

Im Auftrage der  
Deutschen Glastechnischen Gesellschaft e. V.  
herausgegeben von Dr.-Ing. H. Maurach.

\*  
Nachdruck oder Vervielfältigung im ganzen oder in Teilen ausdrücklich untersagt.  
Recht der Uebersetzung in fremde Sprachen vorbehalten. — Copyright 1940 by DGG in Frankfurt a. M.

18. Jahrg.

September 1940

Heft 9

DK 778.37 : 666.115 : 539.4 (045)

## Ueber die Arbeit von F. E. Barstow und H. E. Edgerton zur Glasbruchgeschwindigkeit.<sup>1)</sup>

Von H. Schardin.

(Mitteilung aus dem Ballistischen Institut der Luftkriegsakademie Berlin-Gatow.)

(Eingegangen am 2. August 1940.)

Auf dem deutschen Physikertag 1937 wurde vom Verf. über gemeinsam mit W. Struth durchgeführte Arbeiten vorgetragen, die mit Hilfe der Funkenkinematographie durchgeführt worden waren<sup>2)</sup>. U. a. wurde darüber berichtet, daß bei der Auslösung eines Bruches in einer Glasplatte durch ein Geschöß eine konstante Bruchausbreitungsgeschwindigkeit von 1500 m/s festgestellt worden war. Diese Tatsache erweckte das besondere Interesse der Glasfachleute und es wurden daraufhin umfangreiche Versuche angestellt, über die auf der 21. Glastechnischen Tagung am 16. Febr. 1938 in Berlin vorgetragen wurde<sup>3)</sup>. Mit den Folgerungen der Versuchsergebnisse für die Theorie des Glases beschäftigte sich auf der gleichen Tagung A. Smekal<sup>4)</sup>.

Bei den vom Verf. gemeinsam mit W. Struth durchgeführten Versuchen wurde meist ein fliegendes Geschöß zur Anregung des Glasbruches verwendet. Auf Grund dieser Tatsache wurde hin und wieder der Einwand gemacht, daß eben nur bei einer so intensiven Anregung die Bruchgeschwindigkeit von 1500 m/s auftritt, daß dagegen bei einer schwächeren Anregung sicher auch jede geringere Glasbruchgeschwindigkeit auftreten würde; die Geschwindigkeit von 1500 m/s sei eine obere Grenze.

Auf diese Vermutung konnte man erwidern, daß die Glasbrüche auch bei einem Beschuß ja nicht alle von der Einschußstelle selbst starten, sondern es treten oft zahlreiche Sekundärbrüche auf, entweder am Rande oder manchmal auch mitten in der Glasplatte, insbesondere wenn dort zahlreiche Stellen mit extrem hoher Kerbwirkung vorhanden sind (wie z. B. bei einem Drahtglas). Diese Sekundärbrüche treten nun unter scheinbar gleichen Versuchsbedingungen manchmal auf oder auch nicht, d. h. also ihre Anregungsbedingungen liegen gerade an der Grenze eines kritischen Wertes, und trotzdem ergab sich für sämtliche ausgemessenen Sekundärbrüche die gleiche Bruchgeschwindigkeit von 1500 m/s. Mehr noch: die Sekundärbrüche laufen manchmal von dem Punkt ihres Entstehens in zwei entgegengesetzten Richtungen gleichzeitig weiter; auch für beide Richtungen wurde die gleiche Geschwindigkeit gemessen.

Ferner wurden einige Bruchvorgänge nicht durch einen Schuß durch die Glasplatte selbst hervorgerufen, sondern z. B. durch einen Schuß in einen Wasserbehälter, dessen Wände aus Glasplatten bestanden. Auch in diesem Falle ergab sich für die zerspringenden Glasplatten die gleiche Bruchgeschwindigkeit.

Es konnte also mit großer Wahrscheinlichkeit angenommen werden, daß die Glasbruchgeschwindigkeit unabhängig von der Art der Anregung des Bruches ist.

Nun ist es sehr wertvoll, daß inzwischen von F. E. Barstow und H. E. Edgerton am Massachusetts Institute of Technology in Cambridge U.S.A. auch eine Bestimmung der Glasbruchgeschwindigkeit durchgeführt worden ist. Und zwar verwenden beide Forscher zur Auslösung des Bruches eine Stahlkugel (Durchmesser 9,5 mm), die in der Mitte an einer 10,2×12,7 cm großen Glasplatte anliegt und gegen die ein Metallstempel durch Federkraft mit einer Geschwindigkeit von rund 5 bis 10 m/s geschleudert wird. Die Art der Anregung ist also wesentlich „sanfter“ als durch ein fliegendes Geschöß. Es sei daher im folgenden etwas näher auf diese Arbeit eingegangen.

Zur Abbildung des Vorganges verwenden auch Barstow und Edgerton eine Beleuchtung durch einen elektrischen Funken. Jedoch wurde im Gegensatz zu den Arbeiten von H. Schardin und W. Struth keine kinematographische Bildfolge des Vorganges aufgenommen, sondern die Apparatur lieferte im allgemeinen von jedem Vorgang nur ein Einzelbild. Das bedingt zwar einen relativ einfachen Aufbau der Versuchsanordnung, man muß dabei aber auf eine vielseitige Auswertungsmöglichkeit der Aufnahmen verzichten. Der elektrische Funke warf sein Licht ohne jede Optik auf die Versuchsglasplatte, unter der sich das lichtempfindliche Papier befand. Die entstehenden Glassprünge lieferten also ein Schattenbild. In der Mitte der Glasplatte befand sich auf der gleichen Seite, an der das photographische Papier auflag, auch die Stahlkugel, die zum Einleiten des Bruches diente. An dieser Stelle hatte das Papier ein rundes Loch, damit der Schlag des gegen die Kugel fliegenden Stempels sich auf die Glasplatte ungedämpft übertragen konnte.

Bei dieser Art der Auslösung mußte eine sehr präzise zeitliche Kopplung des Beleuchtungsfunkens angewendet werden, denn im ganzen stehen nur 42 Mikroskunden zur Verfügung; innerhalb dieser Zeit muß der Beleuchtungsfunke springen, um überhaupt ein Bild zu

<sup>1)</sup> Siehe F. E. Barstow und H. E. Edgerton, J. Amer. ceram. Soc., 22 (1939), S. 302—307.

<sup>2)</sup> H. Schardin u. W. Struth, Z. techn. Phys., 18 (1937), S. 474—477.

<sup>3)</sup> H. Schardin u. W. Struth, Glastechn. Ber., 16 (1938), S. 219—227.

<sup>4)</sup> A. Smekal, Glastechn. Ber., 16 (1938), S. 228—231.

bekommen, auf dem noch etwas von der zeitlichen Ausbreitung des Bruches zu sehen ist. Wenn wie bei Schardin und Struth 24 Teilbilder zur Verfügung stehen, so ist ein wesentlich größerer zeitlicher Spielraum vorhanden. Barstow und Edgerton benutzten als Fixpunkt für die Zeit die metallische Berührung des vorliegenden Stempels mit einem auf die Kugel aufgesetzten kurzen 5/16" starken Eisenstab. Der so gegebene Kontakt betätigte ein Verzögerungsgerät, an dem Zeiten zwischen 0 und 0,2 Millisekunden eingestellt werden konnten, von diesem wiederum wurde über ein Quecksilber-Ventilrohr der Beleuchtungsfunke geschaltet. Der Funkenkreis wurde von einem auf 7000 Volt aufgeladenen 0,1  $\mu$ F Kondensator gespeist. Die zeitliche Genauigkeit für das Springen des Funkens wird zu  $\pm 5$  bis 10 Mikrosekunden angegeben.

Man erhält so zwar Einzelbilder des Vorganges, ist jedoch noch nicht in der Lage, die Bruchgeschwindigkeit zu messen. Um das zu ermöglichen, ließen Barstow und Edgerton  $15 \cdot 10^{-6}$  sec nach dem ersten Beleuchtungsfunke noch einen zweiten in einer getrennten Funkenstrecke springen. Dadurch wird das photographische Papier doppelt belichtet, man kann jedoch, wie Bild 1 wiedergibt, die beiden Stadien der Bruchausbreitung auseinanderhalten und hat so den der zeitlichen Differenz der Funken entsprechenden Bruchweg. Die genaue Zeitdifferenz wurde mit einem Kathodenstrahloszillographen gemessen; der Lichtfleck desselben schrieb eine Normalfrequenz und wurde außerdem durch beide Funken abgelenkt.

Dadurch war eine sehr genaue Bestimmung der

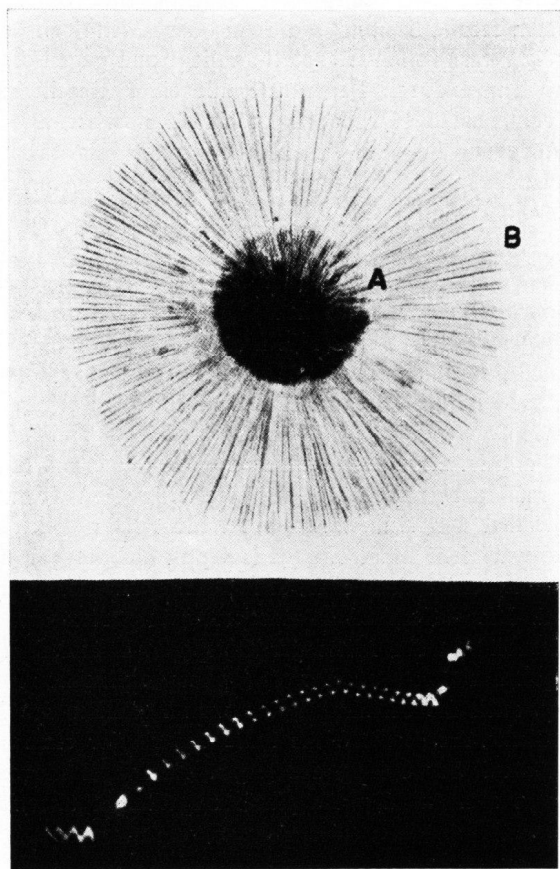


Bild 1. Zur Bestimmung der Glasbruchgeschwindigkeit sind zwei Phasen eines Bruchvorganges übereinanderbelichtet. Aus dem Abstand AB und der entsprechenden, mit Hilfe eines Kathodenstrahloszillographen ermittelten Zeitdifferenz ergibt sich die Bruchgeschwindigkeit. (Unten das Oszillogramm.)

Bruchgeschwindigkeit möglich, als Fehler wird  $\pm 1$  bis 2% angegeben.

Das Resultat der Versuche von Barstow und Edgerton für die Bruchgeschwindigkeit im Glas ist 5040 Fuß/Sek.; d. s. 1536 m/s.

Das stimmt innerhalb der Fehlergrenzen genau mit dem von Schardin und Struth gefundenen Wert überein, so daß auch die wesentlich schwächere Art der Anregung keinen anderen Wert der Bruchausbreitungsgeschwindigkeit zufolge hat.

Allerdings fügen Barstow und Edgerton in einer Anmerkung hinzu, daß sie glauben, auf Grund neuerer Versuche zu der Annahme gekommen zu sein, daß unter geeigneten Bedingungen auch geringere Geschwindigkeiten als 1500 m/s möglich seien. Obgleich über diesen Punkt nichts Näheres mitgeteilt ist, möchte der Verf. hierzu folgendes sagen: Es kommt durchaus öfter vor, daß ein Bruch kurze Zeit stehen bleibt und dann weiterläuft, dann aber wieder mit der alten Geschwindigkeit<sup>5)</sup>. Wenn man nun den Weg des Bruches über ein Zeit mißt, die einen kurzen Stillstand einschließt, so muß natürlich eine scheinbar zu kleine Bruchgeschwindigkeit herauskommen. Da Barstow und Edgerton überhaupt nur 2 Zeitpunkte des Vorganges registrieren, so ist durchaus möglich, daß in wenigen Fällen auch kleinere Bruchgeschwindigkeiten herauszukommen scheinen.

Das Stehenbleiben des Bruches ist durch die elastischen Spannungsverhältnisse bedingt, während erfahrungsgemäß die Bruchgeschwindigkeit nicht von der Größe der Spannung abhängt. Das Stehenbleiben des Bruches ist also eine sekundäre Erscheinung und hat mit dem Mechanismus des Bruches selbst nichts zu tun. Würde man einen Bruch, für den man eine zu kleine Geschwindigkeit gemessen hat, zeitlich genügend auflösen, so würde man wahrscheinlich feststellen, daß er ein oder mehrere Male stehen geblieben ist, daß er aber — wenn er läuft — mit der konstanten Glasbruchgeschwindigkeit läuft.

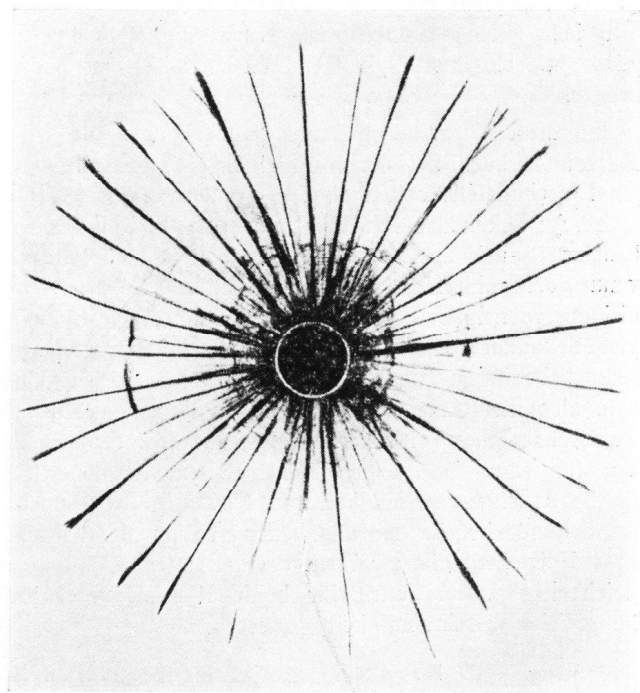


Bild 2. Typische Aufnahme eines normalen Glasbruchvorganges: radial sich ausbreitende Brüche mit kreisförmiger Begrenzung.

<sup>5)</sup> Siehe hierüber H. Schardin u. W. Struth, Glastechn. Ber., 16 (1938), S. 226.

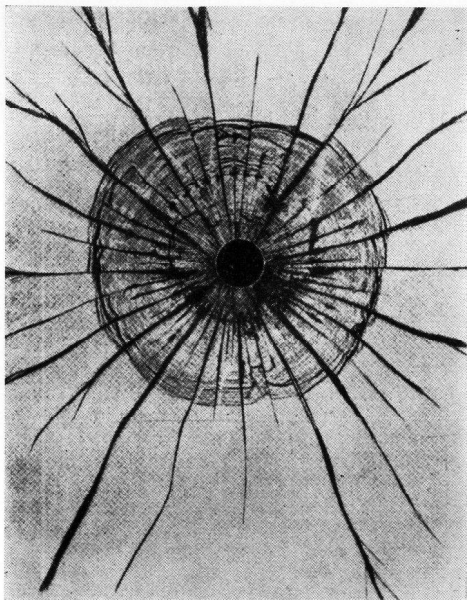


Bild 3. Die Brüche haben den Plattenrand erreicht; einige sind jedoch schon vorher stehengeblieben. In der Mitte bricht ein Bruchkegel heraus.

Der Verf. ist auch der Ansicht, daß die gewöhnlichen thermisch ausgelösten Sprünge in Glasplatten, die man sogar mit dem Auge verfolgen kann, bei genügender zeitlicher Auflösung sich als sprungweise mit Glasbruchgeschwindigkeit laufend herausstellen würden. Dafür spricht m. E. auch das dabei auftretende knisternde Geräusch, denn dieses enthält sehr hohe Tonfrequenzen, deren Entstehung durch einen mit nur einigen Meter pro Sekunde laufenden Bruch vollkommen unverständlich wäre.

Bild 2 und 3 geben zwei Aufnahmen von einem normalen Bruchbild wieder. In der Mitte springt ein ganzer Bruchkegel heraus, dessen Entstehung weiter unten beschrieben wird. Bild 4 zeigt eine sehr schöne Aufnahme vom Bruchvorgang in einem hochvorgespannten Sicherheitsglas. Auch Barstow und Edgerton fanden für dieses die gleiche Bruchgeschwindigkeit.

Auf folgendes machen Barstow und Edgerton aufmerksam, was beim Betrachten der Bilder nützlich

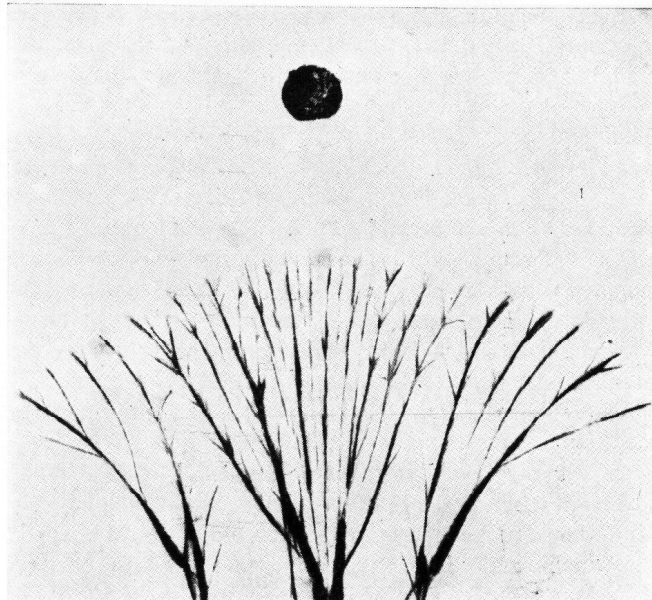


Bild 5.

Obgleich der Stempel gegen die Mitte der Glasplatte schlägt (schwarzer Kreis), laufen die Brüche vom Rande der Platte her los. In dem Vorgang sind aus diesem Grunde mit einem Schweiß versehen, der späteren Zeitmomenten entspricht. Vor einem Glassprung erkennt man also schwach den späteren Verlauf. Ein Sprung dagegen, der stehengeblieben („gestorben“) ist, ist an der Spitze vollkommen

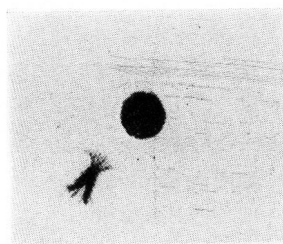


Bild 6. Der Bruchbeginn liegt in einiger Entfernung von der Stelle, an der der Stempel gegen die Platte schlägt (schwarzer Kreis).

scharf und dadurch als solcher sofort zu erkennen. Diese sonst in der Funkenkinematographie als technische Unschönheit empfundene Eigenschaft des Funkens kann sich also manchmal auch als durchaus zweckmäßig erweisen.

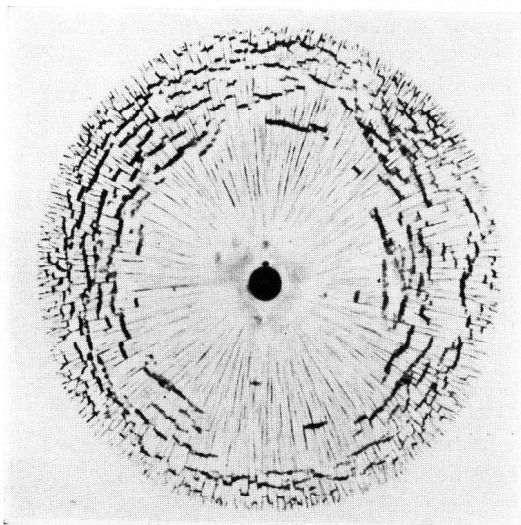


Bild 4. Bruchvorgang im Sekuritglas.

sein kann: der elektrische Funke weist im allgemeinen nach einem sehr kurzen und hellen Lichtblitz noch ein geringes Nachleuchten auf. Schnell ablaufende Aenderun-

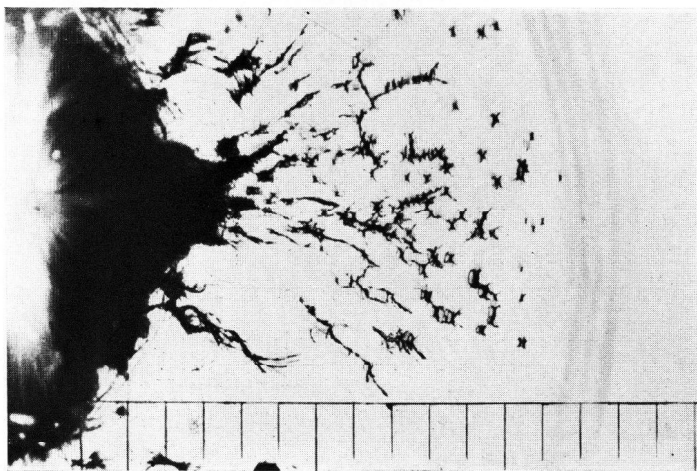


Bild 7. Zertrümmerung einer Glasplatte durch eine Detonation. Unmittelbar hinter der Front der Longitudinalwelle (in der Durchstrahlung als Schliere sichtbar) treten Sekundärbrüche auf. (Aufnahmen von H. Schardin und W. Struth; alle übrigen Abbildungen der Abhandlung sind der angegebenen Veröffentlichung von F. E. Barstow und H. E. Edgerton entnommen.)

Ein Viertel der von Barstow und Edgerton unter möglichst immer gleichen Bedingungen gemachten Aufnahmen zeigten ein abnormales Aussehen: Der Bruchbeginn lag nicht in der Mitte der Glasplatte, wo die Stahlkugel den mechanischen Schlag übertrug, sondern entweder am Rande der Platte oder mitten im Gesichtsfeld (Bild 5 und 6). Die Belastung in der Mitte der Glasplatte ist eben so gering, daß bei Vorhandensein ausgeprägter Kerbstellen, die sich irgendwo in der Platte befinden, diese zuerst zum Bruch führen. Gerade der Rand ist ja in der Beziehung bekanntlich bevorzugt.

Manchmal traten auch mehrere Bruchzentren nebeneinander auf. Barstow und Edgerton haben die Annahme geprüft, ob diese verschiedenen Bruchzentren unmittelbar von der durch den Schlag erzeugten elastischen Welle hervorgerufen sein könnten. In diesem Falle hätte sich eine bestimmte Beziehung zwischen dem Abstand der Bruchzentren, dem Radius der Brüche sowie der Bruch- und Schallgeschwindigkeit ergeben müssen. Sie haben einen derartigen Zusammenhang nicht bestätigt gefunden. Nach den in den Glastechn. Ber. a. a. O. wiedergegebenen Untersuchungen von Schardin und Struth wäre dies ohne weiteres zu erwarten gewesen; denn die von der Einschußstelle eines fliegenden Geschosses ausgehende elastische Welle ist auf jeden Fall intensiver als in den Versuchen von Barstow und Edgerton und reicht trotzdem nicht aus zur sofortigen Auslösung von Sekundärbrüchen. Selbst in einem Glas mit sehr starken inneren Kerbstellen (Drahtglas) ist es nicht

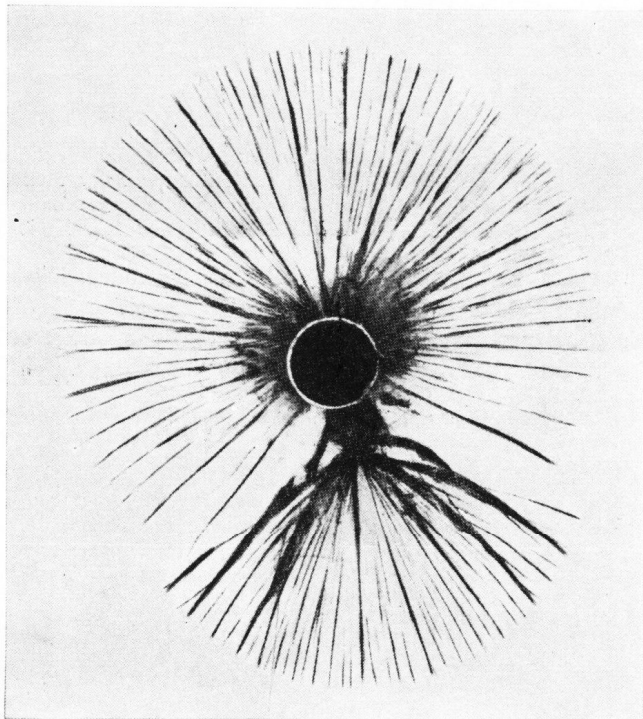


Bild 8. Bruchausbreitung mit zwei Bruchzentren.



Bild 9.  
Fünf verschiedene Phasen vom Bruchbeginn.

der Fall, obgleich hier sehr zahlreiche Sekundärbrüche entstehen. Die größte Geschwindigkeit, die sich hier für die Anregung der Sekundärbrüche errechnet, ist rd. 3000 m/s (gegenüber 5000 m/s Schallgeschwindigkeit im Glas). Erst bei einer extrem intensiven elastischen Welle, wie sie durch eine Detonation eines Sprengkörpers auf einer Glasplatte erzielt werden kann, erreicht man, daß unmittelbar hinter der Wellenfront zahlreiche Sekundärbrüche auftreten (Bild 7).

In der Aufnahme Bild 8 von Barstow und Edgerton, wo dieser Fall nach deren Meinung auch vorzuliegen scheint, dürfte es jedoch so sein, daß beide Zentren in Wirklichkeit für sich Sekundärbrüche waren; dann kann ja ein ganz willkürlicher Wert für den zeitlichen Abstand der Bruchzentren herauskommen, der hier nur zufällig der obigen Beziehung entspricht.

Sehr interessant sind die Bilder von Barstow und Edgerton über den Beginn der Bruchausbreitung in der Nähe der Stahlkugel (Bild 9). Diese sind gewonnen worden durch seitliches Durchstrahlen von viereckigen Glasstäben, die Lichtrichtung war also senkrecht zu der in allen anderen Bildern. Bis auf einen kleinen Anbruch unmittelbar an der Kugel startet der Bruch an der gegenüberliegenden Seite, läuft der Stoßwelle entgegen und dann erst wird von dort aus ein Kegel herausgebrochen.

Abschließend betonen auch Barstow und Edgerton, daß die konstante Glasbruchgeschwindigkeit eine erstaunliche Tatsache darstellt, der eine fundamentale Bedeutung zukommt. Sie endgültig zu erklären und zu verstehen, sei weiteren Arbeiten vorbehalten.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß die sehr interessante Arbeit von Barstow und Edgerton eine schöne Bestätigung der Ergebnisse von Schardin und Struth darstellt; die anders geartete Anregung des Bruches macht sie besonders wertvoll. (14 092)

DK 532.612 : 666.1.031.1 (045)

## Zur Kenntnis der Oberflächenspannung von Gläsern. II. \*).

Von Gustav Keppeler und Alfred Albrecht.

(Mitteilung aus dem Technisch-chemischen Institut der Technischen Hochschule Hannover.)

(Eingegangen am 7. Mai 1940.)

B. Einige aus den besprochenen Arbeiten sich ergebende Regeln.

Die im vorstehenden Abschnitt vollzogenen Korrekturen führen für eine größere Anzahl von Untersuchungen zu einer ziemlich guten Uebereinstimmung der

Werte. Daneben finden sich allgemeinere Gesichtspunkte, die durch die Ergebnisse meist mehrfach belegt sind. Sie sollen hier knapp zusammengefaßt sein.

\*) Teil I der Abhandlung s. Glastechn. Ber., 18 (1940), H. 8, S. 201—210.