

peraturkurve liegen sowohl die Ausdehnungswerte zwischen 100 und 400° C als auch diejenigen zwischen 600 und 1000° C auf je einer Geraden, welche sich beide bei einer Temperatur von 470° C, dem „Aufspaltpunkt“ des Quarzglas, schneiden (Bild 4). Wie Bild 3 zeigt, liegen die dynamisch ge-

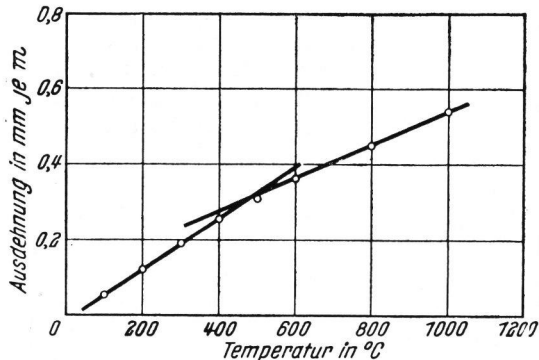


Bild 4. Ausdehnungsverlauf von Quarzglas. (Nach FITTENING: Wärmetechnische Richtwerte. VDI-Verlag, 1938, S. 32).

messenen Aufspaltpunkte höher als die statisch bestimmten, woraus evtl. geschlossen werden könnte, daß bei der  $\alpha$ - $\beta$ -Cristobalit-Umwandlung mit einer gewissen Trägheit zu rechnen ist. Trägt man die Differenzen dynamisch-statisch in Abhängigkeit vom Kieselsäuregehalt graphisch auf, so ergeben sich keine willkürlichen Schwankungen, sondern ein geschlossener Kurvenzug, so daß diesen Differenzen evtl. ebenfalls irgend eine physikalisch bedingte Gesetzmäßigkeit zugrunde liegen dürfte.

Mit fallendem Kieselsäuregehalt nimmt das Verhältnis  $\alpha_1:\alpha_2$  der Ausdehnungskoeffizienten unterhalb ( $\alpha_1$ ) und oberhalb ( $\alpha_2$ ) des Aufspaltpunktes ab, wie aus Bild 5 hervorgeht, wobei ebenfalls wieder der Wert für Quarzglas mit eingetragen worden ist. Extrapoliert man nach der Seite abnehmenden Kieselsäuregehaltes, so dürfte bei etwa 75%  $\text{SiO}_2$  der Wert  $\alpha_1:\alpha_2 = 1,0$  erreicht sein, demnach von hier ab ein Aufspaltpunkt im Sinne der hochkiesel-

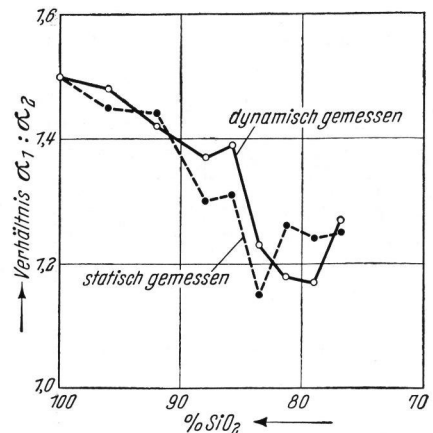


Bild 5. Abhängigkeit des Verhältnisses  $\alpha_1:\alpha_2$  der Ausdehnungskoeffizienten unterhalb ( $\alpha_1$ ) und oberhalb ( $\alpha_2$ ) des Aufspaltpunktes vom Kieselsäuregehalt.

säurereichen Gläser ( $\alpha_1 > \alpha_2$ , also gewissermaßen ein negativer Temperaturkoeffizient des mittleren Ausdehnungskoeffizienten) nicht mehr zu erwarten sein. (18653)

## Über den Anfangsverlauf der Bruchgeschwindigkeit im Zerreißversuch.

Von Adolf SMEKAL, Universität Graz (Österreich).

(Eingegangen am 24. April 1950.)

Herrn Dr.-Ing. Heinrich MAURACH zum 70. Geburtstag zugeeignet

Inhalt: 1. Eigenschaften des Bruchbeginnes. — 2. Anfangsverlauf der Bruchgeschwindigkeit. — 3. Individueller Anstieg der Bruchgeschwindigkeit während des Zerreißvorganges.

1. **Eigenschaften des Bruchbeginnes.** Der Zugversuch mit zylindrischen Glasstäben erlaubt, jede Bevorzugung bestimmter Teile des Prüfkörpers auszuschließen und mit dem Ort des Bruchbeginnes die empfindlichste Stelle des Stabes festzulegen. Es ist bekannt, daß diese Stelle sich nahezu stets an der Staboberfläche befindet und daß ihre Wirksamkeit von der Beschaffenheit des umgebenden Mediums, von der Temperatur und von der Geschwindigkeit der Spannungszunahme während des Versuches entscheidend mitbestimmt wird. Im übrigen ist die Wirksamkeit der empfindlichsten Stelle von Stab zu Stab verschieden und ergibt auch für sorgfältigst hergestelltes Versuchsmaterial eine charakteristische Streuung der Zerreißfestigkeit, die etwa hundertmal größer ist als die Meßgenauigkeit der Einzelwerte [1]. Mittelwert und Streuung der Zerreißfestigkeit sind von der Glaszusammensetzung abhängig.

Die Verknüpfung des Bruchbeginnes mit der Staboberfläche bedingt ferner, daß die Wirksamkeit der empfindlichsten Stelle auch von der Größe der verfügbaren Oberfläche abhängt, also von den

Probeabmessungen Stablänge und Stabdurchmesser. Damit wird die Frage zur Entscheidung gestellt, ob für den Bruchbeginn sämtliche Oberflächenorte grundsätzlich gleichberechtigt sind oder ob der Bruchbeginn durch statistisch verteilte, ortsfeste Strukturbesonderheiten ausgelöst wird. Im ersteren Falle sollte der Ort des Bruchanfanges allein durch die zufälligen Energieschwankungen der Wärmebewegung bedingt sein und bei inhomogener mechanischer Beanspruchung an Stellen maximaler Deformationsenergie auftreten. Das ist jedoch durch Untersuchungen über die Biegefestigkeit zylindrischer Glasstäbe widerlegt worden; die empirische Wahrscheinlichkeit dafür, daß der Ort des Bruchbeginnes längs der stärksten gespannten Faser des Biegestabes gefunden wird, beträgt höchstens 1% [2]. Demnach gibt es ausgedehnte Teile der Staboberfläche, von denen größere Anspannungen ertragen werden als die von der Biegebeanspruchung herrührende Nennspannung am Orte des Bruchbeginnes. Die wahre Bruchspannung daselbst muß um einen endlichen Betrag größer sein, jedenfalls größer als die maximale Biege-

spannung. Der Ort des Bruchbeginnes besitzt also das Kennzeichen einer Kerbstelle, nämlich die Eigenschaft, trotz gleichförmiger äußerer Beanspruchung einen Spannungshchstwert hervorzubringen.

Eine weitere wichtige Eigenschaft der Stelle des Bruchbeginnes bedingt ihre Erkennbarkeit auf einer Bruchfläche. Wie schon früher gelegentlich hervorgehoben [3], besitzt die Bruchfläche daselbst charakteristische Unebenheiten, wogegen ihr Anfangsverlauf im übrigen stets senkrecht zur äußeren Zugrichtung eingestellt ist. Da die Bruchfläche stets senkrecht zur jeweiligen größten Hauptzugspannung verläuft, erfolgt die Bruchauslsung demnach unter Mitwirkung von Spannungs-komponenten, welche der resultierenden Bruchspannung eine abweichende Richtung geben. Solche zusätzliche Spannungs-komponenten sind notwendigerweise durch die Struktur des Stabmaterials bedingt und daher als ortsfest anzusprechen. Sie können sowohl von örtlich strukturbedingter Kerbwirkung her-rhren als auch von Selbstspannungen, die an jener Stelle bereits im unbeanspruchten Stabe vorhanden waren. Der Bruchbeginn der Gläser wird meist durch beide Ursachen gleichzeitig mitbestimmt, da Kerbwirkung allein keine lichtoptisch auflösbaren Unebenheiten auf Bruchflächen ergeben würde. Diese Unebenheiten sind nach Größe und Richtungsverteilung von Stab zu Stab verschiedenartig. Es ist daher gut vorstellbar, daß die zugehörigen mannigfaltigen Eigenspannungs-gehalte die große Streuung der Zerreifestigkeitswerte maßgeblich beeinflussen.

**2. Anfangsverlauf der Bruchgeschwindigkeit.** Da der Zugbruch eines Glasstabes erfahrungsgemäß nur sehr kurze Zeit beansprucht, wird während dieser Zeitspanne bei den gewöhnlich benutzten Geschwindigkeiten der Spannungszunahme kein merklicher Spannungsanstieg stattfinden, wodurch die Ermittlung der Zerreißspannung sehr erleichtert wird. Wie bereits eingangs erwähnt, hat die Geschwindigkeit der Spannungssteigerung andererseits einen beträchtlichen Einfluß auf die Höhe der Zerreißfestigkeit. Ein Verständnis der beiden, scheinbar gegensätzlichen Aussagen fordert offenbar, daß die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Zugbruches während des Bruchvorganges veränderlich ist. Um darüber Näheres zu erfahren, muß man das Experiment befragen.

Das von uns entwickelte Verfahren zur Bestimmung von Richtung und Geschwindigkeit der Bruchfortpflanzung in Glasstäben [3] benutzt krzestwellige Ultraschall-Stoßwellen, die durch den Bruchvorgang selbst ausgelöst werden und auf den Bruchflächen schwache, leicht vermebare Spuren hervorbringen, die „WALLNERSchen Bruchlinien“ [4]. Hierbei ergibt sich, daß die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der normalen WALLNER-Linien entsprechenden Ultraschallvorgnge konstant ist und der Transversalwellen-Geschwindigkeit des Glases entspricht. Die Bruchfortpflanzungsgeschwindigkeit dagegen ist längs der Bruchfläche gesetzmäßig veränderlich. Innerhalb eines vom Ort des Bruchbeginnes ausgehenden und zur Symmetrale des

kreisförmigen Bruchquerschnittes symmetrisch gelegenen Winkelbereiches von  $\pm 35^\circ$  sind die zu aufeinanderfolgenden Zeitpunkten gehörenden Bruchfronten konzentrische Kreisbögen mit dem Bruchanfang als Mittelpunkt. (Bild 1.) Der Einfachheit halber beschränken wir uns hier auf die innerhalb dieses Winkelbereiches geradlinigen Fortschreitungsrichtungen der Bruchfortpflanzung und fragen nach dem für alle derartigen Richtungen übereinstimmenden Verlauf der Bruchfortpflanzungsgeschwindigkeit mit zunehmendem Abstand vom Orte des Bruchbeginnes.

Als Versuchsunterlagen dienten die Daten von 10 Zugbruchflchen mit WALLNER-Linien, deren Vermessung durch G. APELT [5] bis zur quantitativen Ermittlung des Verlaufes der Bruchgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Zeit ausgeführt wurde [6]. Infolge äußerer Umstände sind die tischgroen Original-Vergrößerungen der Bruchbildaufnahmen nicht mehr verfügbar, wohl aber nach Einzeichnung der Auswertungsergebnisse hergestellte verkleinerte Abbildungen davon. Die zur Umwandlung der Zeitkoordinate in die Skala der Bruchwege erforderlichen Messungen wären auf den ursprünglichen Meblttern mit zehnmal größerer Genauigkeit ausführbar gewesen.

Eine andere unwillkommene, jedoch im Meßverfahren begründete Beeinträchtigung beruht auf dem Umstände, daß bei sehr langsamem Bruchfortschritt keine lichtoptisch erfaßbaren WALLNER-Linien entstehen können. Da die Geometrie dieser Bruchlinien unmittelbar das Verhältnis von Bruchgeschwindigkeit zu Ultraschallgeschwindigkeit als „relative Bruchgeschwindigkeit“  $v$  liefert, kann diese Grenze etwa mit  $v < 0,2$  angegeben werden. Auf Zugbruchflchen entspricht dies naturgemäß der näheren Umgebung des Bruchbeginnes. Damit sind hier tatsächlich, wenn auch vorerst nur qualitativ, niedrige Bruchfortpflanzungsgeschwindigkeiten sicher-gestellt.

Betrachtet man die bis zu den kleinsten  $v$ -Werten herabreichenden Meßreihen, so zeigt sich, daß der qualitative Verlauf der Bruchgeschwindigkeit in diesem noch nicht unmittelbar zugänglichen Gebiete kaum zweifelhaft sein kann. Hierzu bringt Bild 2 den Bruchgeschwindigkeits-Verlauf längs der

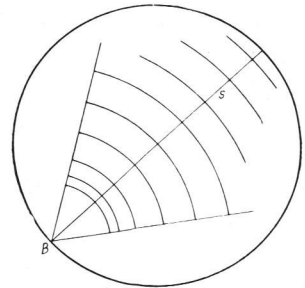


Bild 1. Schematische Darstellung des Winkelbereiches kreisförmiger Bruchfronten auf Zugbruchflchen von zylindrischen Glasstäben. B Ort des Bruchbeginnes auf der Staboberfläche, s Symmetrale des Bruchquerschnittes.

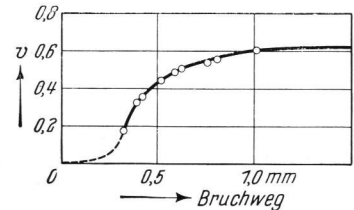


Bild 2. Beispiel für den Anfangsverlauf der relativen Bruchgeschwindigkeit  $v$  mit zunehmendem Bruchweg. Strichlierter Teil extrapoliert. Quarzglasstab von 6 mm Durchmesser, Versuchsgeschwindigkeit 50 g/qmm · sec., Zerreißspannung 3,45 kg/qmm.

Zugbruchfläche eines zylindrischen Quarzglasstabes von 6 mm Durchmesser, der mit einer Versuchsgeschwindigkeit von 50 g/qmm·sec die Zerreißspannung 3,45 kg/qmm lieferte. Danach darf beim Bruchbeginn eine asymptotische Annäherung der Bruchgeschwindigkeits-Kurve an den Nullwert vermutet werden. Die Bruchgeschwindigkeit ist hier jedenfalls so gering, daß der Stab zur Überwindung dieser Anfangsphase eine erhebliche Zeit benötigt, womit der Einfluß der Versuchsgeschwindigkeit auf die Zerreißfestigkeit verständlich wird. Die Länge dieser Zeitdauer sollte am deutlichsten wahrnehmbar sein, wenn jede weitere Laststeigerung während des restlichen Zugversuches unterbleiben würde. Das geschieht im sogenannten Dauerstandversuch bei Anwendung konstanter Zugbelastungen. Hier sind bis zur Vollendung des Bruchvorganges tatsächlich bequem meßbare Wartezeiten erforderlich. Man findet sie desto länger je niedriger die gewählte Dauerlast und definiert als Dauerzugfestigkeit jene Grenzbeanspruchung, welche erst nach unendlich langer Wartezeit die Vollendung des Zerreißvorganges ergeben würde.

**3. Individueller Anstieg der Bruchgeschwindigkeit während des Zerreißvorganges.** Einige Ergebnisse von Messungen des Bruchgeschwindigkeits-

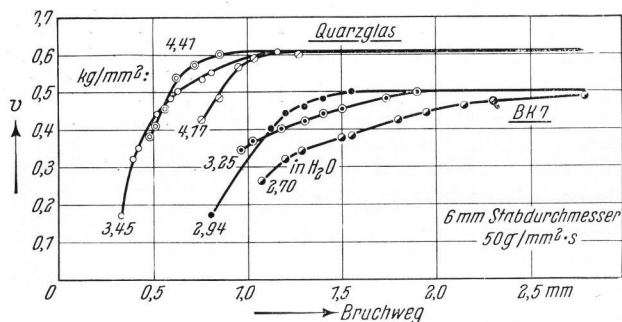


Bild 3. Bruchgeschwindigkeits-Anstiege von je drei Zylinderstäben aus Quarzglas und BK 7 für übereinstimmende Versuchsbedingungen.

Anstieges jenseits der langsamen Anfangsphase sind in Bild 3 zusammengestellt. Sie betreffen sämtlich Zugstäbe mit 6 mm Durchmesser, die mit einer Versuchsgeschwindigkeit von 50 g/qmm·sec zerrissen wurden. Alle Kurven streben konstanten Endwerten zu, die meist über beträchtlich längere Bruchwege verfolgt werden konnten als den in Bild 3 wiedergegebenen Bereich. Wie bereits früher mitgeteilt [3], sind diese Endwerte von der chemischen Zusammensetzung des Glases abhängig, so daß die an Quarzglasproben erhaltenen drei Meßreihen einen gemeinsamen Endverlauf zeigen, ebenso die drei Kurven, die mit dem optischen Glas BK 7 von SCHOTT erhalten wurden. Der Endwert der relativen Bruchgeschwindigkeit  $v$  liegt für Quarzglas höher als für BK 7 und wird unter den angegebenen Versuchsbedingungen an Quarzglas nach beträchtlich kürzeren Laufstrecken erreicht als bei BK 7. Besonders bemerkenswert ist der mit einem BK 7-Zylinder in destilliertem Wasser ausgeführte Zerreißversuch, da hier bis zur Erreichung des End-

wertes der Bruchgeschwindigkeit eine viel längere Wegstrecke erforderlich war als bei den Trockenversuchen.

Ferner zeigt sich, daß der Bruchgeschwindigkeits-Anstieg im allgemeinen von Stab zu Stab verschieden ist, also von den individuellen Struktureigenschaften am Ort des Bruchbeginnes abhängt. Dies scheint vor allem von den dort mitwirkenden Eigenspannungen herzurühren, deren Richtungsbesonderheiten gelegentlich noch über den Beginn des in Bild 3 wiedergegebenen Meßbereiches hinaus fühlbar sind.

Ein sicherer Einfluß der beim Zerreißversuch benutzten Geschwindigkeit der Spannungszunahme auf den Anstieg der Bruchgeschwindigkeit konnte nicht festgestellt werden, wie für zwei Quarzglasstäbe gleichen Durchmessers und nahe übereinstimmende Zerreißfestigkeit in Bild 4 gezeigt wird und auch an einem zweiten derartigen Paar erhalten

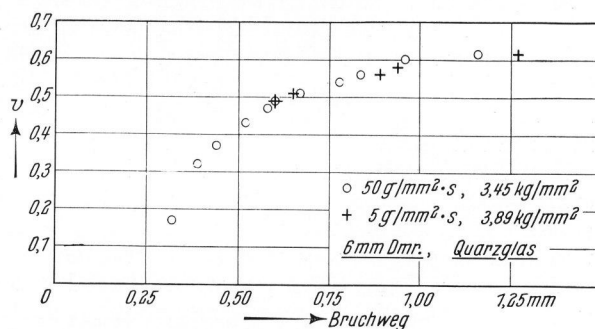


Bild 4. Bruchgeschwindigkeits-Verlauf zweier mit unterschiedlichen Versuchsgeschwindigkeiten zerrissener Quarzglasstäbe. Bei nahe übereinstimmender Zerreißspannung treten hier keine merklichen Verschiedenheiten auf.

wurde. Sollte eine gegenseitige Abhängigkeit dennoch bestehen, dürfte ihr Nachweis nur auf statistischem Wege zu erbringen sein und ein umfangreiches Versuchsmaterial erforderlich machen.

Ferner scheint auch kein stärkerer Einfluß des Stabdurchmessers auf den Anstieg der Bruchgeschwindigkeit zu bestehen, da zwei Quarzglasstäbe von 3,75 mm Durchmesser gegenüber solchen von 6 mm Durchmesser mit nahe übereinstimmenden Zerreißfestigkeiten keine sicheren Unterschiede lieferten. Auch hier handelt es sich vorerst nur um Stichproben, welche die Prüfung umfangreicheren Versuchsmaterials nicht ersetzen können.

Schließlich sei hervorgehoben, daß der Endwert der Bruchgeschwindigkeit in jedem der bisher untersuchten Fälle nach beträchtlich kürzeren Bruchwegen erreicht wird als dem in der Fortpflanzungsrichtung gelegenen Durchmesser des spiegelnd-glatten Teiles der Bruchfläche, so daß zwischen beiden Wegstrecken der Bruchfortpflanzung kein unmittelbarer Zusammenhang besteht.

Über den Einfluß der Temperatur auf den Bruchgeschwindigkeitsanstieg liegen noch keine Auswertungs-Ergebnisse vor. Es würde nicht überraschen, wenn ein solcher Einfluß vorhanden wäre und die Mitwirkung der Wärmebewegung an der Bruchfortpflanzung für diese Phase des Bruchfortschrittes erweisen würde.

**Zusammenfassung.**

Es wird gezeigt, daß der Bruchbeginn zylindrischer Glasstäbe durch das Auftreten von Spannungsspitzen ausgelöst wird, deren Ort an der Staboberfläche durch gleichzeitiges Zusammentreffen von Eigenspannungen des Glases und von Spannungserhöhung infolge Kerbwirkung bestimmt wird.

Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Bruchvorganges durch das Stabinnere ist stark veränderlich. Sie steigt, den Nullwert vermutlich asymptotisch verlassend, mehr oder minder steil an und erreicht einen konstanten hohen Endwert. Im Bereiche des ausgeprägten Anstieges und des Endwertes der Zerreißgeschwindigkeit verläuft der Bruchvorgang so rasch, daß bei den benutzten Versuchsgeschwindigkeiten keine wesentliche Laststeigerung mehr stattfindet und eine wohldefinierte Zerreißspannung erhalten wird. Die gleichzeitige Abhängigkeit der Zerreißspannung von der Versuchsgeschwindigkeit bedeutet dagegen, daß während der langsamen Beginnphase der Bruchfortpflanzung noch beträchtliche Lastzunahmen stattfinden. Die mit endlicher Versuchsgeschwindigkeit ermittelte Zerreißfestigkeit übertrifft daher die der

Versuchsgeschwindigkeit Null entsprechende Dauerstandfestigkeit desto mehr, je höher die Versuchsgeschwindigkeit.

Die während der Beginnphase und während des Anstieges der Bruchgeschwindigkeit zurückgelegten Bruchwege sind ebenso wie der Endwert der Bruchgeschwindigkeit von der stofflichen Zusammensetzung des Glases abhängig. Die genannten Bruchanstiege und die Steilheit des Geschwindigkeitsanstieges zeigen im übrigen individuelle Schwankungen, die den am Ort des Bruchbeginnes vorhandenen anfänglichen Verschiedenheiten entsprechen und zur Streuung der Festigkeitswerte in Beziehung stehen.

Die an einer Stichprobe gefundene Beeinflussung des Bruchgeschwindigkeits-Verlaufes durch einen Wechsel des Umgebungsmediums (Wasser anstatt Luft) weist darauf hin, daß an jener Streuung auch die Wirksamkeit grenzflächenaktiver Stoffe mitbeteiligt sein kann.

Die für die Untersuchungen benutzten BK 7-Stäbe wurden aus zwei Blöcken dieses optischen Glases geschnitten, für deren Überlassung wir Herrn Dr. Edwin BERGER (†) und der Firma SCHOTT dankbar verbunden sind.

**Schrifttum.**

- [1] SMEKAL, A.: *Glastechn. Ber.* 15 (1937) S. 259—270. *Ergebn. d. exakt. Naturwiss.* 15 (1936) S. 106—188.  
 [2] SMEKAL, A. und ULLMANN, E.: Unveröffentlichte Versuche 1944.  
 [3] SMEKAL, A.: *Glastechn. Ber.* 23 (1950) S. 57—67.

- [4] WALLNER, H.: *Z. Phys.* 114 (1939) S. 368—378.  
 [5] APELT, G.: Unveröffentlichte Diplomarbeit Halle-Niederrodten 1945.  
 [6] Siehe [3], Bild 16 auf Seite 66. (18837)

DK 539.42

**Über das Bruchkriterium bei kurzzeitiger Beanspruchung.**

Von Hubert SCHARDIN, Universität Freiburg (Brsg.).

(Eingegangen am 4. April 1950.)

Die wichtigste Eigenschaft technischer Baustoffe ist deren Festigkeit. Es ist eine merkwürdige Tatsache, daß von seiten der reinen Physik her das Wesen der mechanischen Festigkeit verhältnismäßig wenig erforscht ist. Man könnte behaupten, daß die Physik heute über die Eigenschaften der Atomkerne eine genauere Auskunft geben kann als über die mechanische Festigkeit. Man muß in diesem Zusammenhang konstatieren, daß Größen wie Zug-, Druck-, Biege- und Schubfestigkeit, zulässige Spannung, Streck- oder Fließgrenze u. dgl. rein technische Daten darstellen, die empirisch ermittelt sind und mit Physik nichts zu tun haben.

Was die theoretische Erfassung der Festigkeit angeht, so dürfte dem Werkstoff Glas vielleicht eine wichtige Rolle zukommen. Da er als spröder Körper weitgehend ideale Eigenschaften hat, ist es wahrscheinlich eher möglich, die Festigkeitseigenschaften von Glas auf eine physikalische Grundlage zu stellen als es bei anderen technischen Stoffen der Fall sein wird. In dieser Richtung liegt die Tendenz der bekannten Arbeiten von A. SMEKAL, und es ist ein besonderes Verdienst der Deutschen Glastechnischen Gesellschaft und H. MAURACHS, die Notwendigkeit eines Kontaktes der Glasforschung mit der Physik erkannt zu haben und ihn weitgehend zu fördern.

Auf alle Fälle aber wird — auch wenn wir mehr als heute über die Festigkeit wissen — ein volles Verständnis der Festigkeitsgrenzen und der Brucherscheinungen nur vorhanden sein

1. bei einfachen Formen der Gegenstände (Stab, Platte, Rohr u. dgl.),
2. bei bekannten und einfachen Beanspruchungen und definierten Randbedingungen (Einspannungen).

Die komplizierten Vorgänge würden zur exakten Lösung auch mit Hilfe z. B. einer ENIAC soviel Rechenaufwand erfordern, daß sich dieser nicht lohnen würde.

In solchen Fällen sind dann Methoden der technischen Physik anzuwenden, über die im folgenden einiges ausgeführt werden soll.

Eine Glasschale falle zu Boden. Wenn man dafür sorgt, daß die Lage, in der die Schale fällt, immer die gleiche ist, kann man durch Versuche eine kritische Höhe ermitteln, oberhalb deren die Schale zu Bruch geht. Wenn eine genügende Anzahl von Versuchsobjekten zur Verfügung steht, kann auch die Streuung dieser kritischen Höhe angegeben werden.