

## Der Einfluß der Luftfeuchte auf die spezifische Bruchenergie in Spiegelglas bei konstant gehaltenen kleinen Bruchgeschwindigkeiten

H. Richter, Institut für Festkörpermechanik der Fraunhofer-Gesellschaft e. V., Freiburg i. Br., Rosastr. 9

The influence of an environment, e.g. the humidity, on crack propagation in glass is time-dependent. This implies that it is stronger at slow crack velocities and vanishes at higher crack velocities. Moreover, it is expected that this environmental influence could depend also on crack acceleration, a factor which has not yet been investigated.

To study this influence a tensile testing machine was built which can maintain the crack velocity constant in single-edge-notched glass specimens in the range between  $10^{-4}$  and about 1 mm/s. This machine is controlled automatically such that the crack velocity is measured continuously by photoelectrical means, and where differences between the preset and actual crack velocity are fed back to the machine where they are minimized automatically by load adjustment. The tensile loading is applied by an electromagnet. The tests are run in an environmental chamber in which humidity and temperature can be regulated between dew points of  $-35$  to  $+90^{\circ}\text{C}$ , and  $-10$  to  $90^{\circ}\text{C}$ , respectively. The precrack of a length of 3-5 mm in the specimen of dimensions 18x4x4 mm is extended to 15-20 mm at preset constant crack velocity. Load and crack-length are registered continuously (see Fig.1). Preliminary results are shown in Fig.2. These results obtained using constant crack velocities are as yet in agreement with those reported by Wiederhorn (1) and Schönert, Umhauer, Klemm (2), who studied environmental influence on slow but accelerated crack growth.

Bei dem Einfluß des umgebenden Mediums, also auch dem der Luftfeuchte, auf die Bruchausbreitung handelt es sich um einen zeitabhängigen Vorgang: je schneller sich die Rißspitze bewegt, desto weniger Zeit hat ein Medium, um mit der jeweiligen Rißspitze in Reaktion treten zu können.

Bisher wurde der Einfluß eines umgebenden Mediums, insbesondere derjenige von Wasserdampf auf die Bruchausbreitung in Glas durchweg bei sich beschleunigender Rißausbreitung untersucht, z.B. bei kleinen Bruchgeschwindigkeiten von Wiederhorn (1), Schönert, Umhauer und Klemm (2), Varner (3), und bei höheren Bruchgeschwindigkeiten von Kerkhof, Richter (4). Bei solchen Untersuchungen hängt jedoch die Zeit, die das umgebende Medium an der Rißspitze einwirken kann nicht nur von der jeweiligen Geschwindigkeit der Rißausbreitung, sondern auch von deren Beschleunigung ab.

In der vorliegenden Arbeit soll eine Rißbeschleunigung ausgeschlossen und der Einfluß von Wasserdampf auf die Bruchausbreitung in Glas unter der eindeutigeren Bedingung konstanter, vorgebbarer Bruchgeschwindigkeit untersucht werden.

Zur Durchführung der Versuche wurde eine Zerreißmaschine aufgebaut, die es ermöglicht, die Rißgeschwindigkeit in Zugzerreißproben im zu untersuchenden Geschwindigkeitsbereich von etwa  $10^{-4}$  bis etwa 1 mm/s konstant zu halten. Die Zerreißmaschine arbeitet nach dem Prinzip des Regelkreises: Die Regelgröße (Bruchgeschwindigkeit) wird laufend gemessen; Abweichungen zwischen gemessener und vorgegebener Bruchgeschwindigkeit werden so auf die Stellgröße (Zugkraft an der Zerreißprobe) rückgekoppelt, daß die Abweichungen zum Verschwinden gebracht werden. Die Messung der Bruchgeschwindigkeit erfolgt dabei photoelektrisch; die Rückkopplung geschieht über einen stetigen elektronischen Regler. Dieser Regler steuert ein stromprogrammierbares Netzgerät an, das einen Zugmagneten speist. Dadurch können die notwendigen Änderungen der Belastung der Probe schnell genug erzielt werden.

Die Zerreißversuche werden in einem Prüfraum durchgeführt, in dem Luftfeuchten vom Taupunkt etwa  $-35$  bis  $90^{\circ}\text{C}$  und Temperaturen zwischen  $-10$  und  $+90^{\circ}\text{C}$  eingestellt werden können.

Die Zerreißproben sind Spiegelglasplatten der Dimensionen  $180 \times 40 \times 4$  mm. In jeder Probe wird in der Mitte einer Längsschmalseite durch thermisch induzierte Spannungen (s.z.B. (5) ) ein Anfangsriß von 3 bis 5 mm Länge erzeugt.

Dieser Riß wird unter definierten Temperatur- und Luftfeuchtebedingungen in der Zerreißmaschine auf 15 bis 20 mm Länge, d.h. bis zu einem Verhältnis von Rißlänge  $a$  zu Plattenbreite  $b$  von etwa 0,5 bei konstant gehaltener Bruchgeschwindigkeit verlängert.

Der Verlauf der hierfür notwendigen Zugkraft sowie die Rißlänge werden mit einem Schreiber registriert. Die Abbildung 1 zeigt ein solches Schreiberdiagramm mit dem Kraftverlauf (obere Kurve) und der Meßgröße für den Rißweg, bei der eine Periode einem Rißweg von 2,00 mm entspricht. Der Zerreißversuch wird nach Erreichen der gewünschten Rißlänge abgebrochen und die Probe in der Rißebebene durch Biegen von Hand zerteilt. Die Stelle  $a_e$ , bis zu der der Riß im Zerreißversuch gelaufen ist, ist dann auf der Bruchfläche deutlich als Haltelinie zu erkennen.

Aus den nun bekannten Größen der Rißlänge  $a_e$  am Ende eines Zerreißversuches, der konstant gehaltenen Bruchgeschwindigkeit  $v_b$  und dem mit dieser Geschwindigkeit durchlaufenen Rißweg  $s$  läßt sich für jeden Zeitpunkt des Zerreißversuches die Rißlänge  $a_i$  und die Zugkraft  $f_i$  bestimmen.

Je Versuch werden rund 20 solche Wertepaare ( $a_i, f_i$ ) bestimmt.

Für jedes dieser Wertepaare wird die spezifische Bruchenergie  $G$  berechnet zu:

$$G_i = \left(\frac{f_i}{b \cdot d}\right)^2 \cdot \frac{a_i}{E} \cdot F\left(\frac{a_i}{b}\right) = \frac{\sigma_i^2 \cdot a_i}{E} \cdot F\left(\frac{a_i}{b}\right).$$

Hierin ist, abgesehen von den bereits eingeführten Größen  $a_i$ ,  $f_i$ ,  $b$ :

$d$  = Plattendicke,  $E$  = Elastizitätsmodul.

$F(\frac{a_i}{b})$  ist eine Korrekturfunktion, durch die die spezielle Geometrie der Probe berücksichtigt wird, hier die endliche Platte der Breite  $b$  mit Seitenriß (Brown, Srawley (6)).

Der Mittelwert der rund 20 aus einem Zerreißversuch ermittelten  $G_i$ -Werte ist mit einem Variationskoeffizienten von durchschnittlich 3% behaftet. Die Abweichungen verschiedener bei gleichen Bedingungen durchgeführten Versuche ist etwas größer.

Da aus jedem Versuch eine große Anzahl von Wertepaaren ( $a_i$ ,  $f_i$ ) vorliegt, kann gemäß der Forderung  $\sigma_i^2 \cdot a_i \cdot F(a_i/b) = \sigma_{i+1}^2 \cdot a_{i+1} \cdot F(a_{i+1}/b)$  auch der Verlauf der Korrekturfunktion  $F(a/b)$  bestimmt werden.

Vorläufige Ergebnisse für die Abhängigkeit der spezifischen Bruchenergie  $G$  von der Bruchgeschwindigkeit  $v_b$  bei einer Temperatur von 24°C und Luftfeuchten entsprechend Taupunkten von -9,5, + 9,5 und + 19,3°C sind in Abb. 2 zu sehen. Ein Vergleich zeigt, daß sich zwischen diesen Ergebnissen und denjenigen von Wiederhorn (1) bzw. Schönert, Umhauer und Klemm (2) noch keine signifikanten Unterschiede ergeben haben.

Literatur

- (1) Wiederhorn, S.M.: J.Americ.Ceram.Soc. 50 (1967) 407-14
- (2) Schönert, K.; Umhauer, H.; Klemm, W.: Proc.of the Second Intern.Conf.on Fracture, Brighton 1969, S.474-482
- (3) Varner, J.R.; Frchette, V.D.: J.appl.Phys. 42 (1971) 1983-4
- (4) Kerkhof, F.; Richter, H.: Proc.of the Second Intern. Conf. on Fracture, Brighton 1969, S.463-73
- (5) Küppers, H.: Intern.J.Fract.Mech. 3 (1967) 13-17
- (6) Brown, W.F.; Srawley, J.E.: Plane strain crack toughness testing. ASTM Special Techn.Publ. Nr. 410 Philadelphia 1967, S. 12

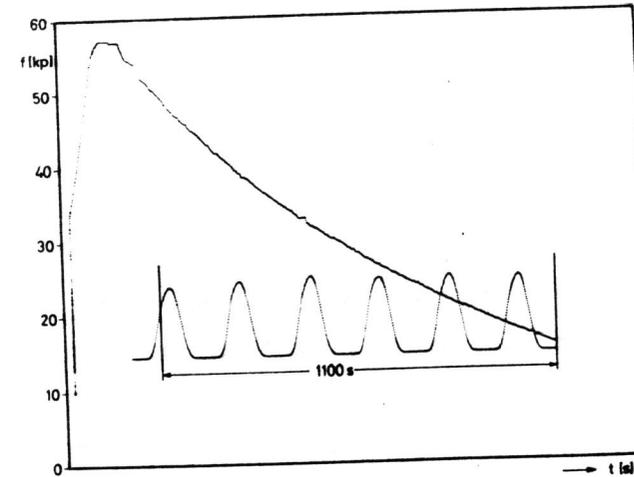


Abb. 1: Kraftverlauf bei der Verlängerung eines Risses um ca. 11,3 mm bei konst. Bruchgeschwindigkeit von 0,010 mm/s (obere Kurve). Eine Periode der unteren Kurve entspricht einem Rißweg von 2,00 mm

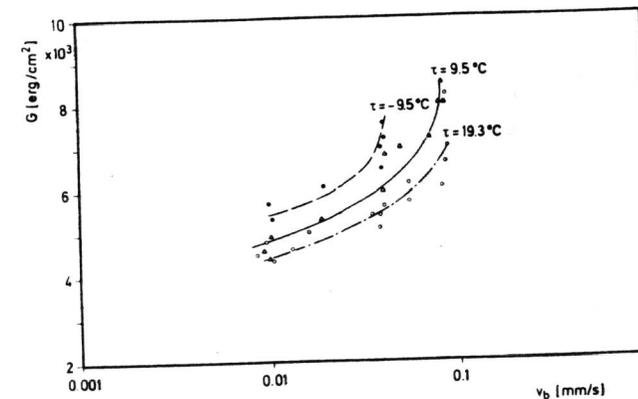


Abb. 2: Abhängigkeit der spez. Bruchenergie von der Bruchgeschwindigkeit bei einer Temperatur von 25°C und verschiedenen Luftfeuchten.

Bei dem Einfluß des umgebenden Mediums, also auch dem der Luftfeuchte, auf die Bruchausbreitung handelt es sich um einen zeitabhängigen Vorgang: je schneller sich die Rißspitze bewegt, desto weniger Zeit hat ein Medium, um mit der jeweiligen Rißspitze in Reaktion treten zu können.

Bisher wurde der Einfluß eines umgebenden Mediums, insbesondere derjenige von Wasserdampf auf die Bruchausbreitung in Glas durchweg bei sich beschleunigender Rißausbreitung untersucht, z.B. bei kleinen Bruchgeschwindigkeiten von Wiederhorn (1), Schönert, Umhauer und Klemm (2), Varner (3), und bei höheren Bruchgeschwindigkeiten von Kerkhof, Richter (4). Bei solchen Untersuchungen hängt jedoch die Zeit, die das umgebende Medium an der Rißspitze einwirken kann nicht nur von der jeweiligen Geschwindigkeit der Rißausbreitung, sondern auch von deren Beschleunigung ab.

In der vorliegenden Arbeit soll eine Rißbeschleunigung ausgeschlossen und der Einfluß von Wasserdampf auf die Bruchausbreitung in Glas unter der eindeutigeren Bedingung konstanter, vorgegebener Bruchgeschwindigkeit untersucht werden.

Zur Durchführung der Versuche wurde eine Zerreißmaschine aufgebaut, die es ermöglicht, die Rißgeschwindigkeit in Zugzerreißproben im zu untersuchenden Geschwindigkeitsbereich von etwa  $10^{-4}$  bis etwa 1 mm/s konstant zu halten. Die Zerreißmaschine arbeitet nach dem Prinzip des Regelkreises: Die Regelgröße (Bruchgeschwindigkeit) wird laufend gemessen; Abweichungen zwischen gemessener und vorgegebener Bruchgeschwindigkeit werden so auf die Stellgröße (Zugkraft an der Zerreißprobe) rückgekoppelt, daß die Abweichungen zum Verschwinden gebracht werden. Die Messung der Bruchgeschwindigkeit erfolgt dabei photoelektrisch; die Rückkopplung geschieht über einen stetigen elektronischen Regler. Dieser Regler steuert ein stromprogrammierbares Netzgerät an, das einen Zugmagneten speist. Dadurch können die notwendigen Änderungen der Belastung der Probe schnell genug erzielt werden.

Die Zerreißversuche werden in einem Prüfraum durchgeführt, in dem Luftfeuchten vom Taupunkt etwa  $-35$  bis  $90^{\circ}\text{C}$  und Temperaturen zwischen  $-10$  und  $+90^{\circ}\text{C}$  eingestellt werden können.

Die Zerreißproben sind Spiegelglasplatten der Dimensionen  $180 \times 40 \times 4$  mm. In jeder Probe wird in der Mitte einer Längsschmalseite durch thermisch induzierte Spannungen (s.z.B. (5)) ein Anfangsriß von 3 bis 5 mm Länge erzeugt.

Dieser Riß wird unter definierten Temperatur- und Luftfeuchtebedingungen in der Zerreißmaschine auf 15 bis 20 mm Länge, d.h. bis zu einem Verhältnis von Rißlänge  $a$  zu Plattenbreite  $b$  von etwa 0,5 bei konstant gehaltener Bruchgeschwindigkeit verlängert.

Der Verlauf der hierfür notwendigen Zugkraft sowie die Rißlänge werden mit einem Schreiber registriert. Die Abbildung 1 zeigt ein solches Schreiberdiagramm mit dem Kraftverlauf (obere Kurve) und der Meßgröße für den Rißweg, bei der eine Periode einem Rißweg von 2,00 mm entspricht. Der Zerreißversuch wird nach Erreichen der gewünschten Rißlänge abgebrochen und die Probe in der Rißebeane durch Biegen von Hand zerteilt. Die Stelle  $a_e$ , bis zu der der Riß im Zerreißversuch gelaufen ist, ist dann auf der Bruchfläche deutlich als Haltelinie zu erkennen.

Aus den nun bekannten Größen der Rißlänge  $a_e$  am Ende eines Zerreißversuches, der konstant gehaltenen Bruchgeschwindigkeit  $v_b$  und dem mit dieser Geschwindigkeit durchlaufenen Rißweg  $s$  läßt sich für jeden Zeitpunkt des Zerreißversuches die Rißlänge  $a_i$  und die Zugkraft  $f_i$  bestimmen. Je Versuch werden rund 20 solche Wertepaare  $(a_i, f_i)$  bestimmt.

Für jedes dieser Wertepaare wird die spezifische Bruchenergie  $G$  berechnet zu:

$$G_i = \left(\frac{f_i}{b \cdot d}\right)^2 \cdot \frac{a_i}{E} \cdot F\left(\frac{a_i}{b}\right) = \frac{\sigma_i^2 \cdot a_i}{E} \cdot F\left(\frac{a_i}{b}\right).$$

Hierin ist, abgesehen von den bereits eingeführten

Größen  $a_i$ ,  $f_i$ ,  $b$ :

$d$  = Plattendicke,  $E$  = Elastizitätsmodul.

$F(\frac{a_i}{b})$  ist eine Korrekturfunktion, durch die die spezielle Geometrie der Probe berücksichtigt wird, hier die endliche Platte der Breite  $b$  mit Seitenriß (Brown, Srawley (6)).

Der Mittelwert der rund  $2\sigma$  aus einem Zerreißversuch ermittelten  $G_i$ -Werte ist mit einem Variationskoeffizienten von durchschnittlich 3% behaftet. Die Abweichungen verschiedener bei gleichen Bedingungen durchgeführten Versuche ist etwas größer.

Da aus jedem Versuch eine große Anzahl von Wertepaaren  $(a_i, f_i)$  vorliegt, kann gemäß der Forderung  $\sigma_i^2 \cdot a_i \cdot F(a_i/b) = \sigma_{i+1}^2 \cdot a_{i+1} \cdot F(a_{i+1}/b)$  auch der Verlauf der Korrekturfunktion  $F(a/b)$  bestimmt werden.

Vorläufige Ergebnisse für die Abhängigkeit der spezifischen Bruchenergie  $G$  von der Bruchgeschwindigkeit  $v_b$  bei einer Temperatur von  $24^\circ\text{C}$  und Luftfeuchten entsprechend Taupunkten von  $-9,5$ ,  $+9,5$  und  $+19,3^\circ\text{C}$  sind in Abb. 2 zu sehen. Ein Vergleich zeigt, daß sich zwischen diesen Ergebnissen und denjenigen von Wiederhorn (1) bzw. Schönert, Umhauer und Klemm (2) noch keine signifikanten Unterschiede ergeben haben.

### Literatur

- (1) Wiederhorn, S.M.: J.Americ.Ceram.Soc. 50 (1967) 407-14
- (2) Schönert, K.; Umhauer, H.; Klemm, W.: Proc.of the Second Intern.Conf.on Fracture, Brighton 1969, S.474-482
- (3) Varner, J.R.; Fréchette, V.D.: J.appl.Phys. 42 (1971) 1983-4
- (4) Kerkhof, F.; Richter, H.: Proc.of the Second Intern. Conf. on Fracture, Brighton 1969, S.463-73
- (5) Küppers, H.: Intern.J.Fract.Mech. 3 (1967) 13-17
- (6) Brown, W.F.; Srawley, J.E.: Plane strain crack toughness testing. ASTM Special Techn.Publ. Nr. 410 Philadelphia 1967, S. 12

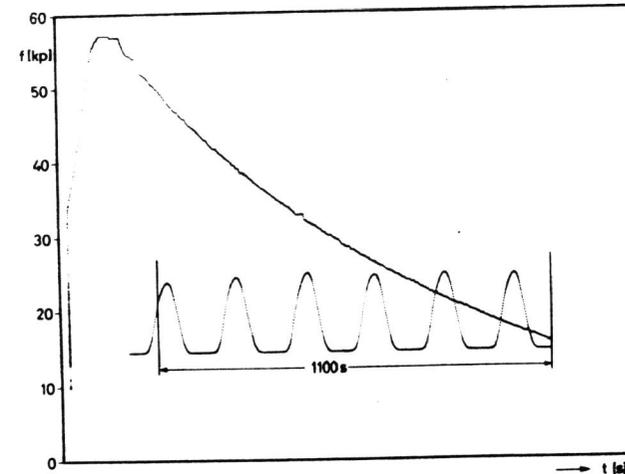


Abb. 1: Kraftverlauf bei der Verlängerung eines Risses um ca. 11,3 mm bei konst. Bruchgeschwindigkeit von 0,010 mm/s (obere Kurve). Eine Periode der unteren Kurve entspricht einem Rißweg von 2,00 mm

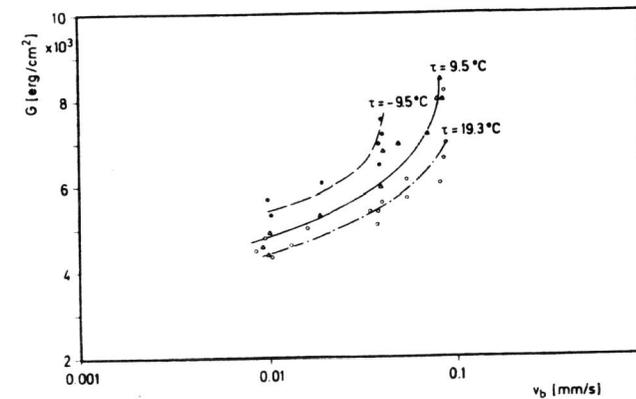


Abb. 2: Abhängigkeit der spez. Bruchenergie von der Bruchgeschwindigkeit bei einer Temperatur von  $25^\circ\text{C}$  und verschiedenen Luftfeuchten.