

Materialwissenschaften

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

Kapitel 9: Werkstoffversagen

9.1 Einführung

9.2 Sprödbbruch

9.3 Bruchmechanik

9.4 Duktiler Bruch

9.5 Zusammenfassung

W. D. Callister, D.G. Rethwisch: Materialwissenschaften und Werkstofftechnik.
Wiley-VCH. Kapitel 8.

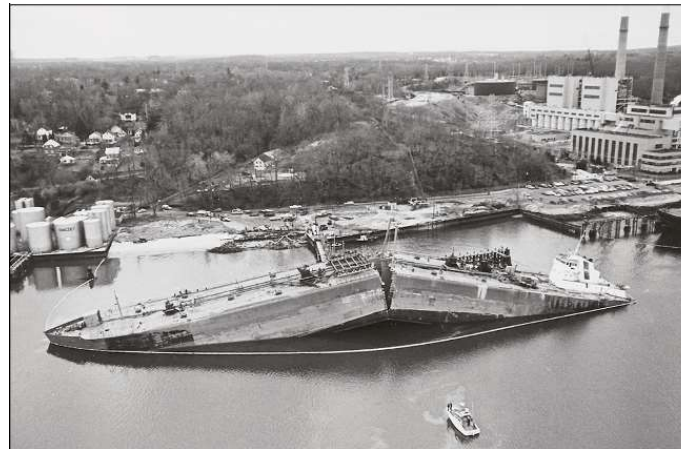
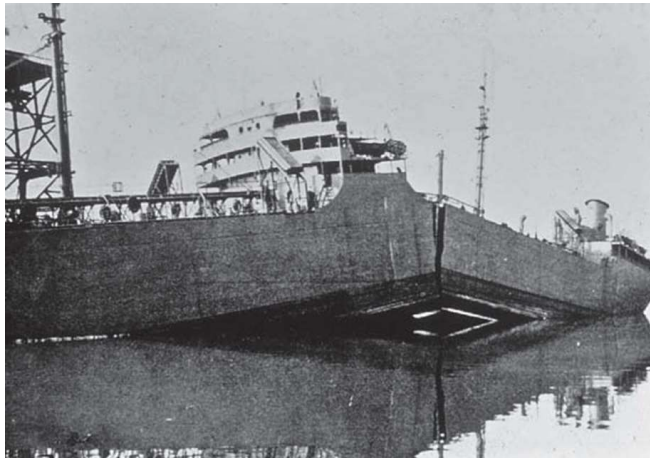
J. P. Mercier, G. Zambelli, W. Kurz: Introduction to Material Science.
Elsevier, 2002. Kapitel 13.

D. R. Askeland: Materialwissenschaften. Spektrum. Kapitel 23.

9.1 Einführung

Liberty-Schiffskatastrophe

→ Sprödbbruch



Übergangstemperatur des Metalls vom Schiff wurde
bei Fertigung falsch berechnet
→ im kalten Seewasser veränderte sich der
Metallkörper des Schiffes plötzlich von duktil zu spröde

Spannungsüberhöhung

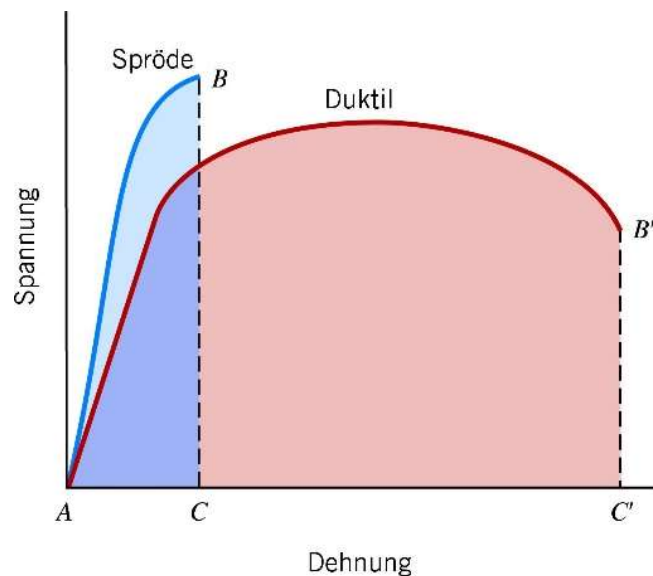


Einführung

Bruch: Zerfall eines Materials in zwei oder mehrere Teile
unter Einwirkung einer Kraft, z.B. einer Zugbelastung

Teilung: **Ausbreitung eines Risses**

Hierbei spielen **interne Defekte** eine große Rolle,
z.B. Haarrisse, Poren, Einschlüsse spröder Partikel, Kerbstellen



spröde Materialien:

brechen ohne plastische Verformung,
z.B. Keramiken

duktilen Materialien:

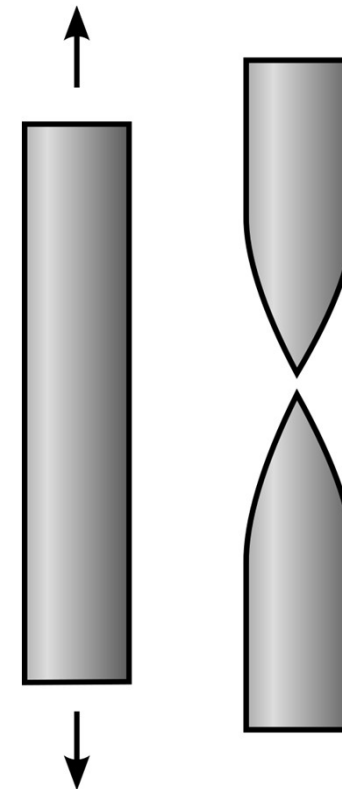
brechen erst nach beträchtlicher
plastischer Verformung, z.B. Metalle
("duktil": verformbar, schlagzäh)

Bruchflächen

überwiegend duktiler Bruch, z.B. bei Ag, Pb
bei anderen Materialien bei hoher Temperatur

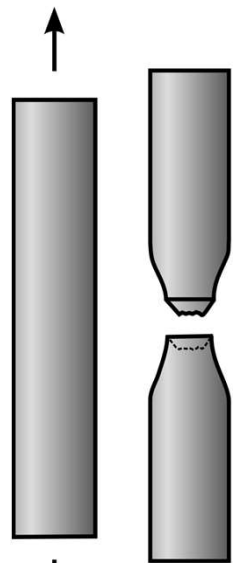
(vollständig) duktiler Bruch

- nur langsame Vergrößerung der Risslänge
- Riss breitet sich nur dann weiter aus,
wenn die einwirkende Spannung erhöht wird
- “stabiler Riss”



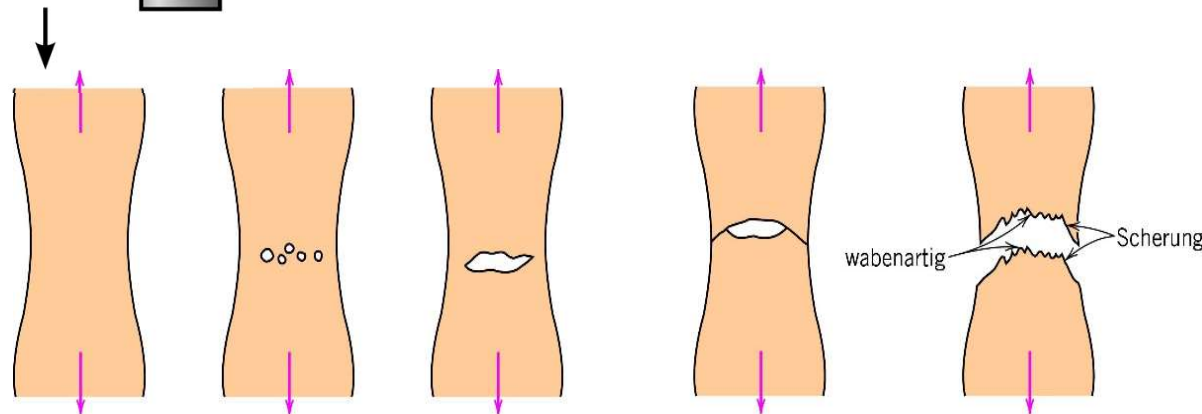
Probe wird bis auf einen punktförmigen Querschnitt eingeschnürt.

Mäßig duktiler Bruch

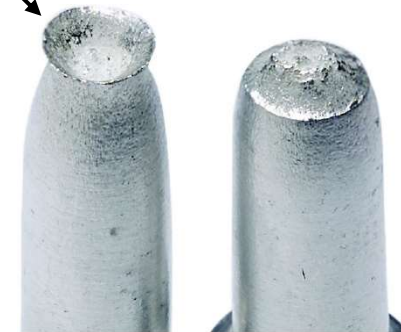


mäßig duktiler Bruch:

- nur geringe Einschnürung
- Bildung kleiner Hohlräume, diese vergrößern sich und vereinigen sich zu einem elliptischen Riss
- dieser wächst, und es kommt zum Bruch: “**Trichterbruch**”
- bei 45° ist das Maximum der Scherspannung



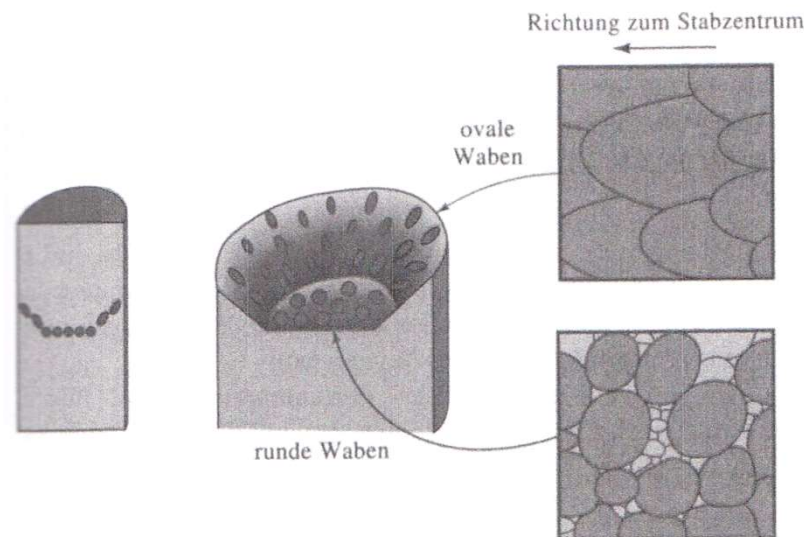
Scherlippe



Aluminium

Mäßig duktiler Bruch: Wabenbildung

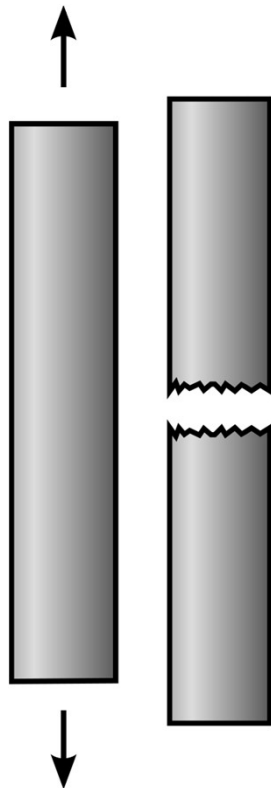
mäßig duktiler Bruch: Hohlräume → elliptischer Riss → Trichterbruch



Waben: Spuren von Mikroporen

- **runde Form**, wo Zugkraft senkrecht zur Bruchfläche gerichtet war
- **längliche Form** auf der Scherlippe, wobei Längsachsen zum Ausgangspunkt des Bruchs zeigen

9.2 Sprödbbruch



- ohne plastische Verformung
- Riss senkrecht zur Zugrichtung
- flache Bruchfläche



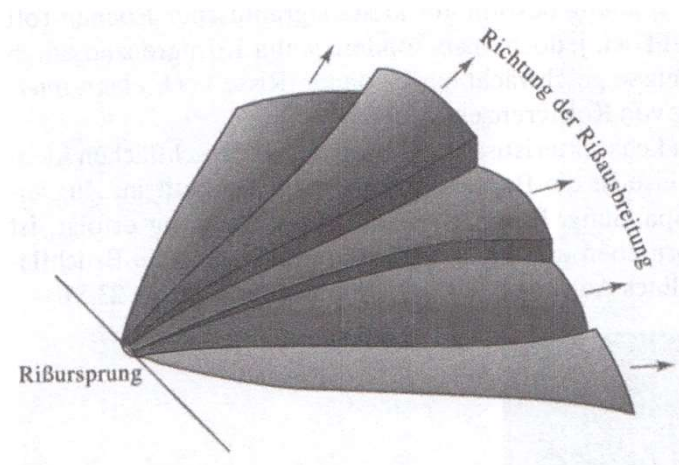
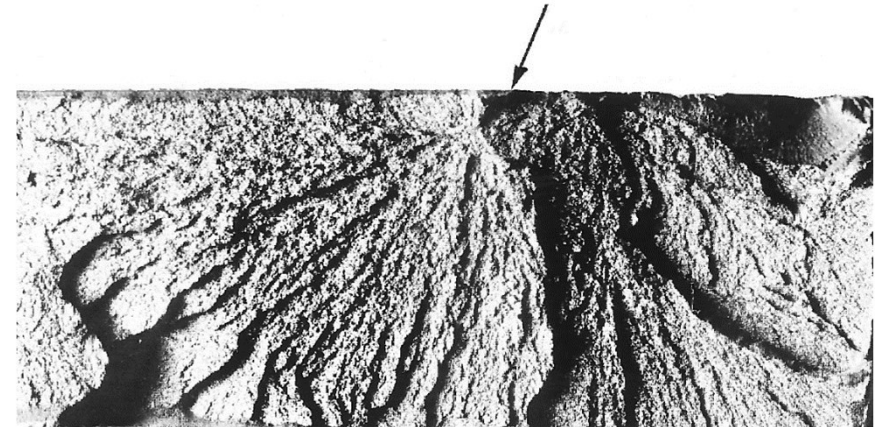
weicher Baustahl

- sehr harte Metalle: keine Bruchmuster
- Gläser: glänzende/glatte Bruchflächen

Chevronmuster beim Sprödbbruch

Chevronmuster

- Risse breiten sich extrem schnell aus
- spontane Vergrößerung, d.h. auch ohne Erhöhung der einwirkenden Spannung
- “instabiler Riss”



- fächerartig vom Rißursprung ausgehende Linien/Grate
- Entstehung durch mehrere Bruchfronten, die sich in unterschiedlichen Höhen im Material ausbreiten

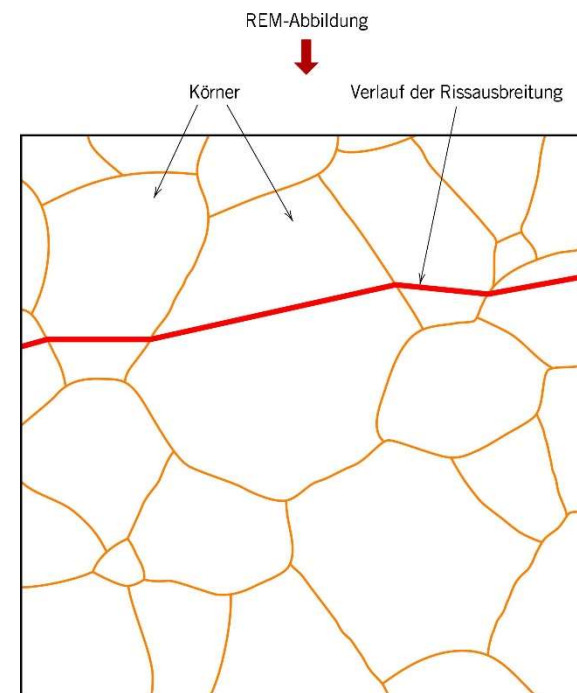
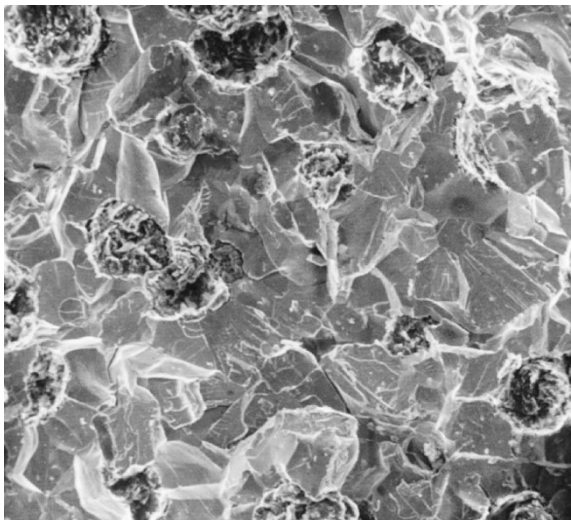
Rissausbreitung in polykristallinen Materialien

Riss verläuft entlang spezifischer kristallographischer Ebenen: “Spaltung”

→ **transgranularer Bruch**, Ausbreitung durch einzelne Körner hindurch,
Richtung unabhängig von Korngrenzen

→ facettenartige Textur

duktiles Gusseisen



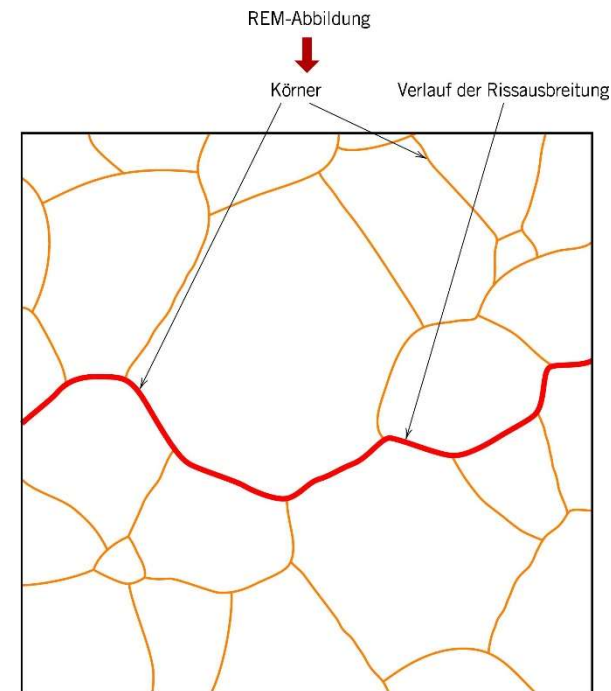
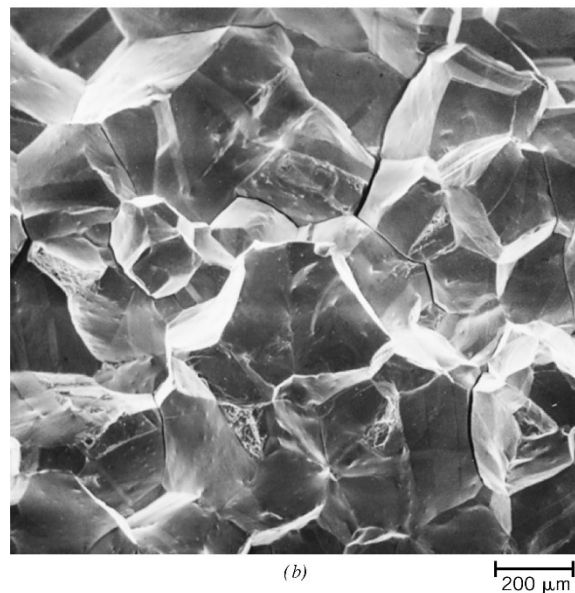
Rissausbreitung in polykristallinen Materialien

in einigen Legierungen: Rissausbreitung entlang von Korngrenzen

wenn Korngrenzbereiche geschwächt oder versprödet sind

→ intergranularer Bruch

→ Körner zu erkennen, Bruch weist facettenartige Textur auf

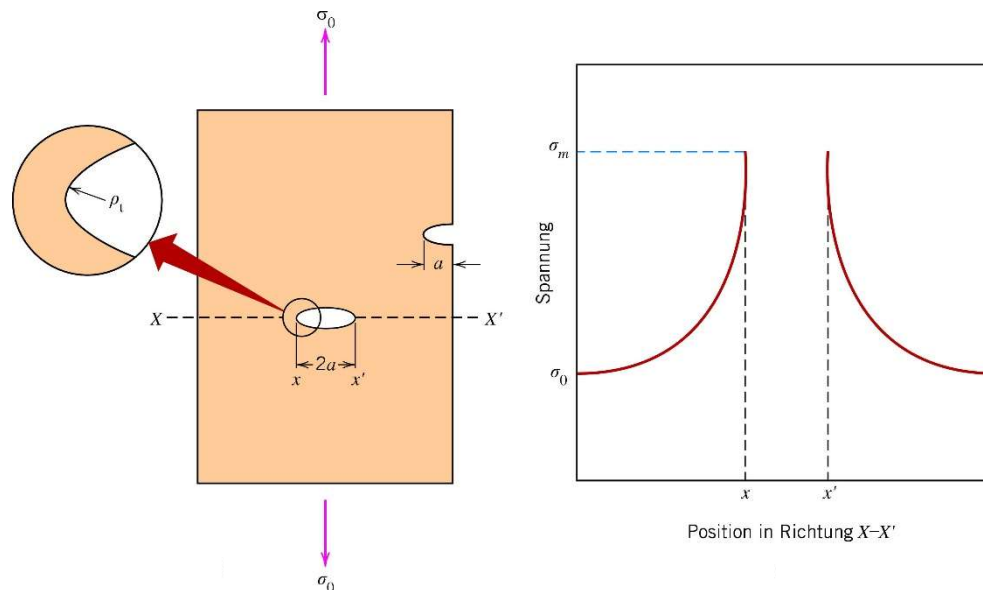


9.3 Bruchmechanik

Beziehungen zwischen Materialeigenschaften,
Defekten, Belastung und Rissausbreitung

Spannungskonzentration:

Bruchfestigkeit bestimmt durch mikroskopische Fehler oder Risse im Material
→ Spannung wird an diesen Punkten verstärkt/konzentriert



innerer Riss

→ lokal wirkende Spannung
an Risspitze besonders
hoch

→ **Riss wirkt
spannungsüberhöhend**

Spannungsüberhöhung

maximale Spannung: $\sigma_m = 2\sigma_0 \left(\frac{a}{\rho_t}\right)^{1/2}$

σ_0 : nominale Zugspannung

ρ_t : Krümmungsradius an Riss-Spitze

a : halbe Länge eines inneren Risses

$\frac{a}{\rho_t}$ kann hohe Werte annehmen für langen, schmalen Mikroriss

→ starke Spannungsüberhöhung

→ **Spannungsintensitätsfaktor:** $K_t = \frac{\sigma_m}{\sigma_0} = 2 \left(\frac{a}{\rho_t}\right)^{1/2}$

→ kritische Spannung für Ausbreitung
eines Risses in sprödem Material
(Berechnung s. Seite 18-19):

$$\sigma_c = \left(\frac{2E\gamma_s}{\pi a}\right)^{1/2}$$

E : Elastizitätsmodul

γ_s : spezifische Bruchflächenenergie

Bruchzähigkeit

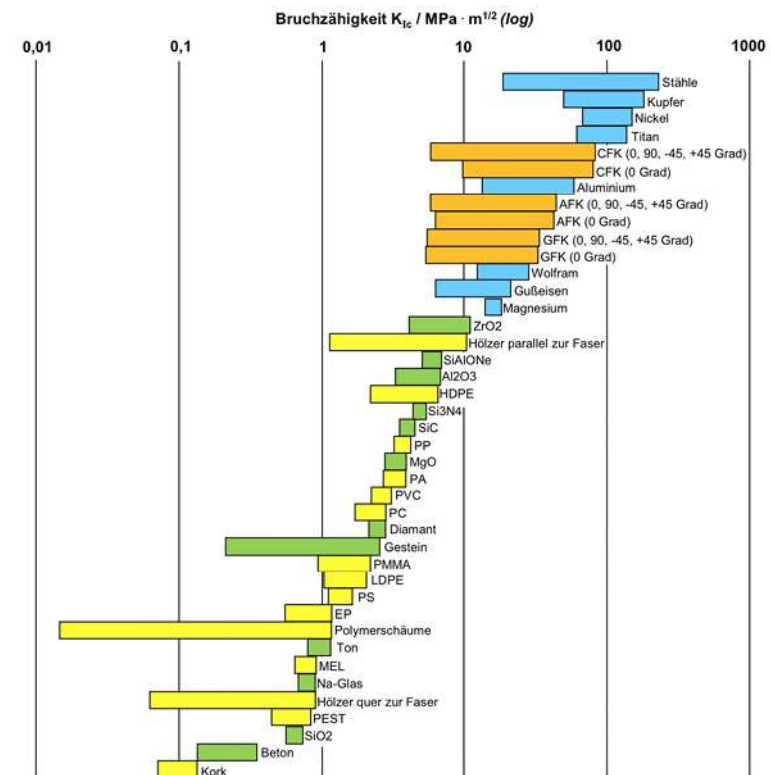
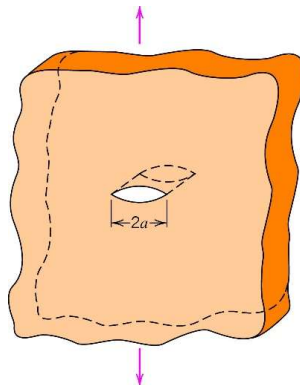
Beziehung zwischen **kritischer Spannung** σ_c

und ursprünglicher **Risslänge** a : $K_c = Y \sigma_c \sqrt{\pi a}$

K_c : **Bruchzähigkeit**, Materialeigenschaft

Y : dimensionsloser Parameter, beschreibt
Geometrie des Risses und des Bauteils
sowie die Art der Belastung

ebenes Blech mit durchgehendem Riss: $Y = 1$



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

B. Heine: Werkstoffwahl für technische Anwendungen – Grundlagen und Beispiele; Carl Hanser Verlag München (2016)

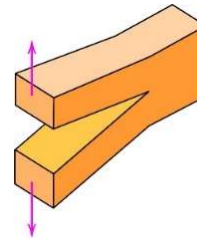
Bruchzähigkeit

Rissöffnungsarten (Rissöffnungsmodi):

Rissöffnung senkrecht zur Rissfläche = Mode I: Beanspruchung von Mode I

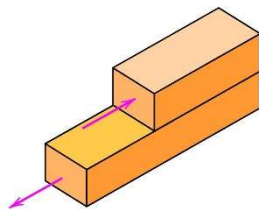
kritischer Spannungsintensitätsfaktor

$$\rightarrow K_{Ic} = Y\sigma_c\sqrt{\pi a}$$

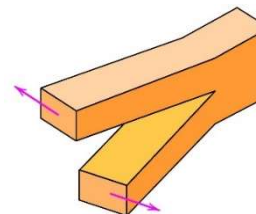


Mode I: Öffnungs- oder
Zugbeanspruchung

weitere Beanspruchungsfälle: andere Moden



Mode II: Schub- oder
Gleitbeanspruchung



Mode III:
Scherbeanspruchung

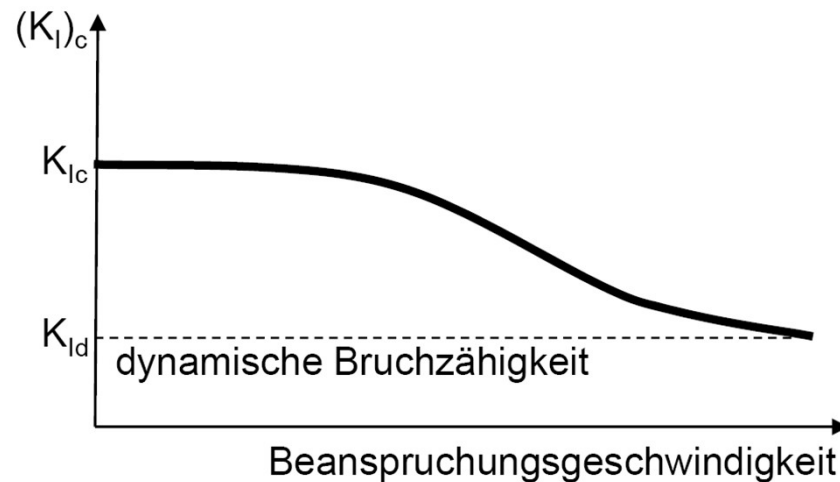
Bruchzähigkeit

spröde Materialien: niedrige K_{Ic} -Werte,
anfällig für katastrophales Versagen
z.B. Keramiken, Polymere im Glaszustand

duktilen Materialien: große K_{Ic} -Werte

Bruchzähigkeit K_{Ic} abhängig von:

- der Temperatur
- der Mikrostruktur
- dem Dehnungszustand
- Der Beanspruchungsgeschwindigkeit



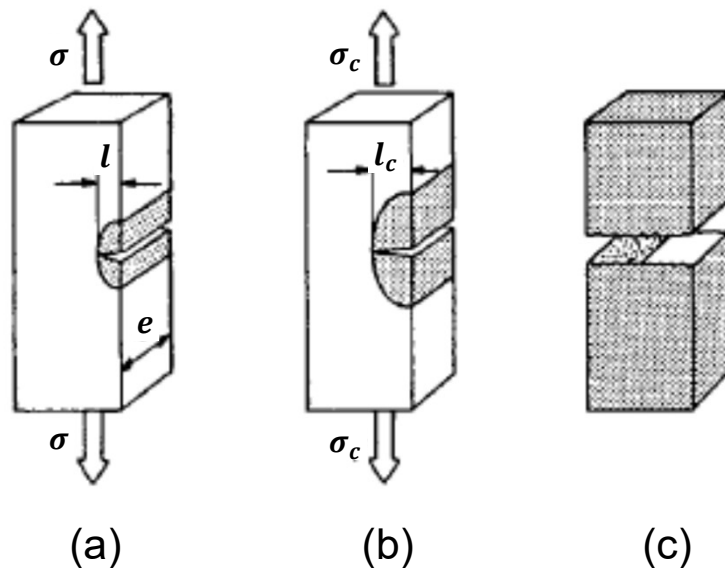
Rissausbreitung

Risse können sich wie folgt **ausbreiten**:

- durch **stabile Ausbreitung**,
wenn die Spannung an der Riss-Spitze gerade groß genug ist,
um eine **langsame Ausbreitung** aufrecht zu erhalten
- durch **instabile Ausbreitung**,
wenn die maximale Spannung den kritischen Wert σ_c überschreitet
→ **extrem schnelle Ausbreitung**

Rissausbreitung

- Spannungsrelaxation um den Riss (grauer Bereich)
- Erzeugung neuer Bruchflächen, diese kostet Oberflächenenergie



- (a) stabiler Riss für $\sigma < \sigma_c$ ($l < l_c$),
- (b) kritischer Riss für $\sigma = \sigma_c$ ($l = l_c$),
- (c) gebrochenes Werkstück mit $l > l_c$.

Energieverhältnisse bei Rissausbreitung

Energie, die zur **Erzeugung neuer Grenzflächen** nötig ist:

$$U_s = 2\gamma l e$$

γ : Oberflächenspannung

l : Risslänge

e : Probendicke

gespeicherte elastische Energie pro Volumen

in rein elastischem Material (Kapitel 7, S. 6):

$$U = \frac{1}{2} \sigma_e \varepsilon_e = \frac{1}{2} \frac{\sigma_e^2}{E}$$

σ_e : Spannung an der Streckgrenze

ε_e : Verformung an der Streckgrenze

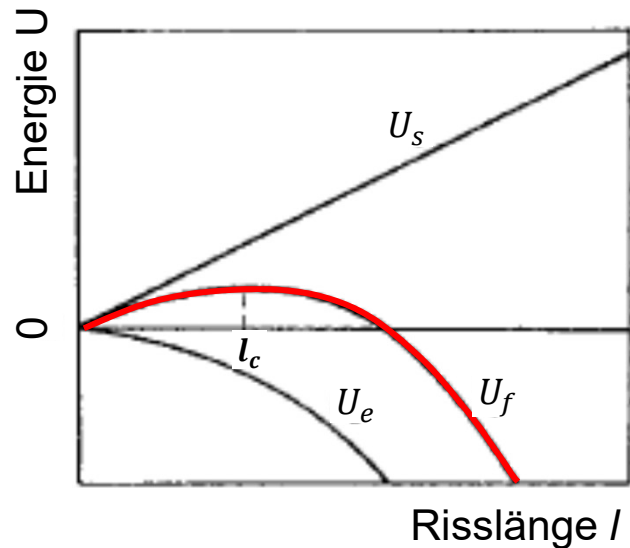
E : Elastizitätsmodul

Spannungsrelaxations-Zone: elliptischer Halbzylinder um den Riss

→ freiwerdende Energie: $U_e = -UV = -\frac{\sigma_e^2 \pi l^2 e}{2E}$

Minuszeichen, da Energie frei wird

Energieverhältnisse bei Rissausbreitung



Rissbildungsenergie U_f

in Abhängigkeit von der Risslänge l

$$U_f = U_s + U_e = 2\gamma l e - \frac{\sigma_e^2 \pi l^2 e}{2E}$$

→ Maximum bei kritischer Risslänge l_c

für $l < l_c$: stabiler Riss

für $l > l_c$: instabiler Riss, wächst schnell

kritische Spannung: $\sigma_c = \sqrt{\frac{2\gamma E}{\pi l}}$ (s. Seite 12)

Spannungen größer als σ_c führen zu schneller Rissausbreitung

9.4 Duktiler Bruch

Rissausbreitungsenergie:

Erzeugung neuer Oberflächen,
aber auch andere Dissipationsprozesse

in Metallen:


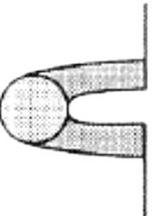
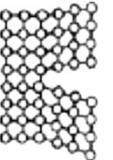

- Bewegung von Versetzungen
- plastische Verformungszone vor Riss-Spitze

in Polymermaterialien:

Mikrorisse (crazes), Fibrillen

(a) makroskopisch

(b) mikroskopisch

Rupture type		
Brittle	Ductile	
(a)		
(b)		
Breaking of primary bonds	Sliding	Crazing
sprödes Material	duktiles Material	

Plastische Verformungszone

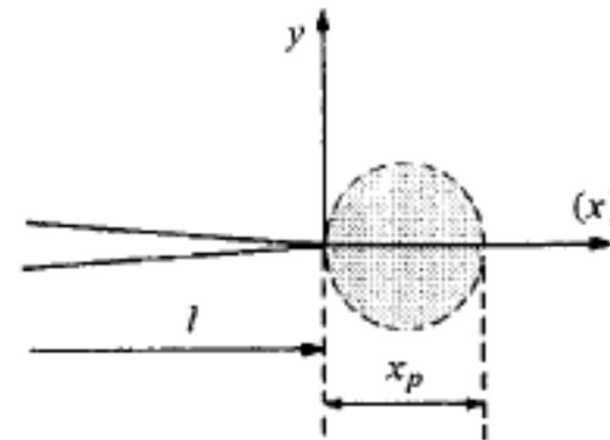
plastisch verformte Zone
durch Spannungskonzentration

Gleichsetzen von maximaler Spannung
mit Streckgrenze

→ Größe der plastisch verformten Zone:

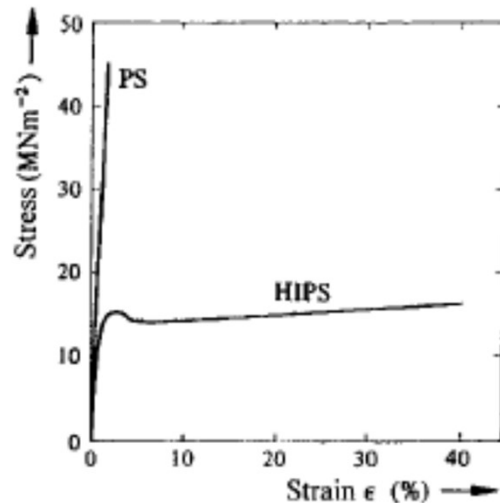
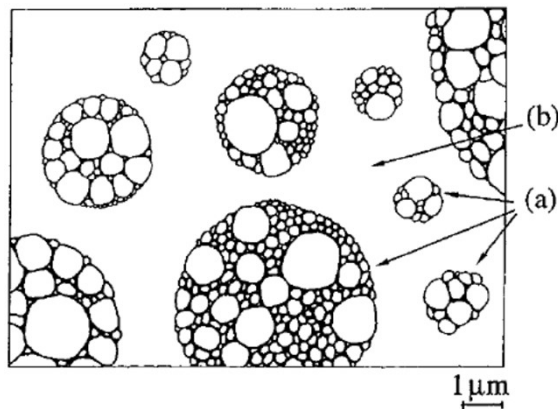
$$x_p \cong \frac{K^2}{2\pi R_e^2}$$

K : Bruchzähigkeit
 R_e : Streckgrenze



Für duktile Materialien ist die Energie, die für die plastische Verformung aufgebracht werden muss, wesentlich größer als die Oberflächenenergie.

Erhöhung der Schlagzähigkeit von Polymeren



Einbetten gummiartiger Partikel

in glasförmige Polymere,
z.B. in sprödes Polystyrol

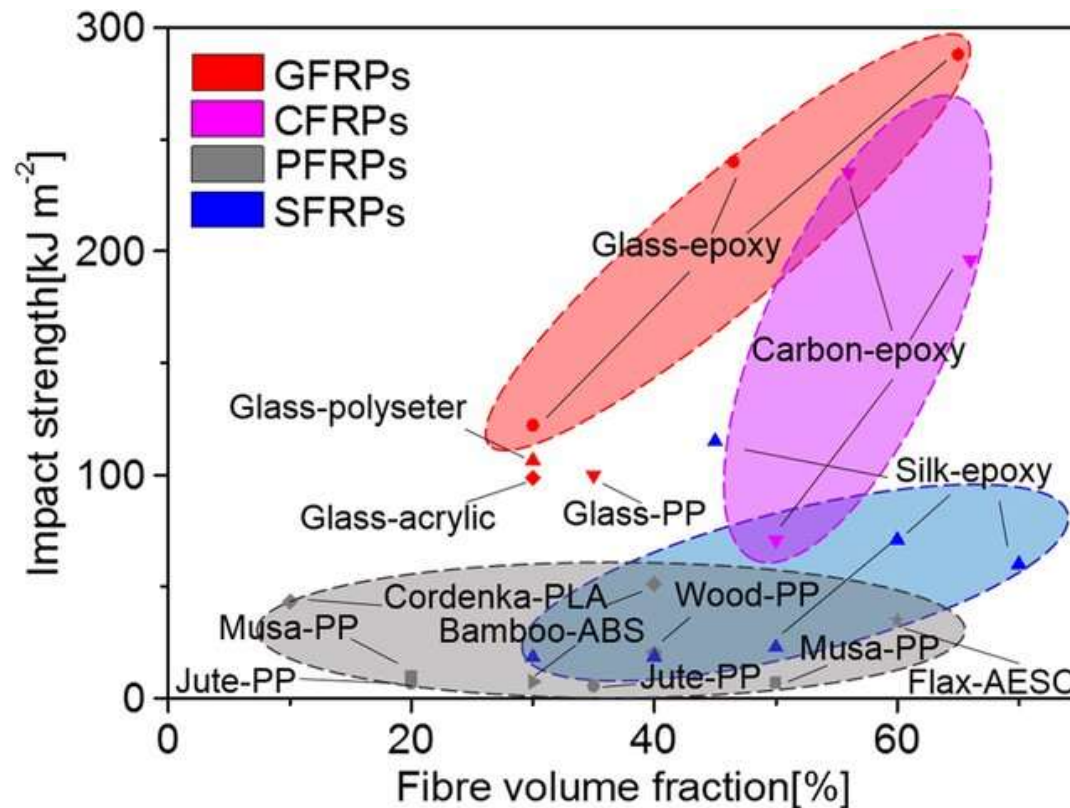
→ Mikrorisse in Partikeln
absorbieren Verformungsenergie

→ **Rissausbreitung** und somit
der Spröbruch werden **gestoppt**

- reines Polystyrol ist spröde
- schlagzähes Polystyrol (high impact polystyrene, HIPS) ist duktil

Erhöhung der Schlagzähigkeit von Polymeren

Polymerverbundwerkstoffe, die mit Glasfasern, Kohlenstofffasern, Pflanzenfasern und Seidenfasern verstärkt

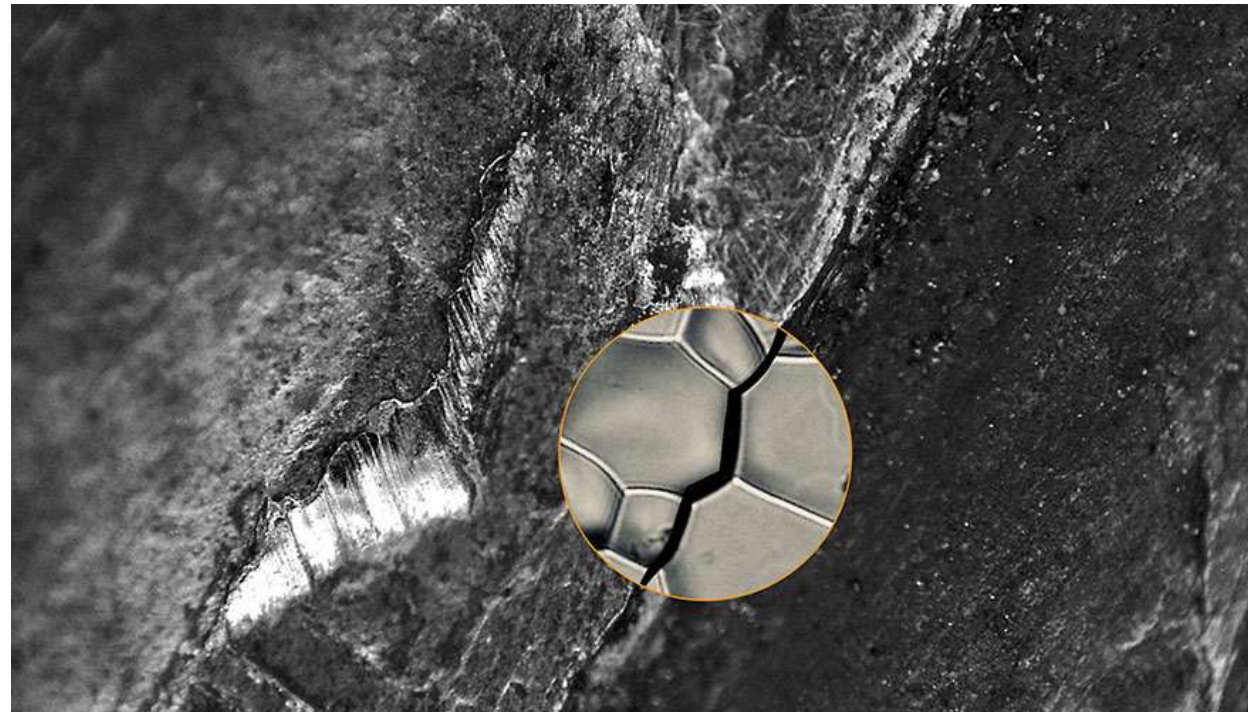
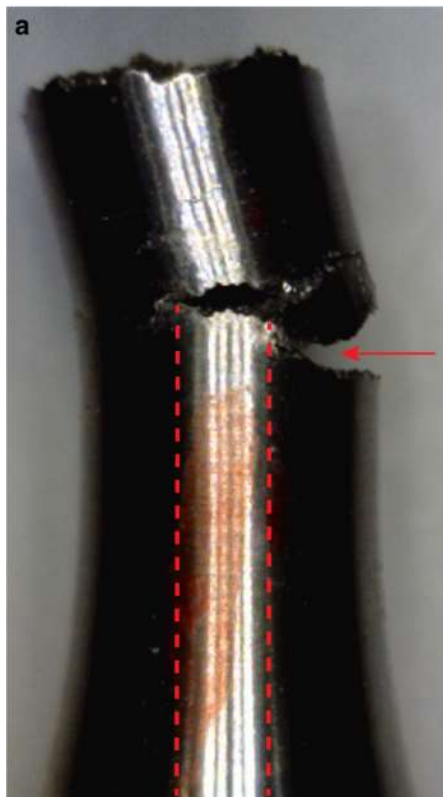


GFRP (Glass Fibre Reinforced Plastics),
CFRP (Carbon Fibre Reinforced Plastics),
PFRP (Plant Fibre Reinforced Plastics)
SFRP (Silk Fibre Reinforced Plastics)

ausgeprägte Zähigkeits-
und Verstärkungseffekte für
Epoxidverbundwerkstoffe
mit Naturseide als
Verstärkungsmaterial

Wasserstoffversprödung Ni-Basis-Legierung 725

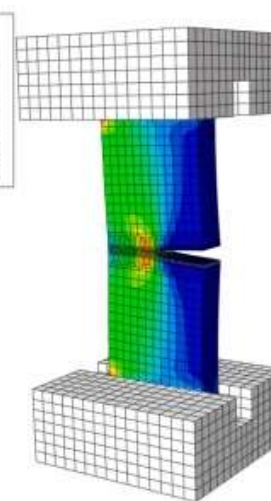
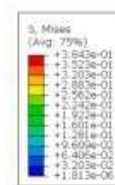
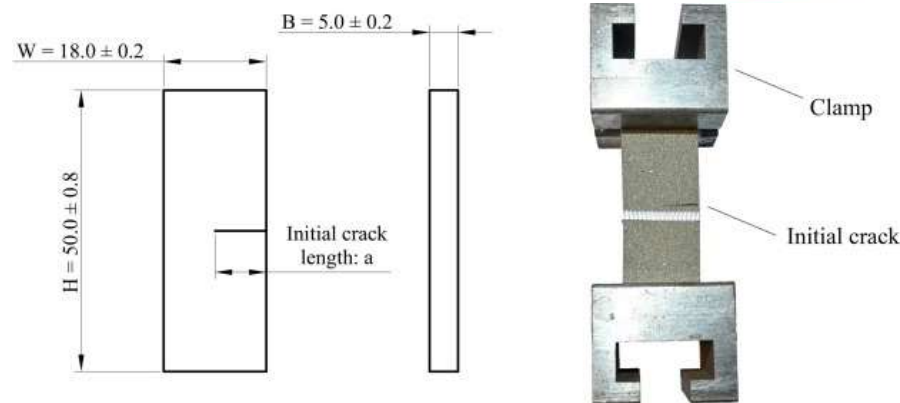
Die Ni-Basis-Legierung 725 ist für hohe Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit ausgelegt.



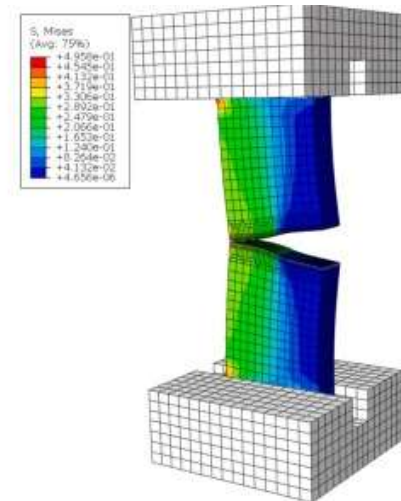
3D-Bilder von mikroskopisch kleinen, wasserstoffgesprengten Rissen in Ni Legierung

Rissausbreitungsgeschwindigkeit und Bruchzähigkeit

Fehleranalyse bei Feststoffraketenmotoren: einseitig gekerbte Zugproben aus hydroxyl-terminiertem Polybutadien (HTPB)



b) Simulation results at 25.48s for 5mm/min tensile rate



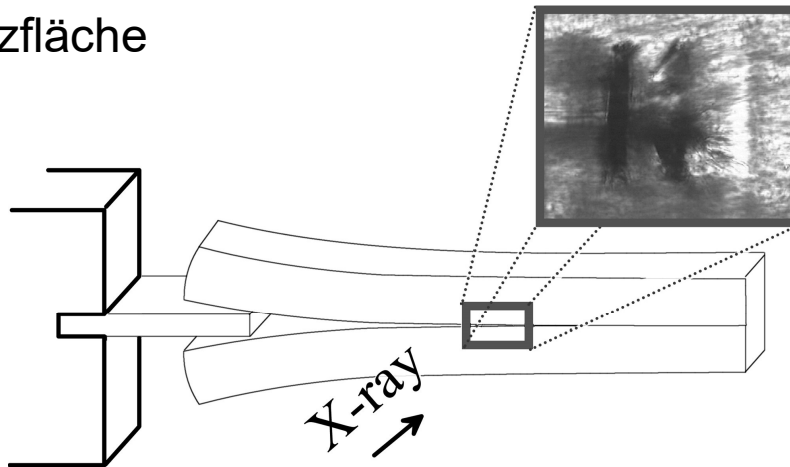
c) Simulation results at 62.77s for 5mm/min tensile rate

Rissausbreitung simulieren:
Kohäsionszonenmodell versus
erweiterte Finite-Elemente-
Methode und Vergleich mit
Messungen

erweiterte Finite-Elemente-Methode

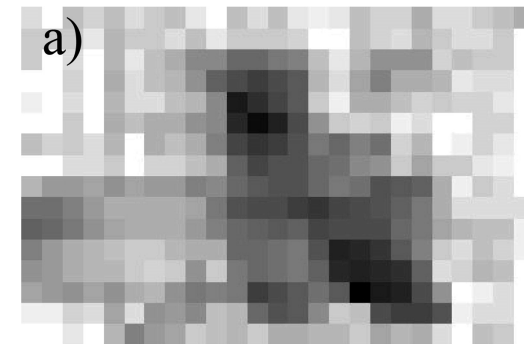
Defekte an Polymer Grenzflächen

Entstehung von Defektstrukturen in der
Energiedissipationszone am Ende einer
Risspitze an der PMMA-PMMA-
Grenzfläche

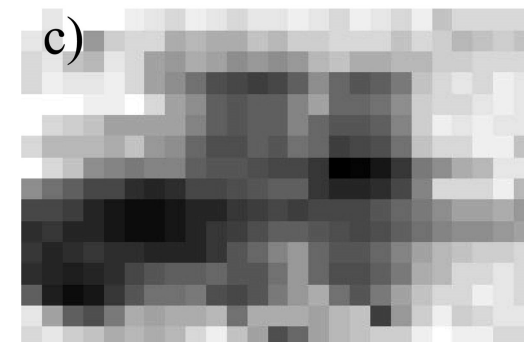
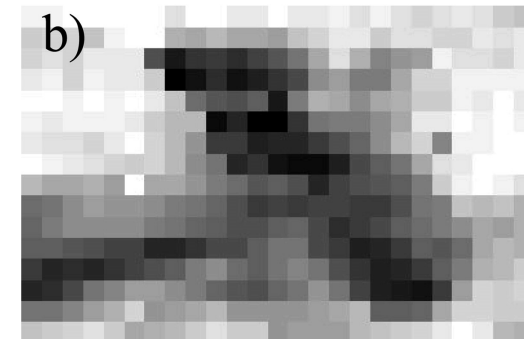


Abrastern mit Nanostrahl: orts aufgelöste
Änderung der Steigung im Kleinwinkelbereich
→ verschiedene lokale Schäden

Lorenz-Haas, PMB, et al., Langmuir **19**, 3056-3061 (2003)



Scanfeld
160 x 250
 μm^2



9.5 Zusammenfassung

Dehnungs- und Bruchverhalten spröder und duktiler Materialien

verschiedene Brucharten/-flächen, z.B. Trichterbruch, Chevronmuster

Sprödbbruch entlang kristallographischer Ebenen oder entlang von Korngrenzen

Spannungskonzentration an Rissen

Definition der Bruchzähigkeit

Rissausbreitung: stabil, instabil

plastische Verformung um Riss-Spitze und Erzeugung neuer Bruchflächen

→ kritische Spannung

duktiler Materialien: auch andere Dissipationsprozesse

Metalle: Bewegung von Versetzungen, plastische Verformung

Polymere: Mikrorisse, Fibrillen