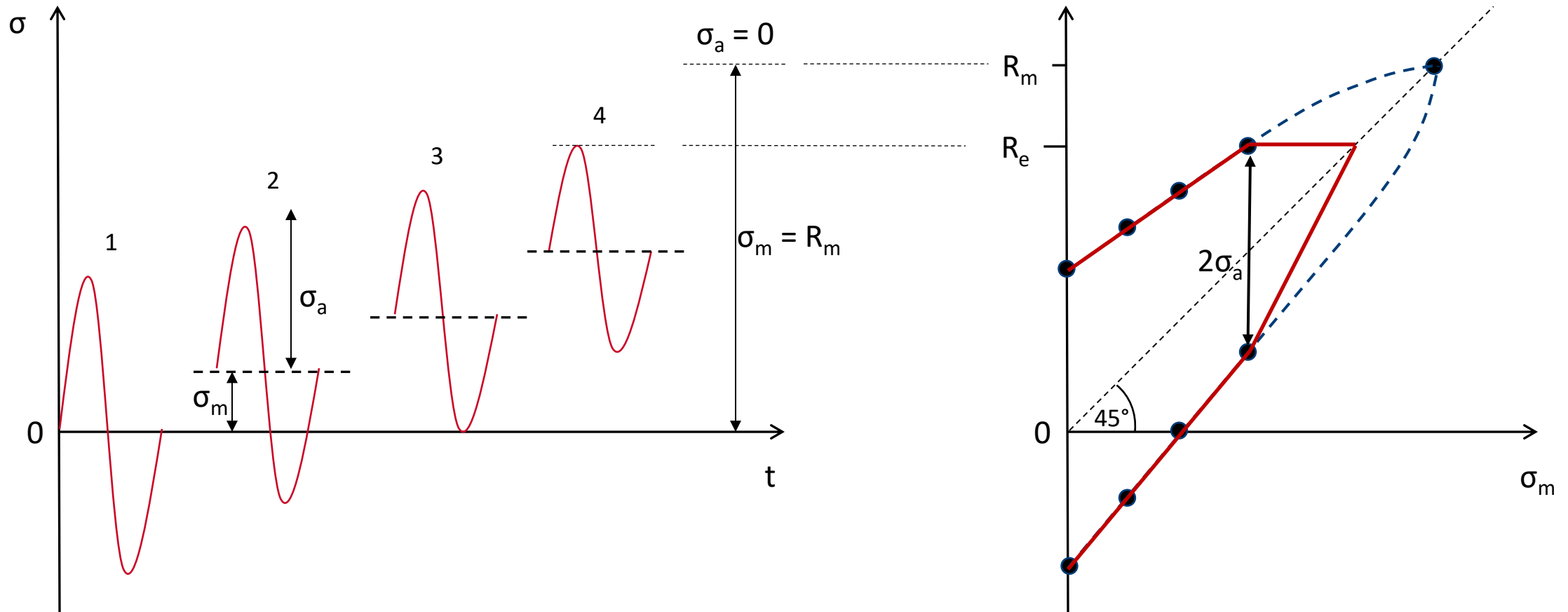
Versuche unter reiner  
Wechselbeanspruchung ( $R = -1$ )



Dauerfestigkeit nach  
August Wöhler (1856)

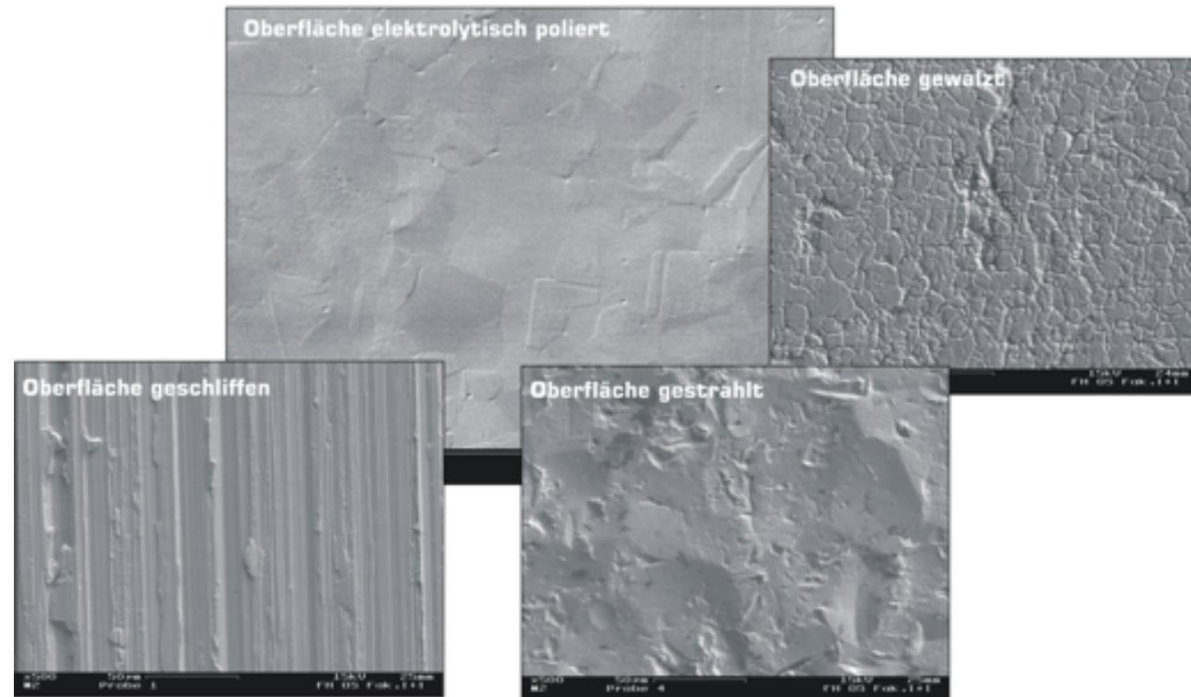
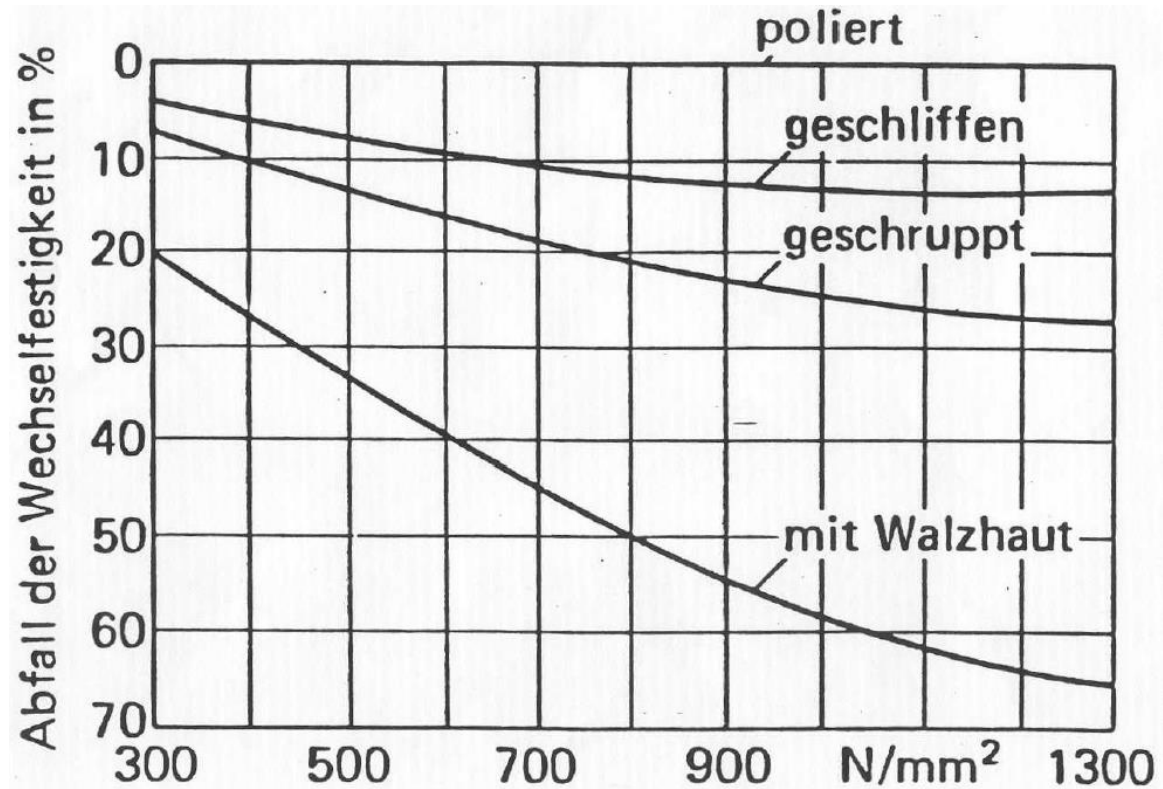
# Mechanisch-Technologische Werkstoffeigenschaften

## Dauerfestigkeitsschaubilder – Das Smith-Diagramm



# Mechanisch-Technologische Werkstoffeigenschaften

Einfluss der Oberfläche auf die dynamische Festigkeit

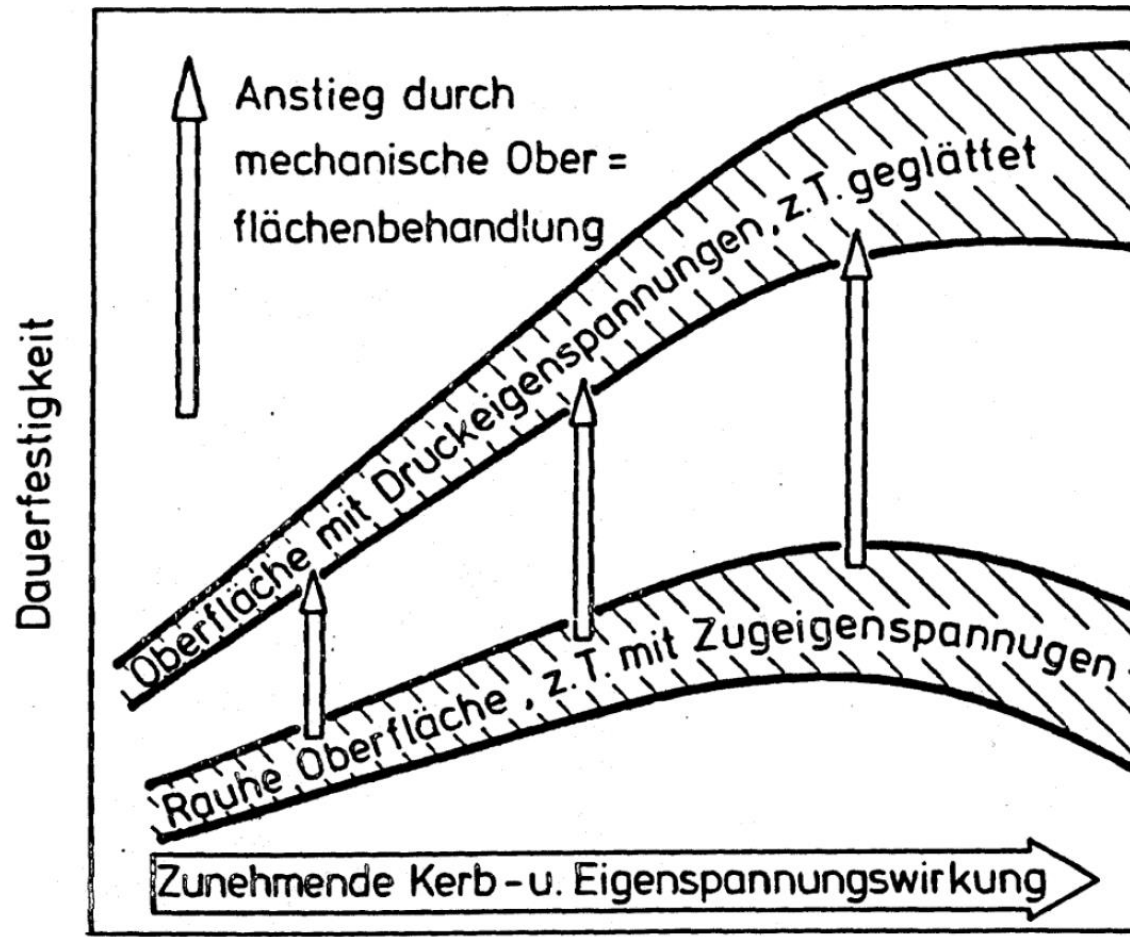


Skript Prof. Fallner

Die Oberflächenrauheit beeinflusst maßgeblich die dynamische Bauteilfestigkeit

# Mechanisch-Technologische Werkstoffeigenschaften

Steigerung der dynamischen Festigkeit durch Oberflächenbehandlung



Skript Prof. Faller



Federntechnik Knörzer

Kugelgestrahlte Feder zur Erzeugung von Druckeigenspannungen an der Oberfläche