# Kurzbeitrag

DK 539.42:539.219.2:666.151:620.171.33

## Umgebungseffekte beim Bruch von dynamisch beanspruchten Glasplatten

## Environmental effects during the fracture of dynamically loaded glass plates

## Effets de l'environnement lors de la fracture de plaques de verre sous l'effet de sollicitations dynamiques

Von Martin Schinker; Walter Döll und George W. Weidmann, Freiburg i. Br.

(Zusammenfassung eines Vortrags auf dem HVG-Kolloquium „Festigkeit von Glas und Glasgegenständen" am 26. Oktober 1976 in Frankfurt (Main))

(Mitteilung aus dem Institut für Festkörpermechanik, Freiburg i. Br.)

(Eingegangen am 28. Juli 1977)

Der festigkeitsmindernde Einfluß von wäßriger Umgebung auf die Rißerweiterung und -ausbreitung von quasistatisch beanspruchten Glasplatten läßt sich am deutlichsten durch den bekannten experimentellen Zusammenhang zwischen der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Rißspitze $v_b$ und der spezifischen Bruchenergie G darstellen (siehe z. B. [1 bis 3]). (Die spezifische Bruchenergie G ist dabei diejenige Energie, die zur Erweiterung des Risses um eine Flächeneinheit aufzuwenden ist und die von der elastisch gedehnten Probe angeliefert wird.) So zeigen die Messungen, daß die relativ geringfügige Variation der spezifischen Bruchenergie von 1 bis etwa 50 J/m² ein kontinuierliches Ansteigen der Bruchgeschwindigkeit um mehr als 13 Zehnerpotenzen, nämlich von 0,1 nm/s ( = 1 Å/s) bis 1,5 km/s bewirkt. Unterhalb eines bestimmten Wertes von G, der bei etwa 8 bis 9 J/m² liegt, hat die Umgebung insbesondere bei Anwesenheit von Wassermolekülen einen sehr starken Einfluß auf das Verhalten zwischen $v_b$ und G, was sich in einer Verschiebung der $v_b$-G-Kurven zu kleineren G-Werten zeigt. Mit zunehmendem Wassergehalt der Umgebung münden diese umgebungsbeeinflußten Kurven bei erhöhten Rißgeschwindigkeiten in die gemeinsame, sehr steil ansteigende, umgebungsunbeeinflußte $v_b$-G-Kurve ein; so liegt bei einer getrockneten, inerten Flüssigkeit (wie z. B. Paraffinöl oder Siliconöl) diese Übergangsgeschwindigkeit bei etwa 10 nm/s ( = 100 Å/s), hingegen in Wasser bei etwa 0,1 m/s [2].

Bei dynamischer Beanspruchung jedoch, wie sie z. B. durch Beschuß, Schlag oder Wellenvorgänge erzeugt wird, ist die äußere Spannung an dem beanspruchten Werkstück nicht mehr konstant, sondern eine Funktion der Zeit. Einem vorhandenen Riß steht die für die Rißerweiterung benötigte Bruchenergie innerhalb einer so kurzen Zeitspanne zur Verfügung, daß chemische Umgebungen mit ihren vergleichsweise langsamen Transportgeschwindigkeiten im engen Riß und niedrigen Reaktionsgeschwindigkeiten an der Rißspitze keinen Einfluß mehr auf die bruchauslösende Energie und den weiteren Bruchverlauf haben sollten.

Ein wesentliches Problem bei Bruchuntersuchungen unter dynamischer Beanspruchung ist die Bestimmung der zu jedem Zeitpunkt der Rißausbreitung herrschenden Spannungsamplitude, deren Kenntnis notwendig ist, um Aussagen über die den Bruchvorgang bestimmenden spezifischen Bruchenergien machen zu können. Zur Erzeugung eines unter dynamischer Belastung stehenden Bruchablaufs wurde eigens eine neuartige Meßmethode entwickelt [4], mit deren Hilfe in einer Schlagapparatur durch das Auftreffen eines Fallgewichts auf einer Scheibe und Reflexion des entstandenen Druckimpulses ein Zugimpuls hervorgerufen wird, der die Probe beim Durchlaufen belastet. Der örtliche und zeitliche Verlauf dieses Impulses $\sigma(t)$ wurde längs der Probe mit Hilfe von Dehnungsmeßstreifen vermessen; dabei ergaben sich reproduzierbare zeitliche Spannungsanstiege von etwa 50 GPa·s$^{-1}$. An Proben, die mit scharfen Anrissen vorgekerbt waren, wurde bei ausreichender Impulshöhe $\sigma_c$ der Bruchvorgang ausgelöst, und der Riß verlängerte sich mit der ansteigenden Geschwindigkeit $v_b(t)$. Die Lage der Rißspitze als Funktion der Zeit a(t) wurde mit Hilfe der Hochfrequenzkinematografie und der Ultraschallfraktografie [5] gemessen. Diese zunächst getrennt gemessenen zeitlichen Funktionen $\sigma(t)$ und a(t) wurden durch eine Markierung an einem bestimmten Ort des Rißweges durch eine Laser-Lichtschranke miteinander verknüpft, so daß der Zusammenhang zwischen der Rißgeschwindigkeit $v_b$ und der spezifischen Bruchenergie G für den unter dynamischer Beanspruchung ablaufenden Bruchvorgang bestimmt werden konnte.

An seitlich gekerbten Tafelglasplatten (Abmessungen (400 × 50 × 4) mm) wurde der unter dieser dynamischen Beanspruchung erzeugte Bruchgeschwindigkeitsverlauf mit Hilfe der obigen Methode bestimmt. Die Auswertung von Versuchen, die in normaler Laborluft vorgenommen wurden, zeigte das zunächst unerklärliche Ergebnis, daß zwischen der Anfangsrißlänge $a_0$ und der bruchauslösenden Spannungsimpulshöhe $\sigma_c$ kein eindeutiges Verhältnis vorlag, wie unter der Annahme einer materialspezifischen kritischen dynamischen Bruchenergie zu erwarten gewesen wäre. Eine sorgfältige Überprüfung aller experimentellen Bedingungen ließ schließlich den Schluß zu, daß nur eine Variation in der Umgebung, und zwar der Luftfeuchte, diese Diskrepanz hervorgerufen haben kann. Die daraufhin an feuchten Proben, die nach der Anrißerzeugung mehrere Tage lang in Wasser gelagert waren, vorgenommenen dynamischen Versuche führten zu dem ebenfalls unerwarteten Ergebnis, daß die für instabile Rißausbreitung maßgebende kritische dynamische Bruchenergie $G_{cdyn}$ nasser Proben ganz erheblich höher war als diejenige Energie, die bei trockenen Proben gleicher Anfangsrißlänge gemessen wurde. Das bedeutet jedoch, daß umgebendes Wasser bei dynamischer Beanspruchung die Rißerweiterung behindert, hingegen bei statischer Beanspruchung erleichtert. Entsprechende dynamische Versuche an Proben, deren Risse mit Siliconöl (Viskosität 0,05 Pa·s) gefüllt waren, sollten zur Beantwortung der Frage beitragen, ob der Umgebungseinfluß auf die Rißausbreitung wie bei quasistatischer Beanspruchung ein chemisch-korrosiver Effekt ist oder ob es sich bei der Behinderung der Rißausbreitung durch flüssige Umgebungen um einen physikalischen Effekt (z. B. Adhäsion oder Kavitation) handelt. Diese Messungen ergaben jedoch ebenfalls unerwartet hohe kritische dynamische Bruchenergien, die etwa gleich hoch waren wie diejenigen bei nasser Umgebung, obwohl aus statischen Messungen bekannt ist, daß inerte Flüssigkeiten (wie z. B. Siliconöl) die Rißerweiterung in Glas nur unterhalb einer sehr niedrigen Bruchgeschwindigkeit beeinflussen (siehe oben).

Noch deutlicher unterscheiden sich bei dynamischer Beanspruchung die Effekte unter dem Einfluß trockener bzw. flüssiger Umgebung, wenn man den Bruchgeschwindigkeitsverlauf betrachtet, der bei Verwendung der Methode der Ultraschallfraktografie unmittelbar aus den Bruchflächen abzulesen ist. So zeigt Bild 1a eine interferenzmikroskopische Aufnahme einer durch 1-MHz-Ultraschallwellen modulierten Bruchfläche einer Glasprobe, die unter trockenen Umgebungsbedingungen gelagert und unter dynamischer Beanspruchung zerrissen worden ist. Der zunehmende Abstand der Maxima der sägezahnförmigen bzw. wellenförmigen Interferenzlinien weist auf die im Bild von links nach rechts ansteigende Rißgeschwindigkeit hin. Man erkennt, daß unmittelbar hinter dem Anfangsriß der Länge $a_0$ der Bruch innerhalb der ersten $\mu$s auf eine Bruchgeschwindigkeit von etwa 10 m/s beschleu-

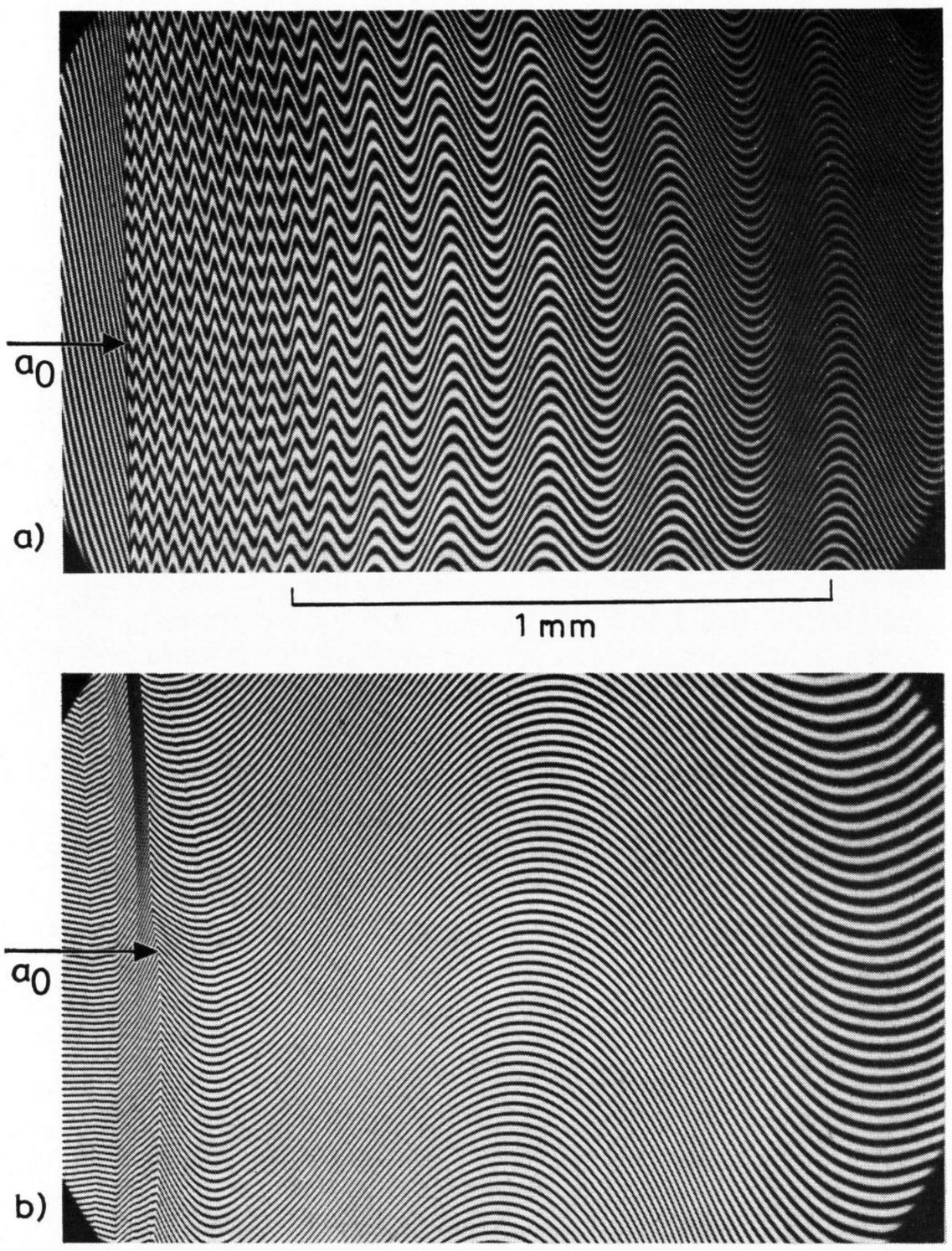


Bild 1. Interferenzmikroskopische Aufnahmen von ultraschallmodulierten Glasbruchflächen, die im dynamischen Zugversuch zerrissen wurden; a) trockene Probenumgebung; b) feuchte Umgebung.

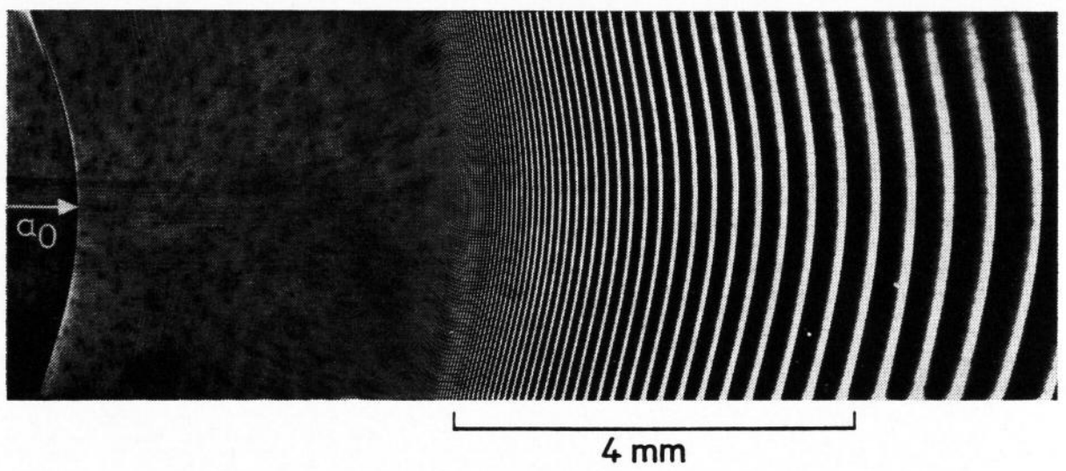


Bild 2. Ultraschallmodulierte Bruchfläche einer unter quasistatischer Beanspruchung zerrissenen trockenen Glasplatte.

nigt wurde. Ein davon sich deutlich unterscheidendes Bruchverhalten unter feuchter bzw. inert-flüssiger Umgebung zeigt das interferenzmikroskopische Bild einer Bruchfläche (Bild 1 b), die ebenfalls durch 1-MHz-Ultraschall moduliert wurde; innerhalb der ersten $\mu$s nach Bruchbeginn ($a_0$) beschleunigte der Riß auf nahezu Bruchhöchstgeschwindigkeit (1500 m/s).

Zum Vergleich zu diesem Bruchverhalten unter dynamischer Belastung zeigt Bild 2 eine auflichtmikroskopische Aufnahme einer Glasbruchfläche, die unter quasistatischer Beanspruchung und gleichzeitiger Überlagerung von 1-MHz-Ultraschall erzeugt wurde. Unter quasistatischer Beanspruchung beschleunigt der Riß sowohl bei trockener als auch bei feuchter Umgebung vergleichsweise langsam; nach etwa 1 s nach Bruchbeginn ($a_0$) erreicht der Bruch eine Geschwindigkeit von lediglich 1 m/s, und aus Bild 2 ist zu entnehmen, daß die Bruchgeschwindigkeit an der rechten Bildkante etwa 400 m/s betragen hat.

Während bei quasistatischen Zugversuchen nach Erreichen der Bruchhöchstgeschwindigkeit Bruchgabelung nur dann auftritt, wenn das Verhältnis Anfangsrißlänge $a_0$ zu Probenbreite b nicht größer als etwa 0,05 ist, wird bei den hier beschriebenen dynamischen Schlagversuchen an feucht- und inert-feuchtgelagerten Proben Bruchgabelung bis zu Werten von $a_0/b = 0{,}5$ beobachtet.

Diese Ergebnisse der Bruchuntersuchung an Glasplatten unter dynamischer Beanspruchung weisen bereits darauf hin, daß es sich bei den beschriebenen Umgebungseinflüssen in feuchter und inert-flüssiger Umgebung, aber auch bei der Kondensation von Luftfeuchtigkeit in nicht ganz ausgetrockneten Rissen um einen physikalischen Effekt handelt, bei dem eine zusätzliche Zerreißspannung aufzubringen ist, wenn der Riß sich erweitern soll. Über die Messung der Größe dieser zusätzlichen Spannung soll in einer weiteren Veröffentlichung berichtet werden.

---

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft, Bonn-Bad Godesberg, für die finanzielle Unterstützung dieser Untersuchungen und Herrn J. Brormann für die Hilfe bei der Durchführung der Experimente.

**Literatur**

[1] Wiederhorn, S. M.: Environmental stress corrosion cracking of glass. In: R. W. Staehle (Hrsg.): Proc. of Intern. Corrosion Fatique Conference, University of Connecticut, June 14 – 18, 1971. (1972). S. 731 – 742.

[2] Weidmann, G. W. und Holloway, D. G.: Slow crack propagation in glass. Physics Chem. Glasses **15** (1974) S. 116 – 122. [Ref. Glastechn. Ber. **48** (1975) 75R1391.]

[3] Richter, H.: Experimentelle Untersuchungen zur Rißausbreitung in Spiegelglas im Geschwindigkeitsbereich $10^{-3}$ bis $5 \cdot 10^3$ mm/s. Univ. Karlsruhe (TH), Fakultät für Chemie-Ingenieurwesen, Dr.-Ing.-Diss. v. 6. 7. 1974. — Karlsruhe 1974. [Ref. Glastechn. Ber. **50** (1977) Nr. 7, 77R1253.]

[4] Döll, W.; Schinker, M. G. und Weidmann, G. W.: Measurement of fast crack propagation in glass under dynamic loading. In: Taplin, D. M. R. (Hrsg.): Proc. IV. Intern. Conf. on Fracture, Waterloo (Canada) 1977. Vol. 3, S. 965 – 970.

[5] Kerkhof, F. und Dreizler, H.: Untersuchung des Bruchvorgangs mittels Ultraschall. Glastechn. Ber. **29** (1956) S. 459 – 470.

77R1501