

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

a	Risslänge
a_0	Anfangsrisslänge
$a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, c_2$	elektrische Anschlüsse für die Probenjustage
a_c	Risslänge beim morphologischen Übergangspunkt
a_f	kritische Fehlerlänge
a_{kor}	korrigierte Risslänge
a_{th}	Abstand der Rissspitze von der Kühlfront
A	an der Probe geleistete Arbeit
A_{osc}	Amplitude des oszillierenden Risses
Au	Gold
C_{mech}	mechanische Compliance
Cr	Chrom
d, d_{mij} , d_{ikl}	piezoelektrische Ladungskonstante
d_{Ges} , d_k , d_L	Schichtdicken
d_{GS}	Korngröße
D_i	dielektrische Verschiebung
D_K, D_L	Verschiebungsdichten in Keramik bzw. Luft
E, E_m , E_K , E_L	elektrische Feldstärke
EDZ	ebener Dehnungszustand
E_{KF}	Koerzitivfeldstärke
F	Kraft
$f_{ij}(\Theta)$	Winkelfunktion zur Berechnung der Spannungsverteilung in der Nähe der Rissspitze
G, G_I	Energiefreisetzungsrates Mode I
G_E^{el}	elektrische Energiefreisetzungsrates für den leitenden Riss
G_{Ic}	kritische Energiefreisetzungsrates Mode I
G_{IV}^{el}	elektrische Energiefreisetzungsrates für den nichtleitenden Riss
G_R	Energiefreisetzungsrates bei ansteigender R-Kurve
G^{total}	totale Energiefreisetzungsrates
h	Breite des Spalts zwischen Ofen und Kühlbad
H	“Irwin”-Matrix (Materialmatrix)

k	Vektor, der die Intensitätsfaktoren beinhaltet
k_{GS}	Korrekturfaktor bei der Korngrößenbestimmung
K, K_I	Spannungsintensitätsfaktor Mode I
K_0	intrinsische Bruchzähigkeit
K_E	elektrischer Feldintensitätsfaktor leitender Risse
$K_{I,appl}$	Spannungsintensität durch äußere Last, Mode I
$K_{I,II,III}$	Spannungsintensitätsfaktoren der Moden I, II und III
K_{Ic}	kritischer Spannungsintensitätsfaktor Mode I (Bruchzähigkeit)
K_{IV}	elektrischer Feldintensitätsfaktor nichtleitender Risse
K_R, K_{IR}	Risswiderstand bei ansteigender R-Kurve, Mode I
$K_{R,max}$	Plateauwert der R-Kurve
K_{R0}	Startwert der R-Kurve
L	Probenbreite
L_c	minimale Probenbreite für die Rissausbreitung
LEBM	Linearelastische Bruchmechanik
L_{GS}	Linienlänge bei der Korngrößenbestimmung
L_{osc}	Probenbreite am morphologischen Übergangspunkt
l_p	Prozesszonenlänge bei R-Kurve
MPB	Morphotrope Phasengrenze
N	Rissanzahl
n_k	Anzahl der Korngrenzen
P	elektrische Polarisierung
P_R	remanente Polarisierung
PZT	Blei-Zirkonat-Titanat
R	charakteristische Größe bei Dentritenwachstum
S_{BF}	Bruchfläche
S_{ij}	elastische Dehnung
S_{ijkl}	elastische Nachgiebigkeit
t	Probendicke
T_0, T_1, T_2	Temperaturen
T_C	Curie-Temperatur
T_m	Schmelztemperatur
U	elastisch gespeicherte Energie
U_{el}	elektrische Spannung

U_{ges}	gesamter elektrischer Spannungsabfall
U_K, U_L	Spannungsabfall in der Keramik bzw. Luft
v	Geschwindigkeit des Verschiebens des elektrischen Felds bzw. des Eintauchens in das Kühlbad
V	Verschiebung
V_{GS}	Vergrößerung bei der Korngrößenbestimmung
W	charakteristische Probengröße
$Y(a/W)$	Geometriefunktion zur Berechnung des Spannungsintensitätsfaktors
$Y_{\text{el}}(a/W)$	Geometriefunktion zur Berechnung der Feldintensitätsfaktoren
z	Anzahl der Geraden bei der Korngrößenbestimmung
ΔK_B	Bruchzähigkeitsänderung aufgrund von Rissüberbrückungen
ΔK_F	Bruchzähigkeitsänderung durch Ausbildung einer Frontzone
$\Delta K_{P,\text{max}}$	maximale Bruchzähigkeitsänderung aufgrund von Prozesszonen
ΔK_W	Bruchzähigkeitszuwachs bei R-Kurve
$\Delta K_{W,\text{max}}$	maximale Bruchzähigkeitserhöhung
ΔT	Temperaturdifferenz
ΔT_c	kritische Temperatur für den morphologischen Phasenübergang
$\delta(t)$	thermische Eindringtiefe
ϵ_0	elektrische Dielektrizitätskonstante im Vakuum
$\epsilon_{\text{kl}}, \epsilon_r$	relative Dielektrizitätskonstante
ϵ_R	remanente Dehnung
γ_B	spezifische Bruchenergie
γ_1, γ_2	Dehnungen
λ	Wellenlänge des oszillierenden Risses
$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_p$	charakteristische Größen bei Dentritenwachstum
λ_c	Wellenlänge des oszillierenden Risses am morphologischen Übergang
ν	Querkontraktionszahl
ρ	Rissabstand
σ_{appl}	von außen aufgebraachte mechanische Spannung
σ_f	Bruchfestigkeit
$\sigma, \sigma_{\text{kl}}$	mechanische Spannungen

1 Einleitung

Die Bruchmechanik beschreibt die Vorgänge beim Brechen und Trennen von Festkörpern in zwei oder mehrere Bruchstücke unter Verwendung von analytischen, numerischen und experimentellen Methoden. Griffith [Gri21] führte 1921 eine Theorie ein, in welcher er den Bruch unter statischer Last beschreibt. Seither wurden sowohl auf theoretischer als auch auf experimenteller Seite große Anstrengungen unternommen, um die Versagensmechanismen beim Bruch zu beschreiben. Für die Auslegung von Bauteilen aus spröden Werkstoffen ist vor allem die Information wichtig, wie sich ein Riss bei vorgegebenen Belastungen verhält. Es wird hierbei von einem rissbehafteten Bauteil ausgegangen, in welchem der Riss bis zu einer kritischen Länge wächst und anschließend Materialversagen eintritt. Im Labor werden die zur Auslegung notwendigen Parameter (z. B. Bruchzähigkeit) häufig an Modellproben ermittelt. Dabei werden Experimente und Probengeometrien im allgemeinen so gewählt, dass sich der Riss bis zur kritischen Länge gerade ausbreitet.

Allerdings zeigt es sich, dass gerade Rissausbreitung in realen Bauteilen häufig nicht stattfindet. Ein typisches Beispiel ist eine durch einen Steinschlag beschädigte Windschutzscheibe. Im Laufe der Zeit werden die Risse immer länger, dabei zeigen sich an unvorhergesehenen Stellen Knicke oder Wellen im Risspfad. Daneben sind oftmals auch Rissaufspaltungen zu beobachten. Keramiken, welche einem Thermoschock ausgesetzt werden, zeigen ebenfalls komplexe Rissstrukturen, Bild 1.1a bis Bild 1.1d (aus [Bah86]). Gezeigt sind die Oberflächen von Objektträgern, welche mit unterschiedlichen Temperaturen abgeschreckt wurden. Durch das Aufeinanderstapeln von mehreren Glasstreifen waren die abgebildeten Seiten thermisch isoliert. Dadurch konnte das Temperaturfeld nur von oben und unten in die Probe eindringen. In Abhängigkeit vom Temperaturunterschied (hier zwischen 159 K und 300 K) zeigen sich deutlich unterschiedliche Rissmuster. Jedoch zeigt sich als gemeinsames Merkmal in allen Versuchen die ungerade Rissausbreitung – neben Rissumlenkung sind teilweise auch Rissverzweigungen sichtbar.

Ein besonders eindrucksvolles Beispiel zeigt Bild 1.1e. Der Glaskolben wurde von unten stark erhitzt und dann von innen mit kaltem Wasser abgeschreckt. Neben den gleichmäßigen Rissabständen ist vor allem auch die Form der Rissausbreitung bemerkenswert. Neben der teilweise geraden Rissausbreitung zeigen sich in allen Rissen auch deutliche Oszillationen.

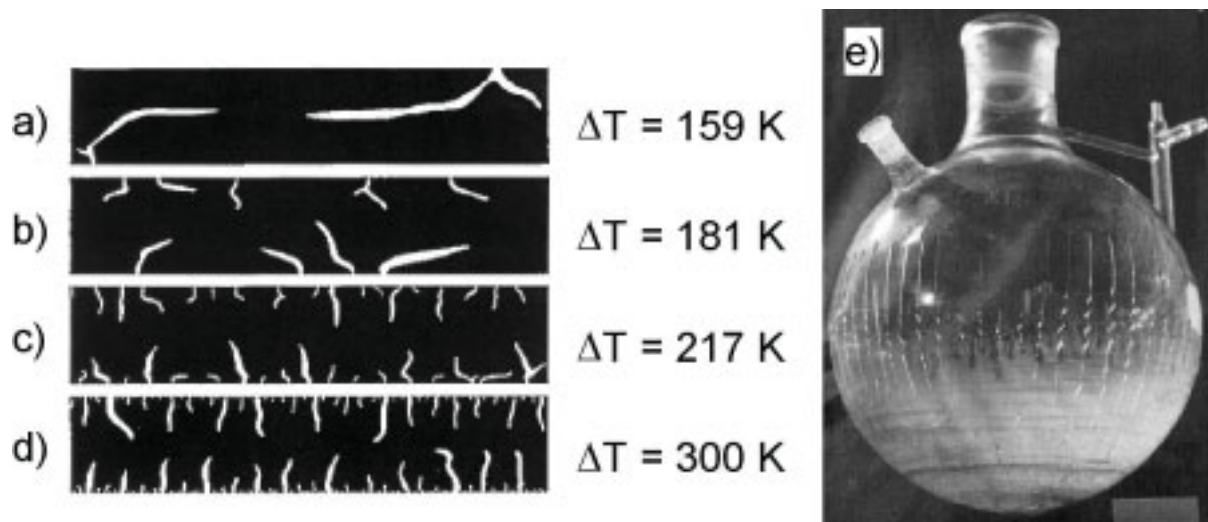


Bild 1.1 a) – d) Typische Thermoschockrissmuster in dünnen Glasstreifen, welche unterschiedlich stark abgeschreckt wurden. Durch thermische Isolierung der sichtbaren Seiten konnte das Temperaturfeld nur von oben und unten eindringen. Deutlich erkennbar ist, dass kaum ein Riss gerade läuft. e) Ein von unten erhitzter Glaskolben wurde mit kaltem Wasser gefüllt. Bemerkenswert sind neben den gleichmäßigen Rissabständen auch die vielen harmonischen Oszillationen.

Um derartige Risse zu bewerten, benötigt man Information darüber, bei welchen äußeren Gegebenheiten diese auftreten. Problematisch ist bei diesen Thermoschockversuchen vor allem der Umstand, dass sich der Riss dynamisch ausbreitet. Hierbei nimmt die Ausbreitungsgeschwindigkeit stetig bis zur Schallgeschwindigkeit des Materials zu, bis es schließlich zum Materialversagen kommt. Sobald die Rissausbreitung beginnt, ist diese durch die große Geschwindigkeit schwierig zu kontrollieren. Dadurch lassen sich die zu ermittelnden Messwerte nicht mit ausreichender Genauigkeit bestimmen, und daher eignen sich diese dynamischen Experimente nur begrenzt zur Ermittlung der kritischen Belastungsparameter, welche die Rissinstabilität (Oszillation, Verzweigungen) hervorrufen.

Um die genannten Probleme zu umgehen, entwickelten Yuse und Sano einen einfach zu realisierenden Versuchsaufbau, welcher einen reproduzierbaren quasi-statischen Rissfortschritt ermöglicht, d. h. die Rissausbreitungsgeschwindigkeit ist deutlich unterhalb der Schallgeschwindigkeit des Materials [YUS93]. Hierbei wird ein dünner Glasstreifen, der in einem Ofen zunächst erwärmt wird, mit einer definierten Geschwindigkeit in ein Wasserbad getaucht (Bild 1.2b). Der so entstehende Temperaturgradient bewirkt aufgrund der Schrumpfung im Wasserbad thermische Spannungen in der Probe, welche zunächst die Rissinitiation und anschließend den Rissfortschritt erzwingt. Der Vorteil bei dieser Art der Versuchsdurchführung ist, dass die unterschiedlichen Rissmorphologien (gerade, oszillierend,