



Vorlesung Schadensanalyse

Bewertung von Rissen in Bauteilen

Allgemein: Untersuchungsverfahren

Mechanische Prüfung

- Härteprüfung
- statische Festigkeitsprüfung
- Festigkeitsprüfung bei schlagartiger Beanspruchung
- zyklische Festigkeitsprüfung
- bruchmechanische Prüfung
- mechanisch-thermische Festigkeitsprüfung
- Bauteil-Prüfung

Metallographie

- nicht geätzt bzw. geätzte Schliffe
- Makro- bzw. Mikroätzungen
- Schliffbeurteilung am Lichtmikroskop
- Schliffbeurteilung am REM

Analytische Elektronenmikroskopie

Eigenspannungsmessung

Chemische Analyse

- Spektroskopie-Methoden
- Gravimetrische Verfahren
- Chromatographie

Korrosionsprüfung

Untersuchungsverfahren

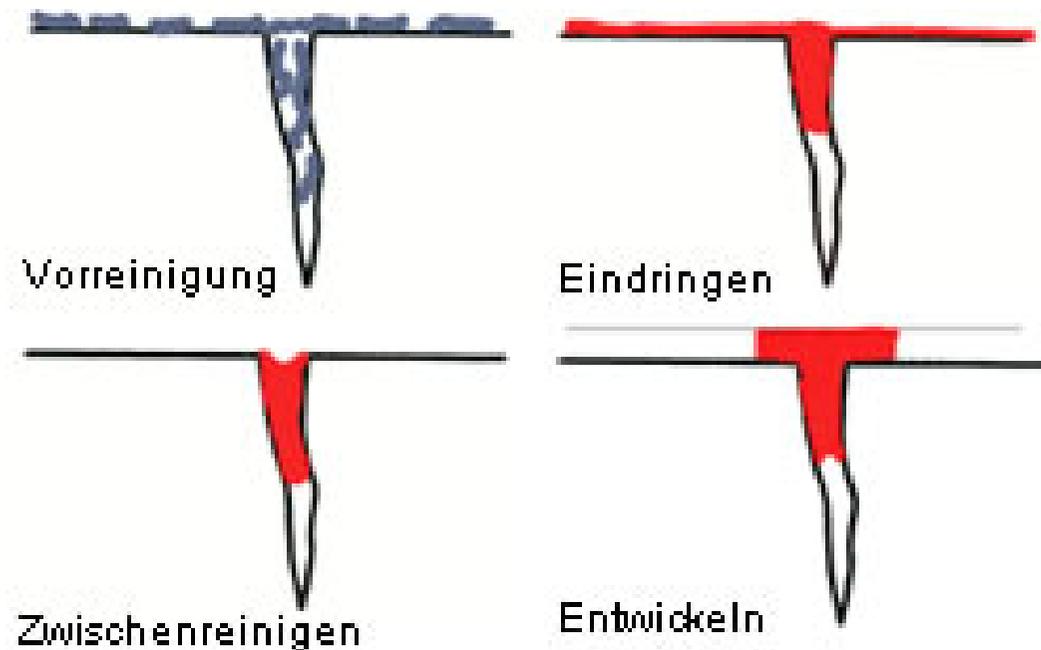
Einsatzhäufigkeit in der Schadensanalytik (1980)

Untersuchungsverfahren	Anteil in %
Sichtprüfung	100
Metallographische Verfahren	100
Mechanische Prüfverfahren, davon:	52
• Zugversuche	15
• Härteprüfungen	25
• Kerbschlagbiegeversuche	8
Chemische Analyse	43
Zerstörungsfreie Prüfverfahren	11
Elektronenmikroskopische Verfahren	9
andere Prüfverfahren	3

Untersuchungsverfahren

ZfP in der Schadensanalytik: Rissdetektion

- Röntgendurchstrahlung
- Röntgen-Beugung
- Röntgen-Rückstreuung
- Gamma-Durchstrahlung
- Ultraschall-Schwächung
- Ultraschall-Resonanz
- Magnetpulver-Verfahren
- Elektrische Verfahren
- Eindring-Verfahren

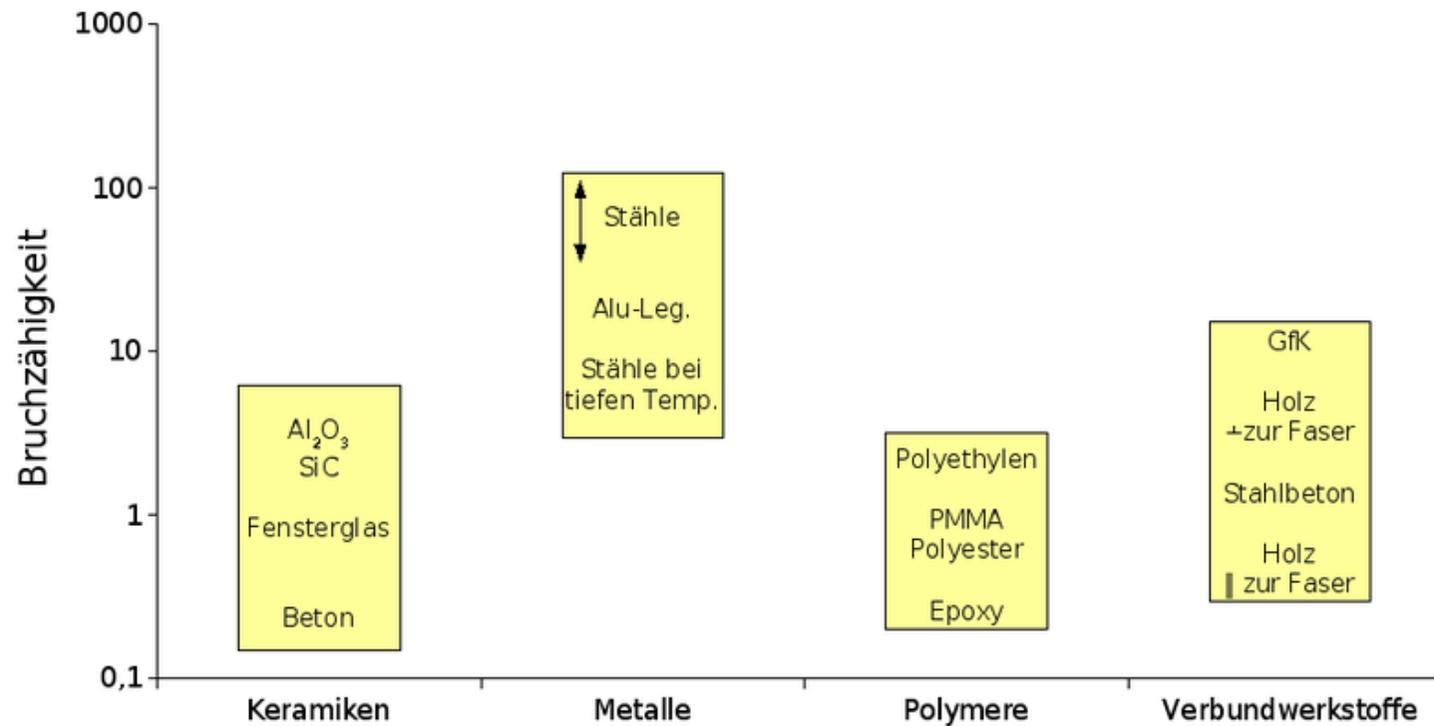


Riss wurde detektiert – Was nun?

Bruchzähigkeit

Kennwerte für die Bruchzähigkeit u. das Risswachstum

Bruchzähigkeit bei Raumtemperatur



Untersuchungsverfahren

Kennwerte für die Bruchzähigkeit u. das Risswachstum

$K_I < K_{Ic}$ stabiler Riss (unterkritisch),

$K_I \geq K_{Ic}$ instabiler Riss (kritisch)

	K_{Ic} -Wert [MN/m ^{3/2}]	E-Modul [MPa]
Tafelglas	0.3	60'000
AlZnMgCu 1.5 warmausgehärtet	30	72'000
Ti-6Al-4V ausgehärtet	40	108'000
40NiCrMo73 vergütet	80	210'000

Untersuchungsverfahren

Mechanische Prüfung

- Härteprüfung
- statische Festigkeitsprüfung
- Festigkeitsprüfung bei schlagartiger Beanspruchung
- zyklische Festigkeitsprüfung
- bruchmechanische Prüfung
- mechanisch-thermische Festigkeitsprüfung
- Bauteil-Prüfung

Chemische Analyse

- Spektroskopie-Methoden
- Gravimetrische Verfahren
- Chromatographie

Metallographie

- nicht geätzt bzw. geätzte Schliffe
- Makro- bzw. Mikroätzungen
- Schliffbeurteilung am Lichtmikroskop
- Schliffbeurteilung am REM

Analytische Elektronenmikroskopie

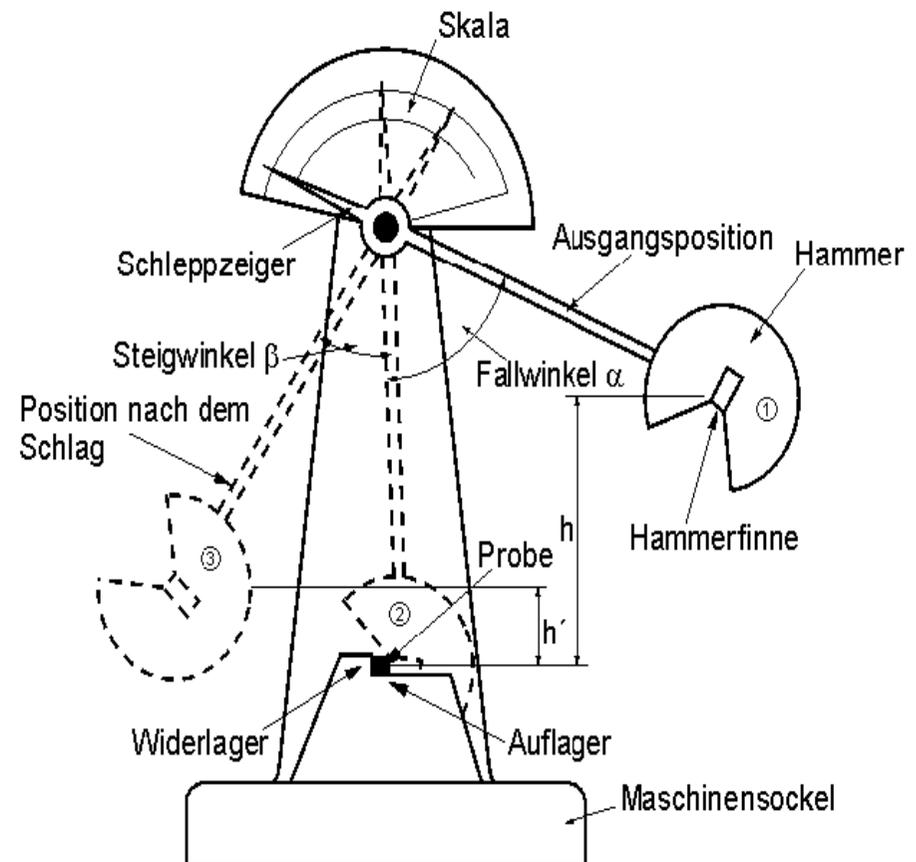
Eigenspannungsmessung

Korrosionsprüfung

Bruchmechanische Prüfung

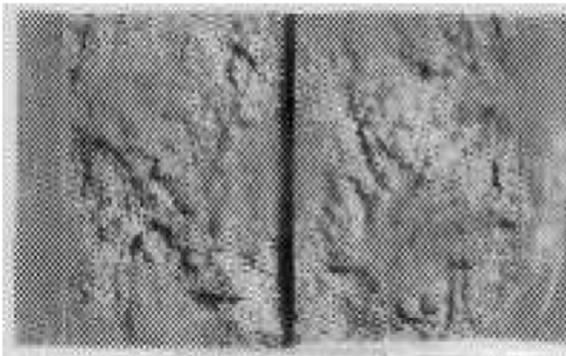
„Vorstufe“ zur Beurteilung der Bruchzähigkeit:
Kerbschlagbiegeversuch

		Nr	Benennung	Einheit
Charpy-U		1	Länge der Probe	mm
		3	Höhe der Probe	mm
		3	Breite der Probe	mm
Charpy-V		4	Höhe im Kerbgrund	mm
		5	Kerbwinkel	Grad
		6	Kerbradius	mm
		3	Breite der Probe	mm



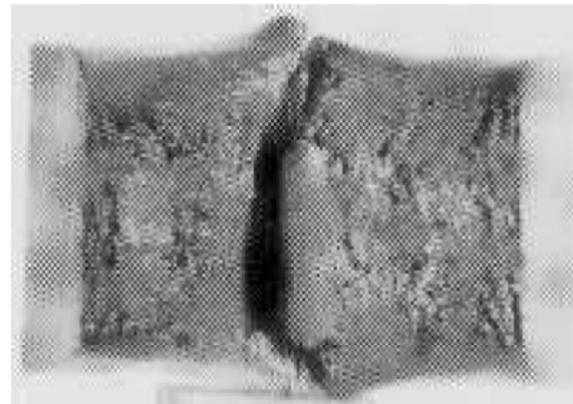
Bruchmechanische Prüfung

„Vorstufe“ zur Beurteilung der Bruchzähigkeit:
Kerbschlagbiegeversuch



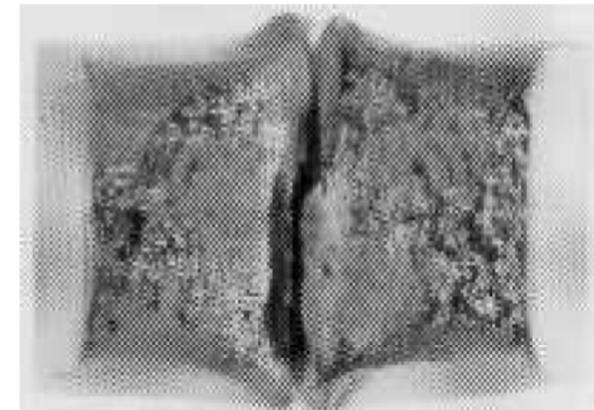
Trennbruch

$T = -100 \text{ °C}; \quad KV = 6,8 \text{ J}$



Mischbruch

$T = 20 \text{ °C}; \quad KV = 127,2 \text{ J}$



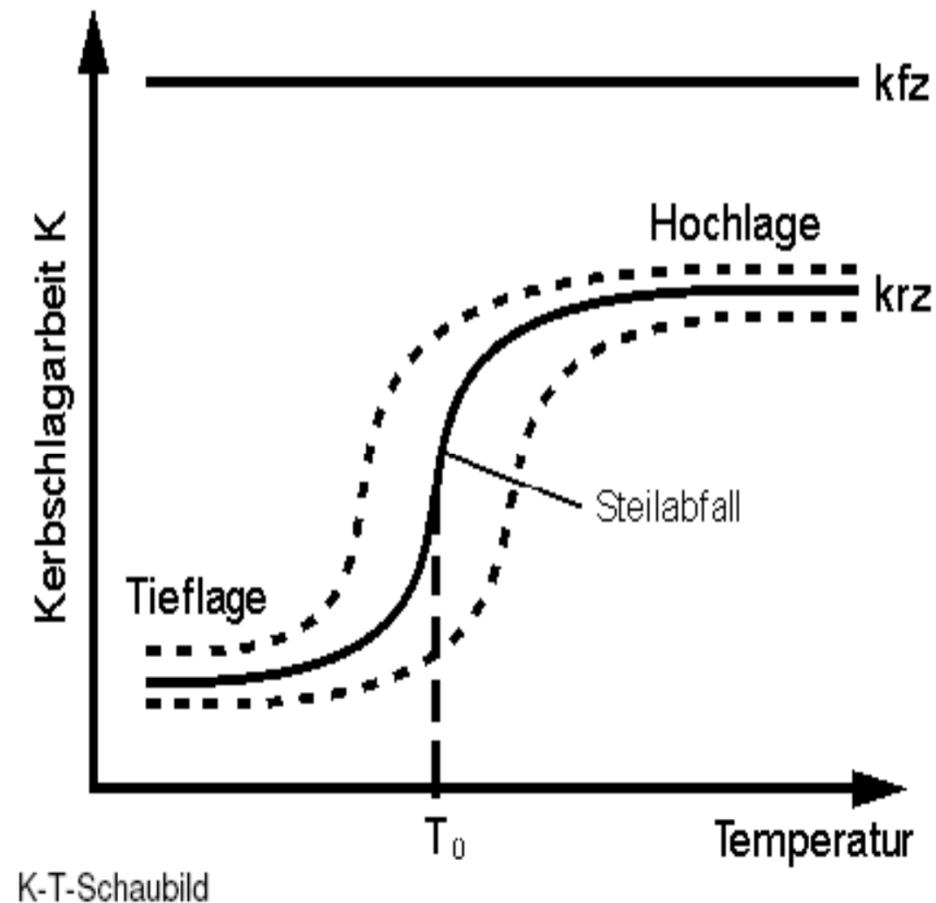
Verformungsbruch

$T = 150 \text{ °C}; \quad KV = 148,8 \text{ J}$

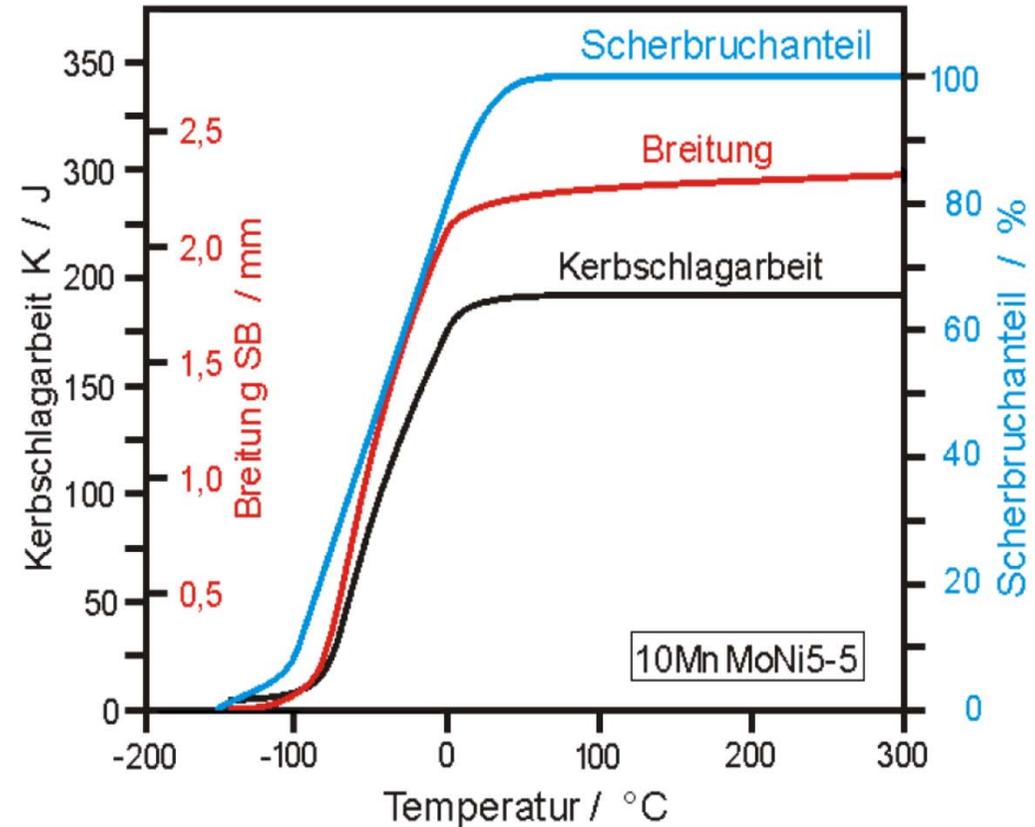
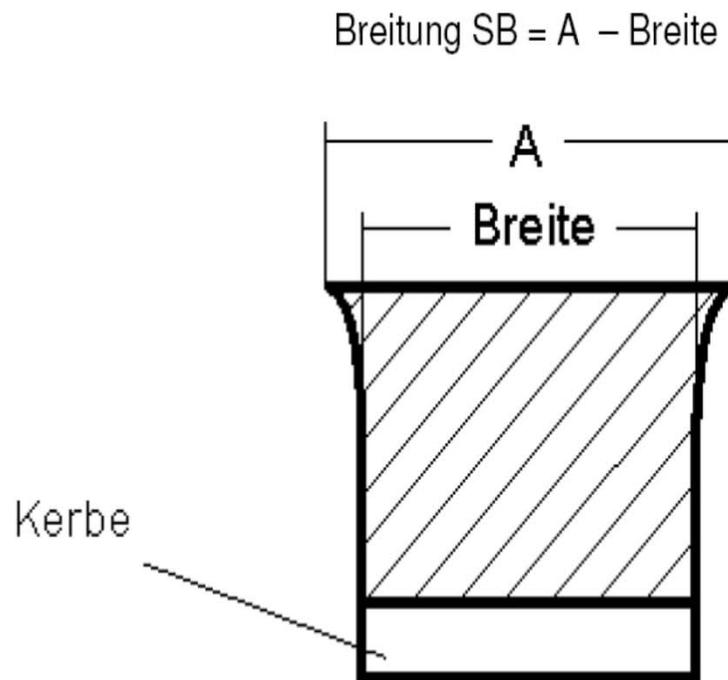
Brucharten der Kerbschlagbiegeproben; Werkstoff 20 MnMoNi 5 5

Bruchmechanische Prüfung

„Vorstufe“ zur Beurteilung der Bruchzähigkeit:
Kerbschlagbiegeversuch



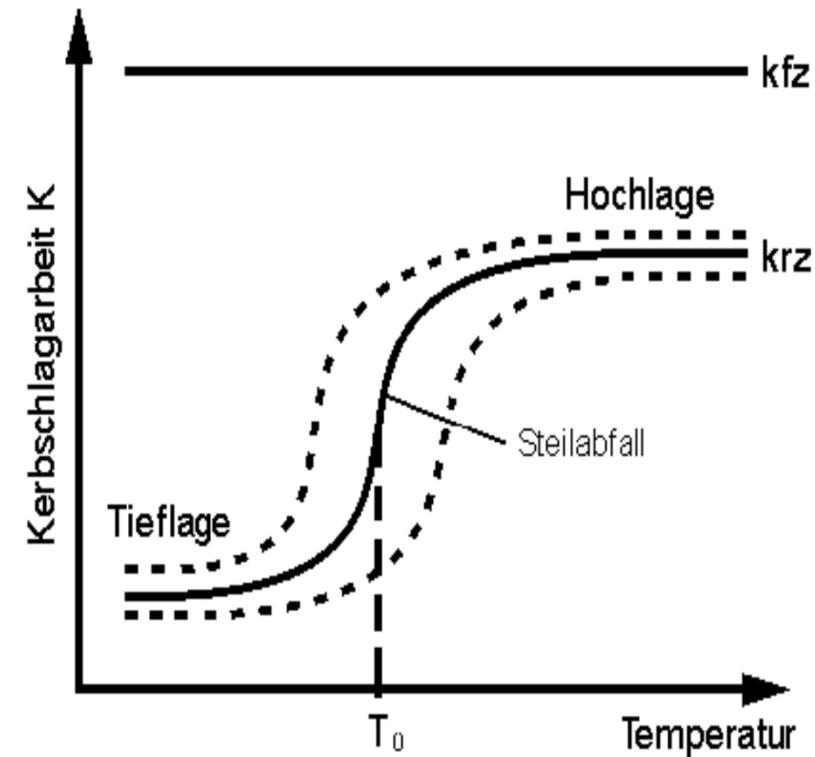
Bruchmechanische Prüfung



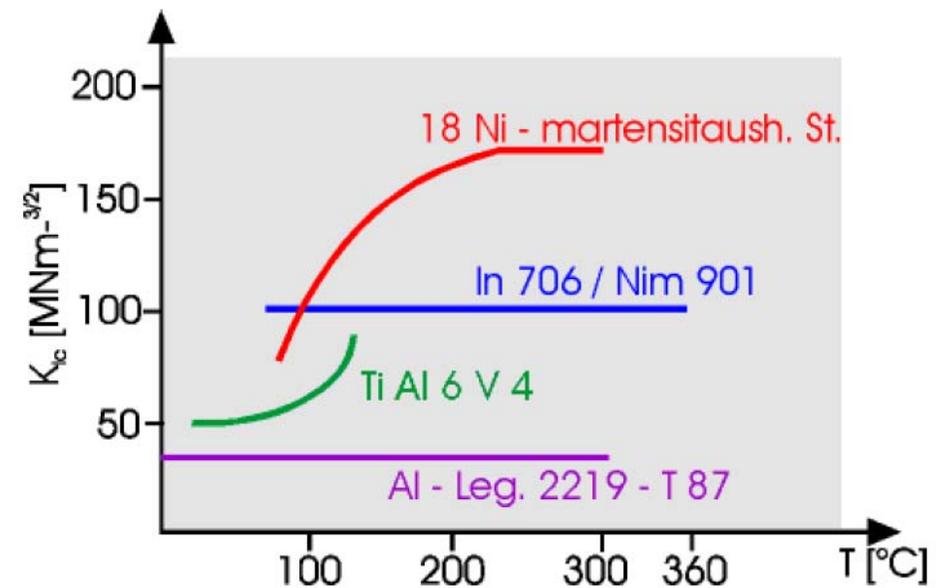
Zusammenhang zwischen der Kerbschlagarbeit, dem Scherbruchanteil und der Breitung in Abhängigkeit von der Temperatur
Werkstoff: 10MnMoNi5-5
Probenform: Charpy-V-Proben

Aber: Kerbschlagbiegeversuch liefert nur Angaben für eine qualitative Bewertung der Risszähigkeit eines Werkstoffs.

Quantifizieren der Bruchzähigkeit?



K-T-Schaubild

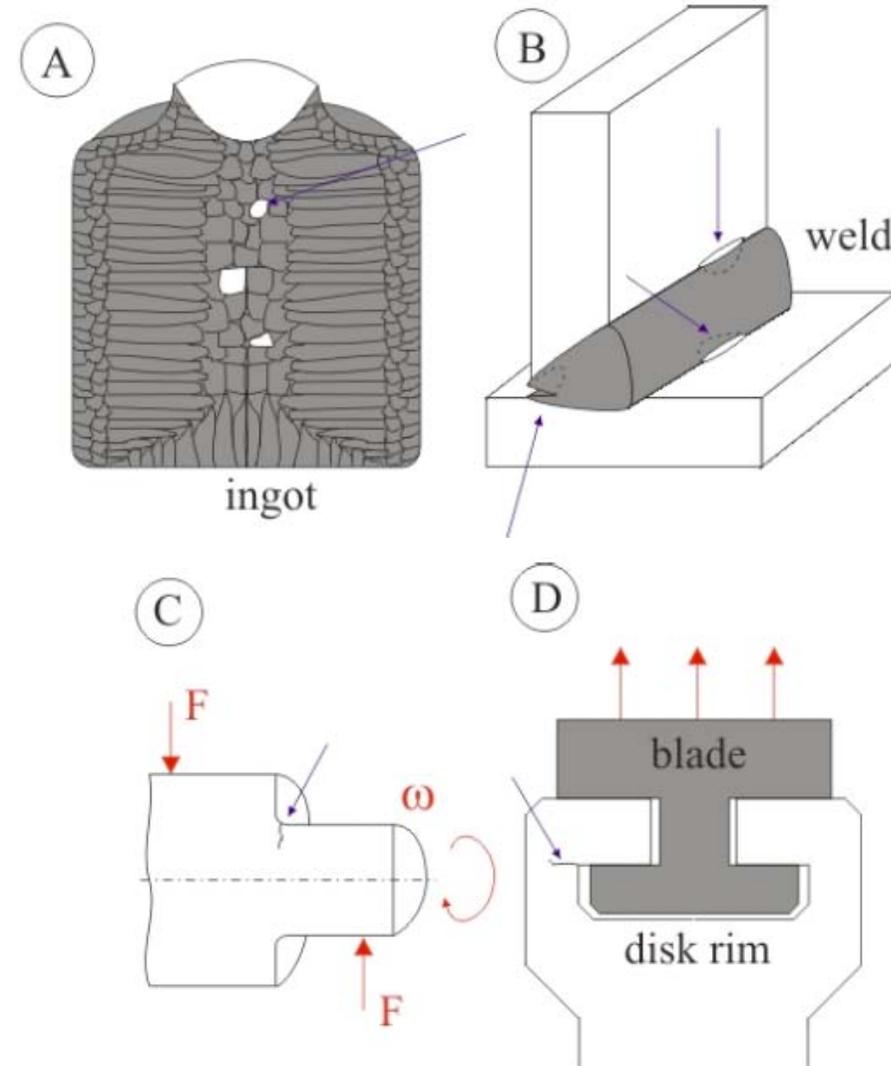


Aber: Kerbschlagbiegeversuch liefert nur Angaben für eine qualitative Bewertung der Risszähigkeit eines Werkstoffs.

Gefahr eines Risses einschätzen?

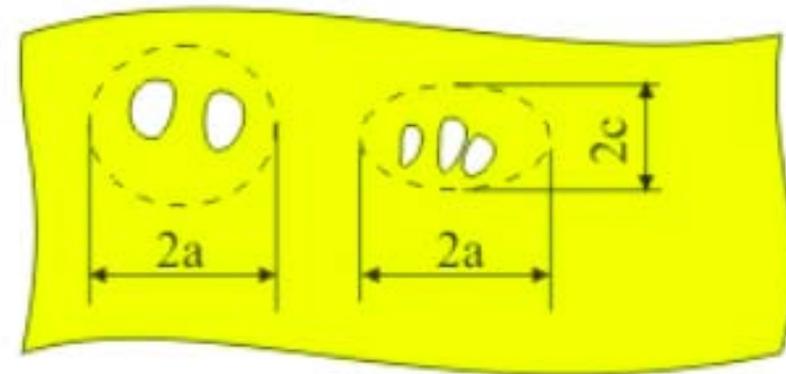
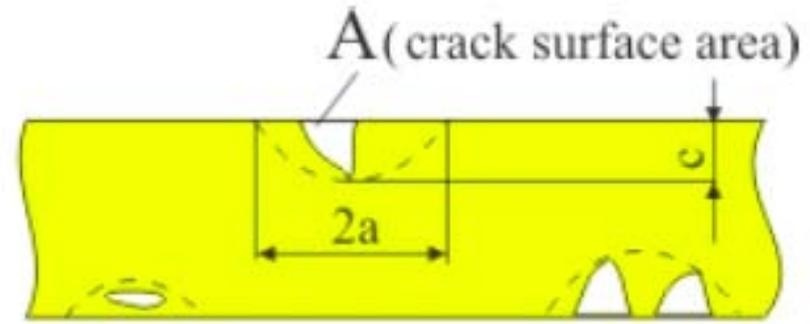
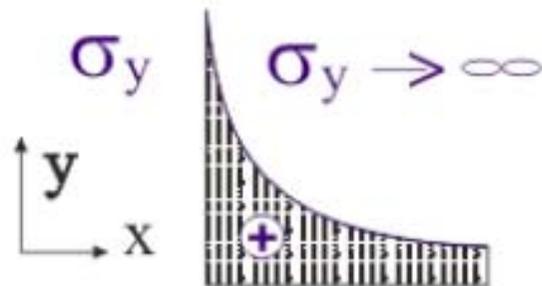
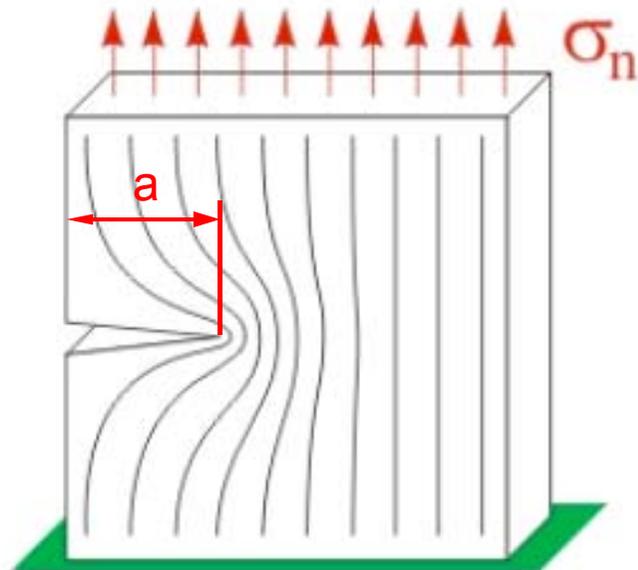


Dye penetration in the stiffening cone of a turbine.

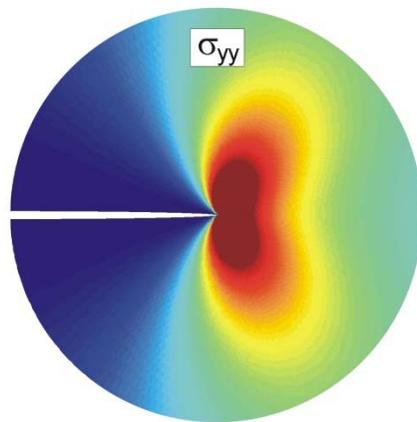
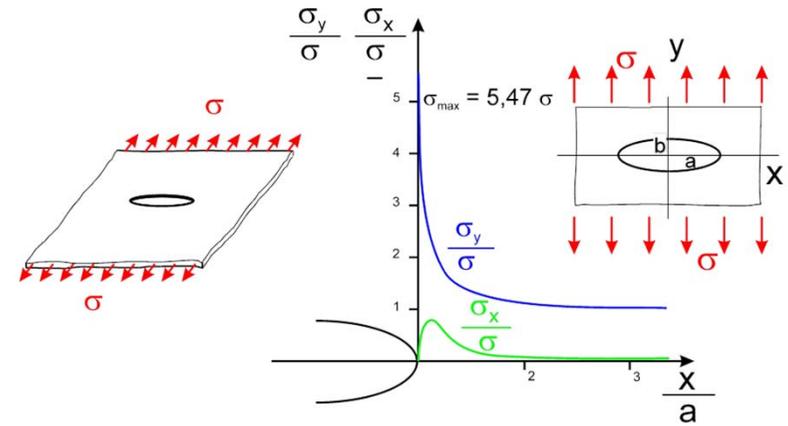
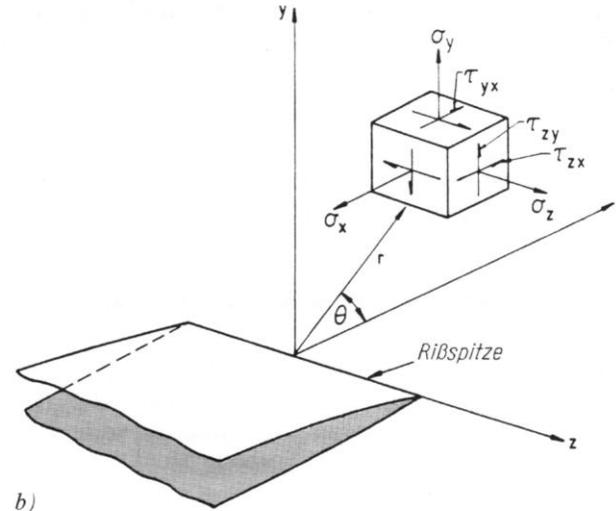
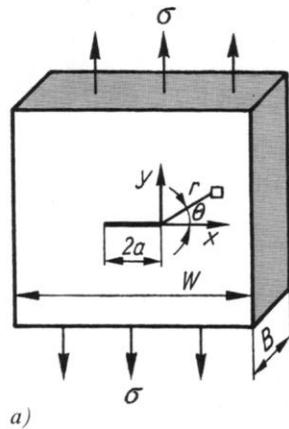




Idealer Riss kontra Materialdefekte



Linear-elastische Bruchmechanik



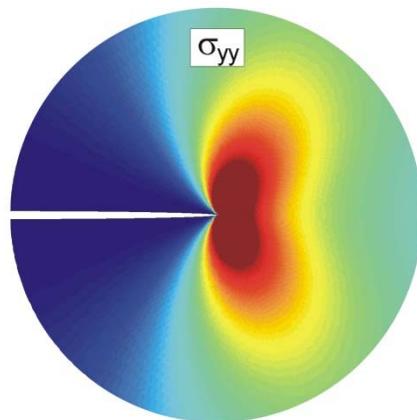
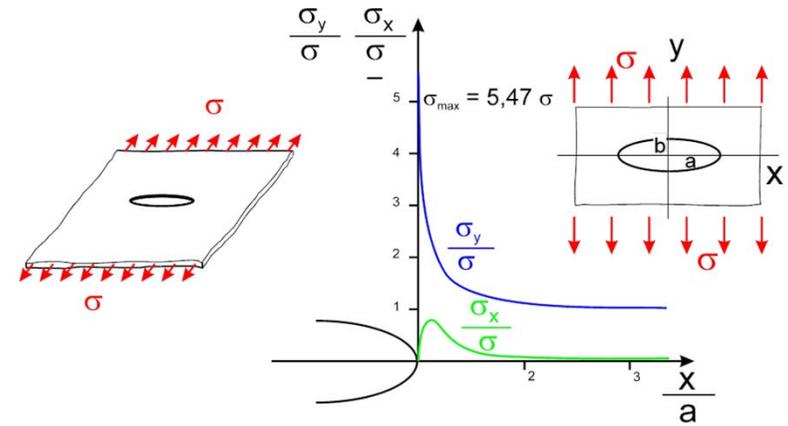
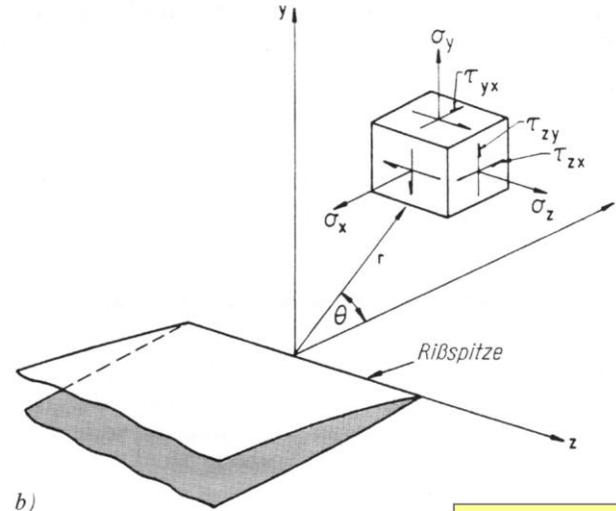
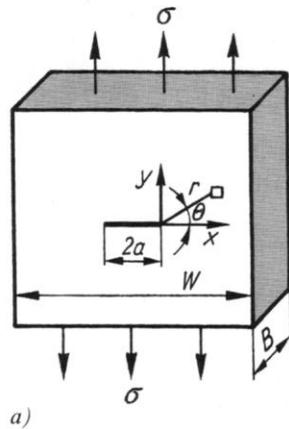
$$\sigma_x = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos \frac{\varphi}{2} \left(1 - \sin \frac{\varphi}{2} \sin \frac{3\varphi}{2}\right) - \sigma$$

$$\sigma_y = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos \frac{\varphi}{2} \left(1 + \sin \frac{\varphi}{2} \sin \frac{3\varphi}{2}\right)$$

$$\tau = \tau_{xy} = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos \frac{\varphi}{2} \sin \frac{\varphi}{2} \cos \frac{3\varphi}{2}$$

Vernachlässigung der Terme höherer Ordnung

Linear-elastische Bruchmechanik



$$\sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\varphi}{2} \left(1 - \sin \frac{\varphi}{2} \sin \frac{3\varphi}{2}\right)$$

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\varphi}{2} \left(1 + \sin \frac{\varphi}{2} \sin \frac{3\varphi}{2}\right)$$

$$\tau = \tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\varphi}{2} \sin \frac{\varphi}{2} \cos \frac{3\varphi}{2}$$

Vernachlässigung der Terme höherer Ordnung

Linear-elastische Bruchmechanik

Beschreibung der lokalen Beanspruchungssituation an der Rissspitze über den Spannungsintensitätsfaktor K

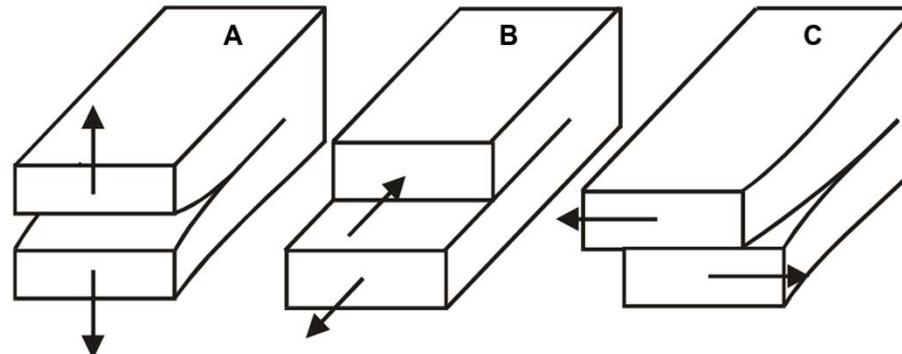
$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} Y_I \left(\frac{a}{w} \right)$$

σ = Nennspannung

a = Risslänge

$Y_I(a/w)$ = Geometriefunktion, die Rissform und -lage und Bauteil berücksichtigt

$K_I = \text{kritisch?}$

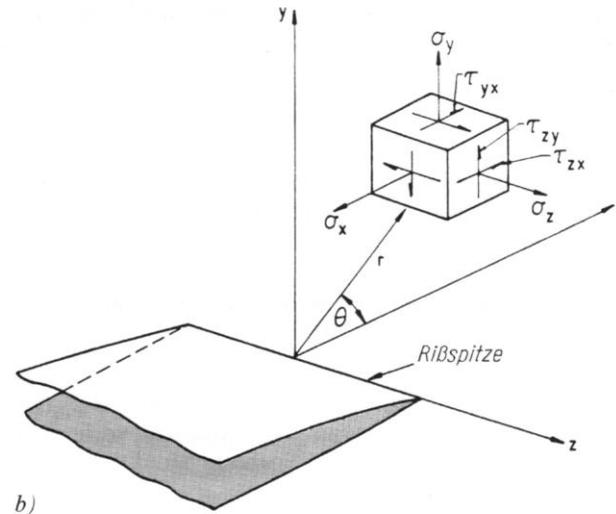
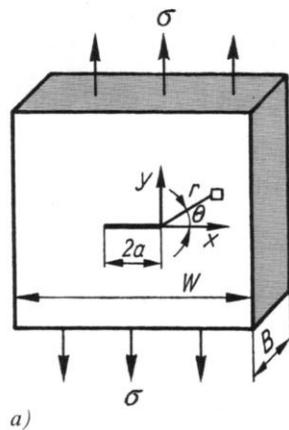


A) Modus I: Zugbeanspruchung senkrecht zur Rißebe (K_I)

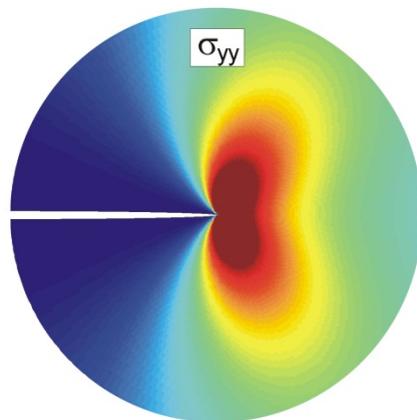
B) Modus II: Schubbeanspruchung in Rißrichtung (K_{II})

C) Modus III: Schubbeanspruchung zur Rißrichtung (K_{III})

Linear-elastische Bruchmechanik



Beschreibung der lokalen Beanspruchungssituation an der Rissspitze über den Spannungsintensitätsfaktor K



$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} Y_I \left(\frac{a}{w} \right)$$

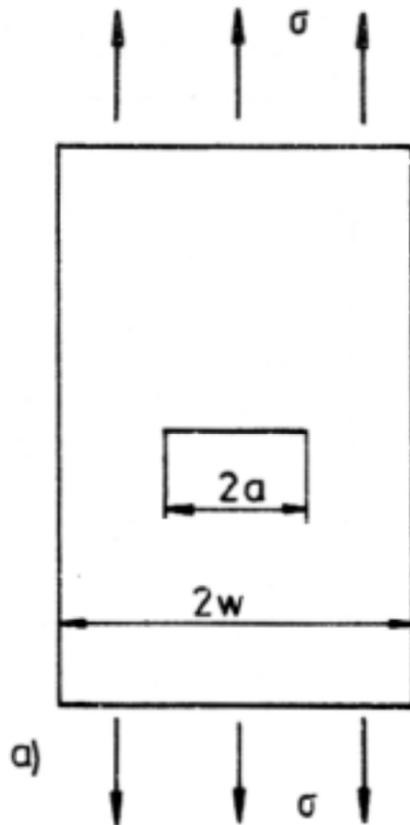
σ = Nennspannung

a = Risslänge

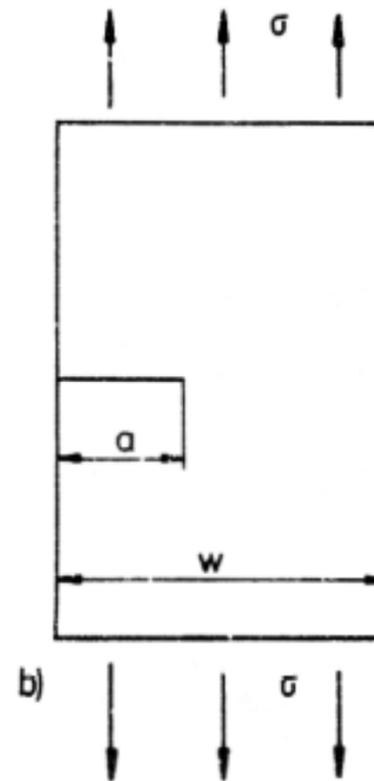
$Y_I(a/w)$ = Geometriefunktion, die Rissform und -lage und Bauteil berücksichtigt

Linear-elastische Bruchmechanik

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} Y_I \left(\frac{a}{w} \right)$$



$\frac{a}{w}$	Y_I
0	1,00
0,2	1,02
0,4	1,11



$\frac{a}{w}$	Y_I
0	1,12
0,2	1,37
0,4	2,11

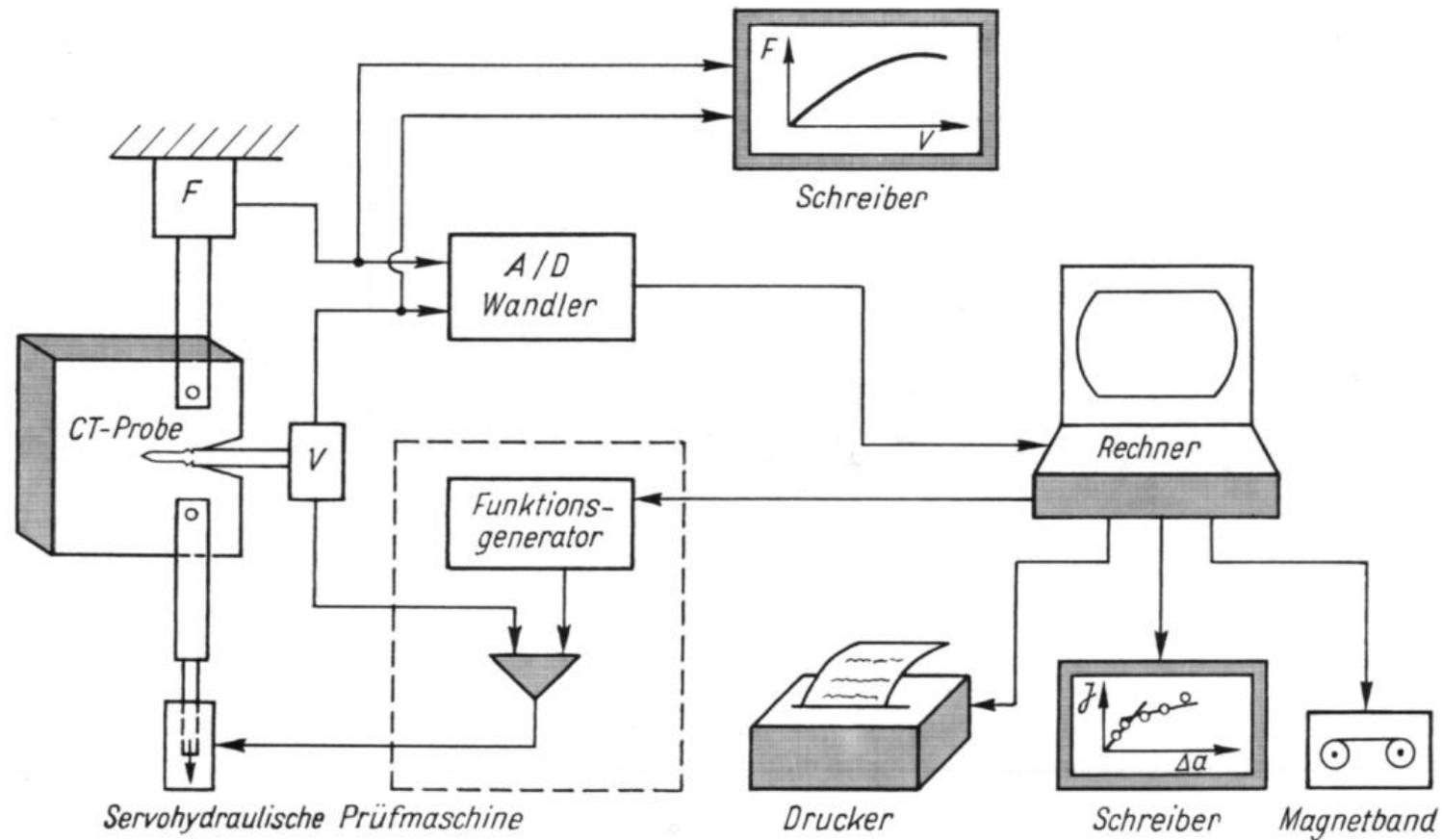
Linear-elastische Bruchmechanik

Kennwertermittlung:

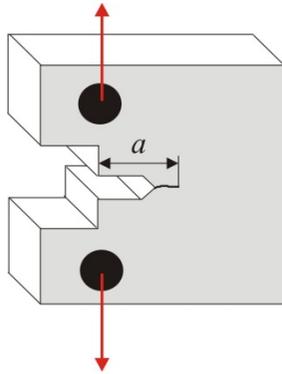
- Quasi-statischer Wert:
Ermittlung der Risszähigkeit nach ASTM E 399
- Zyklisches Risswachstumsverhalten:
Ermittlung der Thresholdwerte u.
Rissgeschwindigkeitskurven nach ASTM E 647

Linear-elastische Bruchmechanik (ASTM E 399)

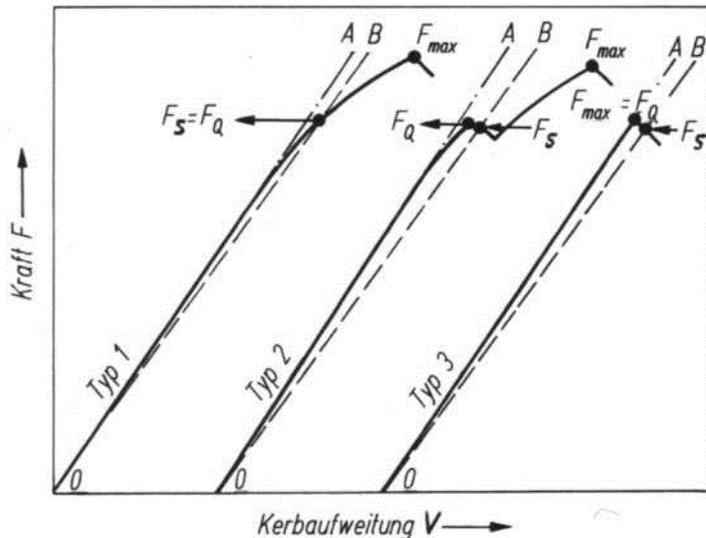
Versuchsführung



Linear-elastische Bruchmechanik (ASTM E 399)



Compact-Tension (CT) Probe



- Zugbelastung einer CT-Probe quasistatisch bis zum Bruch
- Aufzeichnung eines Kraft-Rissaufweitungs-Diagramms
- Anlegen einer Tangente an den Kraft-Rissausweitungs-Kurvenverlauf
- Weitere Linie mit 5%-Neigung relativ zur Tangente
- Schnittpunkt der 95%-Sekante mit der Kraft-Rissaufweitungs-Kurve ergibt den F_Q -Wert, der für die Berechnung des Spannungsintensitätsfaktors erforderlich ist

3-Pkt-Biege-Probe

$$K_Q = \frac{F_Q \cdot s}{t \cdot w^{3/2}} \cdot Y\left(\frac{a}{w}\right)$$

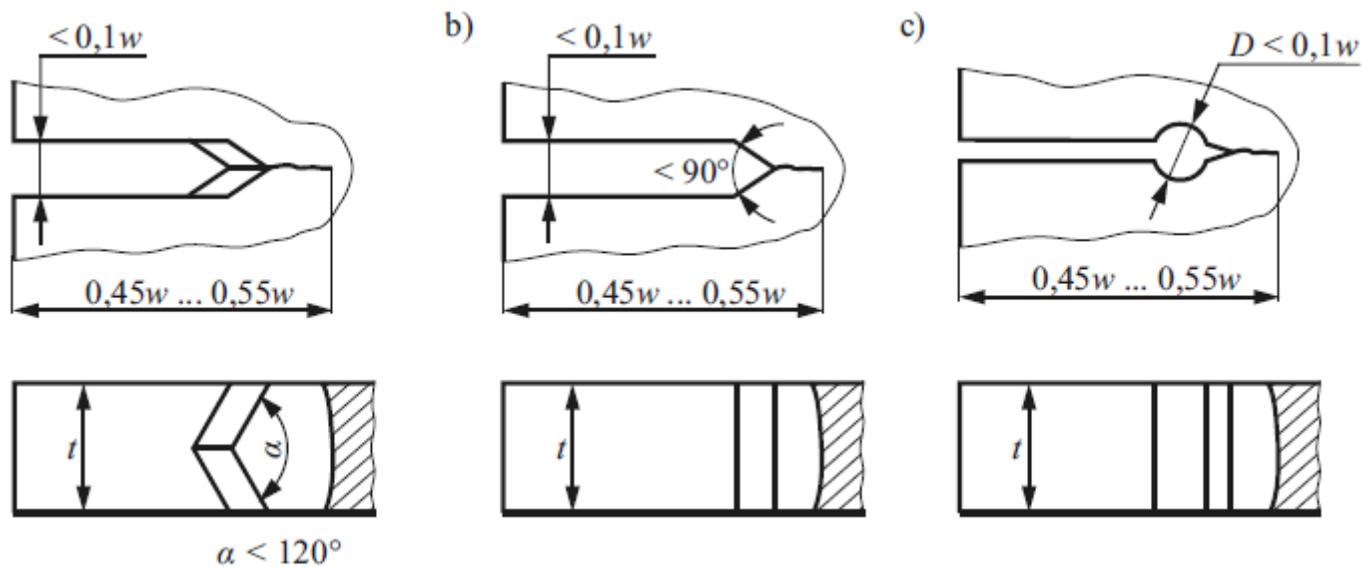
Compact-Tension (CT) Probe

$$K_Q = \frac{F_Q}{t \cdot \sqrt{w}} \cdot Y\left(\frac{a}{w}\right)$$

Linear-elastische Bruchmechanik (ASTM E 399)

Versuchsführung

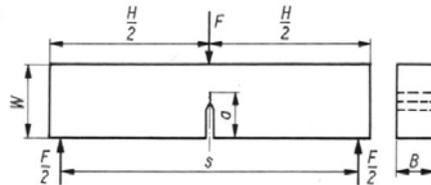
- Starterkerb gemäß ASTM E 399



Linear-elastische Bruchmechanik (ASTM E 399)

3-Punkt-Biege-Probe

Probenform



Bestimmungsgleichung

$$K_1 = \frac{Fs}{BW^{3/2}} f_1(a/W)$$

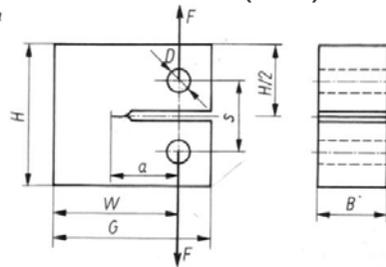
$f_1(a/W)$ Geometriefaktor
(s. Tabelle 4.7)
für $0,45 \leq a/W \leq 0,55$
und $s/W = 4$

Abmessung

$W = 2B$, Normalprobe
 $W = B$ bis $4B$, Alternativproben
 $s = 4W$
 $H = \text{mind. } 4,2W$
 $a = (0,45 \dots 0,55) W$

Compact-Tension (CT) Probe

Probenform



Bestimmungsgleichung

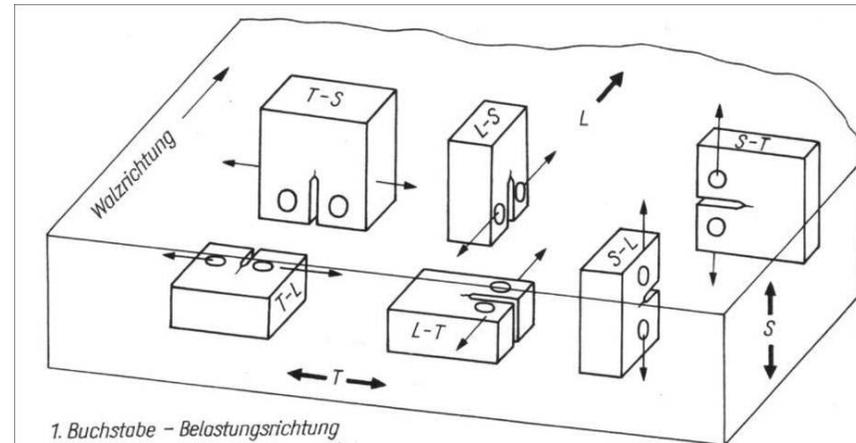
$$K_1 = \frac{F}{BW^{1/2}} f_2(a/W)$$

$f_2(a/W)$ Geometriefaktor
(s. Tabelle 4.7)
für $0,45 \leq a/W \leq 0,55$

Abmessung

$W = 2B$, Normalprobe
 $W = 2B$ bis $4B$, Alternativproben
 $s = 0,55W$
 $H = 1,2W$
 $a = (0,45 \dots 0,55) W$
 $D = 0,25W$
 $G = 1,25W$

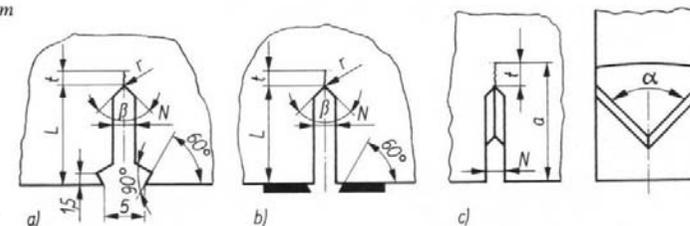
Probenentnahme



1. Buchstabe - Belastungsrichtung
2. Buchstabe - Rißausbreitungsrichtung

Starterkerb

Kerbform



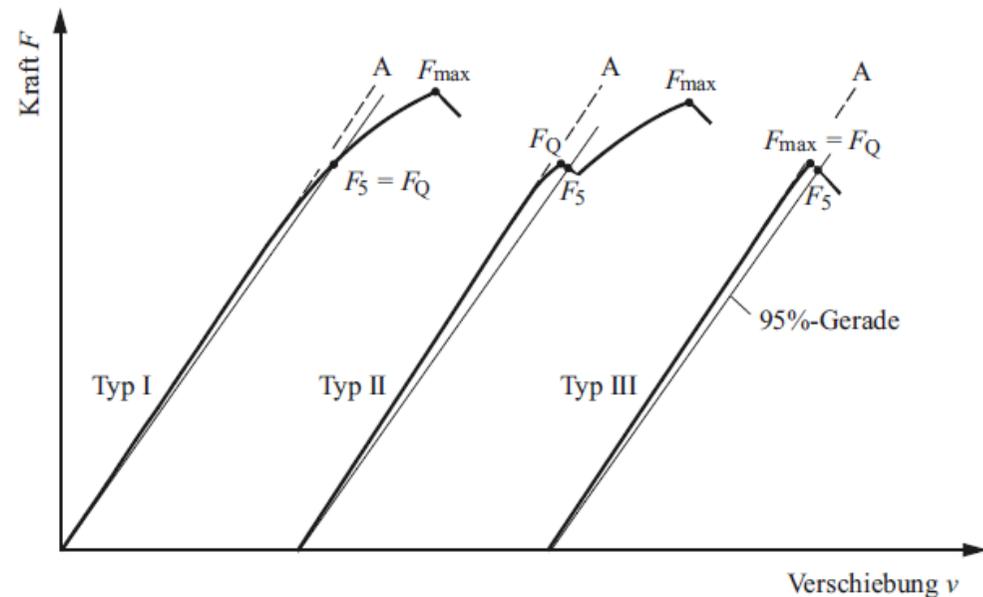
Kerbabmessungen

N	β	r	t	L	α
mm		mm	mm		
$\leq W/10$ min. 1,6	$< 90^\circ$	$\leq 0,25$	min. 1,30 $> 0,05a$	$a - t$	max. 120°

Linear-elastische Bruchmechanik (ASTM E 399)

Versuchsführung

- Proben hinsichtlich Probendicke u. Probenbreite vermessen
- Ermüdungsanriss mit einer zykl. Belastung bei einem Spannungsverhältnis R zwischen -1 und $0,1$ erzeugen, dabei sollte die max. Spannungsintensität 80% der Risszähigkeit nicht übersteigen
- Belastung in einem quasi-statischen Versuch bis zum Bruch
- Belastungsrate sollte zwischen $0,55$ und $2,75 \text{ MPam}^{1/2}/\text{s}$ liegen
- Aufzeichnung der Kraft u. der relativen Verschiebung mittels Wegaufnehmer über die Kerbaufweitung
- Mindestens 3 Versuche für die Bestimmung von K_{IC}

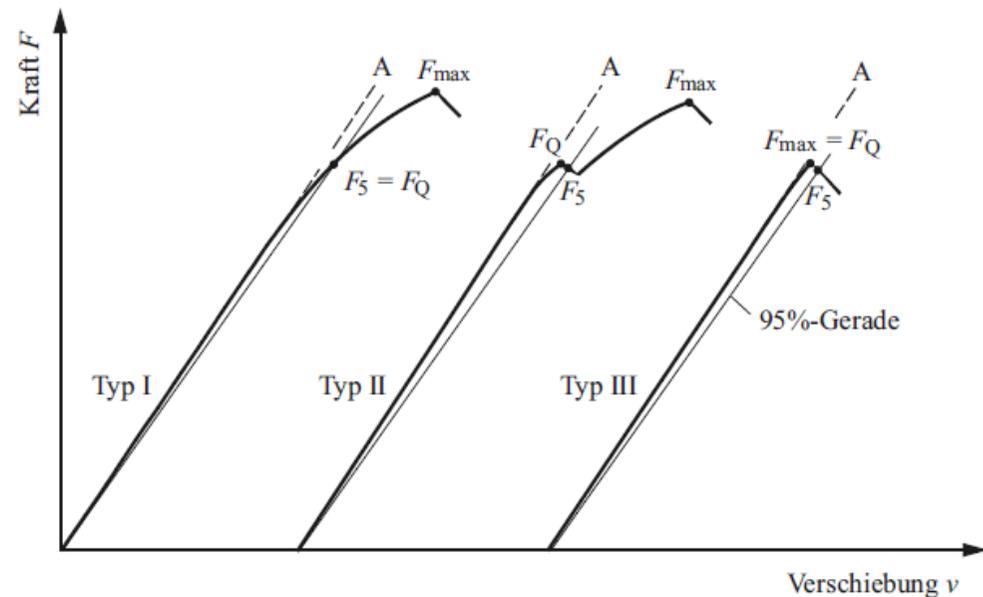


Linear-elastische Bruchmechanik (ASTM E 399)

Versuchsauswertung

Sekante durch den Ursprung mit einer Steigung, die gegenüber dem elastischen Verhalten um 5% reduziert ist

- Typ I-Verlauf: Kraftpunkte der Kurve sind alle kleiner als Schnittpunkt, dann gilt $F_Q = F_5$ (gemäß Bild)
- Typ II-Verlauf: Unstetigkeitsstelle, bei der es aufgrund kurzfristigen instabilen Risswachstums zu einer Absenkung der Kraft kommt, Kraftpunkte, $F_Q \neq F_5$ sondern F_Q gleich dem lokalen Maximum
- Typ III-Verlauf: Kurve hat einen nahezu linear-elastischen Verlauf, auch hier gilt: F_Q gleich dem lokalen Maximum



Linear-elastische Bruchmechanik (ASTM E 399)

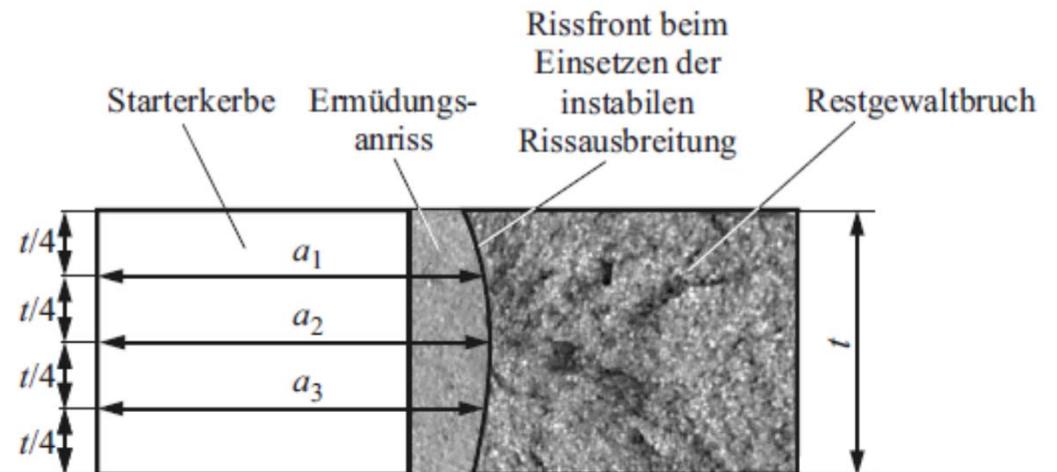
Versuchsauswertung

Es ist abschließend die zugehörige Risslänge an der gebrochenen Probe zu ermitteln.

Da im Allgemeinen eine gekrümmte Rissfront auftritt, ist die Messung an 3 Punkten in einem Abstand $t/4$ über der Probendicke vorzunehmen.

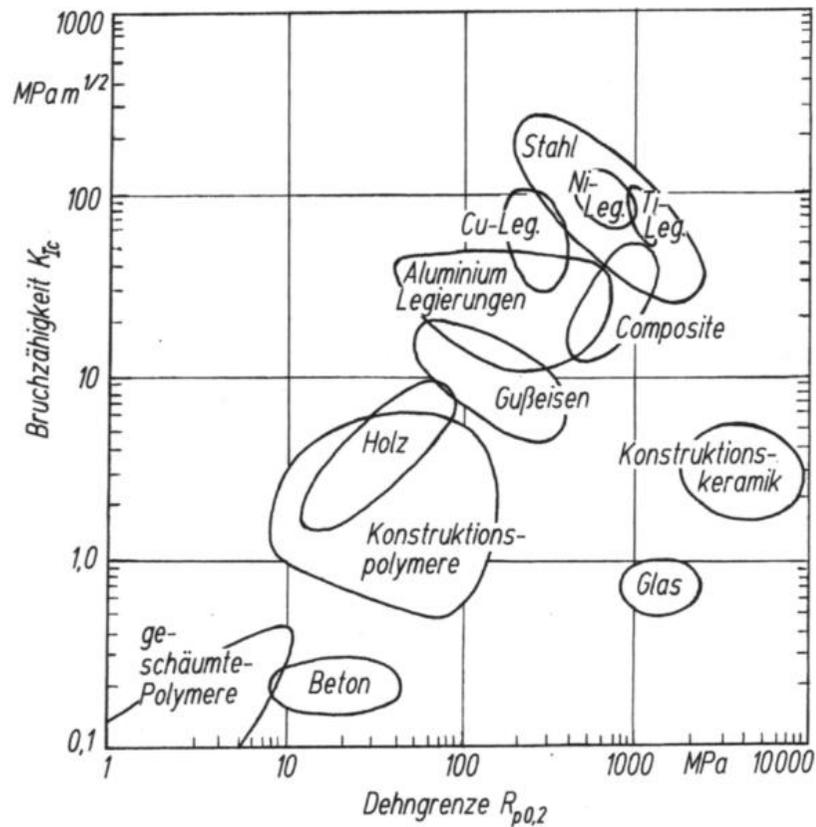
Die Differenz der Einzelmessungen darf maximal 10% von der mittleren Risslänge abweichen.

Die Risslänge an der Oberfläche darf maximal 15% von der mittleren Risslänge betragen.

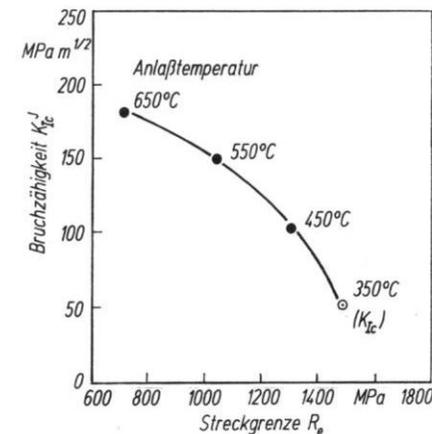


Linear-elastische Bruchmechanik

Bruchzähigkeit K_{IC}



Stahl	$R_{p0,2}$ MPa	K_{IC} MPa m ^{1/2}
34CrMo4	450	66
35CrMo13.5	450	40
40CrMo4	480	60
51CrMo4	960	111
30CrMoNiV5.11	650	61
39CrMoV13.9	1500	66
	2180	48
30CrMoV21.14	1080	124
30CrNiMo8	1060	108
	1410	87
34CrNiMo6	1280 ... 1550	40 ... 83
26NiCrMoV8.5	570	97
26NiCrMoV11.5	670	137
28NiCrMoV8.5	750	84
38NiCrMoV7.3	1200 ... 1600	66 ... 133
40NiCrMo6	1550	60



36CrNiMo4

Linear-elastische Bruchmechanik

Achtung: Einheit $\text{MPa mm}^{1/2}$ oder $\text{MPa m}^{1/2}$

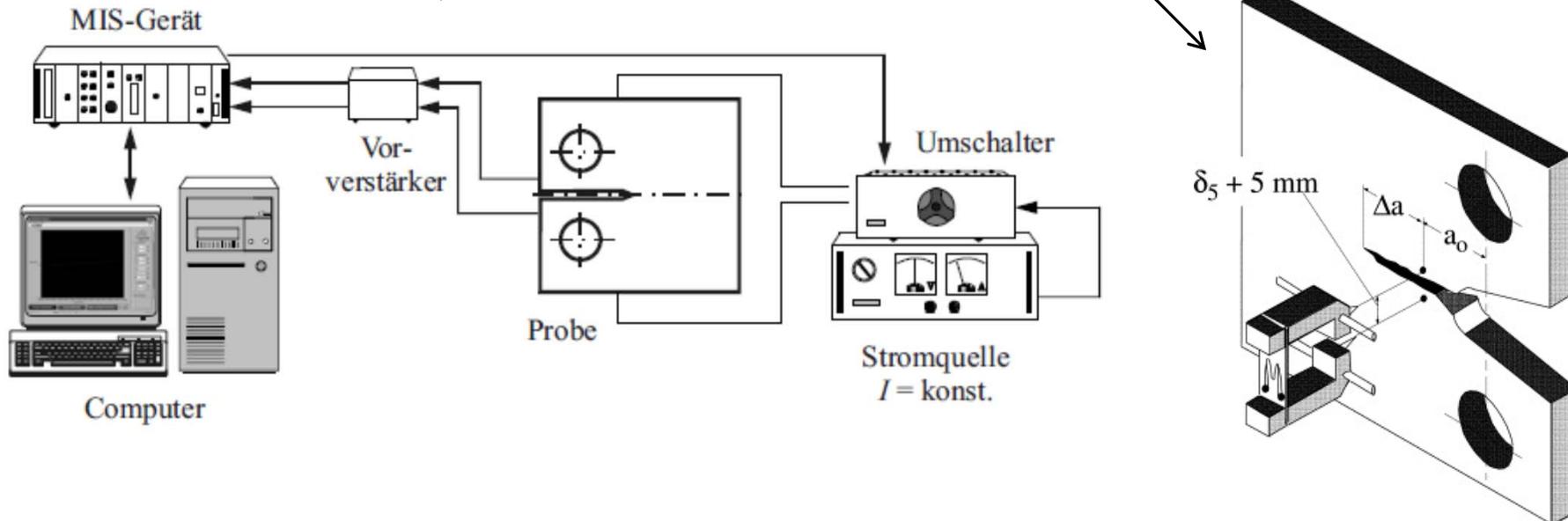
Werkstoff		$R_{p0,2} ; R_e$ MPa	K_{Ic} $\text{MPa mm}^{1/2}$	Temperatur
Vergütungs - stähle (Maschinen- baustähle)	34 Cr Mo 4	450	2100	RT
	35 Cr Mo 13,5	450	1250	
	30 Cr Ni Mo 8	1060	3420	
	39 Cr Mo V 13,9	1500	2080	
Baustähle	St 37-3	230	2500	-80°C
		230	3500	-40°C
	St52-3	310	5500	-40°C
Eisenguss- werkstoffe	GGL-10	$R_m = 93$	221	RT
	GGG-55	376	1896	
Aluminium - legierungen	Al Cu Mg	440	880	RT
	Al Zn Mg Cu 1,5	500	910	
Keramische	Siliziumnitrid	-	60 -160	RT

Linear-elastische Bruchmechanik (ASTM E 647)

Methoden der Risslängenmessung

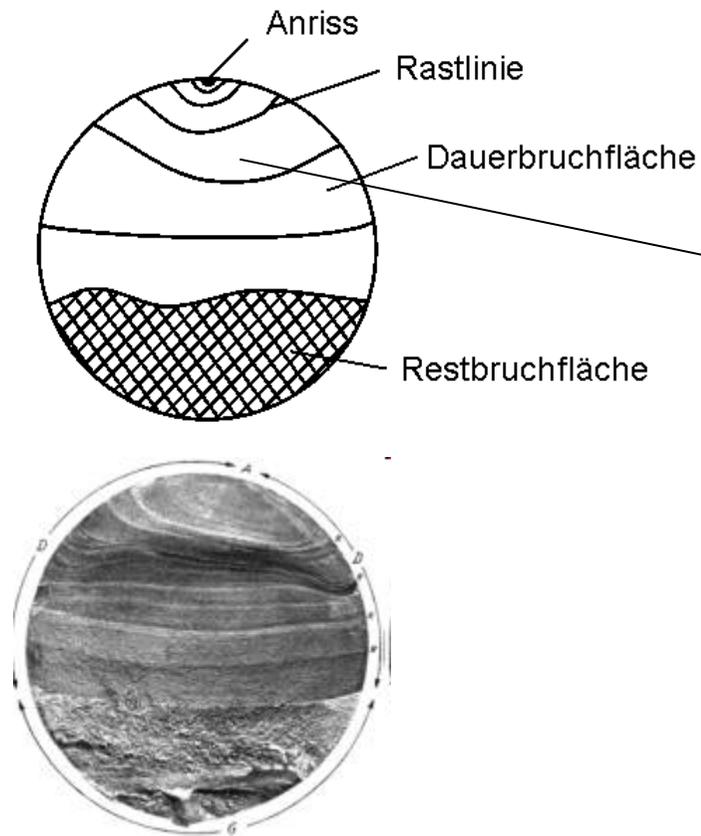
- Optische Methoden
- Elektropotentialmethode
- Compliance-Methode

Probentyp	Intervall der Risslängenmessung	
CT-Probe	$\Delta a \leq 0,04w$	für $0,25 \leq a/w \leq 0,40$
	$\Delta a \leq 0,02w$	für $0,40 \leq a/w \leq 0,60$
	$\Delta a \leq 0,01w$	für $a/w \geq 0,60$
MT-Probe	$\Delta a \leq 0,03w$	für $2a/w < 0,60$
	$\Delta a \leq 0,02w$	für $2a/w > 0,60$

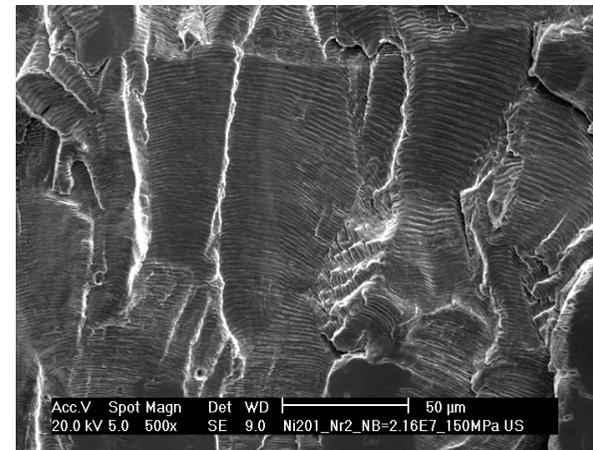


Ermüdungsrisswachstum

Bruchfläche

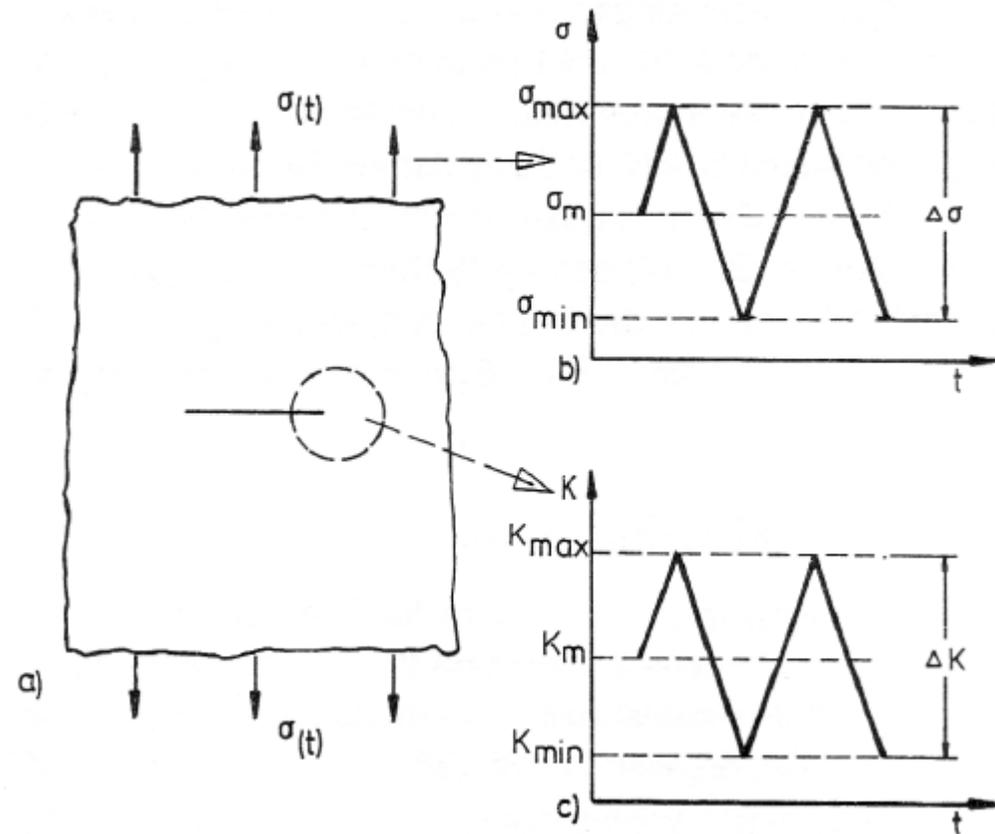
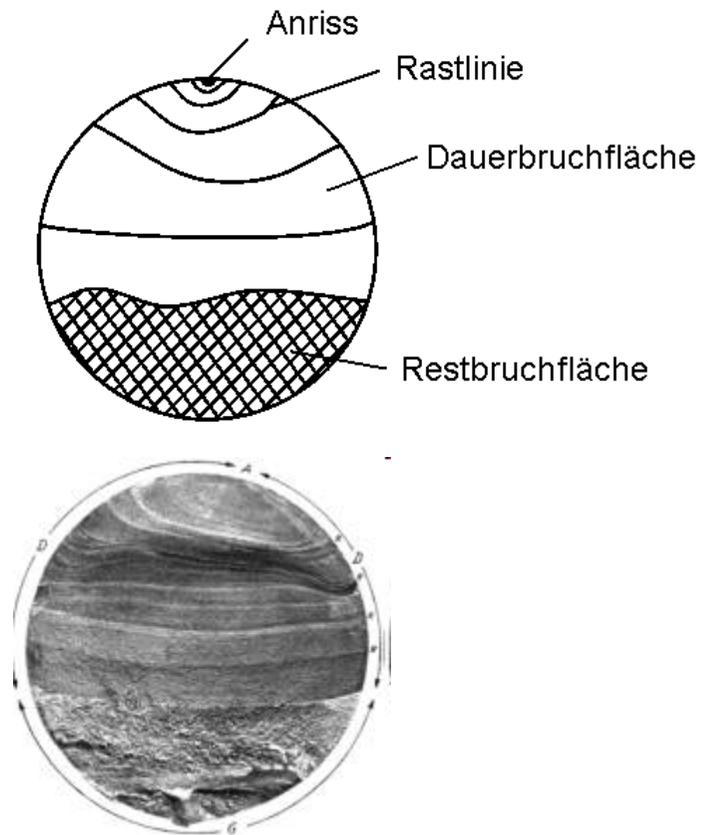


Schwingbruchfläche (Bsp.:Nickel)



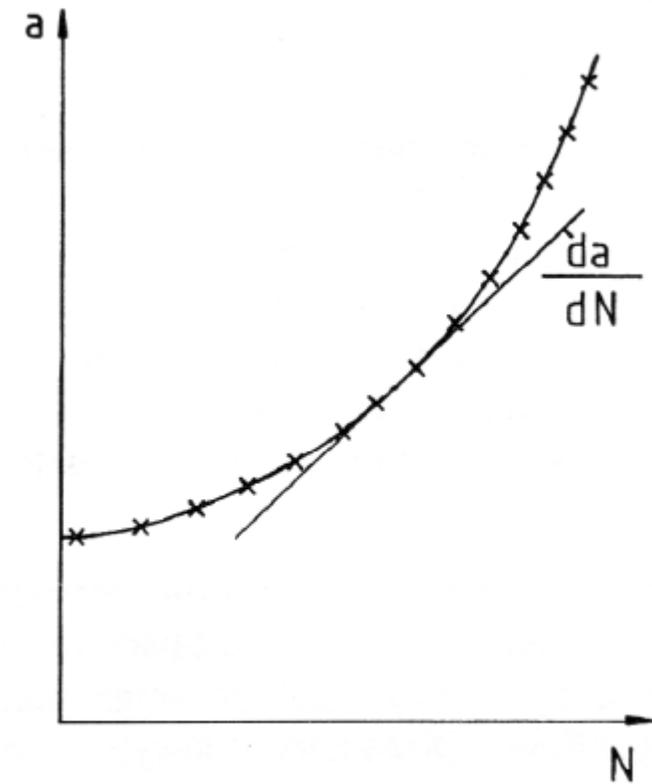
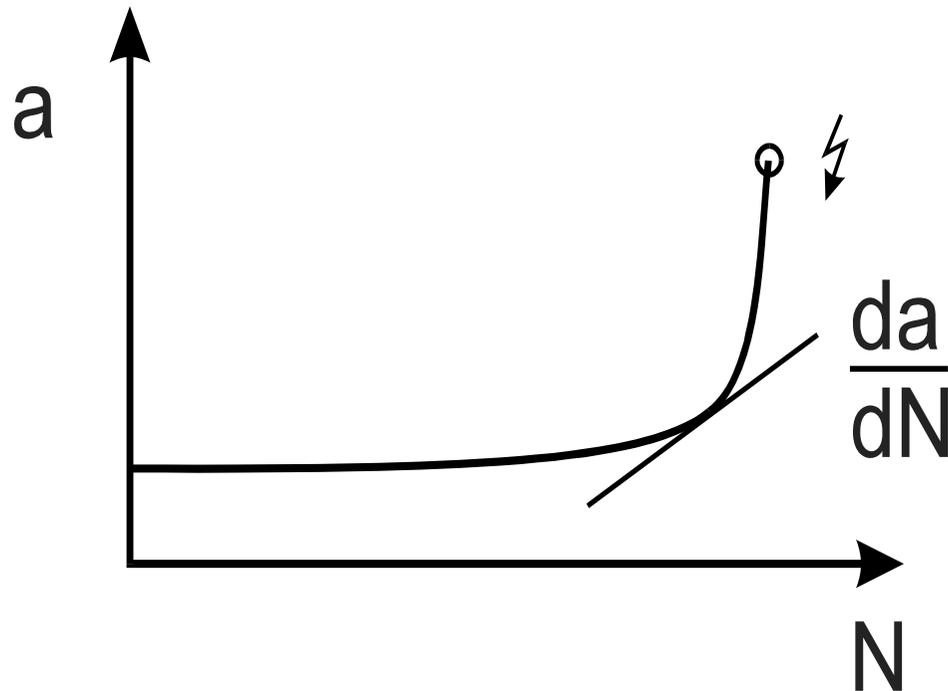
Ermüdungsrisswachstum

Bruchfläche





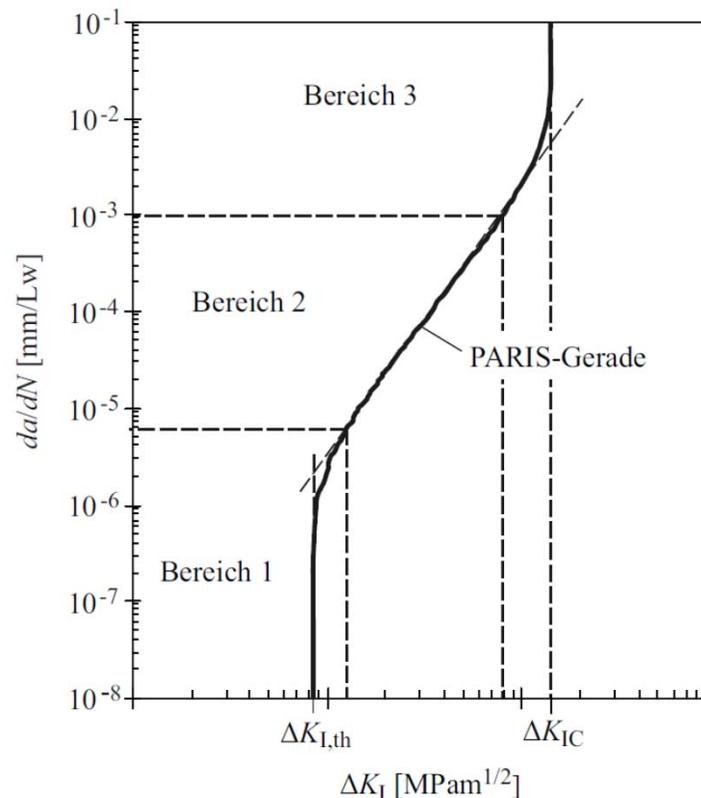
Ermüdungsrisswachstum



Linear-elastische Bruchmechanik (ASTM E 647)

Für die Charakterisierung des Ermüdungsrisswachstums haben sich

- der Schwellenwert $\Delta K_{I,th}$
 - die Rissgeschwindigkeitskurve $da/dN = f(\Delta K, R)$
- etabliert.



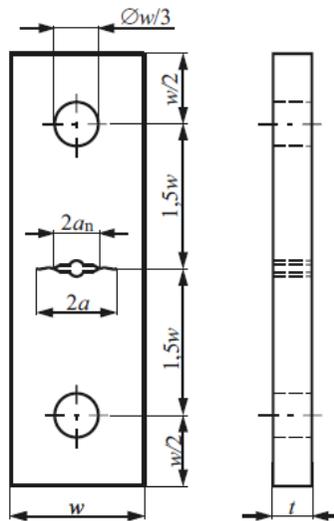
Paris-Gesetz
(stabiles
Risswachstum):

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta\sigma \sqrt{\pi a})^m$$

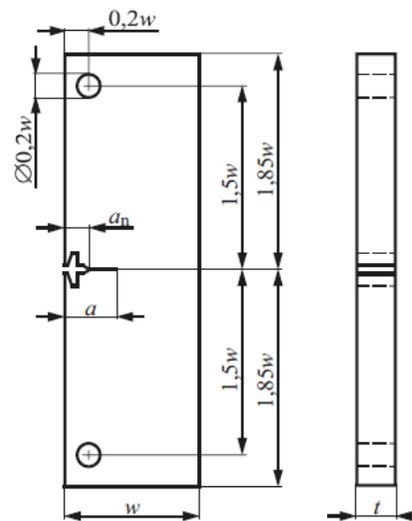
Achtung:
Paris-Gesetz
bedingt doppelt-
logarithmischer
Auftragung!

Linear-elastische Bruchmechanik (ASTM E 647)

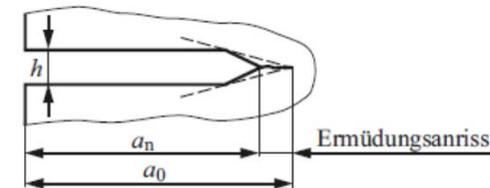
MT-Probe



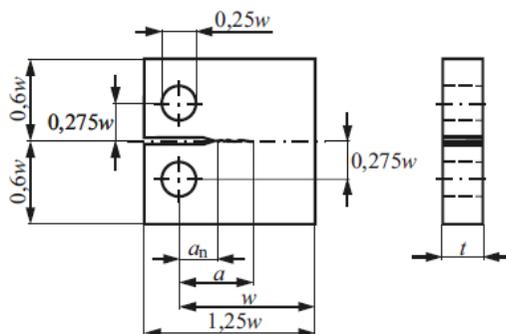
Exzentrische
SEN-Probe



Ermüdungsriß



- Anrisserzeugung durch Anschwingen
- Mindestlänge $0,1t$, die Kerbhöhe h oder 1 mm
- Maximale Spannungsintensität zum Anschwingen nicht größer als Anfangswert
- Riss sollte symmetrisch erzeugt werden, Anriß auf der Vorder- und Rückseite der Probe darf nicht mehr als $0,25t$ voneinander abweichen



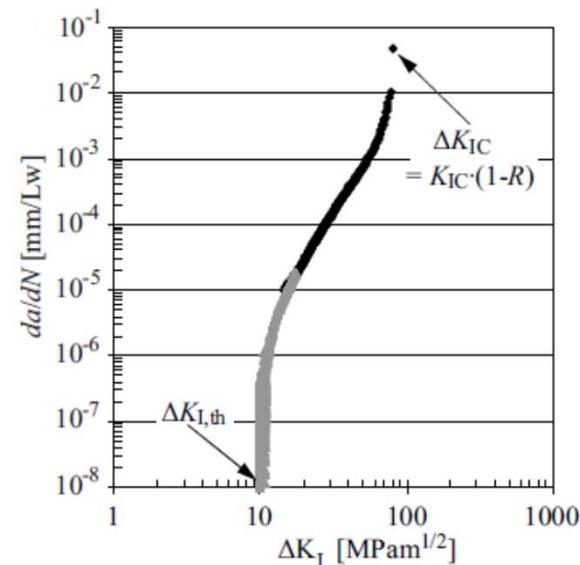
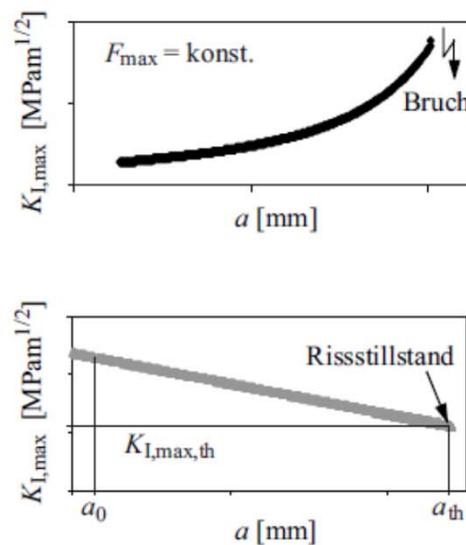
CT-Probe

Linear-elastische Bruchmechanik (ASTM E 647)

Versuchsführung

Es werde in der Regel zwei Versuchstypen erforderlich:

- K_{\max} und K_{\min} konstant, da hier konstante Kraftschwingbreite steigende Spannungsintensität mit zunehmender Risslänge – ergibt den mittleren und oberen Bereich der Rissfortschrittskurve
- Wahl der Spannungsintensität so, dass der Riss mit mittlerer Geschwindigkeit wächst, mit zunehmender Risslänge Reduzierung der zykl. Spannungsintensität bis das Risswachstum zum Stillstand kommt – ergibt den Schwellenwert $\Delta K_{I,th}$

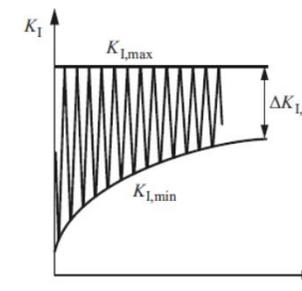
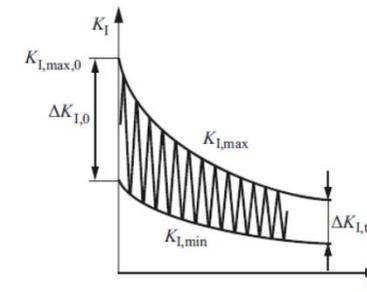
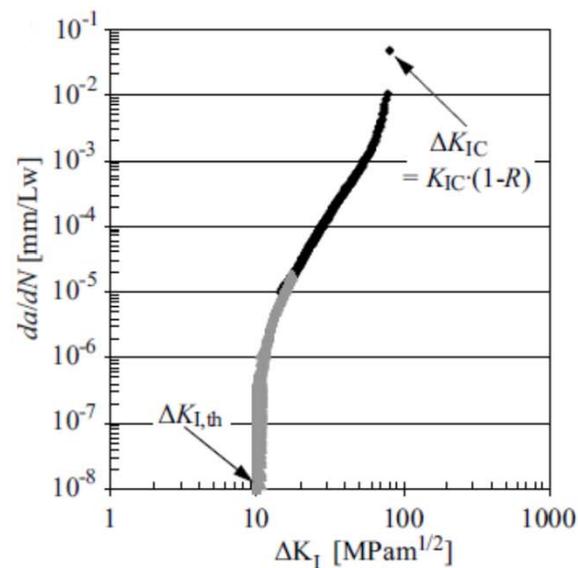
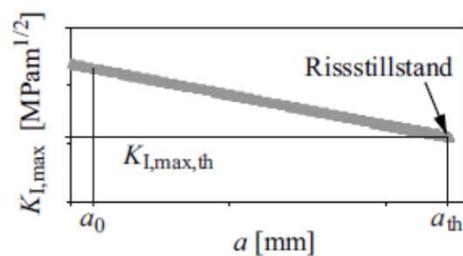
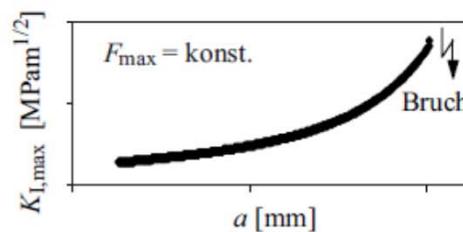


Linear-elastische Bruchmechanik (ASTM E 647)

Versuchsführung

Es werde in der Regel zwei Versuchstypen erforderlich:

- K_{\max} und K_{\min} konstant, da hier konstante Kraftschwingbreite steigende Spannungsintensität mit zunehmender Risslänge – ergibt den mittleren und oberen Bereich der Rissfortschrittskurve
- Wahl der Spannungsintensität so, dass der Riss mit mittlerer Geschwindigkeit wächst, mit zunehmender Risslänge Reduzierung der zykl. Spannungsintensität bis das Risswachstum zum Stillstand kommt – ergibt den Schwellenwert $\Delta K_{I,th}$



Linear-elastische Bruchmechanik (ASTM E 647)

Bruchzähigkeit bei zyklischer Beanspruchung u. Risswachstumsparameter

material	ΔK_{th} [MNm ^{-3/2}]	$m[-]$	$C \times 10^{-11}$ [!]
mild steel	3.2 - 6.6	3.3	0.24
structural steel	2.0 - 5.0	3.85 - 4.2	0.07 - 0.11
idem in sea water	1.0 - 1.5	3.3	1.6
aluminium	1.0 - 2.0	2.9	4.56
aluminium alloy	1.0 - 2.0	2.6 - 3.9	3 - 19
copper	1.8 - 2.8	3.9	0.34
titanium	2.0 - 3.0	4.4	68.8

Achtung: nicht vergleichbar mit K_{IC} (stat. Bruchzähigkeit) vergleichbar!

Linear-elastische Bruchmechanik (ASTM E 647)

Bruchzähigkeit bei zyklischer Beanspruchung u. Risswachstumsparameter

Werkstoff		$R_{p0,2}$ MPa	m	C
Stahl	Ck 45	440	3,20	$3,22 \times 10^{-14}$
"	42 Cr Mo 4	720	2,36	$1,11 \times 10^{-11}$
"	X20 Cr 13	620	2,01	$1,61 \times 10^{-10}$
"	H60-3	485	3,8	$4,8 \times 10^{-10}$
Stahlguß	GS-35 Cr Mo V10.4 (ölvergütet)	720	3,3	$1,95 \times 10^{-14}$
"	GS-C25	245	3,25	$3,73 \times 10^{-14}$

Auslegungskonzepte zur Vermeidung von Ermüdungsversagen

- **Infinite Life Design**

Die zulässige Spannungsamplitude im höchstbeanspruchten Bauteil/Bereich wird unterhalb der Schwingfestigkeit festgelegt. Rissinitiierung ist damit praktisch ausgeschlossen.

- **Safe Life Design**

Anhand der Wöhlerkurve wird die Gesamtlebensdauer eines Bauteils vorhergesagt. Nach Erreichen der Lebensdauer wird das Bauteil auf jeden Fall ausgetauscht.

- **Damage Tolerant Design**

Risswachstum kann vorhergesagt werden (z.B. anhand des Paris-Gesetzes). Anhand von regelmäßigen Inspektionen wird das Risswachstum beobachtet und bei Überschreiten einer kritischen Risslänge das Bauteil ausgetauscht.

- **Fail Safe Design**

Sicherheitsfaktoren und versagensunkritisches Design muss garantieren, dass auch nicht-detektierte Risse kein Bauteilversagen verursachen.

Bewertung der Restlebensdauer bei Ermüdungsriß

Damage Tolerant Design

Risswachstum kann vorhergesagt werden (z.B. anhand des Paris-Gesetzes). Anhand von regelmäßigen Inspektionen wird das Risswachstum beobachtet und bei Überschreiten einer kritischen Risslänge das Bauteil ausgetauscht.

Fail Safe Design

Sicherheitsfaktoren und versagensunkritisches Design muss garantieren, dass auch nicht-detektierte Risse kein Bauteilversagen verursachen.

Bestimmung der Restlebensdauer auf der Basis des Paris-Gesetzes:

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta\sigma \sqrt{\pi a})^m \quad N_f - N_i = \frac{(\Delta\sigma)^{-m}}{\beta^m C (\sqrt{\pi})^m (1 - \frac{m}{2})} a_f^{(1 - \frac{m}{2})} \left[1 - \left(\frac{a_i}{a_f} \right)^{(1 - \frac{m}{2})} \right]$$

Beispielrechnung

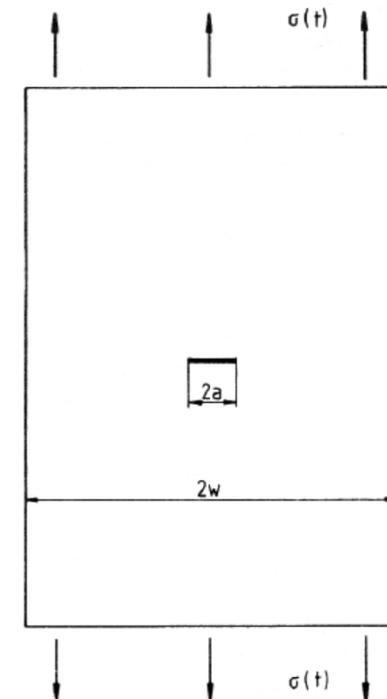
Fallbeispiel: An einer zyklisch belasteter Zuglasche (Breite $2w = 200$ mm) wurde ein Innenriss der Länge $2a = 2$ mm festgestellt. Die Lasche ist im Betrieb einer zyklischen Belastung von $\sigma_{\max} = 160$ MPa und $\sigma_{\min} = 20$ MPa ausgesetzt. Zur Beurteilung des Schadensfalls unter LEBM-Bedingungen kann ein Geometriefaktor $Y = 1$ angenommen werden.

Werkstoffkennwerte:

$$R_{po,2} = 600 \text{ MPa}, \quad K_c = 1100 \text{ MPa mm}^{1/2},$$

$$\Delta K_o = 200 \text{ MPa mm}^{1/2}$$

$$C = 2 \cdot 10^{-12}, \quad m = 3,0 \text{ für } da/dN \text{ in mm/LW},$$



Beispielrechnung

a) Ist bei der gegebenen Schadensfall mit einem Risswachstum zu rechnen?

$$\Delta K_I = \Delta \sigma \sqrt{\pi a} Y_I = \Delta K_o$$

$$a_o = \frac{1}{\pi} \left[\frac{\Delta K_o}{\Delta \sigma Y_I} \right]^2$$

$$a_o = 0,65 \text{ mm}$$

Beispielrechnung

b) Wann würde instabiles Risswachstum einsetzen, wenn von nun an nur noch eine statische Last entsprechend der maximalen Betriebsbeanspruchung vorläge?

$$K_{I_{\max}} = \sigma_{\max} \sqrt{\pi a} Y_I = K_c.$$

Die kritische Risslänge berechnet sind demnach zu

$$a_c = \frac{1}{\pi} \left[\frac{K_c}{\sigma_{\max} Y_I} \right]^2.$$

$$a_c = 15 \text{ mm}$$

Beispielrechnung

c) Wie groß ist die Restlebensdauer der Zuglasche?

$$dN = \frac{da}{C(\Delta K_I)^m} \quad N_c = \int_{a_a}^{a_c} \frac{da}{C(\Delta K_I)^m}$$

Für den Fall, daß $\Delta\sigma$ und Y_I konstant sind, ergibt die Integration für $m \neq 2$:

$$N_c = \frac{1}{\left(\frac{m}{2} - 1\right) C [\Delta\sigma \sqrt{\pi} Y_I]^m} \left[\frac{1}{a_a^{\frac{m}{2} - 1}} - \frac{1}{a_c^{\frac{m}{2} - 1}} \right]$$

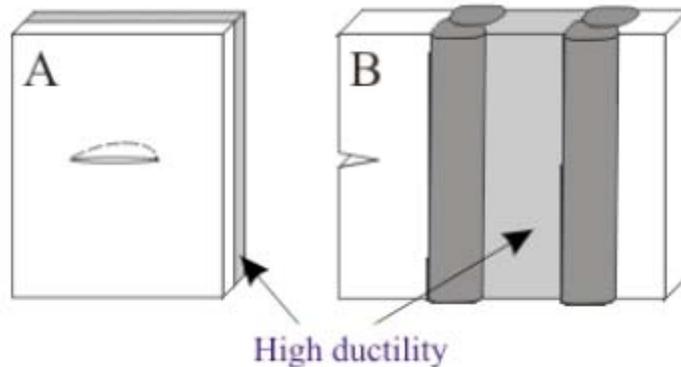
$$N_c = 48600$$

Im Fall einer 20% Reduzierung der Betriebsbelastung kann die Restlebensdauer auf $N_c > 100000$ Lastwechsel gesteigert werden.

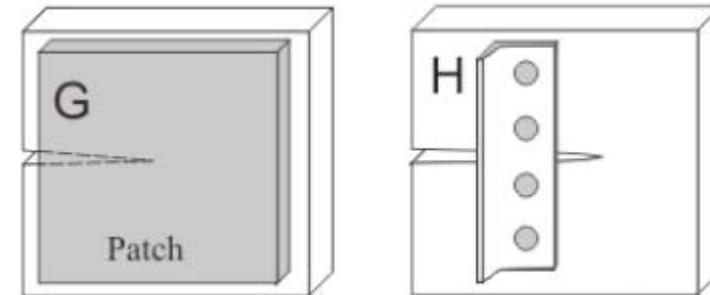
Schadensprävention bei rissbehafteten Bauteilen

Risszähigkeit verbessern durch

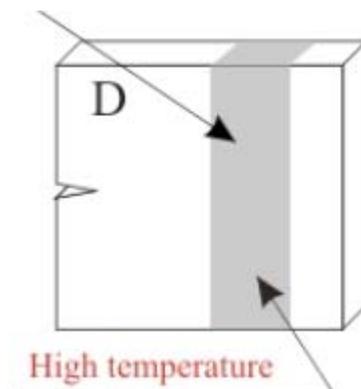
- duktile Materialien



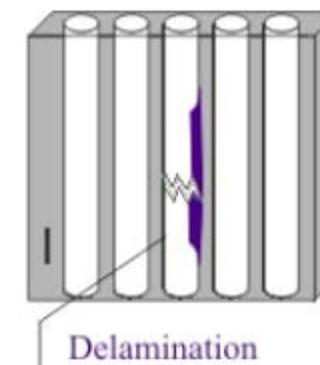
- „patchen“



- lokale Erwärmung



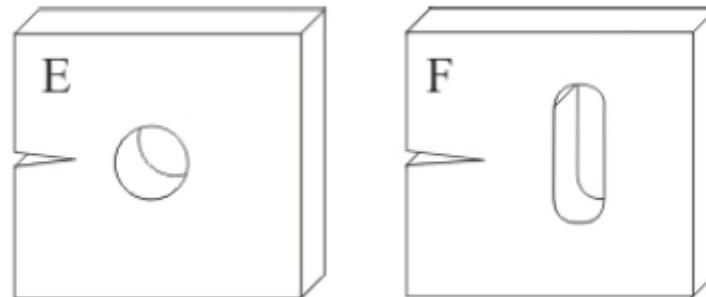
- Versteifungselemente



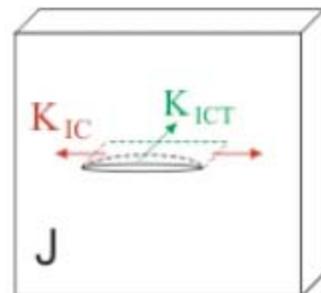
Schadensprävention bei rissbehafteten Bauteilen

Risszähigkeit verbessern durch

- Reduzierung des Spannungsintensitätsfaktors durch Entlastungsbohrungen

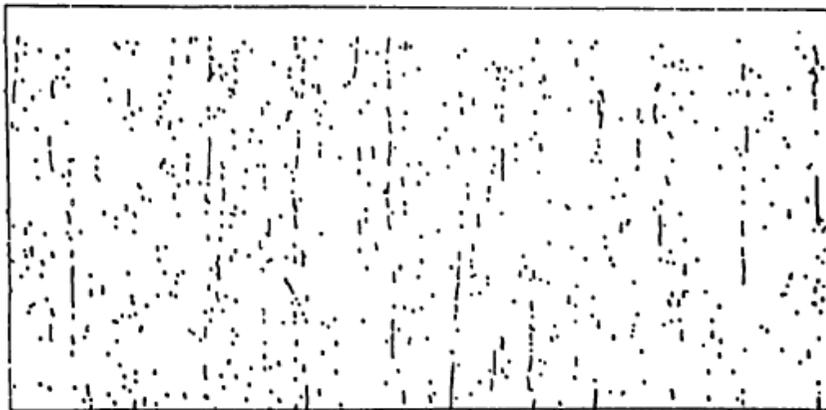
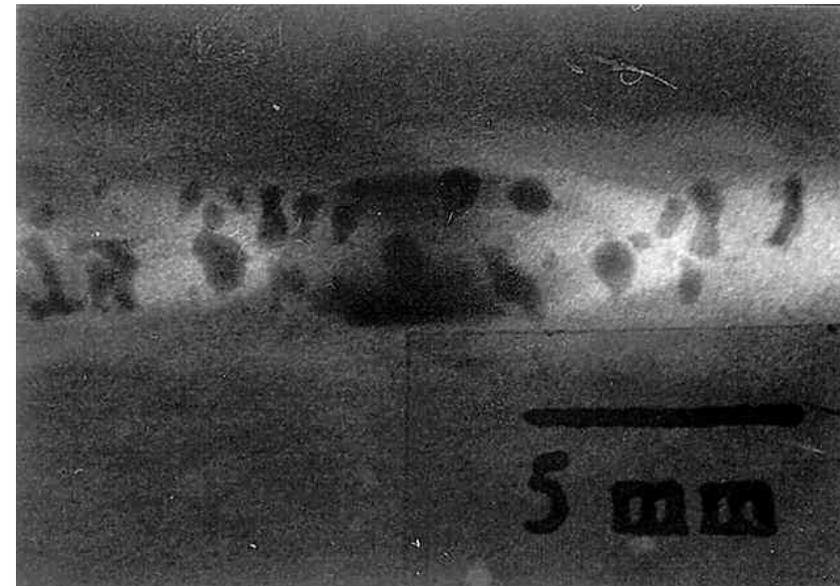
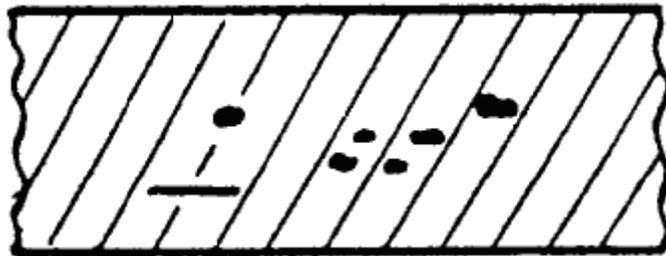


- Leck-vor-Bruch-Konzept



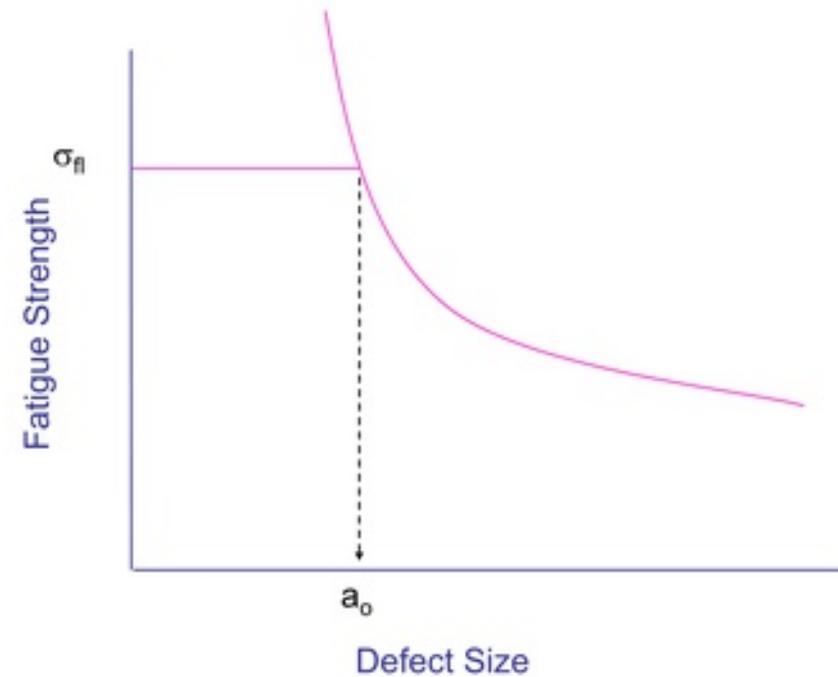
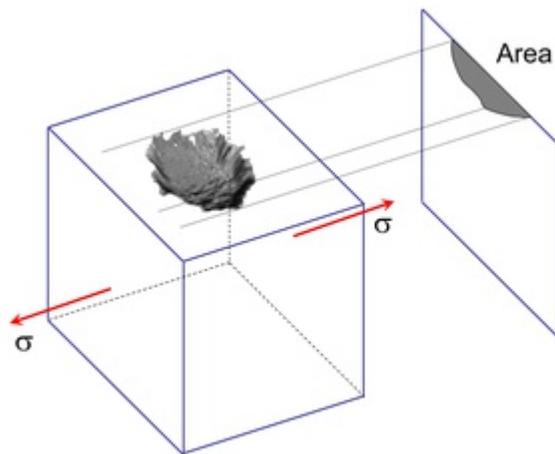


Bewertung kleiner Defekte/Ungängen?



Bewertung kleiner Defekte mittels Murakami-Modell

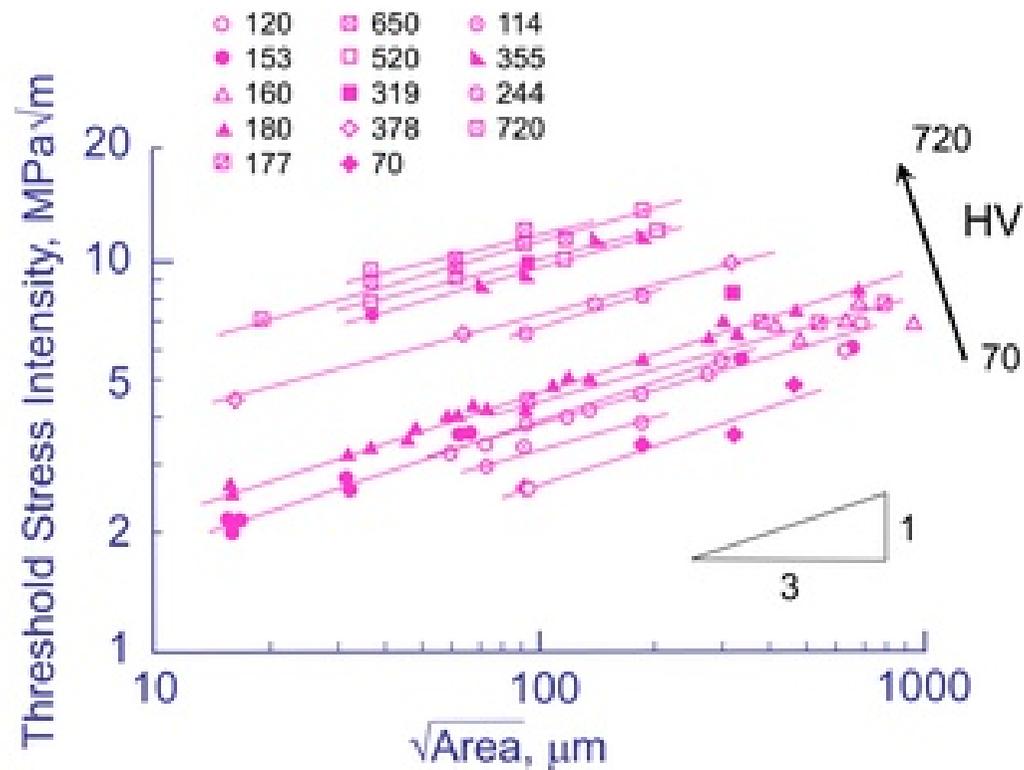
$\sqrt{\text{area}}$ – Konzept nach Y. Murakami



Annahme der kritischen Defektgröße sollte sich an der Auflösungsgrenze des Detektionsverfahrens orientieren

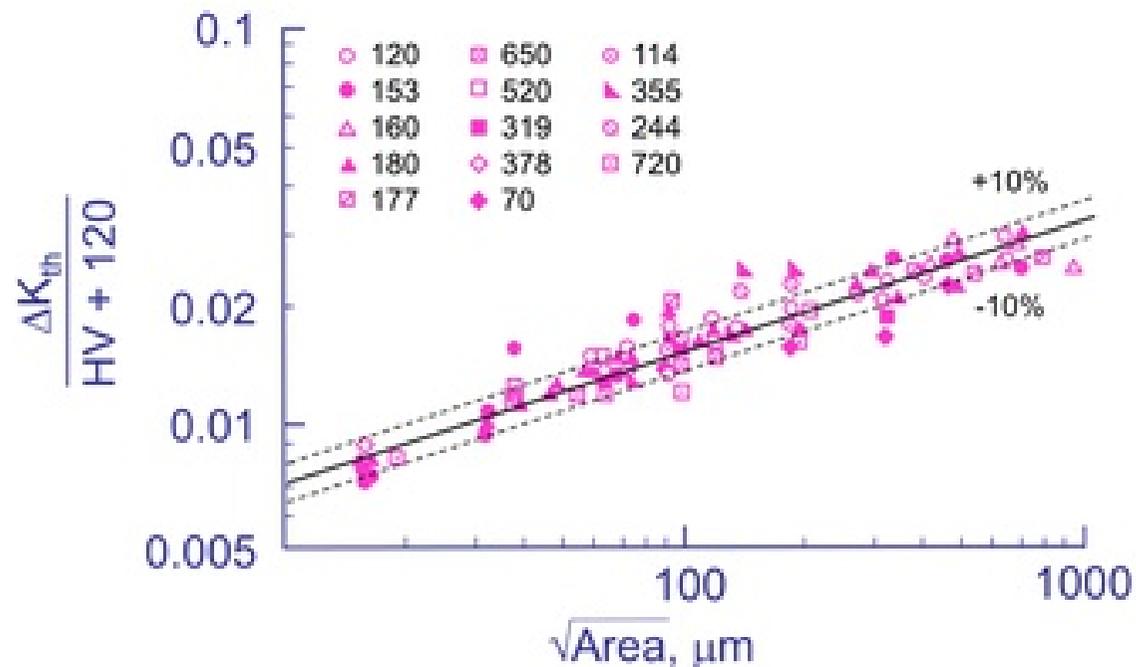
Bewertung kleiner Defekte mittels Murakami-Modell

$\sqrt{\text{area}}$ – Konzept nach Y. Murakami



Bewertung kleiner Defekte mittels Murakami-Modell

$\sqrt{\text{area}}$ – Konzept nach Y. Murakami

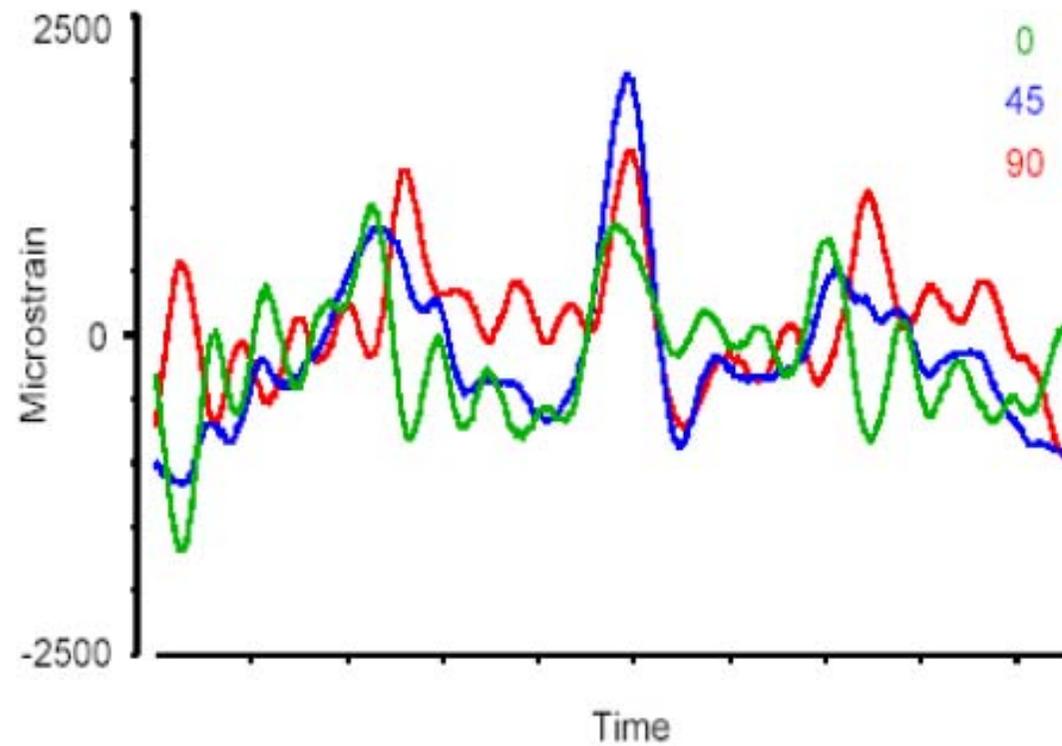
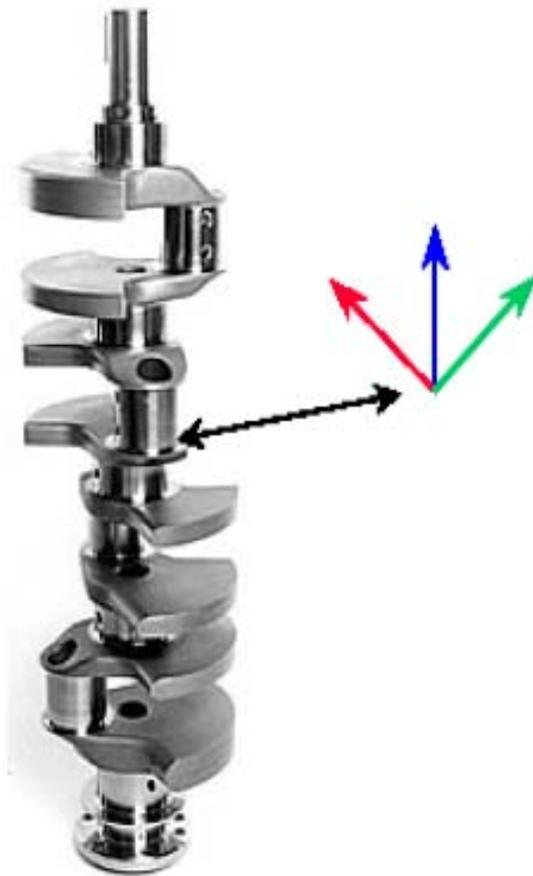


$$\Delta K_{th} = 3.3 \times 10^{-3} (H_V + 120) (\sqrt{Area})^{1/3}$$

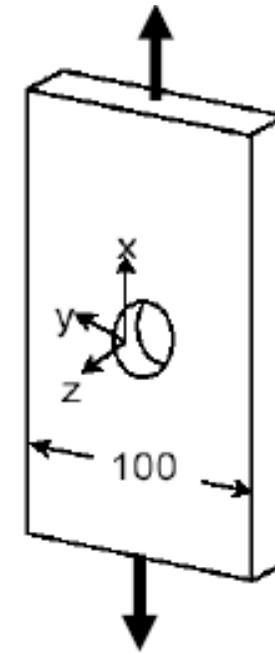
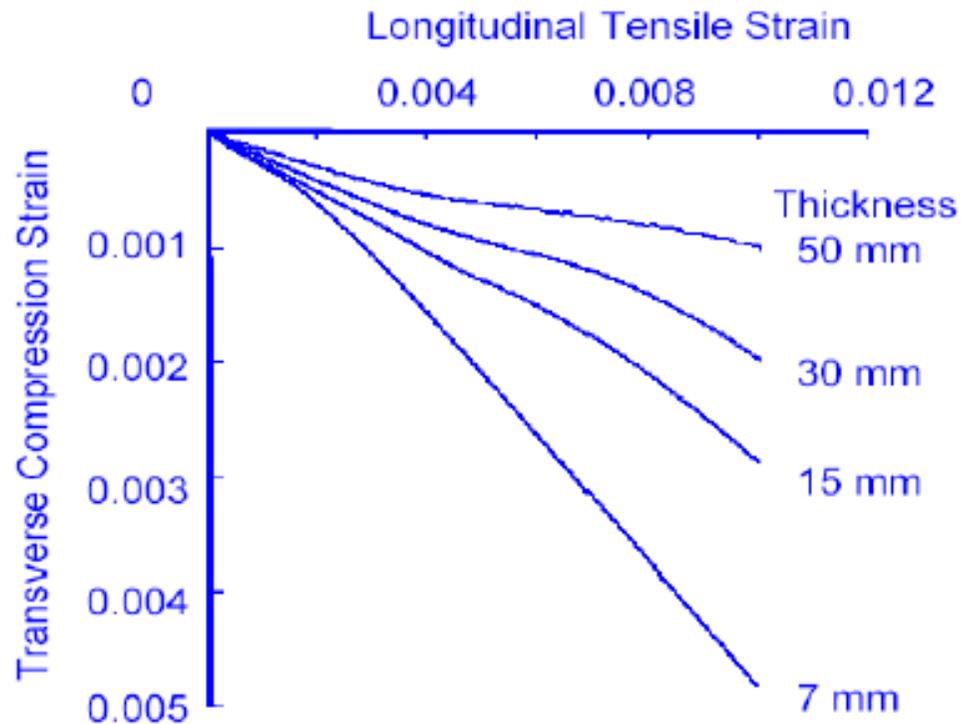
$$\sigma_a = \frac{1.43 (H_V + 120)}{(\sqrt{Area})^{1/6}} \left[\frac{1 - R}{2} \right]^\alpha$$



Risswachstum unter multiaxialer Belastung

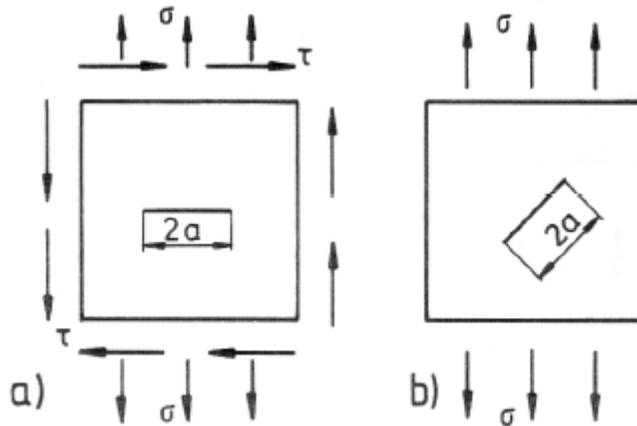


Risswachstum unter multiaxialer Belastung

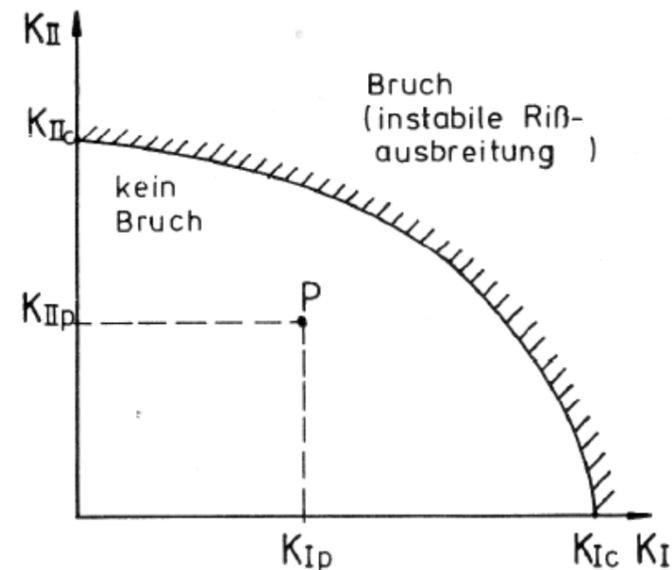


t	ϵ_x	ϵ_z	σ_x	σ_z
7	0.01	-0.005	63.5	0
15	0.01	-0.003	70.6	14.1
30	0.01	-0.002	73.0	21.8
50	0.01	-0.001	75.1	29.3

Risswachstum unter multiaxialer Belastung

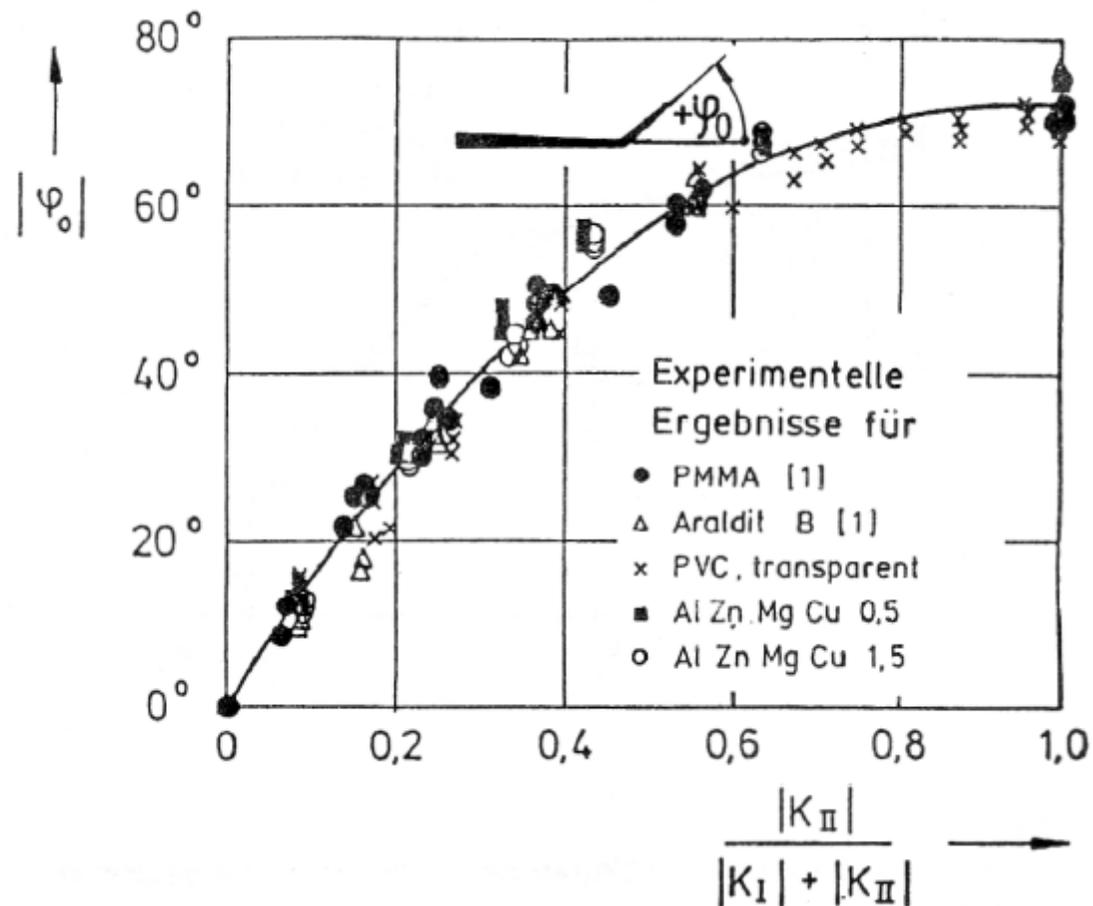


Mixed-mode-Beanspruchung liegt immer dann vor, wenn ein Bauteil z.B. gleichzeitig einer Normal- und einer Schubbeanspruchung ausgesetzt ist oder der Anfangsriss schräg zur Belastungsrichtung liegt.



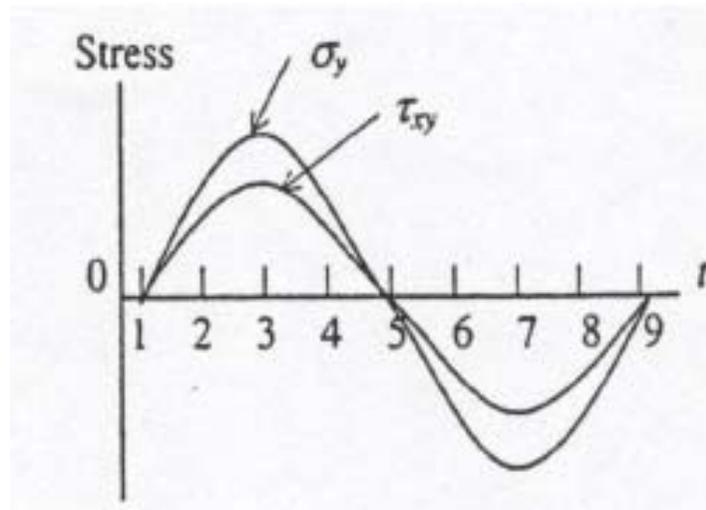
Risswachstum unter multiaxialer Belastung

Rissfadablenkung durch mixed-mode-Beanspruchung

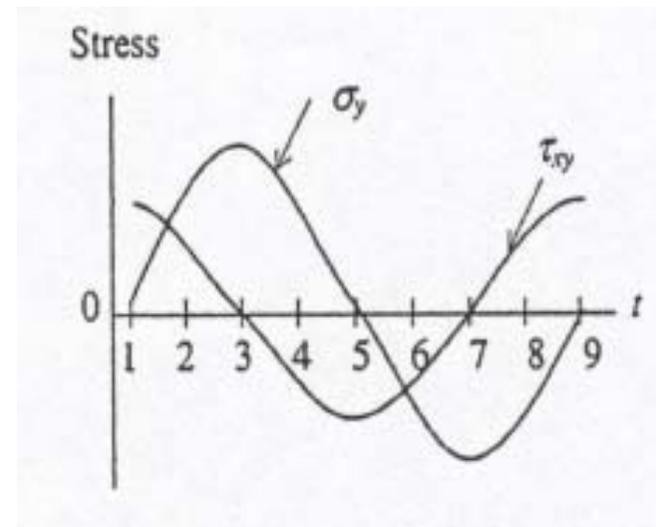


Risswachstum unter multiaxialer Belastung

In phase - Beanspruchung

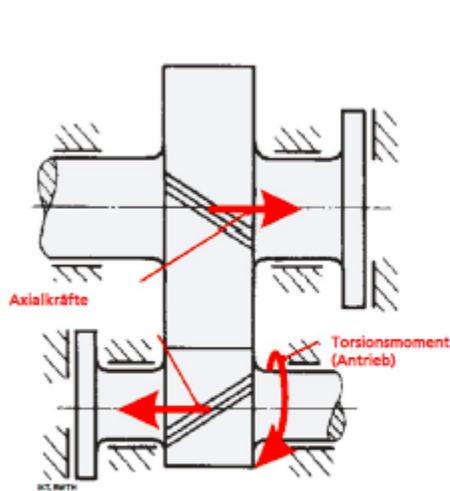


Out of phase - Beanspruchung

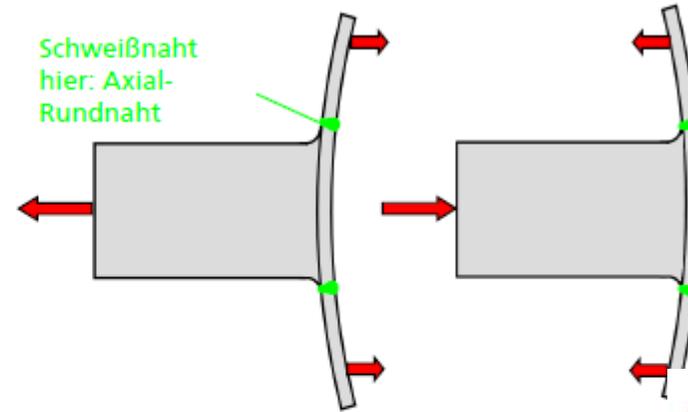




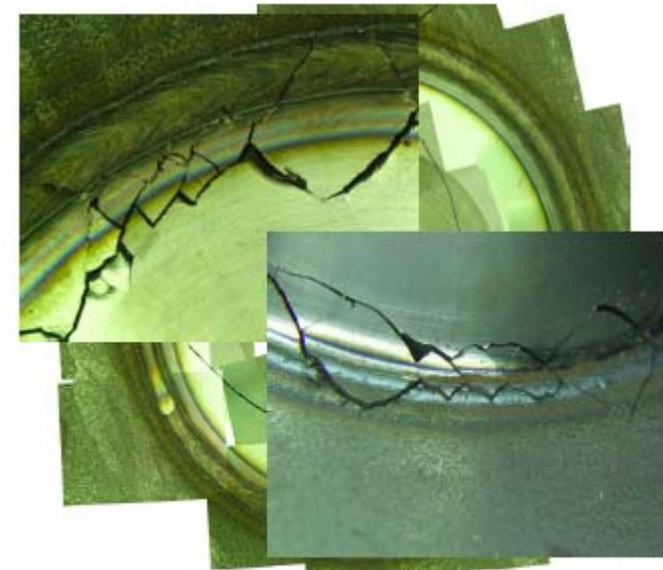
Risswachstum unter multiaxialer Belastung



Durch die Schrägverzahnung von Zahnrädern entstehen zusätzliche Axialkräfte.

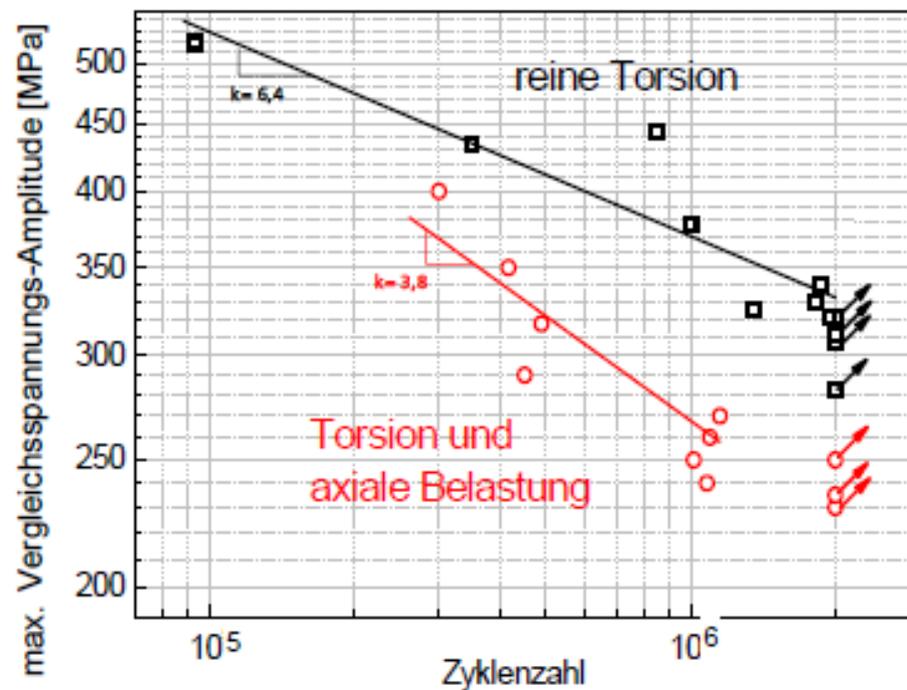


Die Axialkräfte bewirken eine „Aufschirmung“ der Scheibe und eine Biegebelastung der Schweißnaht.



Riss mit stark unterschiedlichen Ausbreitungsrichtungen, hauptsächlich an der Innenseite der Schweißnaht bei mittleren und kleinen $M_a \leq 4,5 \text{ kNm}$

Risswachstum unter multiaxialer Belastung



deutlicher Abfall der Schwingfestigkeit im Zeitfestigkeitsbereich (und vermutlich auch der Dauerfestigkeit) durch Axialkraft

Änderung des Anstiegs der Wöhlerlinie

$k = 6,4$ (Torsion)

$k = 3,8$ (Torsion-Axial)

Abnahme k bei stärker gekerbten Proben [Haibach];

Kerbwirkung der Schweißnaht bei Biegung an der Naht

Erheblicher Einfluss des Axial-bzw. Biegungs- Anteils auf die Schwingfestigkeit der Schweißverbindung