

EC **ENCYCLOPAEDIA**
CINEMATOGRAPHICA

FILM E 2366

**Bruchvorgänge – Bruchgabelungen
in Glasscheiben unter Zugbeanspruchung
(Funckenkinematographische Aufnahmen)**

INSTITUT FÜR DEN WISSENSCHAFTLICHEN FILM • GÖTTINGEN

ISSN 0073-8433

PUBLIKATIONEN ZU WISSENSCHAFTLICHEN FILMEN

SEKTION
TECHNISCHE WISSENSCHAFTEN
NATURWISSENSCHAFTEN

SERIE 3 · NUMMER 1 · 1977

FILM E 2366



INSTITUT FÜR DEN WISSENSCHAFTLICHEN FILM · GÖTTINGEN

Angaben zum Film:

Stummfilm, 16 mm, schwarzweiß, 43 m, 4 min (24 B/s). Hergestellt 1969, veröffentlicht 1976.

Das Filmdokument ist für die Verwendung in Forschung und Hochschulunterricht bestimmt. Die Aufnahmen entstanden am Institut für Festkörpermechanik der Fraunhofer-Gesellschaft e. V., Freiburg i. Br., Prof. Dr. F. KERKHOF, R. KIRSTEIN. Bearbeitet und veröffentlicht durch das Institut für den Wissenschaftlichen Film, Göttingen, Ing. G. HUMMEL.

Zitierform:

KERKHOF, F., und R. KIRSTEIN: Bruchvorgänge – Bruchgabelungen in Glasscheiben unter Zugbeanspruchung (Funckenkinematographische Aufnahmen). Film E 2366 des IWF, Göttingen 1976. Publikation von F. KERKHOF und U. SOLTÉSZ, Publ. Wiss. Film., Sekt. Techn. Wiss./Naturw., Ser. 3, Nr. 1/E 2366 (1977), 9 S.

Anschrift der Verfasser der Publikation:

Prof. Dr. F. KERKHOF, Institut für Festkörpermechanik der Fraunhofer-Gesellschaft e. V., Rosastr. 9, D-7800 Freiburg i. Br.

Dr. U. SOLTÉSZ, Institut für Festkörpermechanik der Fraunhofer-Gesellschaft e. V., Rosastr. 9, D-7800 Freiburg i. Br.

PUBLIKATIONEN ZU WISSENSCHAFTLICHEN FILMEN

Sektion BIOLOGIE

Sektion TECHNISCHE WISSENSCHAFTEN

Sektion MEDIZIN

NATURWISSENSCHAFTEN

Sektion ETHNOLOGIE

Sektion GESCHICHTE · PUBLIZISTIK

Herausgeber: H.-K. GALLE · Schriftleitung: G. BEKOW, E. BETZ, I. SIMON

PUBLIKATIONEN ZU WISSENSCHAFTLICHEN FILMEN sind die schriftlichen Ergänzungen zu den Filmen des Instituts für den Wissenschaftlichen Film und der Encyclopaedia Cinematographica. Sie enthalten jeweils eine Einführung in das im Film behandelte Thema und die Begleitumstände des Films sowie eine genaue Beschreibung des Filminhalts. Film und Publikation zusammen stellen die wissenschaftliche Veröffentlichung dar.

PUBLIKATIONEN ZU WISSENSCHAFTLICHEN FILMEN werden in deutscher, englischer oder französischer Sprache herausgegeben. Sie erscheinen als Einzelhefte, die in den fachlichen Sektionen zu Serien von etwa 500 Seiten zusammengefaßt und im Abonnement bezogen werden können. Jede Serie besteht aus 4 Lieferungen mit einer entsprechenden Zahl von Einzelheften; jährlich erscheinen 1–4 Lieferungen in jeder Sektion.

Bestellungen und Anfragen an: Institut für den Wissenschaftlichen Film
Nonnenstieg 72 · D-3400 Göttingen
Tel. (05 51) 2 10 34

FRANK KERKHOF und REINHARD KIRSTEIN, Freiburg i.Br.:

Film E 2366

Bruchvorgänge – Bruchgabelungen in Glasscheiben unter Zugbeanspruchung (Funckenkinematographische Aufnahmen)

Verfasser der Publikation: FRANK KERKHOF und UWE SOLTÉSZ, Freiburg i.Br.

Mit 3 Abbildungen

Inhalt des Films:

Bruchvorgänge – Bruchgabelungen in Glasscheiben unter Zugbeanspruchung (Funckenkinematographische Aufnahmen). Das Phänomen der Bruchgabelung oder Bruchverzweigung in Spiegelglasscheiben (der Größe $300 \times 100 \times 9 \text{ mm}^3$) unter einachsiger Zugspannung wird an drei Beispielen demonstriert. Die primären Aufnahmen wurden mit Hilfe einer 24-Funken-Kamera nach CRANZ-SCHARDIN hergestellt. Die 24 Originalbilder jeder Aufnahmeserie wurden jeweils mehrfach kopiert und zu einem Film zusammengesetzt, um sowohl den Eindruck eines kontinuierlichen Vorganges zu vermitteln als auch die Details der Bruchvorgänge erkennen zu lassen. Mit wachsender Zerreißspannung wird die Bruchverzweigung vielfältiger und komplizierter.

Summary of the Film:

Fracture – crack branching in plate glass under tensile stress (recorded by spark-cinematography). The phenomenon of crack branching or crack bifurcation in plate glass (measuring $300 \times 100 \times 9 \text{ mm}^3$) when subjected to uniaxial tensile stress is demonstrated on three examples. The original exposures were taken with a 24-spark camera according to CRANZ-SCHARDIN. The 24 original frames of each series of exposures were copied several times and spliced together to make a continuous length of film, the purpose of this procedure being to give the impression of a continuous process and to enable the fracture process to be observed in detail. With increasing tensile stress the number of crack bifurcations increases and the behaviour becomes more complex.

Résumé du Film:

Processus de fracture – Bifurcations de fracture dans des disques de verre sous l'effet d'une contrainte de traction (prises de vues par cinématographie à étincelles). Le phénomène de bifurcation de fracture dans des plaques de verre à réflexion (de $300 \times 100 \times 9 \text{ mm}^3$ de taille) sous l'effet d'une contrainte de traction uniaxiale est démontré dans trois exemples. Les prises de vues primaires ont été réalisées à l'aide d'un appareil photographique

à 24 étincelles de CRANZ-SCHARDIN. Les 24 photos originales de chaque série de prises de vues ont été copiées chacune plusieurs fois et réunies en un film, afin d'une part de donner l'impression d'un processus continu, et d'autre part de permettre de distinguer les détails des processus de fracture. La bifurcation de fracture se diversifie et devient plus complexe à mesure que la contrainte de traction maximale s'accroît.

Allgemeine Vorbemerkungen

Dieser Film über das Phänomen der Bruchgabelung in Glasscheiben kann als eine Ergänzung zu dem historischen Film „Der Bruchvorgang im Glas“ von H. SCHARDIN und W. STRUTH [9] aufgefaßt werden. In den seither vergangenen über drei Jahrzehnten ist andererseits durch die Entwicklung der sog. „Bruchmechanik“ als der – die herkömmliche Festigkeitslehre ergänzenden – Lehre vom Bruchverhalten auch das Verständnis der Bruchvorgänge in Gläsern vertieft und verfeinert worden. So erscheint es zweckmäßig, das in dem neuen Film demonstrierte Phänomen der Bruchgabelung unter dem Aspekt der Bruchmechanik zu erläutern.

Im Sinne einer einfachen und knappen Darstellung beschränken wir uns einleitend auf eine kurze Zusammenfassung der gegenwärtig vorliegenden Untersuchungsergebnisse über die Rißausbreitung in einer zugbeanspruchten Scheibe. In Abb. 1 ist

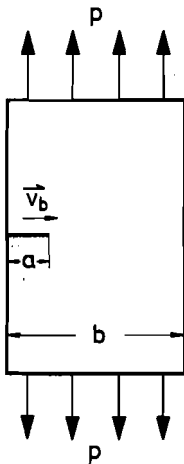


Abb. 1. Schematische Darstellung des Zerreißversuchs an einer Glasscheibe

a : Rißlänge; b : Scheibenbreite; p : Zerreißspannung; v_b : Bruchgeschwindigkeit

die Versuchsanordnung schematisch dargestellt, mit der die Ausbreitungsgeschwindigkeit v_b eines Risses der Länge a in einer Scheibe der Breite b unter der Zugspannung p von verschiedenen Autoren untersucht worden ist. Die im Prinzip gleiche Anordnung wurde auch bei der Herstellung des Films benutzt.

In Abb. 2 sind die bis heute vorliegenden Ergebnisse von K. SCHÖNERT, H. UMHAUER und W. KLEMM [6], von F. KERKHOF und H. RICHTER [3], G. W. WEIDMANN [7], S. M. WIEDERHORN und H. JOHNSON [8], H. RICHTER [5] schematisch zusammenfassend wiedergegeben (vgl. auch die Monographie von F. KERKHOF [4]). Dabei be-

deutet die auf der Abszissenachse angegebene „Energiefreisetzungsrate G_I “ diejenige Energie, die dem laufenden Riß je cm^2 Riflche (= 2 cm^2 Bruchuferflche) aus dem elastischen Energievorrat der zuggespannten Scheibe zur Verfügung gestellt wird.

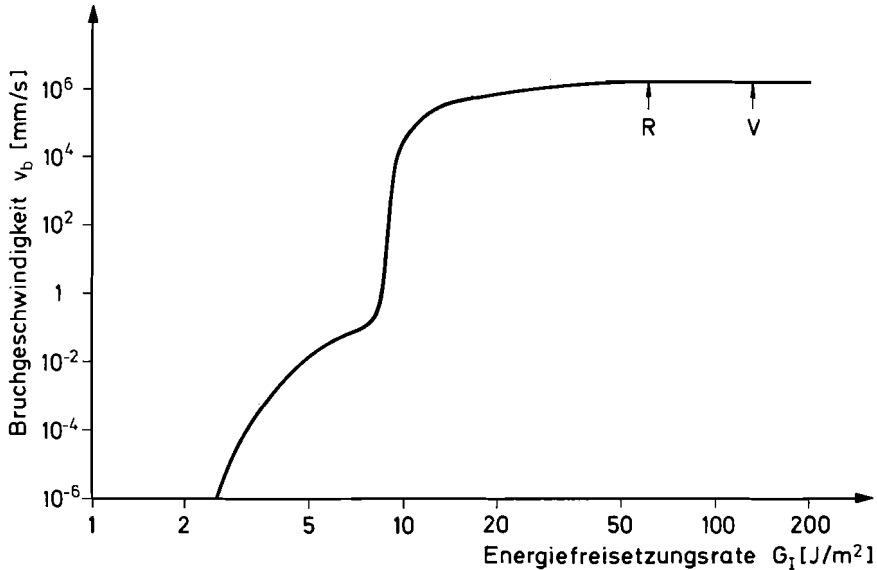


Abb. 2. Prinzipieller Verlauf der Bruchgeschwindigkeit v_b in Abhängigkeit von der Energiefreisetzungsrate G_I für Spiegelglas

R: Beginn der Bruchrauigkeit; V: Einsetzende Bruchverzweigung

Für einen sich von der Kante her langsam ausbreitenden, noch relativ zur Scheibenbreite b kurzen Riß ($a \ll b$) gilt:

$$G_I = \frac{4p^2}{E} a, \tag{1}$$

wobei p = äußere Zerreißspannung,
 E = Dehnungsmodul des Glases.

Bei kleinen Rigeschwindigkeiten unter etwa 10 cm/s besteht noch ein Einfluß der Temperatur und des umgebenden Mediums in dem Sinne, daß mit zunehmender Temperatur und z.B. mit zunehmender Luftfeuchtigkeit (bei konstantem G_I -Wert) die Rigeschwindigkeit erhöht wird. Oberhalb der angegebenen Geschwindigkeit von etwa 10 cm/s ist ein direkter Einfluß der Umgebung aber nicht mehr festzustellen; die Riausbreitungsgeschwindigkeit nähert sich asymptotisch einer oberen Grenze: der schon von H. SCHARDIN entdeckten „maximalen Bruchgeschwindigkeit“, die bei Tafel- bzw. Spiegelglas 1520 m/s beträgt.

Nach Erreichen dieser Bruchhchstgeschwindigkeit treten nun charakteristische Begleitphänomene in Form von strukturellen Veränderungen der Riuferflchen auf: die Bruchrauigkeit R von einem bestimmten Wert G_R der Energiefreisetzungsrate

G_I an und die „Bruchgabelung“ oder „Bruchverzweigung“ V bei einem ebenfalls bestimmten charakteristischen Wert G_V . Bei Tafel- bzw. Spiegelglas betragen diese charakteristischen Werte etwa $G_R = 65 \text{ J/m}^2$ und $G_V = 135 \text{ J/m}^2$ (vgl. F.KERKHOF [4], W.DÖLL [1]).

Unter dem Aspekt der Energiebilanz des Bruchvorganges können beide Bruchphänomene so verstanden werden, daß das mit G_I wachsende Energieangebot in zunehmendem Maße zur Schaffung neuer Bruchflächen genutzt wird – wobei die Bildung der Bruchrauhigkeit (= mikroskopisch kleine Rißverzästelungen) als ein gewisses Vorstadium der eigentlichen Bruchgabelung angesehen werden kann.

Der vorliegende Film zeigt die Entwicklung von Rißverzweigungen oder Rißgabelungen in Flachglas (Spiegelglas)-scheiben für verschiedene Zerreißspannungen. Da zur Rißgabelung stets der gleiche, charakteristische G_V -Wert gehört, ergibt sich wegen der obigen G_I (1), nach der $G_V \propto p^2 a_V$ gilt, daß die Rißlänge a_V , bei der Rißverzweigung auftritt, um so kleiner sein muß, je größer die äußere Zerreißspannung p ist. Dieser Zusammenhang ist auch aus den Filmaufnahmen ersichtlich.

Auffällig bei einfachen Rißgabelungen ist, daß der Verzweigungswinkel zwischen den beiden sekundären Rißzweigen ca. 30° beträgt. Zur Begründung eines solchen charakteristischen Gabelungswinkels untersuchte J.F.KALTHOFF [2] die Richtungsstabilität von einfach gegabelten Randrissen und konnte theoretisch-numerisch und experimentell zeigen, daß sich für einen solchen Öffnungswinkel von ca. 28° beide Gabelungszweige geradlinig ausbreiten. Bei diesem Winkel wird das ursprünglich einachsige Zugspannungsfeld durch den gegabelten Riß so verändert, daß jede der beiden Rißspitzen durch eine reine Normalspannung (Zugspannung, senkrecht zur Rißfläche) beansprucht wird und Scherspannungen, die bei anderen Winkeln auftreten und zu Rißablenkungen führen, verschwinden. Diese Tatsache wurde durch spannungsoptische Untersuchungen und Bruchversuche an Scheiben aus Araldit B belegt.

Zur Entstehung des Films

Zur Herstellung des Films wurde die funckenkinematographische Methode nach CRANZ-SCHARDIN benutzt, deren Prinzip in Abb.3 dargestellt ist. Das Licht von 24 Kurzzeit-Funkenstrecken (von denen in Abb.3 nur 3 eingezeichnet sind), die nacheinander gezündet werden, wird über einen Hohlspiegel auf die 24 (räumlich getrennten) Objektive einer Kamera fokussiert. Im gemeinsamen Bereich aller 24 Beleuchtungskegel befindet sich die Glasscheibe, die über die Objektive auf 24 nebeneinanderliegende Bilder in der Filmebene abgebildet wird. Der zeitliche Abstand der Entstehung dieser Bilder kann elektronisch gesteuert werden, so daß der in der Scheibe ablaufende Bruchvorgang in 24 verschiedenen Stadien erfaßt wird, und beträgt bei dem vorliegenden Film 2 bzw. $2,5 \mu\text{s}$. Das jeweils 1. Bild wird ausgelöst, wenn der anlaufende Riß einen dünnen Aluminiumstreifen durchtrennt, der vor der Anfangsrißspitze auf die Glasscheibe aufgedampft worden ist. Dieser ist in den Filmaufnahmen als senkrechter schwarzer Streifen zu erkennen.

Um nun einerseits den Eindruck eines kontinuierlichen Vorgangs zu vermitteln und andererseits auch die Details der Bruchvorgänge erkennen zu lassen, wurden die 24 Einzelbilder jeder Aufnahmeserie jeweils mehrfach kopiert und zu einem Film zusammengesetzt.

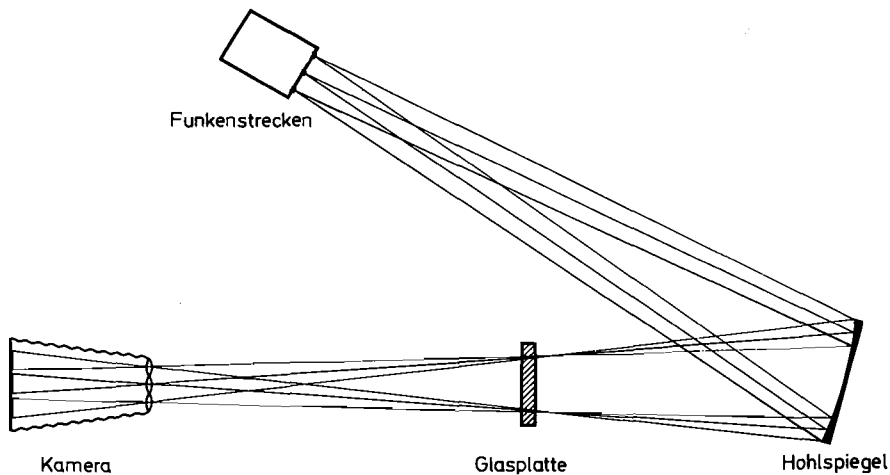


Abb. 3. Funkenkinematographische Anordnung zur Beobachtung des Bruchvorgangs in einer Glasplatte

Filmbeschreibung¹

Einachsiger Zugversuch an Flachglas-Scheiben ($300 \times 100 \times 9 \text{ mm}^3$) mit verschiedenen Anrissen; Zugrichtung vertikal; Bruchgeschwindigkeit 1520 m/s

Einzelbilder jeder Aufnahmeserie mehrfach kopiert (2-, 4-, 8-, 16- und 2fach); Bildfeldbreite etwa 100 mm

Mit Hilfe der geschilderten Aufnahme- und Kopiertechnik wurden Filme von 3 Bruchvorgängen in zuggespannten Spiegelglasscheiben hergestellt, die sich im wesentlichen nur durch die den Bruchvorgang auslösende Zerreißspannung unterscheiden. Diese kann durch unterschiedliche Tiefe und Form der vorher eingesägten oder angeritzten Anfangskerben variiert werden.

Kleine Zerreißspannung ($34,2 \text{ kp/cm}^2$); einfache Gabelung

Zeitlicher Bildabstand $2 \mu\text{s} \cong 500000 \text{ B/s}$

1.–5. Bei der kleinsten Zerreißspannung von $34,2 \text{ kp/cm}^2$ tritt nur eine einfache Bruchgabelung nach einem relativ langen Bruchweg von ca. 48 mm auf.

¹ Die *Kursiv*-Texte entsprechen den Zwischentiteln im Film.

Mittlere Zerreißspannung (48,7 kp/cm²); mehrfache Gabelung
Zeitlicher Bildabstand 2,5 µs \cong 400 000 B/s

6.–10. Bei der mittleren Zerreißspannung von 48,7 kp/cm² tritt eine mehrfache Gabelung auf, und zwar schon nach einem Bruchweg von ca. 24 mm.

Große Zerreißspannung (63,4 kp/cm²); vielfache Gabelung
Zeitlicher Bildabstand 2,5 µs \cong 400 000 B/s

11.–15. Bei der großen Zerreißspannung von 63,4 kp/cm² ist der Bruchweg bis zur ersten Verzweigung noch kürzer: ca. 15 mm; auf diese folgt eine vielfache Verästelung des Bruches.

Anmerkung:

Jeder der vorstehenden drei Versuche ist also in fünf hintereinander folgenden Bildserien wiedergegeben, die durch die im ersten Zwischentitel angegebenen Mehrfachkopierungen hergestellt wurden. Dadurch ist es möglich, den gleichen Vorgang mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten vorzuführen. Eine Relation zur tatsächlichen Geschwindigkeit der Rißausbreitung kann durch die Errechnung des Zeitdehnermastabes gegeben werden. Bei einer Vorfhrgeschwindigkeit von 24 B/s liegt die (scheinbare) Zeitdehnung zwischen

33.333 : 1 (bei 2,5 µs Bildabstand und 2facher Kopierung) und
333.333 : 1 (bei 2 µs Bildabstand und 16facher Kopierung).

Literatur

- [1] DLL, W.: Investigations of the crack branching energy. Int. Journ. of Fracture 11 (1975), 184–186.
- [2] KALTHOFF, J.F.: On the propagation direction of bifurcated cracks. Proc. of the Conference on Dynamic Crack Propagation. Lehigh University, Bethlehem, Pa., USA; Editor: G. C. SIH. Noordhoff Intern. Publish., Leyden 1973.
- [3] KERKHOF, F., und H. RICHTER: Investigation of the influence of water vapour on crack velocities in glass by ultrasonic fractography. Proc. 2nd Intern. Conf. on Fracture, Brighton, 13.–18. April 1969. Chapman and Hall, London 1969, 463–473.
- [4] KERKHOF, F.: Bruchvorgänge in Glsern. Verl. d. Dt. Glastechn. Ges., Frankfurt a.M. 1970.
- [5] RICHTER, H.: Experimentelle Untersuchungen zur Riausbreitung in Spiegelglas im Geschwindigkeitsbereich 10⁻³ bis 5 · 10³ mm/s. Dissertation, Universität (TH) Karlsruhe 1974.
- [6] SCHNERT, K., H. UMHAUER und W. KLEMM: The influence of temperature and environment on the slow crack propagation in glass. In: PRATT, P.L. (Hrsg.): Fracture 1969. Proc. 2nd Internat. Conf. on Fracture, Brighton, April 1969. Chapman and Hall, London 1969, 474–482.

- [7] WEIDMANN, G.W.: Slow crack propagation in glass. Dissertation, University of Keele 1973.
- [8] WIEDERHORN, S.M., and H. JOHNSON: Effect of electrolyte pH on crack propagation in glass. Journ. of the Amer. Ceram. Soc. 56 (1973), 192–197.

Filmveröffentlichung

- [9] SCHARDIN, H., W. STRUTH und D. ELLE: Der Bruchvorgang im Glas – Historische Aufnahmen der Bruchausbreitung beim Beschuß verschiedener technischer Gläser (CRANZ-SCHARDIN-Verfahren). Film E 2355 des IWF, Göttingen 1976. Publikation von H. SCHARDIN und W. STRUTH, m. Vorw. v. F. KERKHOF, Publ. Wiss. Film., Sekt. Techn. Wiss./Naturw., Ser. 3, Nr. 2/E 2355 (1977), 23 S.

Abbildungsnachweis

Abb. 1–3: F. KERKHOF und U. SOLTÉSZ.