

Ergebnisse der kinematographischen Untersuchung des Glasbruchvorganges.

Von Hubert SCHARDIN, Universität Freiburg (Brsg).

(Vortrag auf der 23. Glastechnischen Tagung in München am 24. Mai 1949.)

(Eingegangen am 15. November 1949.)

Die normale Glasbruchgeschwindigkeit beträgt 1500 m/s, d. i. rund $\frac{1}{2}$ der Transversalwellengeschwindigkeit und rund $\frac{1}{3}$ bis $\frac{1}{4}$ der Longitudinalwellengeschwindigkeit des Glases. Man wird daher bei einem Glasbruchvorgang niemals mit quasistationären Verhältnissen rechnen dürfen, sondern stets den Ausbreitungsvorgängen der elastischen Spannungen die größte Bedeutung beizumessen haben. In dem ersten Teil der folgenden Arbeit werden diese für den Fall des Stoßes gegen eine Platte mit spannungs- und schlierenoptischen Verfahren kinematographisch untersucht. Im nächsten Abschnitt folgt dann eine systematische Zusammenstellung aller elastischen Ausbreitungsvorgänge, die in Platten eine Rolle spielen, sowie ein Vergleich mit den experimentellen Ergebnissen. Anschließend wird der Zusammenhang zwischen elastischen und Bruchvorgängen untersucht. Da für den in der Praxis wichtigen Zugversuch analoge experimentelle Untersuchungen schwieriger durchzuführen sind, wird schließlich der Versuch unternommen, die erhaltenen Resultate auf den Zugversuch zu übertragen.

Einleitung.

Nachdem im Jahre 1937 die ersten kinematographischen Aufnahmen des Glasbruchvorganges gemacht worden waren, worüber auf der 21. Glastechnischen Tagung in Berlin am 16. Februar 1939 eingehend berichtet wurde¹⁾, sind eine Reihe weiterer Untersuchungen durchgeführt worden, deren Ergebnisse jedoch bisher nicht oder nur unvollständig veröffentlicht worden sind.

Eine der wesentlichsten Erkenntnisse der ersten Arbeiten war die Feststellung einer ausgezeichneten Bruchgeschwindigkeit von 1500 m/sec für gewöhnliches Glas, von 1700 m/sec für Glas BK 7/45833 und von 2200 m/sec für Quarzglas.

Der Wert von 1500 m/sec für normales Glas ist 1939 von F. E. BARSTOW und H. E. EDGERTON²⁾ bestätigt worden. In einer Arbeit aus dem Jahr 1941 weisen sie darauf hin, daß die durch thermisch erzeugte Spannungen hervorgerufenen Brüche geringe Bruchgeschwindigkeiten aufweisen. Man kann dies leicht beobachten, wenn man eine Glasplatte lokal erhitzt. Das mit derartigen Sprüngen meist verbundene knisternde Geräusch scheint mir jedoch darauf hinzudeuten, daß der Bruch sich absatzweise ausbildet, wie es in einigen Fällen auch kinematographisch verfolgt werden konnte. Die makroskopisch zu beobachtende Geschwindigkeit würde demnach nur einen Mittelwert darstellen, der durch das zeitweise Stillstehen des Bruches verursacht wird. Diese Erklärung sehen auch BARSTOW und EDGERTON als möglich an³⁾.

Inzwischen ist nun durch die Arbeiten von SMEKAL und WALLNER ein neuer Weg zur Er-

mittlung der Glasbruchgeschwindigkeit gefunden worden, der auf der Analyse einer Bruchfläche beruht. Die Durchkreuzung von Bruchfronten mit elastischen Wellen hinterläßt in der Bruchfläche Spuren, die sogenannten WALLNERSchen Linien, so daß bei Kenntnis der Wellengeschwindigkeiten die Bruchgeschwindigkeiten ermittelt werden können.

Aus derartigen Untersuchungen hat SMEKAL die oben genannten Werte für die Bruchgeschwindigkeit bestätigen können, mit der Einschränkung, daß es ein Anlaufgebiet zu geben scheint, in welchem die Geschwindigkeit von kleinen Werten bis zum Normalwert ansteigt. Dieses Gebiet erstreckt sich jedoch nur über einen kleinen Bereich in der Größenordnung bis zu 1 mm. Es könnte demnach sein, daß sich die thermisch erzeugten Bruchfronten in diesem Anlaufgebiet bewegen. Immer wenn der Bruch auf höhere Geschwindigkeiten gekommen ist, bleibt er stehen, da die nur langsam veränderlichen inneren Spannungen dann durch den Bruch selbst ausgeglichen sind.

Der hohe Wert der normalen Bruchgeschwindigkeit legte die Vermutung nahe, daß die elastischen Ausbreitungsvorgänge nicht ohne Einfluß auf den Bruchvorgang sein können.

So sehen wir ja auch bei den SMEKALSchen Zerreißversuchen eines Glasstabes, die bei langsam zunehmender Belastung durchgeführt werden, elastische Wellen auftreten, die das Bruchbild beeinflussen (vgl. Näheres weiter unten).

Es war also wünschenswert, mit der Bruchausbreitung gleichzeitig die elastischen Wellen kinematographisch zu registrieren. Eine erste Veröffentlichung der eigenen diesbezüglichen Arbeiten erfolgte im Jahre 1940⁴⁾, während etwa gleichzeitig

¹⁾ Vgl. SCHARDIN, H. und STRUTH, W.: Hochfrequenzkinematographische Untersuchung der Bruchvorgänge im Glas. *Glastechn. Ber.* **16** (1938) S. 219—227.

²⁾ BARSTOW, F. E. und EDGERTON, H. E.: Glass-fracture velocity. *J. Amer. ceram. Soc.* **22** (1939) S. 302—307, sowie SCHARDIN, H.: Über die Arbeit von F. E. BARSTOW und H. E. EDGERTON zur Glasbruchgeschwindigkeit. *Glastechn. Ber.* **18** (1940) S. 233—236.

³⁾ *J. Amer. ceram. Soc.* **24** (1941) S. 135. [Vgl. Fußnote 5).]

⁴⁾ Vortrag auf der phys. Tagung in Berlin am 2. September 1940, veröffentl.: SCHARDIN, H., ELLE, D. und STRUTH, W.: Über den zeitlichen Ablauf des Bruchvorganges in Glas und Kunstglas. *Z. techn. Phys.* **21** (1940) S. 393—400. [*Ref. Glastechn. Ber.* **19** (1941) S. 363.]

in Amerika von EDGERTON und BARSTOW ähnliche Untersuchungen durchgeführt wurden⁵⁾.

Vom Verfasser wurde dann auf der Stuttgarter Physiker-Tagung im Jahre 1948 und ausführlicher auf der 23. Glastechnischen Tagung in München 1949 über die neueren eigenen Ergebnisse vorgetragen.

Im folgenden soll nun näher auf diesen Fragenkomplex eingegangen werden.

I. Versuchsanordnung und Versuchsergebnisse.

Die Glasbrüche sind im durchfallenden Licht infolge der auftretenden Totalreflexion ohne weiteres gut zu sehen. Man ist erstaunt über die Schärfe der Front eines Bruches, obwohl die Bruchflanken erst auseinandergehen müssen und zunächst noch optischer Kontakt vorhanden ist.

Wie die Aufnahmen beweisen, kann es sich hierbei jedoch nur um eine sehr kurze und in sich ziemlich konstante Streckehandeln (Beispiel siehe Bild 1).

Im allgemeinen liegen bei den durchgeführten Versuchen mit Platten die Bruchflächen senkrecht zu den Oberflächen. Es gibt jedoch auch Fälle, wo die Bruchfläche sich parallel zur Oberfläche dreht (Bild 2).

Die Versuchstechnik bestand einmal in der Verwendung der funckenkinematogra-

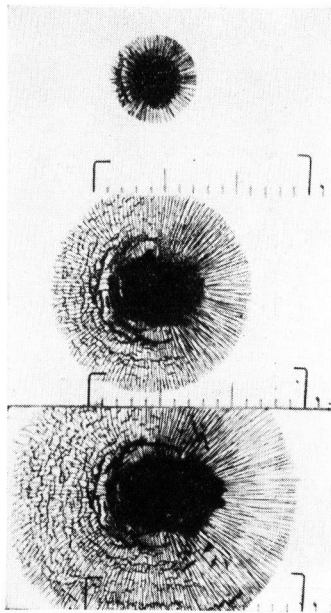


Bild 1. Der Bruchvorgang in einer Sekuritplatte, ausgehend von der Mitte der Platte. Man beachte die Schärfe der Bruchfronten.

phischen Anordnung nach CRANZ-SCHARDIN, die 24 Bilder des Vorganges liefert bei genügend hohen Frequenzen (etwa 100 000 bis 500 000/sec), wie sie zur zeitlichen Auflösung der Bruchvorgänge und der auftretenden Wellen notwendig sind⁶⁾.

Die Versuchsobjekte waren meist Glasplatten mit Dicken von 2 bis 8 mm. Die Anregung der Brüche erfolgte durch einen harten Schlag entweder gegen die Oberfläche oder gegen die Kante der Platte.

Zur Sichtbarmachung der elastischen Wellen wurden drei verschiedene Verfahren angewandt: Das erste bestand — wie in der Spannungsoptik üblich — in der Ausnutzung der Spannungsdoppelbrechung. Der Strahlengang durchlief vor und hinter der Versuchsplatte je eine Polarisationsfolie, die im allgemeinen parallel zueinander ausgerichtet waren, so daß die Spannung im Glas eine Verdunklung des Gesichtsfeldes hervorrief.

Das zweite Verfahren wurde neu entwickelt. Es beruht auf einer empfindlichen Sichtbarmachung der Deformation der Glasoberfläche während des Bruchvorganges mit Hilfe des Schlierenverfahrens (Bild 3). Das Licht der 24 Funkenstrecken fällt

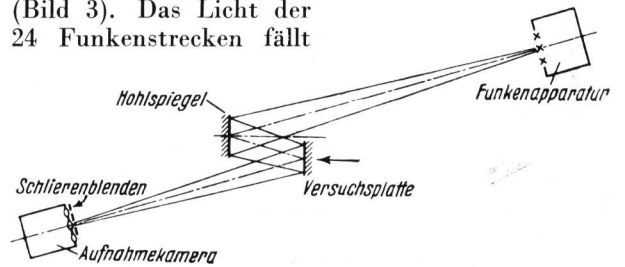


Bild 3. Anordnung für das Reflexionsschlierenverfahren.

zunächst auf einen optisch einwandfreien Hohlspiegel und wird dann von der vorderen durch Aluminiumbedampfung verspiegelten Oberfläche der Versuchsplatte reflektiert. Vor den 24 die Versuchsplatte abbildenden Objektiven befindet sich

⁶⁾ Vgl. Glastechn. Ber. 16 (1938) S. 219.

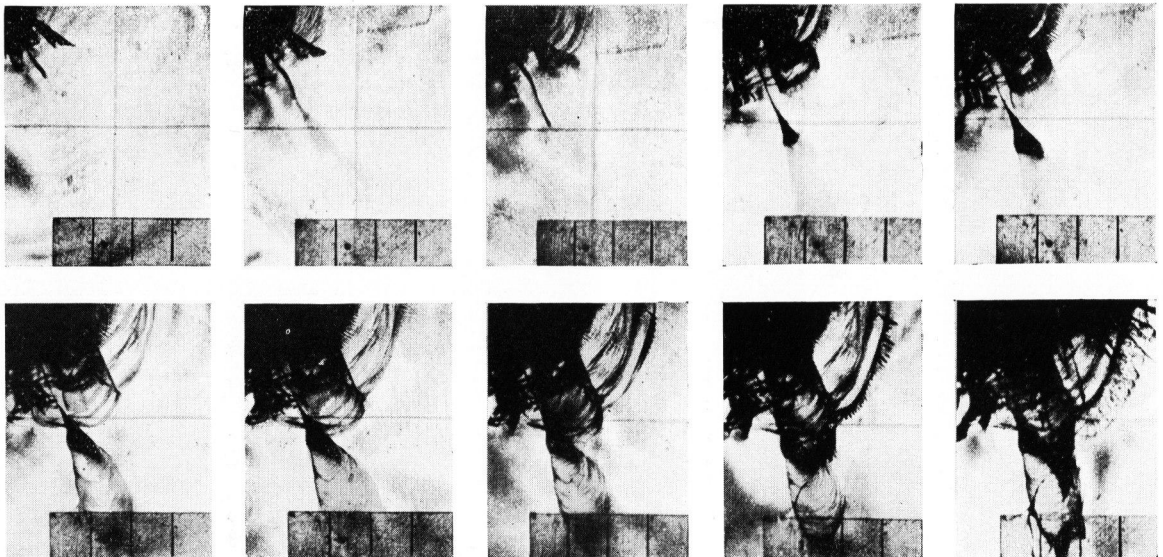


Bild 2. Bildreihe eines Bruchvorganges. Die Bruchflächen drehen sich parallel zur Plattenoberfläche. Wenn die Bruchfläche nicht mehr senkrecht zur Oberfläche ist, kann die Front nicht mehr sicher erkannt werden.

⁵⁾ Vortrag auf der 42. Jahrestagung der Amer. ceram. Soc. am 10. April 1940, veröffentl.: EDGERTON, H. E. und BARSTOW, F. E.: Further studies of glass fracture with high-speed photography. J. Amer. ceram. Soc. 24 (1941) S 131—137.

in der Bildebene der Funken je eine Schlierenblende, so daß eine durch die Deformation eines Oberflächenelementes der Versuchsplatte hervorgerufene Verschiebung des Lichtes eine entsprechende Helligkeitsänderung im Bild der Platte ergibt. Dieses Verfahren hat den besonderen Vorteil, daß es nicht auf durchsichtige Objekte beschränkt ist. Es wäre also z. B. auch möglich, die gleichen Untersuchungen an keramischen oder anderen undurchsichtigen Materialien anzustellen, wenn es gelingt, die eine Oberfläche so zu schleifen und zu polieren, daß die optische Güte etwa der des normalen Fensterglases gleichkommt. Eine ganz einwandfreie Qualität der Oberfläche ist nicht erforderlich, da es bei den Vorgängen auf Änderungen des vorhandenen Zustandes ankommt und daher anfängliche Unregelmäßigkeiten der Oberfläche berücksichtigt werden können. Ein gutes Reflexionsvermögen der Oberfläche kann durch Metallbedampfung erreicht werden.

Wie die experimentellen Ergebnisse gezeigt haben, ist die Empfindlichkeit des soeben beschriebenen Verfahrens ausreichend, um bei starken stoßartigen Beanspruchungen von Platten die Oberflächendeformationen sichtbar zu machen.

Nachdem dieses Resultat erzielt worden war, lag es nahe, daß auch im durchfallenden Licht bei empfindlicher Schliereinstellung die elastischen Wellen sichtbar sein müssen, obgleich bei bisherigen Versuchen im durchfallenden Licht eine solche Beobachtung nicht gemacht worden war, mit Ausnahme einiger Fälle bei sehr intensiver Beanspruchung z. B. durch eine starke Detonation. Es war aber niemals eine genügend empfindliche Einstellung angewandt worden. Die folgende Überlegung zeigt, daß im durchfallenden Licht in dem Falle, wo die beiden Oberflächen sich gegenseitig deformieren, eine Ablenkung des Lichtes auftreten muß, die rund $\frac{1}{3}$ derjenigen bei der Reflexion beträgt. Wenn dagegen eine parallele Deformation beider Seiten auftritt, ist praktisch mit einer sichtbar zu machenden Ablenkung nicht zu rechnen.

Ein Teil der Oberfläche der Platte sei um den Winkel ε deformiert, die gegenüberliegende Oberfläche gegenseitig gleichfalls um ε . Ein senkrecht zur ursprünglichen Oberfläche einfallender Lichtstrahl L wird um den Winkel $\varepsilon_r = 2 \varepsilon$ abgelenkt reflektiert (Bild 11, S. 10).

Der durchfallende Strahl L_d sei um den Winkel ε_d abgelenkt. Die Frage ist, wie sich ε_r zu ε_d verhält.

Es ist

$$\frac{\sin \varepsilon}{\sin \varepsilon'} \approx \frac{\varepsilon}{\varepsilon'} \approx \frac{3}{2}$$

(n für die Versuchsglasplatte annähernd gleich 1,5 gesetzt)

$$\varepsilon' = \frac{2}{3} \varepsilon$$

Die Ablenkung des in der Glasplatte verlaufenden Strahles ist $\varepsilon - \varepsilon' = \frac{1}{3} \varepsilon$. Die Gesamtablenkung ist

$$\varepsilon_d = \varepsilon,$$

also

$$\frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_d} = \frac{2 \varepsilon}{\varepsilon} = 2$$

d. h. das Reflexionsverfahren ist doppelt so empfindlich wie die Durchstrahlung.

Trotzdem reicht, wie die Versuche zeigen, die im durchfallenden Licht auftretende Ablenkung noch gut aus, auswertbare Aufnahmen zu liefern.

Wie die folgenden Bilder des Bruchvorganges in Glasplatten zeigen, ergänzen sich die drei beschriebenen Verfahren in ihren Resultaten. Jedes hat seine spezifischen Vorteile.

Es seien nun zunächst einige Serien von kinemographischen Aufnahmen des Bruchvorganges in Glasplatten wiedergegeben. Die erste Bildreihe (Bild 4) bringt eine Auswahl von 10 Teilbildern aus einer Serie, die im Original 24 Bilder hatte, und die nach dem spannungsoptischen Prinzip aufgenommen worden ist⁷⁾. Die Bildfrequenz lag in der Größenordnung von 200000/sec. Die Glasplatte wird in der Mitte des linken Randes durch einen scharfen Stoß beansprucht. Der auf der Platte sichtbare Maßstab bedeutet von Teilstrich zu Teilstrich im Original die Strecke von 1 cm. Die Platte war 5 mm dick und wies am rechten Ende eine Anzahl von Rissen auf, die mit einem Diamanten angebracht waren, um deren Einfluß auf die Bruchbildung zu erkennen.

In 4a sieht man den Beginn des Vorganges am linken Rande. Die schwarze annähernd kreisförmige Fläche ist durch die Zertrümmerung der Glasplatte verursacht. An der Front dieser schwarzen Fläche erkennt man einige isoliert auftretende Punkte. Es handelt sich hier um den Beginn von Sekundärbrüchen. Davor läuft die Longitudinalwelle, die sehr sauber halbkreisförmig begrenzt ist.

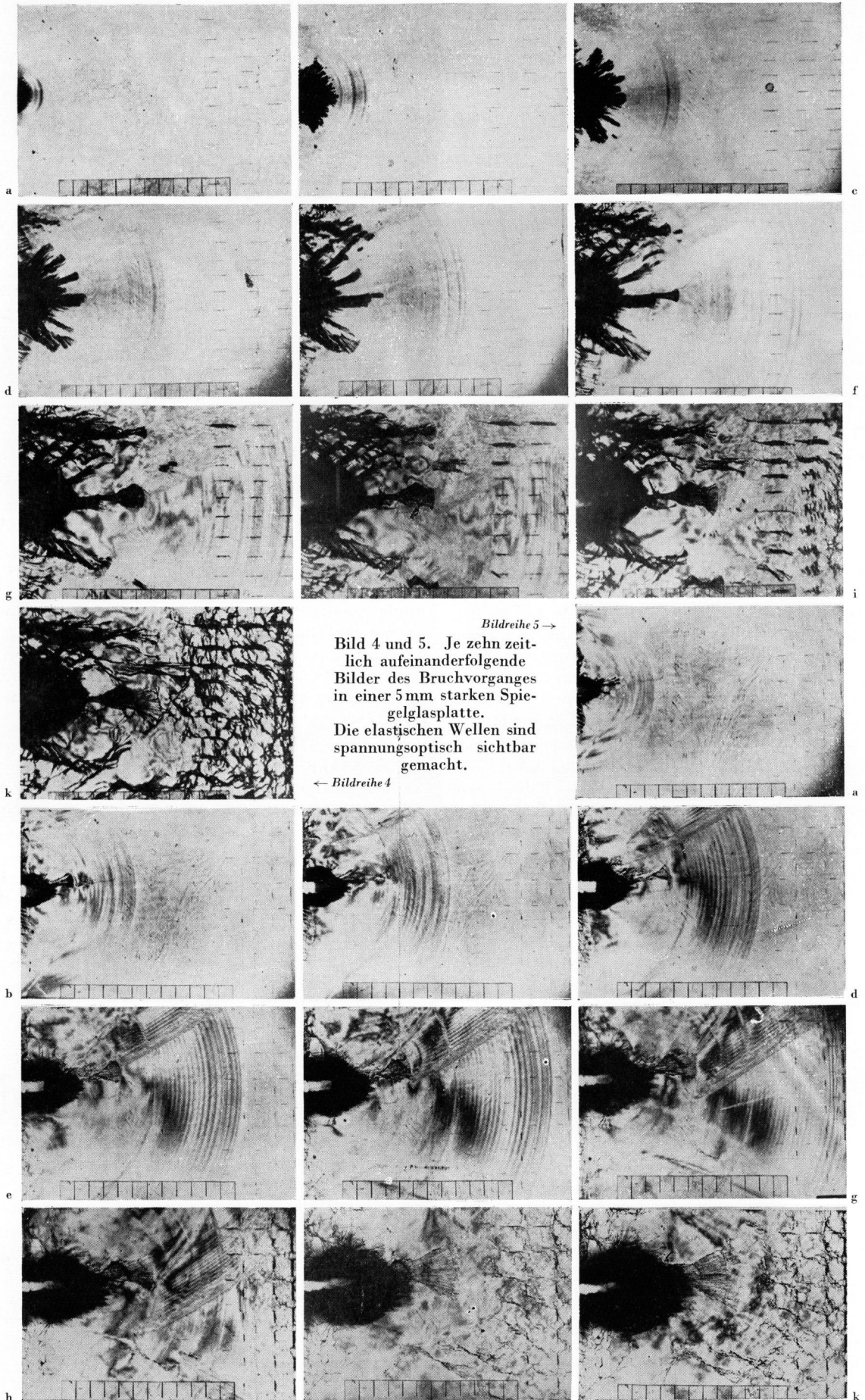
4b gibt einen etwas späteren Zeitpunkt wieder. Man erkennt auch hier wieder die kreisförmig sich ausbreitende Longitudinalwelle und die unregelmäßigen Umrisse der Bruchbildung. Daß hinter der Front der Longitudinalwelle noch weitere scheinbare Wellen zu sehen sind, ist spannungsoptisch bedingt. Hierauf wird später eingegangen werden.

Es ist zu beachten, daß die Sekundärbrüche nicht im vorderen Teil auftreten, sondern nur in dem Bereich, der sich mit kleinerer Geschwindigkeit als 3200 m/sec (der Transversalwellengeschwindigkeit) ausbreitet. Am linken Rande ist folgende Erscheinung zu beobachten: Die Transversalwelle erzeugt hier laufend Brüche. Da jedoch die Brüche selbst sich mit 1500 m/sec ausbreiten, ist die Front der Brüche geradlinig begrenzt. Sie entspricht dem Winkel $\alpha = \arcsin$ Bruchgeschwindigkeit geteilt durch Transversalwellengeschwindigkeit.

4c. Die Bruchbildung ist sehr unregelmäßig geworden. Gut ausgebildet sind jedoch die Brüche, die am Rande von der Front der Transversalwelle erzeugt werden. Die Transversalwelle selbst ist auf diesen Aufnahmen nicht gut zu erkennen.

4d. Gute Ausbildung der von der Transversalwelle gezogenen Randbrüche. Ein neues Phänomen

⁷⁾ Bildreihe 4 und 5 sind gemeinsam mit W. STRUTH aufgenommen worden.



wird sichtbar: Am oberen Rande wird von der Longitudinalwelle eine Transversalwelle (Schubwelle) gezogen (Näheres hierüber folgt später). Innerhalb des Gebietes dieser gezogenen Transversalwelle nun entstehen zahlreiche Sekundärbrüche.

4c. Am unteren linken Rande sind die von der primären Transversalwelle gezogenen Brüche gut sichtbar. Am oberen Rande Fortsetzung der starken Bruchbildung hinter der von der Longitudinalwelle gezogenen Schubwelle. Keine Bruchbildung im Bereich der primären Longitudinalwelle.

4f. Die Longitudinalwelle tritt in den Bereich der künstlich erzeugten Anrisse auf der Oberfläche der Glasplatte ein. Diese Anrisse werden durch die Longitudinalwelle nicht beeinflusst.

4g. Die Longitudinalwelle hat gerade den rechten Rand erreicht. Die am oberen Rande gezogene Schubwelle überstreicht die oberen Diamantenrisse. Sie werden stark vergrößert.

4h. Am rechten Rande entsteht nach Reflexion der Longitudinalwelle eine große Anzahl von Brüchen. Durch die gezogene Schubwelle werden die Anrisse weiterhin stark vergrößert.

4i und 4k. Weitere Ausbildung der gleichen Erscheinungen.

Die folgende Bildreihe (Bild 5) stellt im wesentlichen den gleichen Vorgang dar, nur sind einige Erscheinungen in dieser Reihe deutlicher ausgeprägt, andere dagegen weniger. Zum Unterschied gegen die Versuchsplatte in Bild 4 waren auf derjenigen des Bildes 5 am rechten Ende horizontale und vertikale Risse angebracht.

Teilbild 5a läßt folgende Erscheinung deutlich erkennen: Die Longitudinalwelle, die als Halbkreis auf dem linken Rande aufsetzt, erzeugt an diesem an den beiden Punkten A und B (vgl. Bild 12) je eine Schubwelle, die sich mit der Transversalwellengeschwindigkeit c_t ausbreitet. Da die Punkte A und B mit der höheren Geschwindigkeit c_l laufen, ist diese Schubwelle wie die Kopfwelle eines Geschosses anzusehen; sie ist gegen den Rand um den Winkel β geneigt, für den die MACHsche Beziehung gelten

muß: $\sin \beta = \frac{c_t}{c_l}$. Mit $c_l = 3200$ m/sec und c_t

$= 5400$ m/sec wird $\beta = 36^\circ$, wie man auch dem Bild 5a entnehmen kann. Die beiden geradlinigen Äste dieser „gezogenen“ Schubwelle müssen tangential in die primäre Transversalwelle einlaufen, deren Lage somit in Bild 5a gekennzeichnet ist, ohne daß diese selbst auf diesem Bild gut zu erkennen wäre.

Der Punkt C der Transversalwelle (vgl. Bild 12) ist aber noch dadurch gekennzeichnet, daß hier der Beginn der zahlreichen wiederum geradlinig begrenzten Randbrüche liegt.

5b. Die Longitudinalwelle ist gegen den oberen Rand gelaufen. Von einer normalen Reflexion ist kaum etwas zu erkennen, dagegen wird auch hier wieder eine Schubwelle gezogen. In der unteren linken Ecke des Bildes sieht man jetzt deutlich sowohl die „gezogene“ Schubwelle als auch die primäre Transversalwelle, die am Rande der Glasplatte zahlreiche Brüche auslöst.

5c. Die normale Reflexion der Longitudinalwelle am oberen Rande ist sehr schwach angedeutet, stark ausgeprägt jedoch die „gezogene“ Schubwelle. Diese ist gekrümmt, da ja ihre Erzeugende — der Schnittpunkt der Longitudinalwelle mit dem oberen Rand — eine variable Geschwindigkeit hat. Die primäre Transversalwelle ergibt am oberen Rande eine normale Reflexion.

5d. Primäre Longitudinalwelle, gezogene Transversalwelle, primäre Transversalwelle und deren Reflexion am oberen Rand sind gut erkennbar.

5e. Die gezogene Transversalwelle läuft gerade über das stark ausgeprägte Sekundärbruchbüschel und erzeugt hier eine Beeinflussung der Bruchbildung, so daß der geometrische Ort der Schnittkurve Bruchbüschelfront — Schubwelle auch auf den folgenden Bildern zu erkennen bleibt.

5f. Die gezogene Schubwelle ist an der Bruchfront des Sekundärbruchbüschels reflektiert worden.

5g. Am rechten Rande ist gerade die primäre Longitudinalwelle reflektiert worden. Die vertikalen Anrisse der dem Rand am nächsten liegenden Reihe vergrößern sich stark. Die am oberen Rande reflektierte Transversalwelle beginnt über die Front des Bruchbüschels zu laufen.

5h. Die vorgeritzten Stellen vergrößern sich hinter der reflektierten Longitudinalwelle und hinter der am oberen Rande gezogenen Transversalwelle. Im ersten Falle sind es vor allem die vertikalen Anrisse, im zweiten die horizontalen. Die reflektierte Transversalwelle ist über das Bruchbüschel gelaufen und hat hier eine Richtungsänderung der einzelnen Brüche hervorgerufen.

5i. Die reflektierte Longitudinalwelle ist über das Bruchbüschel gelaufen und hat als Spur eine Anzahl von Querbrüchen hinterlassen. Die reflektierte Longitudinalwelle und die von ihr gezogene Schubwelle ist am oberen Rande erkennbar (über dem Bruchbüschel).

5k. Die reflektierte Longitudinalwelle und die gezogene Transversalwelle sind am oberen Rand noch sichtbar. Alle anderen Wellen bzw. ihre Reflexionen sind durch die starke Bruchbildung zerstreut und nicht mehr zu erkennen (wie bereits in 5i).

Die nächste Bildreihe ist nach dem Reflexionschlierenverfahren aufgenommen. Die Versuchsplatte hatte die Abmessungen $150 \times 150 \times 2$ mm. Sie wurde wieder durch einen intensiven Stoß gegen die Mitte des linken Randes beansprucht. Die Bildfrequenz der Originalreihe betrug 450 000/sec. Die Platte weist schon vor dem Versuch schattige Stellen auf: Die Oberfläche ist nicht eben genug; es handelt sich um normales Fensterglas. Trotzdem sind die Einzelheiten des Vorganges gut erkennbar.

6a. Auf dem ersten Teilbild erkennt man auch hier sehr gut die Ausbreitung der Longitudinalwelle. Daß diese sichtbar ist, liegt daran, daß die Front des Druckstoßes an der Vorder- und Rückseite natürlich auch je einen Schubstoß mitzieht. Diese Schubwellen und ihre Reflexionen verursachen eine Deformation der Oberfläche entsprechend Bild 13, so daß die einzelnen Wellen des Bildes 6a und der

folgenden einen reellen elastischen Vorgang darstellen, während bei den spannungsoptischen Aufnahmen der Reihen 4 und 5 die hinter der Longitudinalwellenfront auftretenden scheinbaren Wellen

6b. Man kann auf diesem Bilde sehr deutlich zwei Gebiete voneinander unterscheiden: dasjenige, das durch die primäre Longitudinalwelle und die

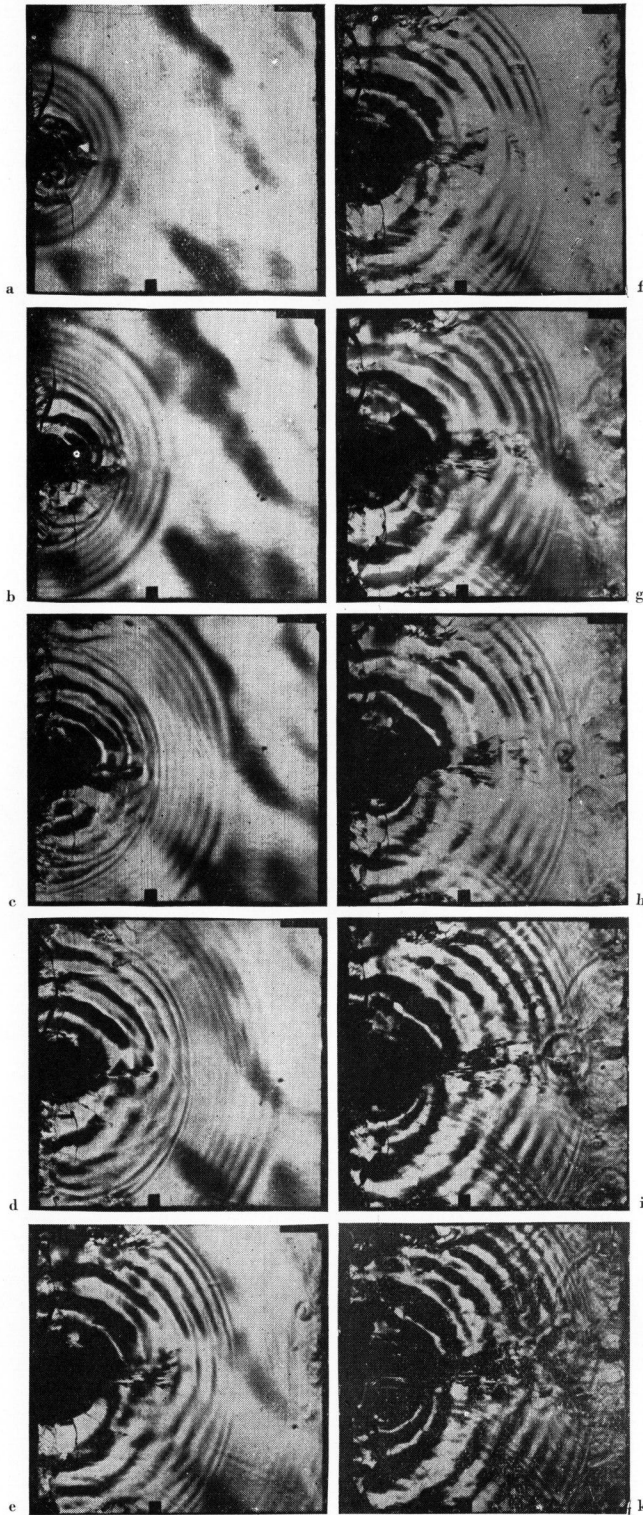


Bild 6. Sichtbarmachung der elastischen und Bruchvorgänge in einer quadratischen Fensterglasscheibe nach dem Reflexionsschlierenverfahren.

die Folge der elastischen und optischen Verhältnisse sind.

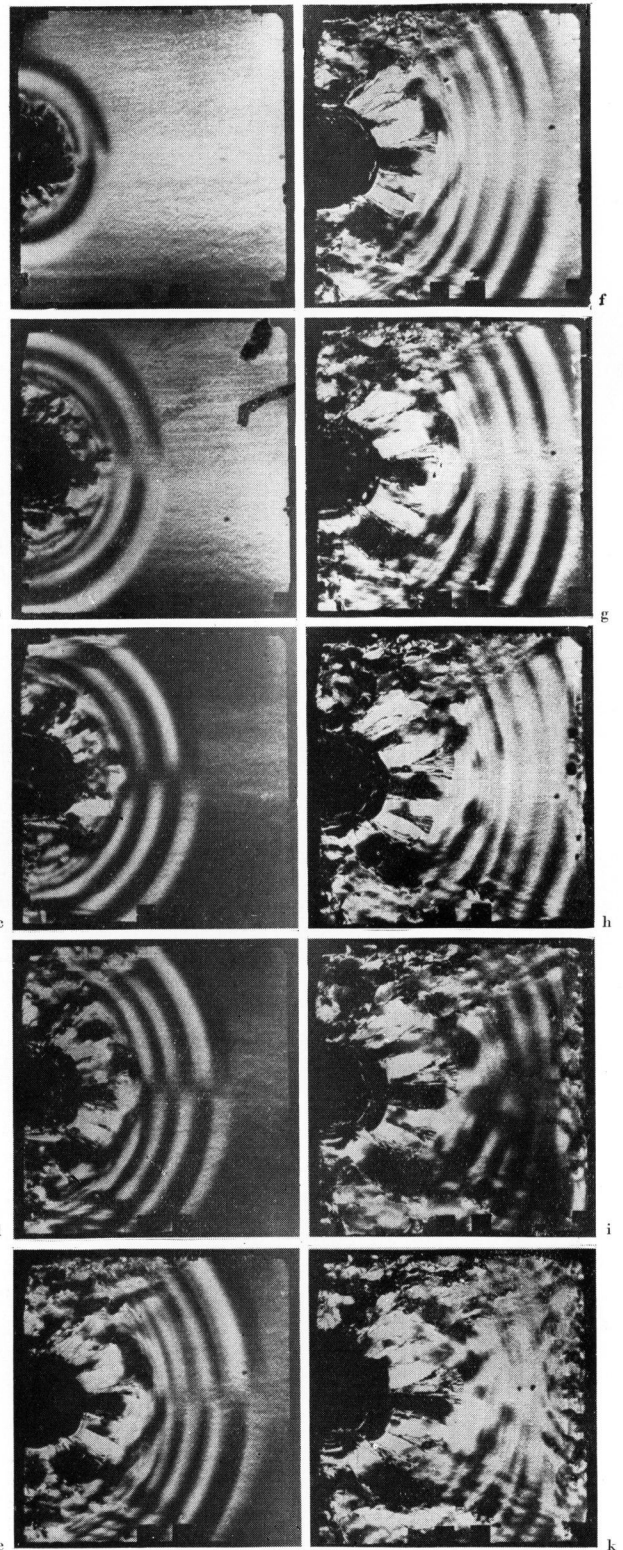


Bild 7. Wellenausbreitung und Bruchvorgang in einer Spiegelglasscheibe. Anwendung des Reflexionsschlierenverfahrens.

von dieser an Vorder- und Rückseite gezogene Schubwellen (Pulsationen) beherrscht wird, sowie dasjenige hinter der primären Transversalwelle, das

dort beginnt, wo die regelmäßige Aufeinanderfolge der T_L -Wellen (von der Longitudinalwelle gezogenen Transversalwellen) aufhört. Die Identifizierung dieser Lage der primären Transversalwelle ergibt sich eindeutig aus der Lage der geradlinig begrenzten Randbrüche, von denen wir schon wissen, daß sie durch die Transversalwelle erzeugt werden (Vgl. Bild 4 c, d und 5 a).

6 c. Man erkennt am oberen Rande schwach die Reflexion der Longitudinalwelle.

6 d. Das Gebiet der T_L -Wellen (oder der Pulsationen) ist wieder deutlich von demjenigen hinter der Transversalwelle unterschieden. Während bei den spannungsoptischen Aufnahmen das Gebiet hinter der primären Transversalwelle, soweit es nicht von Brüchen durchsetzt war, verhältnismäßig strukturlos aussah, bilden sich hier starke Wellen aus, die keinen konstanten Abstand voneinander haben. Ihre Geschwindigkeit — die sich aus mehreren aufeinanderfolgenden Aufnahmen bestimmen läßt — hängt von der Wellenlänge ab: es handelt sich um Biegewellen. Ihre Front ist identisch mit der primären Transversalwelle. Es ist verständlich, daß sie spannungsoptisch schlecht nachweisbar sind, während hingegen das Reflexionsverfahren sie besonders gut sichtbar machen muß, da dieses ja gerade die Deformation der Oberfläche registriert.

6 e. Auf diesem und den folgenden Bildern dieser Reihe ist ein neuer Effekt zu sehen: Die Longitudinalwelle ist gerade am rechten Rande reflektiert worden. Es entstehen eine Anzahl von Sekundärbrüchen. Diese Brüche lösen nun sekundäre Wellen aus, die sich kreisförmig um jeden Bruchbeginn herum ausbreiten. Eine Ausmessung der Geschwindigkeit ergibt, daß diese etwas niedriger als die der Transversalwellen ist. Es handelt sich wahrscheinlich um eine Verknüpfung von Oberflächen- und Biegewellen (vgl. die weiteren Ausführungen im III. Teil). Wir stellen jedenfalls fest: Beim Auslösen von Sekundärbrüchen breitet sich die vorher in Form innerer Spannungen vorhandene Energie — wenigstens zum Teil — als Welle aus.

6 f bis 6 k. Auch die primäre Transversalwelle löst Sekundärbrüche aus, von denen wiederum Sekundärbruchwellen ausgehen. Man erkennt ferner die regelmäßige Ausbildung der Biegewellen. Am oberen und unteren Rand ist die normale Reflexion aller Transversalwellen gut sichtbar.

Die von der Longitudinalwelle gezogene Schubwelle ist auf einigen Bildern zwar erkennbar (z. B. in 6 e und f), allerdings in dieser Bildreihe nicht sehr deutlich.

In der Bildreihe 7 handelt es sich um eine 6 mm starke Spiegelglasplatte der Abmessungen 150×150 mm. Die Oberfläche ist optisch einwandfreier als in der Reihe 6.

7 a. Die Front der Longitudinalwelle ist in der oberen Hälfte dunkel, in der unteren hell. Es liegt das an der Orientierung der Schlierenblende; sie ist horizontal ausgerichtet, und zwar so, daß eine Ablenkung des reflektierten Lichtes nach oben Verdunklung, Ablenkung nach unten Aufhellung ergibt. Deshalb erscheinen in den folgenden Bildern die

T_L -Wellen in der oberen und unteren Hälfte gegeneinander versetzt.

7 b. Die „Wellenlänge“ der T_L -Wellen zwischen der Longitudinal- und Transversalwelle ist wesentlich größer als in der Reihe 6. Sie müßte (entsprechend Bild 13) proportional zur Plattendicke sein. Eine Ausmessung bestätigt es.

7 c. Am unteren linken Rande ist die geradlinige Begrenzung der von der Transversalwelle erzeugten Bruchfronten erkennbar.

7 d und 7 e. Die von der Longitudinalwelle am oberen und unteren Rande gezogenen Transversalwellen sind hier und in den folgenden Bildern gut sichtbar.

7 f und 7 g. Im Bereich hinter der primären sowie hinter den „gezogenen“ Transversalwellen treten zahlreiche Sekundärbrüche auf.

7 h bis 7 k. Die Longitudinalwelle wird am rechten Rande reflektiert. Es entstehen zahlreiche Sekundärbrüche, die wieder Ausgangspunkt für Sekundärbruchwellen werden.

Die Bildreihe 8 bringt den Fall des vertikalen Stoßes gegen die Mitte einer runden 6 mm starken Spiegelglasplatte (Durchmesser 180 mm). Die Aufnahme erfolgte wieder mit einer Frequenz von 450 000/sec nach dem Reflexionsschlierenverfahren. Der schwarze Kern in der Mitte der Platte ist ein Stanniolplättchen, das den Zweck hatte, durch Kontaktgebung mit der verspiegelten Oberfläche der Platte den Stoßbeginn mit der Bildfolge zu synchronisieren. Die Zuleitung zum Plättchen erscheint doppelt, da man sie direkt sowie im Spiegelbild sieht.

8 a. Die Aufnahme gibt den Zeitpunkt unmittelbar nach dem Stoß wieder. Oben rechts vom Stanniolplättchen wird gerade eine Welle sichtbar.

8 b. Die Welle ist überall frei zu sehen.

8 c. Die Welle hat sich weiter ausgebreitet. Hinter dem Stanniolplättchen erscheinen die schön kreisförmig begrenzten primären Bruchfronten. Der Durchmesser des die Brüche einschließenden Kreises im Verhältnis zum Durchmesser der Welle erlaubt nun eine erste Aussage darüber, um welche Welle es sich im vorliegenden Falle handelt. Der Durchmesser der Welle ist etwa doppelt so groß wie der der Brüche. Da die Bruchgeschwindigkeit 1500 m/sec beträgt, kann es sich also nur um eine Transversalwelle handeln. Sie ist in diesem Falle deshalb so ausgeprägt, weil ja die Art der Anregung — ein Stoß senkrecht gegen die Oberfläche — insbesondere Biegewellen verursacht: Deren Front ist ein Schubstoß mit einer Teilchenverschiebung senkrecht zur Plattenoberfläche und mit der normalen Transversalwellengeschwindigkeit. Eine Longitudinalwelle ist auf den Bildern nicht zu erkennen. Prinzipiell ist sicher eine solche vorhanden, sie ist jedoch nicht energiereich genug, als daß die Empfindlichkeit der Anordnung ausreichen würde, sie nachzuweisen (vgl. Text zu 8i).

8 d. Rechts oben ist ein Sekundärbruch aufgetreten. Daher eilen hier die Brüche voraus.

8 e. Links unten setzt sich die Bruchfront aus lauter Kreisbögen zusammen. Hier liegen einzelne „Bruchbüschel“ nebeneinander, d. s. zahlreiche Einzelbrüche, die gemeinsam von einer Stelle ausgingen. Infolge der konstanten Bruchgeschwindigkeit

keit liegen dann die jeweiligen Bruchfronten auf einem Kreisbogen.

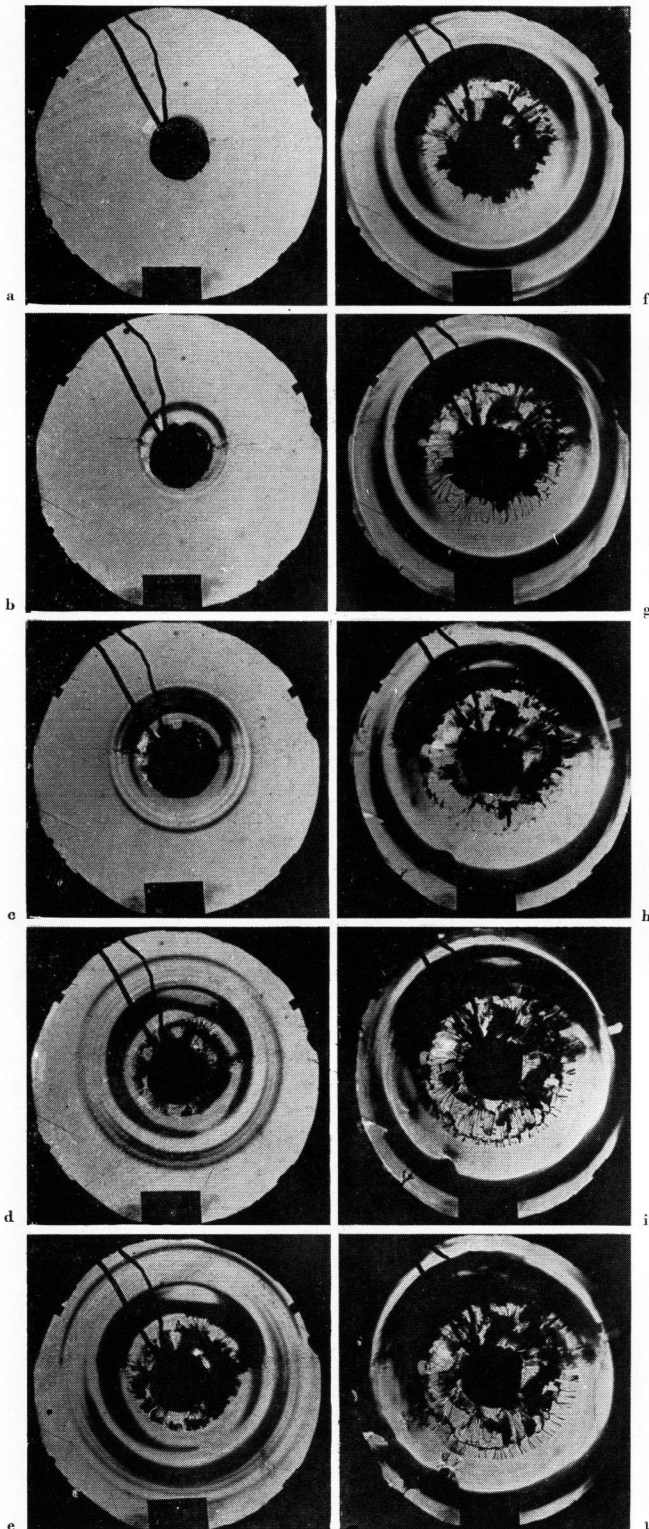


Bild 8. Runde Spiegelglasplatte. Anregung der Wellen und Brüche durch einen Stoß senkrecht gegen die Mitte der Platte, Reflexionsschlierenverfahren.

8f. Die Transversalwelle hat oben gerade den Plattenrand erreicht. Die Reflexion ergibt hier jedoch nicht wie bei der Longitudinalwelle eine größere Anzahl von Sekundärbrüchen.

8g. Die Bruchfronten sind auf diesem und den folgenden Bildern erstaunlich scharf, obgleich die Oberfläche noch mit einem Aluminiumbelag verspiegelt ist. Ein Bruch kann natürlich erst zu sehen sein, wenn die Bruchflanken einen Abstand von der Größenordnung der Lichtwellenlänge haben. Man muß wohl annehmen, daß der Abstand vom wirklichen Bruchbeginn bis zur optischen Sichtbarkeit kaum größer als einige Zehntel Millimeter ist.

8h. Fast alle Brüche weisen auf diesem Bild eine merkwürdige Verdickung der Front auf. Die Erklärung dafür läßt sich an Hand des nächsten Bildes finden.

8i. Alle Brüche haben an der Stelle, wo sich in Bild 8h die Bruchfronten befanden, Querbrüche erhalten. Wir wissen an Hand der früheren Aufnahmen (vgl. 5i), wie das wohl zustande gekommen sein wird: Die reflektierte Longitudinalwelle ist im Augenblick der Aufnahme des Bildes 8h über die Bruchfronten hinweggelaufen. Da die reflektierte Druckwelle eine Zugspannung mit sich führt, kommt es zum Abreißen der durch die Brüche bereits gebildeten Glasstreifen. Hierbei wird die vorhandene Bruchfront als Kerbstelle wirken. Diese Erklärung stimmt auch mit der Wegstrecke überein, die die Longitudinalwelle zurückgelegt haben müßte. Wir haben hiermit eine weitere indirekte Bestätigung dafür, daß es sich bei der in der vorliegenden Reihe gut sichtbaren Welle um eine Transversalwelle handeln muß.

8k. Links unten sind zwei Sekundärbruchzentren aufgetreten. Schon auf den beiden Bildern vorher war die Durchbiegung der Platte an diesen beiden Stellen gestört.

Es folgen nun noch zwei Bildserien, die als Schlierenaufnahmen im durchfallenden Licht gemacht worden sind.

In der Reihe 9 wurde eine Spiegelglasplatte der Abmessungen $150 \times 150 \times 5,8$ mm verwendet.

Alle Teilbilder der Reihe lassen erkennen, daß die Longitudinalwelle sowie die von ihr hervorgerufenen Pulsationen nach Bild 13, S. 10 (T_1 -Wellen) deutlich zu sehen sind. Die Wellenlänge der Pulsationen entspricht derjenigen, die aus den Reflexionsaufnahmen zu ermitteln ist.

Ferner sieht man gut (besonders z. B. in 9e—g) die am oberen Rand reflektierte Longitudinalwelle und die gezogene Schubwelle. Bei der reflektierten Longitudinalwelle ist zu bemerken, daß ihre Intensität zum Rand hin abnimmt. Das ist in erster Linie auf die Abhängigkeit des Reflexionskoeffizienten vom Einfallswinkel zurückzuführen, worauf im zweiten Teil näher eingegangen wird.

Bei der am rechten Rande reflektierten Longitudinalwelle fällt auf, daß sie, auch im weiteren Verlauf, sehr schön regelmäßig aussieht; der Grund ist wohl der, daß bei den Durchstrahlungsaufnahmen

1. die inneren Spannungen soweit sie keinen Oberflächeneffekt hervorrufen und
2. die Biegewellen, d. h. gleichsinnige Durchbiegungen der Versuchsplatte, wirkungslos sind.

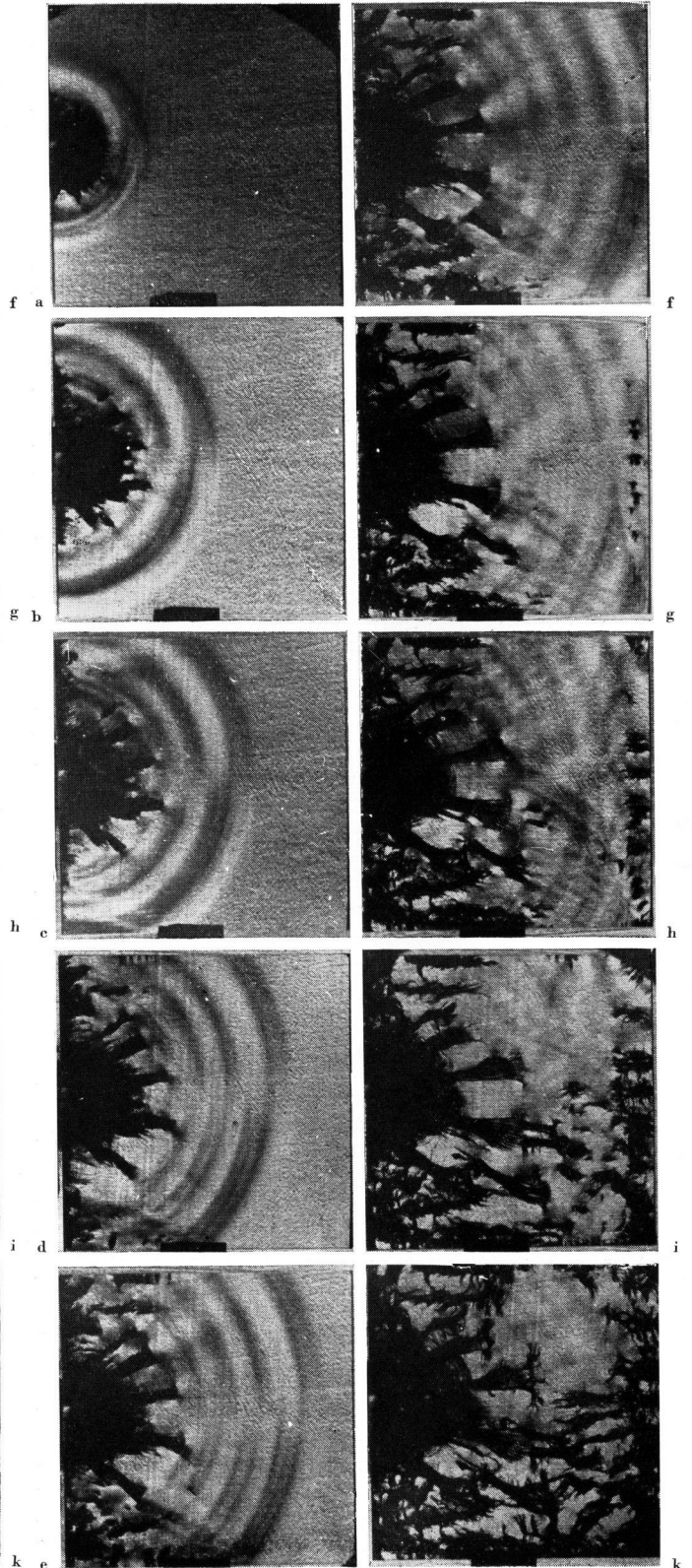
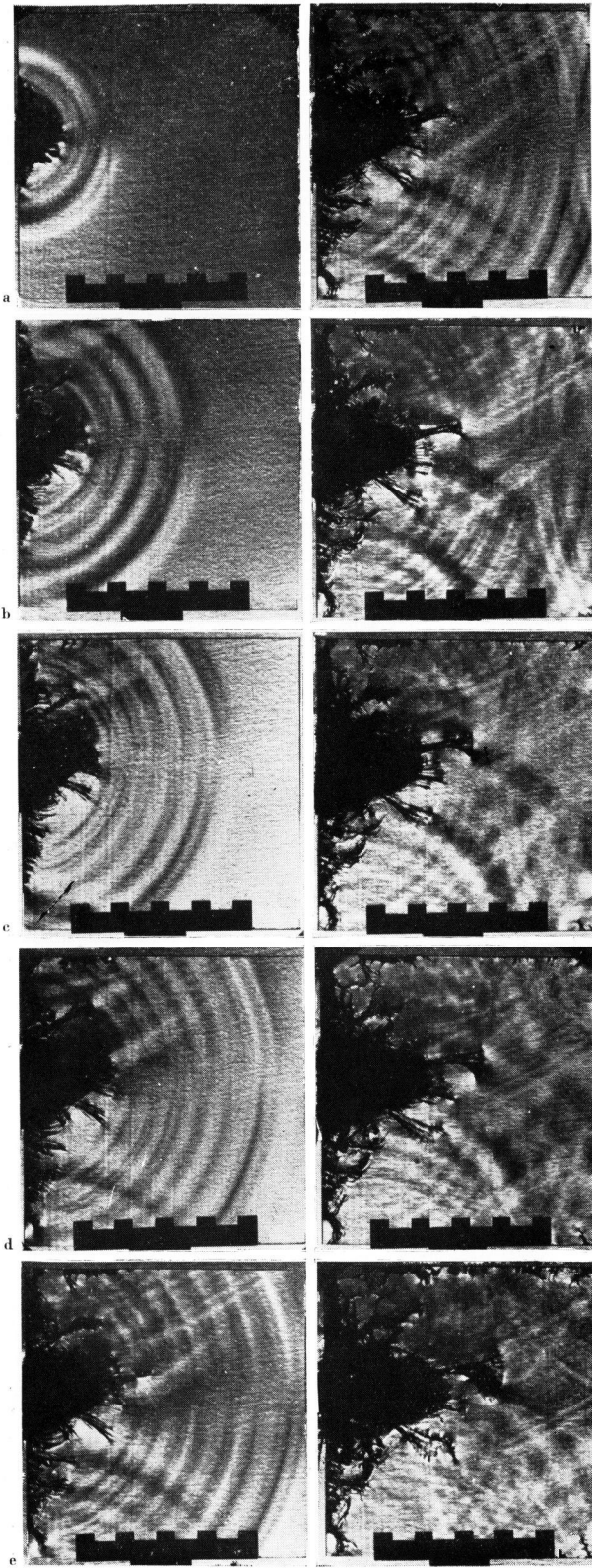


Bild 9. Stoßbeanspruchung einer Spiegelglasplatte (150×150×5,8mm). Schlierenaufnahme im durchfallenden Licht.

Bild 10. Schlierenaufnahme im durchfallenden Licht. Spiegelglasplatte 150×150×7,1 mm. Starke Sekundärbruchbildung.

Daher treten auch als besonderes Charakteristikum dieser und der folgenden Bildserie die primäre Transversale und die dahinter folgenden Biegewellen nicht in Erscheinung. Das Feld der von der Longitudinalwelle hervorgerufenen Pulsationen läuft durch bis zu den Bruchfronten.

Die Lage der transversalen Front ist auch hier markiert durch die von dieser erzeugten, geradlinig begrenzten Brüche am linken Rande.

Die Bildreihe 10 stellt im wesentlichen den gleichen Vorgang dar. Die Spiegelglasplatte war in diesem Falle 7,1 mm stark und der Stoß war offenbar stärker, weil wesentlich mehr Sekundärbrüche auftreten.

Zu bemerken ist, daß auf den Bildern 10d—f zahlreiche Sekundärbrüche im Bereich der am unteren Rande gezogenen Schubwelle auftreten und zwar bereits in dem Gebiet, das noch nicht zusätzlich von der primären Transversalwelle überstrichen ist.

Auf Bild 10g ist sehr prägnant das Auftreten der Sekundärbrüche nach Reflexion der Longitudinalwelle zu sehen. Die von diesen ausgehenden Wellen, die auf den Reflexionsaufnahmen festgestellt wurden, sind hier in keinem Falle zu finden. Das dürfte besagen, daß es sich bei diesen Sekundär-Bruchwellen in erster Linie um Biegewellen handeln muß.

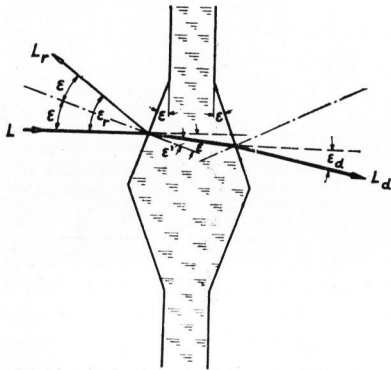


Bild 11. Ablenkung im durchfallenden Licht bei gegensinniger Deformation einer Glasplatte.

Aus dem gleichen Grunde ist auch das Gebiet zwischen den primären Brüchen und der primären Transversalwelle im Gegensatz zu den Reflexionsaufnahmen frei von starken Störungen. Bei den Reflexionsaufnahmen sieht man hier in erster Linie die konzentrischen Biegewellen, die aber wieder durch die von den Sekundärbrüchen ausgehenden Sekundärbruchwellen mitunter stark gestört sind. Wir haben somit eine Reihe von charakteristischen Unterschieden der drei experimentellen Verfahren kennengelernt.

Das spannungsoptische Verfahren basiert auf der durch Doppelbrechung hervorgerufenen resultierenden Phasenverschiebung des Lichtes. Diese ist bei Biegewellen nahezu Null, so daß Biegewellen nicht sichtbar zu machen sind. Man sieht auf den spannungsoptischen Aufnahmen auch keine Sekundärbruchwellen.

Bei den durch die Longitudinalwelle hervorgerufenen Pulsationen kann die Phase mehrfach durch Null gehen auf einer Strecke, die z. B. der Entfernung von AB nach DE in Bild 13 entspricht. Daher sind die auf den spannungsoptischen Auf-

nahmen sichtbaren zahlreichen „Farbgleichen“ in keiner Weise identisch mit einzelnen elastischen Wellen. Man kann aus ihnen also nicht ohne weiteres die Wellenlänge der Pulsationen entnehmen. Jedoch ist eine quantitative Auswertung prinzipiell möglich, worauf hier jedoch nicht eingegangen werden soll.

Das Reflexions- und das Durchstrahlungsschlierenverfahren machen beide die Longitudinalwelle auf Grund der von ihr hervorgerufenen Pulsationen der Plattendicke sichtbar. Deren Wellenlänge ist daher ohne weiteres zu entnehmen.

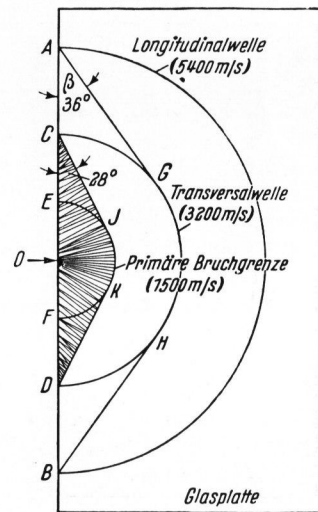


Bild 12. Die durch einen Stoß gegen die Kante einer Glasplatte erzeugten Wellen und Brüche.

Erstaunlicherweise sind die von der Longitudinalwelle gezogenen Schubwellen außer nach dem spannungsoptischen Verfahren auch nach beiden Schlierenverfahren zu sehen, während Biegewellen nur mit dem Reflexionsschlierenverfahren nachgewiesen werden können.

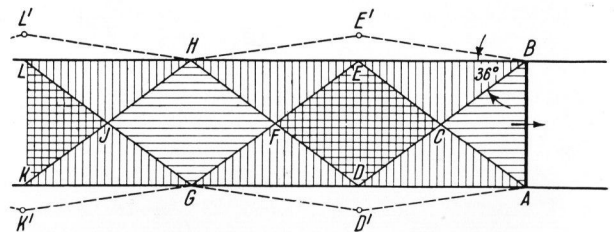


Bild 13. Gedachter Schnitt durch eine Glasplatte, in der in AB ein Druckstoß nach rechts läuft. Infolge der gezogenen Schubwellen treten in der Platte hinter dem Stoß periodische Verdickungen (E'D', L'K') auf.

Wir haben nun ein umfangreiches experimentelles Material über die Vorgänge bei der Stoßbeanspruchung und den Bruch von Glasplatten an die Hand bekommen. Es soll im folgenden Abschnitt analysiert und mit Hilfe der Ergebnisse theoretischer Arbeiten soweit vervollständigt werden, als dies bei der bisherigen Kenntnis dieser Vorgänge möglich erscheint. (18481)