

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.

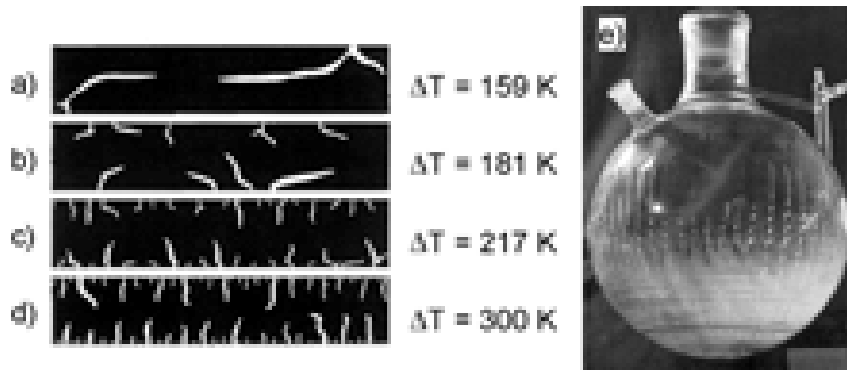


Bild 1.1 a) – d) Typische Thermoschockrissmuster in dünnen Glasstreifen, welche unterschiedlich stark abgeschreckt wurden. Durch thermische Isolierung der sichtbaren Seiten konnte das Temperaturfeld nur von oben und unten eindringen. Deutlich erkennbar ist, dass kaum ein Riss gerade läuft. e) Ein von 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 Rissinitiierung und anschließend den Rissfortschritt erzwingt. Der Vorteil bei dieser Art der Versuchsdurchführung ist, dass die unterschiedlichen Rissmorphologien (gerade, oszillierend,

aufspaltend) direkt in Abhängigkeit der Belastungsparameter beobachtet werden können. Die Belastungen können hierbei über einen weiten Bereich mit großer Genauigkeit variiert werden. Bild 1.2a zeigt einen Freihandversuch mit einem Objektträger, der auf 250 °C erwärmt und anschließend in Wasser eingetaucht wurde. Wie in Bild 1.1e zeigt sich hier Mehrfachrissausbreitung mit deutlichen Oszillationen.

Anders als bei den oben erwähnten Thermoschockexperimenten an Glas wurde in dieser Arbeit die quasi-statische Rissausbreitung in einer ferroelektrischen Keramik untersucht. Die zuverlässige Funktion von ferroelektrischen Keramiken als Aktoren und Sensoren ist eine der wichtigsten Voraussetzungen für deren erfolgreichen Einsatz als Bauteil. Ein dabei häufig auftretendes Problem ist die durch elektrische Feldinhomogenitäten induzierte Rissbildung. Ähnlich wie Temperaturgradienten aufgrund der Wärmeausdehnung führen elektrische Feldinhomogenitäten zu Dehnungsinkompatibilitäten aufgrund der elektromechanischen Kopplung dieser Keramiken. Die dabei entstehenden komplexen Rissmuster zeigen Knicke, Wellen oder auch Rissaufspaltungen. Die entstandenen Risspfade im Bauteil sind dabei nicht nur mechanische, sondern auch elektrische Schwachstellen, da sie z.B. durch Silbermigration entlang der Rissoberflächen zum dielektrischen Durchschlag zwischen zwei Elektroden und damit zum Versagen des Bauteils führen können. Das Verständnis der durch elektrische Felder induzierten Rissmorphologie ist deswegen von großer praktischer Bedeutung für die zuverlässige Auslegung ferroelektrischer Bauteile. Um derartige Risse zu bewerten, wurde im Rahmen dieser Arbeit ein neuer experimenteller Aufbau entwickelt, welcher eine kontrollierte Rissausbreitung unter quasi-statischen Bedingungen ermöglicht.

Dabei wird eine ferroelektrische Keramikprobe teilweise mit Elektroden bedeckt und mit einem elektrischen Feld angesteuert, Bild 1.2c. Dies bewirkt eine Ausdehnung in Feldrichtung und eine Querkontraktion senkrecht dazu. Dadurch entstehen Dehnungsinkompatibilitäten an der Grenzfläche, welche wiederum mechanische Spannungen verursachen. Durch stetige Vergrößerung der Elektrodenfläche mit der Geschwindigkeit v wächst der Riss mit einem charakteristischen Abstand a vor der Polungsfront durch das Material. Bild 1.2d zeigt eine PZT-Probe, bei der das elektrische Feld von unten über die Probe verschoben wurde. Die beiden eingesägten Kerben dienen als Startrisse, aus denen die elektrisch getriebenen Risse herauslaufen.

Es zeigt sich hier eine gewisse Analogie zwischen der ferroelektrischen Schrumpfung infolge eines wirkenden elektrischen Felds und der thermischen Schrumpfung durch Thermoschockbelastung.

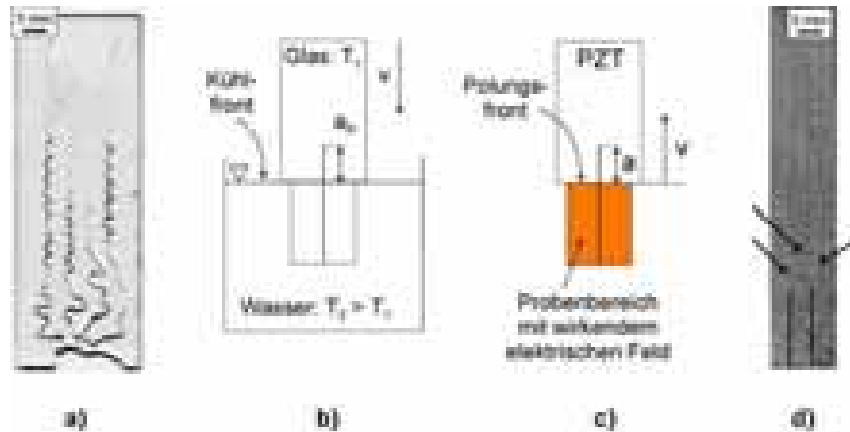


Bild 1.2 a) Freihandversuch an einem Objektträger aus Glas, welcher bei 250 °C in ein Wasserbad getaucht wurde. Deutlich sind Rissoszillationen erkennbar. b) Prinzip der quasi-statischen Rissausbreitung in Glas: Ein erwärmter Glasstreifen wird in ein kaltes Wasserbad mit der Geschwindigkeit v getaucht. Es entstehen thermische Spannungen in der Umgebung der Kühlfront, welche den Riss im Abstand a_{th} durch das Material treiben. c) Prinzip der quasi-statischen Rissausbreitung in PZT: Das Anlegen eines elektrischen Felds bewirkt inelastische Dehnungen und somit mechanische Spannungen in der Umgebung der Polungsfront. Durch Vergrößerung der Elektrodenfläche mit der Geschwindigkeit v wird der Riss im Abstand a vor der Polungsfront durch das Material getrieben. d) Mehrfachrissausbreitung (Pfeile) in PZT. Das Feld wurde von der Unterseite her über die Probe geschoben. Die beiden Kerben dienen als Startriss.

Die **Ziele dieser Arbeit** sind:

- Konstruktion eines experimentellen Aufbaus, welcher das kontrollierte Verschieben des elektrischen Felds über die Probenlänge und somit quasi-statische Rissausbreitung ermöglicht.
- An ferroelektrischen Proben mit unterschiedlichen Geometrien und Polungszuständen werden gerade und oszillierende Rissausbreitung untersucht. Weiterhin werden auch Doppelrisse durch das Material getrieben.
- Die charakteristische Risslänge a (entspricht Abstand Polungsfront – Risspitze) wird direkt als Funktion des angelegten elektrischen Felds bestimmt. Diese Untersuchungen werden an gepolten sowie ungepolten Proben durchgeführt.
- Die kritische Last wird für den Übergang von gerader Rissausbreitung zu oszillierender Rissausbreitung für den Einfachriss ermittelt. Bei der sich einstellenden Oszillation wird die kritische Wellenlänge λ_C ermittelt. Beide Fälle werden für unterschiedliche Probengeometrien und Polungszustände untersucht.
- Die Ergebnisse der Einzel- und Doppelrissausbreitung werden in einem morphologischen Phasendiagramm zusammengefasst.

Im Rahmen dieser Arbeit besteht eine enge Kooperation mit der TU Dresden¹. Die an der TUHH experimentell ermittelten Werte werden mit der dort entwickelten Theorie verglichen [Nie02].

¹ Zusammenarbeit mit Dr. V.-B. Pham, Dr. H.-A. Bahr und Prof. H. Balke, Institut für Festkörpermechanik, TU Dresden.