

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 |
| $U_{\text{K}}, U_{\text{L}}$ | 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 |
| $\Delta K_{\text{P,max}}$ | maximale Bruchzähigkeitsänderung aufgrund von Prozesszonen |
| ΔK_{W} | Bruchzähigkeitszuwachs bei R-Kurve |
| $\Delta K_{\text{W,max}}$ | maximale Bruchzähigkeitserhöhung |
| ΔT | Temperaturdifferenz |
| ΔT_{c} | kritische Temperatur für den morphologischen Phasenübergang |
| $\delta(t)$ | thermische Eindringtiefe |
| ϵ_0 | elektrische Dielektrizitätskonstante im Vakuum |
| $\epsilon_{\text{kl}}, \epsilon_{\text{r}}$ | relative Dielektrizitätskonstante |
| ϵ_{R} | remanente Dehnung |
| γ_{B} | spezifische Bruchenergie |
| γ_1, γ_2 | Dehnungen |
| λ | Wellenlänge des oszillierenden Risses |
| $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_{\text{p}}$ | 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.

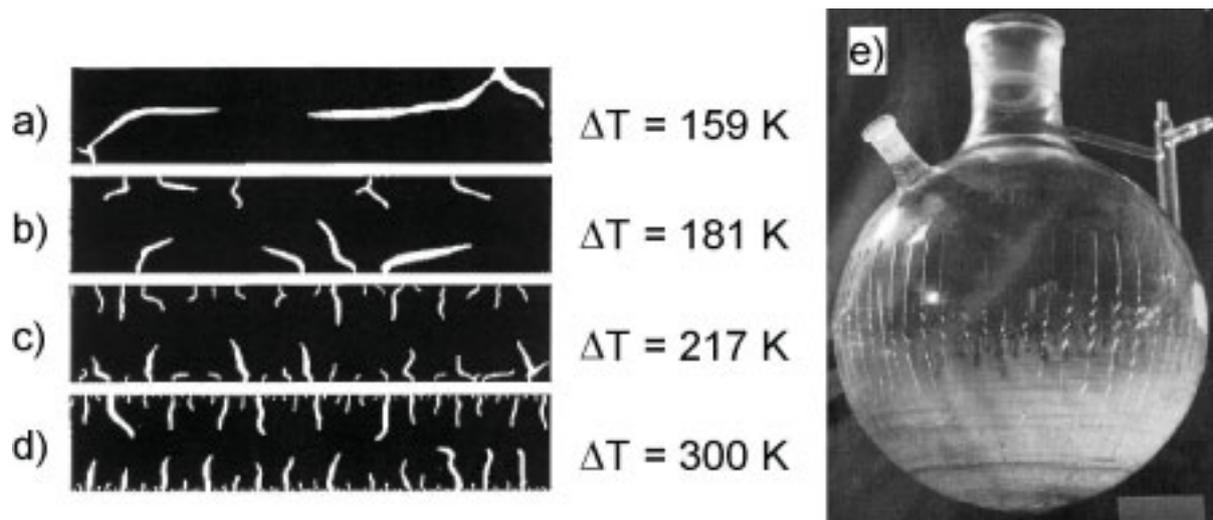


Bild 1.1 a) – d) Typische Thermoschockrissmuster in dünnen Glasstreifen, welche unterschiedlich stark abgeschreckt wurden. Durch thermische Isolierung der sichtbaren Seiten konnte das Temperaturfeld nur von oben und unten eindringen. Deutlich erkennbar ist, dass kaum ein Riss gerade läuft. e) Ein von 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,