

Bedeutung der Schardin'schen Bruchausbreitungsgeschwindigkeit.

Von Adolf Smekal, Halle (Saale).

Institut für theoretische Physik der Martin Luther-Universität, Halle.

(Erweiterte Fassung des auf der 21. Glastechnischen Tagung in Berlin am 16. Februar 1938 gehaltenen Vortrages.)

1. Bisherige Erkenntnisse und Vorstellungen. 2. Deutung der Schardinschen Bruchausbreitungsgeschwindigkeit. 3. Prüfungsmöglichkeiten der vorgeschlagenen Auffassung. 4. Bemerkungen zu den Schardinschen Bruchbildern. 5. Zusammenfassung.

1. Bisherige Erkenntnisse und Vorstellungen.

Der Bruch des Glases erfolgt zumeist so rasch, daß eine Bestimmung seiner Fortpflanzungsgeschwindigkeit bisher nur bei besonders „langsamen“ Bruchvorgängen möglich war (1). Solche Brüche können in ungleichförmig beanspruchten Glasproben willkürlich hervorgebracht werden; sorgt man dafür, daß der Bruch in ein wenig beanspruchtes Gebiet hineinläuft, dann kann man ihm schließlich mit dem Auge folgen, insbesondere wenn er sich in dem betrachteten Bereiche „totläuft“, d. h. zum Stillstand kommt. Die einfachste Erzeugung solcher Bruchvorgänge erfolgt durch ungleichförmige thermische Beanspruchungen. Neuere systematische Versuche dieser Art rühren von Hirata her (2), bei denen für bestimmte Fälle auch zahlenmäßige Angaben über Bruchgeschwindigkeiten (z. B. 0,1 bis 100 cm/sec) erhalten wurden. Hirata verfolgte u. a. die Radialbrüche, die bei der örtlichen Erwärmung von Glasplatten (Dicke 1,3 bis 1,5 mm) mittels einer spitzen Gasflamme auftreten; die Ausbildung des endgültigen Bruchbildes hat dabei etwa 2 Minuten in Anspruch genommen.

Nach diesen Erfahrungen scheint es, daß die Bruchvorgänge innerhalb gewisser Grenzen alle denkbaren Geschwindigkeiten besitzen können. Tatsächlich konnte die Bruchtheorie spröder Körper den Satz aufstellen, daß „der räumliche Verlauf des athermischen Bruchvorganges im homogenen Körper von der Geschwindigkeit seines Fortschreitens weitgehend unabhängig ist“ (3). Im Geltungsbereich dieses Satzes bestand daher zunächst kein besonderes Interesse an der wirklichen Größe der Bruchgeschwindigkeit. Man durfte sich den Bruchvorgang beliebig langsam fortschreitend denken (3), da er in Uebereinstimmung mit älteren Erkenntnissen von de Fréminville und Preston (4) senkrecht zur größten Zugspannung, nicht der anfänglichen, sondern zu den durch den jeweiligen Bruchfortschritt veränderten Spannungsverteilungen im Glase fortschreitet. Da sich elastische Spannungsänderungen in festen Körpern mit Schallgeschwindigkeit ausbreiten, liegt es auf der Hand, daß für alle derartigen Bruchvorgänge die Bruchausbreitungsgeschwindigkeit kleiner sein muß als die Schallgeschwindigkeit. Doch scheint dieser Satz bisher nicht ausgesprochen worden zu sein.

Aus dem deutlichen Einfluß der bei Zugversuchen benutzten Belastungsgeschwindigkeiten von 0,5 bis 1000 g/qmm sec auf die Höhe der Zerreißfestigkeit (5) geht unzweifelhaft hervor, daß die gewöhnlichen wärmebeeinflussten Bruchvorgänge wenigstens mit verhältnismäßig geringen Geschwindigkeiten einsetzen. Die gleiche Folgerung ergibt sich aus dem Bestehen endlicher Festigkeitsgrenzen im Dauerstandversuch beim Fehlen äußerer bildsamer Formänderungen. Alle diese makroskopischen Zeiteffekte der Festigkeit beruhen auf spannungsthermischen Formänderungen an sub-

mikroskopischen Kerbstellen, die notwendigerweise mit verhältnismäßig geringen Geschwindigkeiten vor sich gehen (6).

Betrachtet man die weitere Fortpflanzung des Bruchvorganges, etwa beim Zerreißen eines Glasstabes, dann bewirkt die fortschreitende Querschnittsabnahme an der Bruchstelle, daß die den Bruch fortführenden Spannungen rasch anwachsen. Man hat daher angenommen, daß der Bruch in derartigen Fällen immer rascher und rascher fortschreitet. Da sich zuerst eine glatte, glänzende Bruchfläche bildet — der „Spiegel“ — nahm man an, daß diese bei geringeren Bruchgeschwindigkeiten entsteht als der Restbruch, der die rauhe „Furchungsfläche“ liefert (7). Diese Auffassung entspricht verwandten Betrachtungen von Preston (8). Bei kritischer Untersuchung ihrer Unterlagen zeigt sich jedoch, daß sie keine genügende Rechtfertigung besitzt. Die Erfahrung lehrt zwar, daß alle „langsamen“ Bruchvorgänge durch „spiegelnde“ Bruchflächen gekennzeichnet sind, nicht aber, daß die Umkehrung dieses Satzes berechtigt wäre. Die Entscheidung darüber, ob und in welcher Richtung Unterschiede zwischen der Fortpflanzungsgeschwindigkeit bei glatten oder bei rauhen Bruchflächen vorhanden sind, mußte daher weiteren Versuchen und einer Vertiefung der theoretischen Einsicht anheimgegeben bleiben.

2. Deutung der Schardinschen Bruchausbreitungsgeschwindigkeit.

Die funkenkinematographischen Untersuchungen der Bruchvorgänge in Gläsern durch Schardin und Struth (9) liefern den bisher fehlenden direkten Zugang zur Bruchgeschwindigkeits-Messung „rascher“ Bruchvorgänge. Die Bereicherung, die die Festigkeitslehre des Glases dadurch erfahren wird, ist noch kaum abzusehen. Es darf zunächst als hocheureiliche Bestätigung der bisherigen indirekten Erkenntnisse betrachtet werden, daß die gemessenen Bruchgeschwindigkeiten kleiner als die Schallgeschwindigkeiten der Gläser sind. Darüber hinausgehend liefern diese Versuche aber noch die überraschende Feststellung, daß die Bruchfortpflanzungsgeschwindigkeit einen festen Wert besitzt, der vom räumlichen Bruchverlauf unabhängig ist!

Die Versuche beschränken sich bisher auf Raumtemperatur, auf sonst unbeanspruchte Glasproben und auf die große Belastungsgeschwindigkeit der Bruchauslösung durch ein Gewehrsgeschöß von Mündungsgeschwindigkeit (d. h. Geschößgeschwindigkeit kleiner als Bruch- und Schallgeschwindigkeit). Da alle Festigkeitsversuche an Glasproben einen Einfluß der Temperatur, Belastungsart und Belastungsgeschwindigkeit ergeben haben, wird die Ermittlung des Einflusses der Veränderung dieser Versuchsbedingungen von besonderem Interesse sein. Allerdings sind alle diese Erscheinungen, wie eingangs bereits erinnert wurde, im wesentlichen als Folgen der spannungsthermischen Veränderungen an einzelnen submikroskopi-

schen Kerbstellen anzusehen, so daß außerhalb solcher Kerbstellen eine Beeinflussung der Bruchgeschwindigkeit nicht mit Notwendigkeit vorauszusehen ist. Unabhängig von der Klarstellung dieser Fragen besteht aber schon jetzt die Aufgabe, ein Verständnis der räumlichen Konstanz der Schardinschen Bruchgeschwindigkeit anzubahnen.

Diese Konstanz legt es nahe, an die molekulare Natur des Bruchvorganges anzuknüpfen. Die Lösung der Molekularbindungen längs der entstehenden Bruchflächen beansprucht offenbar einen gewissen Zeitaufwand. Z. B. könnte es darauf ankommen, hierzu eine den Atomen eigene Reaktionszeit abzuwarten; aus der Schardinschen Geschwindigkeit $1500 \text{ m/sec} = 1,5 \cdot 10^5 \text{ cm/sec}$ und der Größenordnung 10^{-7} cm für den mittleren Molekularabstand würde sich so eine molekulare Aufenthaltsdauer von rund $10^{-7} : 10^5 = 10^{-12} \text{ sec}$ errechnen — eine in der Atomphysik nicht ungewohnte Größenordnung. Für eine ganz andersartige Deutungsmöglichkeit spricht jedoch die Erwägung, daß zur Lösung der Molekularbindungen ein gewisser Arbeitsbetrag erforderlich ist, dessen Leistung auf Kosten der elastischen Verformungsarbeit des beanspruchten Glasstückes mit einem gewissen Zeitaufwand verbunden sein mag. Dieser Weg ist auch dazu geeignet, eine Beziehung zur Schallgeschwindigkeit im Glase (5000 m/sec) herzustellen, mit der die Schardinsche Geschwindigkeit (1500 m/sec) offenbar nahe zusammenhängt.

Die Schallgeschwindigkeit $\sqrt{E/d}$ mißt die Ausbreitungsgeschwindigkeit elastischer Störungen im quasihomogenen Medium mit der Dichte d und dem Elastizitätsmodul E . Das Vorhandensein der zahllosen submikroskopischen Kerbstellen in den Gläsern berührt die Ausbreitungsgeschwindigkeit nicht, solange die Kerbstellen als sehr klein gegen die Wellenlängen jener Schallwellen gelten können, aus denen man sich die elastischen Störungen aufgebaut denken kann. Die Kerbstellen können nur eine gewisse Schallschwächung zur Folge haben.

Für elastische Störungen, die aus der Veränderung von Kerbstellen im Glase entspringen, liegen jedoch ganz andere Verhältnisse vor. Die Wellenlängen solcher Störungen sind von der gleichen Größenordnung wie die Abmessungen der Kerbstellen selbst und auch jene der Nachbar-Kerbstellen. Für solche elastische Veränderungen muß das Glas wegen seiner Kerbstellen demnach als grundsätzlich inhomogener Festkörper betrachtet werden, so daß für diese Wellen eine Herabsetzung der Ausbreitungsgeschwindigkeit gegen die Schallgeschwindigkeit zu erwarten ist.

Bei der Bruchfortpflanzung liegen nun elastische Veränderungen vor, deren Ausbreitung im Körper mit Wellen beider Arten zusammenhängen. Sobald der Bruch makroskopische Abmessungen angenommen hat, ist er als Großvorgang anzusehen, dessen makroskopische Beeinflussung der elastischen Spannungsverteilung im Glase mit der gewöhnlichen Schallgeschwindigkeit vollzogen wird. An der fortschreitenden Bruchfront hingegen wandert der Bruch gewissermaßen von Kerbstelle zu Kerbstelle vor, denn er beruht zur Gänze auf der Ueberwindung der Molekularbindungen durch hohe elastische Spannungsspitzen, wie sie eben nur an der Bruchfront und an den ihr benachbarten Kerbstellen verwirklicht sind (10). Die Ausbreitung der diesem Fortschreiten ent-

sprechenden elastischen Veränderungen und die Zufuhr der aufzuwendenden molekularen Trennungsarbeiten erfolgt also mit der kleineren Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wellenlängen von Kerbstellen-Abmessungen. Also kann auch der Bruchfortschritt nur mit einer gegen die normale Schallgeschwindigkeit verkleinerten Fortpflanzungsgeschwindigkeit vor sich gehen.

Die vorstehende Theorie der Bruchfortpflanzung liefert eine qualitative Wiedergabe sowohl der Verwandtschaft, als auch der Verschiedenheit zwischen der Schardinschen Bruchgeschwindigkeit und der gewöhnlichen Schallgeschwindigkeit. Eine exakte rechnerische Durchführung, die das Zahlenverhältnis beider Geschwindigkeiten liefern müßte, steht noch aus. Sie erfordert eine genauere Kenntnis der Kerbstelleneigenschaften, als sie zur Zeit verfügbar ist. Die bisherigen Festigkeitstatsachen haben aber jedenfalls zu der Feststellung geführt, daß die Dichte der Kerbstellen des Glasinnern im allgemeinen merklich gleichförmig ist. Daher sollte auch die Bruchfortpflanzungsgeschwindigkeit im Glasinnern überall merklich die gleiche sein und von Verschiedenheiten der makroskopisch-elastischen Beanspruchungen abhängen. Tatsächlich liegt, wie vorhin erwähnt, die eigentliche Bedeutung der Schardinschen Ergebnisse gerade darin, daß die Bruchgeschwindigkeit überall einen festen Wert zu besitzen scheint. Man wird somit hoffen dürfen, den angegebenen Zusammenhang umkehren und aus den Schardinschen Bruchgeschwindigkeiten auf die Kerbstellenbildung und -Beschaffenheit der Gläser zurückschließen zu können.

3. Prüfungsmöglichkeiten der vorgeschlagenen Auffassung.

Die vorstehende Deutung der Schardinschen Bruchgeschwindigkeit liefert eine Reihe von Prüfungsmöglichkeiten.

A. Unabhängigkeit der Bruchgeschwindigkeit von makroskopischen Probenabmessungen.

Wegen der submikroskopischen Abmessungen der Kerbstellen des Glasinnern ist zu erwarten, daß die makroskopischen Körperabmessungen auf die Bruchgeschwindigkeit keinen Einfluß nehmen. Die Bruchgeschwindigkeit ist tatsächlich für Plattenglas mit Dicken zwischen 2 und 7 mm übereinstimmend gefunden worden (11), sowohl für den Durchschuß (Schardin-Struth, Bild 19*), wie für den auf eine Kante parallel zur Plattenebene auftreffenden Schuß (Bild 22 bis 26). Das Gleiche scheint bei der Zertrümmerung eines Glasblockes bei räumlicher Bruchausbreitung (Bild 27) vorzuliegen.

B. Bruchgeschwindigkeit und Sekundärbruch-Auslösung.

Die Bruchflächen bestehen nach den bisherigen Erkenntnissen über den Bruchvorgang (10) aus Primär- und Sekundärbruch-Teilen. Vom Standpunkt der Bruchtheorie aus besteht zwischen den Sekundärbrüchen, die Aufrauhung oder spitzwinklige Verzweigung einer einheitlichen Bruchbahn bewirken, und den davon räumlich getrennt entstehenden Brüchen keine grundsätzliche Verschiedenheit. Sie alle beginnen, sobald an den betreffen-

*) S. den vorhergehenden Aufsatz von H. Schardin und W. Struth, S. 219—227 dieses Heftes.

den Kerbstellen Spannungsspitzen von der erforderlichen Höhe eintreten (10). Ebenso wie bezüglich ihrer räumlichen Lage, bestehen auch in der zeitlichen Aufeinanderfolge der beiden Sekundärbrucharten angebbare Verschiedenheiten. Die zur primären Bruchbahn gezählten Sekundärbrüche entstehen durch die gleiche Hauptspannung der äußeren elastischen Beanspruchung und sollten daher praktisch gleichzeitig gebildet werden, was durch spitzwinklig verzweigte Brüche ausnahmslos bestätigt wird (Bild 4 bis 6). Bruchgeschwindigkeit und Auslösegeschwindigkeit der Sekundärbrüche stimmen hier also praktisch überein. Bei räumlich entfernter Sekundärbruchbildung dagegen sollte die Auslöse-Geschwindigkeit von der Bruchgeschwindigkeit verschieden werden und gegebenenfalls der Schallgeschwindigkeit nahekommen können. Dies hat sich mehrfach bestätigt (Bild 4, 7 und 8), besonders schön beim Bruch des Drahtglases (Bild 9, 11), sowie bei der stark verzögerten Auslösung von „Querbrüchen“ (Bild 5, 6, 14, 15). — Die Auslösegeschwindigkeiten sollten ferner unter sonst gleichartigen Bedingungen eine Abhängigkeit von der benutzten Geschwindigkeit zeigen. Besonders interessant wären derartige Erscheinungen bei der Bruchauslösung durch Vorgänge mit Ueberschallgeschwindigkeiten.

C. Temperatur und Bruchgeschwindigkeit.

Nach der vorgeschlagenen Theorie der Bruchgeschwindigkeit ist ein merklicher Einfluß der Versuchstemperatur unwahrscheinlich. Ein Temperatureffekt ist nur für den Beginn des primären Bruchvorganges zu erwarten und sollte auch nur dann bemerkbar sein, wenn die Bruchauslösung durch sehr „langsame“ Vorgänge eingeleitet wird. Von großem Interesse wäre eine Feststellung darüber, ob die Bruchgeschwindigkeit eine ähnliche Temperaturabhängigkeit wie die Schallgeschwindigkeit besitzt, die sich aus dem Temperaturgang von Dichte und Elastizitätsmodul errechnen läßt. Dies würde Aussagen über den Umgebungszustand der Kerbstellen ermöglichen.

D. Bruchgeschwindigkeit und Kerbstellendichte.

Bei abnehmender Kerbstellendichte sollte eine Annäherung der Bruchgeschwindigkeit an die Schallgeschwindigkeit erwartet werden. In Glasfäden stark verschiedener Durchmesser können beträchtliche Kerbstellendichte-Verschiedenheiten hervorgebracht werden (12). Ähnliche, aber geringere Einflüsse wären in sehr dünnen Glasfolien verschiedener Dicke anzunehmen. Leider dürften Bestimmungen der Bruchgeschwindigkeit an solchen Objekten großen Schwierigkeiten begegnen. Daher bleibt vorerst nur der Ausweg, merklich verschiedene Kerbstellen-Dichten in Gläsern verschiedener chemischer Zusammensetzung aufzufinden, wofür besonders Hartgläser geeignet sein könnten. Die gefundenen Verschiedenheiten der Bruchgeschwindigkeiten in Spiegelglas und Quarzglas (11) (Bild 16) können im Sinne der Theorie gedeutet werden, da Quarzglas bei nahezu gleicher Schallgeschwindigkeit die größere Bruchgeschwindigkeit besitzt und auch eine größere Kerbstellendichte aufzuweisen scheint.

E. Einfluß des Spannungsgehaltes.

Vorgespanntes Plattenglas (z. B. Sekurit) ist dadurch ausgezeichnet, daß der Bruchverlauf, wenn er einmal ein-

geleitet ist, zur Gänze in der zuggespannten Schicht verläuft, also im Platteninneren verbleibt; die bekannten, senkrecht zur Plattenebene gerichteten Bruchflächen stoßen nicht bis zu den Plattenoberflächen durch, sondern endigen in den druckgespannten Schichten noch unterhalb der Oberflächen (13). Aus der Krümmung des Endverlaufes sowie aus gewissen, auf den Bruchflächen erscheinenden Zeichnungen kann die ursprüngliche Richtung des Bruchverlaufes eindeutig erschlossen werden (13). Die Bruchausbreitung im vorgespannten Plattenglas ist also von anisotroper Beschaffenheit: senkrecht zur Plattenebene sinkt die Bruchgeschwindigkeit in den druckgespannten Schichten auf Null ab; parallel zur Plattenebene dagegen besitzt sie ihren größten Wert. Eine sichere Voraussage über den Einfluß der Vorspannung auf die Bruchgeschwindigkeit ist ursprünglich nicht versucht worden. Die Versuche konnten an Proben ausgeführt werden, die von genau übereinstimmender chemischer Zusammensetzung waren und bis auf die Vorspannung auch die gleiche Vorbehandlung erfahren hatten. Es zeigte sich, daß die allein meßbaren Bruchgeschwindigkeiten parallel zur Plattenebene miteinander übereinstimmten (11) (Bild 18), trotz stark verschiedener Bruchbilder (Bild 15) und sehr verschiedener Bruchflächenbeschaffenheit! Die Größe der Bruchgeschwindigkeit wird also durch das seitliche Totlaufen der Brüche nicht beeinflusst, ebenso wenig durch die Bildung zahlloser feiner Brüche, die der zuggespannten Schicht nachträglich ein weißliches Aussehen („grauer Streifen“) verleihen (13). Ersteres ist nach der vorgeschlagenen Theorie ohne weiteres verständlich wegen der makroskopischen Plattendicke (vgl. A). Die sehr feinteilige Bruchverzweigung in der zuggespannten Schicht hätte allenfalls eine Verlangsamung der Bruchausbreitung herbeiführen können. Das Aussehen der Bruchflächen widerspricht dieser Erwartung nicht, indem es eindeutig ergab, daß die Bruchfront in den ungespannten Neutralschichten beiderseits der zuggespannten Schicht als geschwindigkeitsbestimmend anzusehen ist, wogegen sie in der zuggespannten Schicht und — viel stärker — auch in den druckgespannten Schichten deutlich zurückbleibt. Während dieses ohne weiteres einleuchtet, weist jenes darauf hin, daß die Bruchfortpflanzung durch die der feinteiligen Verzweigung entsprechende erhebliche Leistung an Oberflächenenergie tatsächlich verlangsamt würde, wenn nicht die nötige Energiezufuhr durch das Voreilen der Bruchfront in den Neutralschichten geliefert würde (13). Das Aussehen der Bruchflächen ist daher mit der vorgeschlagenen Theorie zwanglos vereinbar und erklärt ebenso zwanglos die Unwirksamkeit der Vorspannung auf die Schardinische Bruchgeschwindigkeit.

F. „Verlangsamte“ Brüche.

Beispiele von Bruchvorgängen, deren Bruchgeschwindigkeit ohne eine so wirksame Zeitlupe wie die des Schardinischen Verfahrens gegen den Normalwert als verlangsamt erscheinen könnten, haben Schardin und Struth beim Schuß auf die Kante einer Glasplatte parallel zur Plattenebene aufgefunden (Bild 25). Sie zeigen, daß diese Brüche vorübergehend stehen bleiben und dann mit der ursprünglichen Geschwindigkeit ein Stück weiterlaufen (Bild 26). Die Möglichkeit, daß diese und noch viel „langsamere“ Sprünge nur abschnitts-

weise, dann aber mit Normalgeschwindigkeit fortschreiten, kann aus der vorgeschlagenen Theorie unmittelbar entnommen werden. Nur bei sehr langsamen Veränderungen der makroskopischen Spannungsverteilung im Glase — wie etwa bei den eingangs erwähnten thermisch ausgelösten Bruchvorgängen — muß auch damit gerechnet werden, daß ein Bruchvorgang sich rein spannungsthermisch verschiebt und dann wesentlich kleinere und temperaturabhängige Bruchgeschwindigkeiten besitzt.

4. Bemerkungen zu den Schardinschen Bruchbildern.

Die Ergebnisse der eindrucksvollen Bruchbilder von Schardin und Struth sind im Vorstehenden nur hinsichtlich ihrer Aussagen über die Geschwindigkeit der Bruchfortpflanzung besprochen worden. Darüber hinausgehend bieten sie ein reiches Anschauungs- und Belegmaterial für die bereits bekannten Zusammenhänge zwischen den elastischen Beanspruchungen und dem räumlichen Verlauf der Bruchvorgänge (10). Durch das gleichzeitige Nebeneinander zahlreicher, ähnlich beschaffener Bruchvorgänge werden Erscheinungen sichtbar gemacht, die bei der Wahl weniger wirksamer Vorgänge der Bruchauslösung nur vereinzelt auftreten und daher weniger gesetzlich erscheinen würden. Das gilt vor allem von den spitzwinkligen Verzweigungen der Radialbrüche in den Bildern 4 bis 6 an gewöhnlichem Spiegelglas und den Bildern 12 an einem Mehrschichtenglas, die nahezu nach Ablauf der gleichen radialen Bruchwege einsetzen. Sie dürfen als überzeugende Belege für den Satz angesehen werden, daß solche Verzweigungen beim Ueberschreiten einer gewissen kritischen makroskopischen Zugspannung senkrecht zur Bruchrichtung beginnen müssen.

Aus der Tatsache, daß die meisten Bruchvorgänge mit Schardinschen Geschwindigkeiten „spiegelnde“ Bruchflächen besitzen und daß auch die rauheren Innen-Bruchflächen von vorgespanntem Plattenglas keine veränderte Bruchgeschwindigkeit zeigen, folgt nunmehr (vgl. 1.), daß die mehr oder minder große Rauigkeit von Bruchflächen keine Verschiedenheiten der Bruchgeschwindigkeiten bedingen muß.

Besonders klare Beispiele für die Selbständigkeit der Ausgangsstellen von Sekundärbruchvorgängen liefern die Bilder 10 vom Durchschuß eines Drahtglases; sie zeigen

überdies, daß jedem Bruchvorgang eine bestimmte anfängliche Ebenenrichtung zukommt und daß die Bruchausbreitung längs dieser Ebene nach allen — hier den beiden entgegengesetzten — Richtungen gleichförmig fortschreitet.

5. Zusammenfassung.

Es wird gezeigt, daß die Schardin'sche Geschwindigkeit der Bruchausbreitung im Glase hinter der Schallgeschwindigkeit zurückbleiben muß, weil sie nicht die Fortpflanzungsgeschwindigkeit makroskopischer elastischer Störungen in einem quasi-homogenen Medium darstellt, sondern die Fortpflanzung der submikroskopischen Vorgänge an der Bruchfront durch ein grundsätzlich inhomogenes Medium betrifft. Die Schardin'sche Geschwindigkeit sollte demnach einen neuen Weg zur Kennzeichnung der im spröden Glase vorhandenen submikroskopischen Kerbstellen darbieten. Die vorgeschlagene Auffassung der Bruchausbreitung liefert eine Reihe von Prüfungsmöglichkeiten und befindet sich in Uebereinstimmung mit den bisherigen Ergebnissen der Schardin'schen Untersuchungen. Sie gestattet die Voraussage, daß die Schardin'sche Bruchgeschwindigkeit innerhalb gewisser Grenzen unabhängig ist von der Temperatur und der Geschwindigkeit der Beanspruchungssteigerung des Glases beim Bruchbeginn. Eine endgültige Beurteilung der Theorie wird erst nach Ausführung weiterer Versuche und Rechnungen möglich sein.

Herrn Prof. Schardin möchte ich für sein freundliches Entgegenkommen und viele anregende Aussprachen meinen herzlichsten Dank sagen.

Für die entgegenkommende Stiftung von Versuchsmaterial danke ich verbindlichst Herrn Dr. Hecht von der Heraeus Quarzglas G. m. b. H., Herrn Direktor Dipl.-Ing. L. von Reis der Spiegelmanufaktur Stolberg (Rhld.) und Herrn Direktor Dipl.-Ing. A. Lamesch der Sekuritwerke in Herzogenrath.

Für die Anregung zur näheren Beschäftigung mit der Entdeckung der Schardin'schen Bruchausbreitungsgeschwindigkeit bin ich Herrn Dr.-Ing. H. Maurach zu herzlichstem Dank verbunden.

Anmerkungen und Schrifttumsangaben.

(1) Vgl. z. B. Ch. d. Fréminville, Rev. Métallurgie, **11** (1914), S. 971—1056; F. W. Preston, J. Soc. Glass Technol., **10** (1926), S. 234 ff. (Ref. Glastechn. Ber., **4** (1926/27), S. 437); K. H. Borchard, Glashütte, **64** (1934), S. 115 (Ref. Glastechn. Ber., **12** (1934), S. 348 u. 440).

(2) M. Hirata, Experimental studies on form and growth of cracks in glass plate. Scient. Papers Inst. Phys. Chem. Res., Tokyo, **16** (1931), S. 172—195.

(3) A. Smekal, Bruchtheorie spröder Körper, Z. Phys., **103** (1936), S. 495—525, § 6 auf S. 509.

(4) Ch. d. Fréminville, a. a. O.; F. W. Preston, a. a. O. — Siehe auch A. Smekal, Festigkeitseigenschaften spröder Körper, Ergeb. ex. Naturw., **15** (1936), S. 106—188, insbesondere Ziff. 11,3 auf 146—147.

(5) G. Apelt, Z. Phys., **91** (1934), S. 336 ff.; K. Mengelkoch, ebenda, **97** (1935), S. 46 ff. (Ref. über diese Arbeiten s. Glastechn. Ber., **13** (1935), S. 63; **15** (1937), S. 293); M. Eichler, ebenda, **98** (1935), S. 280 ff.

(6) A. Smekal, Glastechn. Ber., **15** (1937), S. 259—270; J. Soc. Glass Technol., **20** (1936), S. 432—448. — Ferner A. Smekal, (3), (4).

(7) A. Smekal, Glastechn. Ber., **13** (1935), S. 141—151, 222—232.

(8) F. W. Preston, (1).

(9) H. Schardin und W. Struth, Z. techn. Phys., **18** (1937), S. 474 ff.; Glastechn. Ber., **16** (1938), H. 7, S. 219—227.

(10) A. Smekal, (6), (3) und (4).

(11) H. Schardin und W. Struth, Glastechn. Ber., **16** (1938), H. 7, S. 219—227, Zahlenangaben in Abschnitt 11.

(12) A. Smekal, Ueber die mechanischen Eigenschaften dünner Glasfäden. Nova Acta Leopoldina Halle, N. F., **5** (1938), S. 512—514 (Ref. Glastechn. Ber., **16** (1938), H. 7, S. 240); Vortrag auf der 21. Glastechnischen Tagung in Berlin am 18. Februar 1938 (wird in den Glastechn. Ber. erscheinen).

(13) Nach eigenen, noch unveröffentlichten Ergebnissen über den Bruch von vorgespanntem Plattenglas.