streuung sehr viel kleiner sein kann, als gewöhnlich angenommen wird. Da die statische „Ermüdungs"festigkeit des Glases überdies von großer praktischer Bedeutung ist, scheint es mir angezeigt, bestimmte Normen für die Festigkeitsprüfung erst zu vereinbaren, wenn die hier angeschnittenen Fragen eine umfassende Untersuchung an zahlreichen technischen Gläsern gefunden haben werden.

Schrifttum.

(1) A. J. Holland und W. E. S. Turner, J. Soc. Glass Technol., **20** (1936), S. 72—83. (Ref. Glastechn. Ber., **14** (1936), S. 290.)

(2) A. A. Griffith, Phil. Trans. Roy. Soc., London, **A, 221** (1920), S. 163.

(3) K. H. H. Müller, Z. f. Physik, **69** (1931), S. 431 bis 455; O. Reinkober, Phys. Z., **32** (1931), S. 243; E. Jenckel, Z. Elektrochem., **38** (1932), S. 569, § 4; S. Schurkow, Phys. Z. d. Sowjetunion, **1** (1932), S. 123—131; E. J. Gooding, J. Soc. Glass Technol., **16** (1932), S. 145. (Referate über diese Arbeiten s. Glastechn. Ber., **9** (1931), S. 609; **11** (1933), S. 38, 342.)

(4) Den Einfluß der Ziehrichtung auf die Zerreißfestigkeit von Plattenglas haben wir untersucht in der Arbeit W. Mangler, Z. f. Physik, **93** (1934), S. 173 ff. (Ref. Glastechn. Ber., **13** (1935), S. 174.)

(5) K. Wirtz, Z. f. Physik, **93** (1935), S. 292 ff. (Ref. Glastechn. Ber., **13** (1935), S. 174.)

(6) G. Apelt, Z. f. Physik, **91** (1934), S. 336 ff. (Ref. Glastechn. Ber., **13** (1935), S. 63.)

(7) G. Apelt, ebenda, S. 340, Fig. 5.

(8) K. H. Borchard, Glastechn. Ber., **13** (1935), S. 114.

(9) A. Smekal, Glastechn. Ber., **13** (1935), S. 141, Tabelle 2; ferner „Die Festigkeitseigenschaften spröder Körper", Ergebnisse d. exakten Naturwiss., **15** (1936), S. 106, § 14.

(10) M. Eichler, Z. f. Physik, **98** (1935), S. 280. (Ref. im vorlieg. Hefte, S. 293.)

(11) E. J. Gooding, J. Soc. Glass Technol., **16** (1932), S. 145—170. (Ref. im vorlieg. Hefte, S. 292.)

(12) A. Smekal: „Ueber die Natur der mechanischen Festigkeitseigenschaften der Gläser". Englische, nicht autorisierte Fassung in J. Soc. Glass Technol., **20** (1936), S. 432—448; deutsche Fassung im vorlieg. Heft, S. 259—270.

(13) A. Smekal: „Die Festigkeitseigenschaften spröder Körper", Ergebnisse d. exakten Naturwiss., **15** (1936), S. 106, § 12, 5. (11 303)

DK 539.4.013/.016 : 666.115(042)

Ueber einige Faktoren, welche die Ergebnisse der Prüfung von Glas auf mechanischem Wege beeinflussen.

Von Dipl.-Ing. E. Albrecht, Berlin.

[Beitrag für die Fachgruppe II des 2. Internationalen Glas-Kongresses, London, 9. Juli 1936.]

Als Einleitung zur Sitzung der Fachgruppe II des 2. Internationalen Glas-Kongresses (London und Sheffield 1936) wurde ein Ueberblick über die Faktoren gegeben, von denen die Festigkeit von Glas als geformter Körper (Gegenstand, Bauteil, Prüfkörper) abhängt. Die hier vorliegenden Gesetzmäßigkeiten sind für einige dieser Faktoren bereits weitgehend erkannt. Ausbau und Synthese dieser Erkenntnisse bleibt Aufgabe.

Es ist allgemein bekannt, wie groß der Einfluß der chemischen Zusammensetzung auf die Eigenschaften des Glases ist. Das fabrikatorische Verhalten eines Glases, seine chemische Widerstandsfähigkeit, seine optischen Eigenschaften werden von seiner chemischen Zusammensetzung bedingt und oft von kleinen Zusätzen entschiedend beeinflußt. Der zunächst a priori aufgestellte Satz, daß sich die Eigenschaften eines Glases additiv aus denen seiner Komponenten ergeben und sich also aus der Analyse mit Hilfe von Koeffizienten berechnen lassen, kann für eine Reihe von physikalischen Eigenschaften (Härte, Dichte, Ausdehnung u. a.) als erwiesen gelten. Daher wird es als stilwidrig empfunden, wenn in einer Veröffentlichung, die eine physikalische Eigenschaft von Glas betrifft, die Analyse fehlt.

Es ist also nicht zu verwundern, wenn die Gültigkeit des Additivitätsgesetzes auch für den Teil der physikalischen Eigenschaften des Glases vorausgesetzt wurde, den wir mechanische Festigkeit nennen. Die Nachprüfung bestätigte das Erwartete: die mechanischen Eigenschaften von Gläsern mit willkürlich oder planmäßig geänderter chemischer Zusammensetzung erwiesen sich als gesetzmäßig abhängig von dieser, wenn unter gleichen Versuchsbedingungen geprüft wurde. Diese Voraussetzung ist wesentlich und darf nicht vernachlässigt werden. Ein Vergleich der Ergebnisse verschiedener Forscher zeigt, daß der Einfluß der jeweils verschiedenen Versuchsbedingungen den der Glaszusammensetzung oft überragt und häufig so groß ist, daß die gefundenen Festigkeiten nicht ohne weiteres miteinander verglichen werden können. Im allgemeinen kann man sagen, daß um so kleinere Werte der Festigkeit je Querschnittseinheit erhalten werden, je größer die Abmessungen der Prüfkörper sind, je höher die Versuchstemperatur und je länger die Dauer der Beanspruchung ist. Man muß sich also darüber klar sein, daß die Materialfestigkeiten keine Materialkonstanten zu sein brauchen, und man ist sich darüber klar, wenn man Prüfkörper und Prüfverfahren normt. Von einer Normung der Prüfverfahren für die mechanischen Eigenschaften von Glas sind wir noch ziemlich weit entfernt.

Der Einfluß der Probengröße auf die Festigkeit je Querschnittseinheit — die im folgenden kurz als Festigkeit bezeichnet wird — scheint bei Glas größer zu sein als bei anderen Werkstoffen. Die Erscheinung ist an sich durchaus bekannt; so fällt z. B. die Druckfestigkeit (kg/cm²) von Beton, an 10 cm-Würfeln bestimmt, etwas höher aus, als wenn sie an Würfeln von 20 oder 30 cm Kantenlänge ermittelt wird. Aehnlich verhalten sich Mauerziegel; noch größer ist der Einfluß der Abmessungen bei Steinzeug. Die Druckfestigkeit von Quarzglas wird in den üblichen Handbüchern mit rund 20 000 kg/cm² angegeben. Dieser Wert (1) ist an Zylindern von

5 mm Durchmesser (19 mm² Querschnitt) und Höhe bestimmt. Prüfkörper von 200 mm² Querschnitt ergeben etwa die halbe Druckfestigkeit (2). Danach ist schwer zu sagen, welcher Wert für die Druckfestigkeit in Rechnung zu stellen wäre, wenn es sich z. B. um einen Isolator aus Quarzglas handeln würde, auf den ein Funkturm gestellt werden soll.

Die Biegefestigkeit von Flachglas nimmt ab mit wachsender Breite und Dicke der Proben (3) (4).

Die Zugfestigkeit sehr dünner Glasfäden ist außerordentlich groß (5). Stäbe von einigen Quadratmillimetern Querschnitt haben etwa 1000 kg/cm², solche von 10 bis 100 mm² etwa 500 kg/cm² Zugfestigkeit; diese sinkt bei noch größerem Querschnitt noch weiter (6) (7) (8) (10).

Der Einfluß der Probenform ist deutlich merkbar. Der Unterschied zwischen Würfel- und Zylinderfestigkeit ist auch bei anderen Werkstoffen bekannt. Kantige und runde Glasstäbe geben beim Zugversuch nicht ganz gleiche Werte (6). Auf die Biegefestigkeit von Flachglas ist das Seitenverhältnis von Einfluß. Sehr deutlich ist der Einfluß von Probenform und -größe bei der Prüfung von Hohlglas auf Innendruck.

Der Einfluß der Oberflächenbeschaffenheit ist besonders gut verfolgt worden. Die dabei entwickelten Theorien und ihre experimentelle Nachprüfung (5) (6) haben unsere Erkenntnisse über die Gesetzmäßigkeiten, die den Zerreißvorgang beherrschen, außerordentlich gefördert. — Es genügt hier, auf die grundlegende Bedeutung dieser Arbeiten hinzuweisen. Es ergab sich, daß und warum geschliffene und polierte Oberflächen kleine Festigkeiten hervorrufen, Feuerpolitur und Aetzpolitur festigkeitserhöhend wirken. Sehr deutlich konnte dies auch bei Flachglas nachgewiesen werden, dessen Biegefestigkeit von der Bearbeitung der Kanten beeinflußt wird (11).

Der Einfluß der Temperatur, bei der die Prüfung vorgenommen wird, sowie die Belastungsgeschwindigkeit, mit der sie ausgeführt wird, sind von geringerer Bedeutung als die vorher aufgezählten Faktoren. Tiefe Temperatur und hohe Belastungsgeschwindigkeit wirken festigkeitssteigernd (6) (9) (11).

Der Einfluß der Dauer der Beanspruchung ist der einzige, der sich bisher in der Form einer mathematischen Beziehung hat ausdrücken lassen. Bei kurzzeitiger Beanspruchung folgt Glas dem Hookeschen Gesetz; Elastizitätsgrenze und Bruchbeginn fallen praktisch zusammen, bleibende Formänderungen und plastische Verformungen sind, auch unmittelbar vor dem Bruch, kaum nachweisbar. Unter ruhender Last treten jedoch elastische Nachwirkungen auf. Die Dauerstandfestigkeit von Glas ist wesentlich geringer als seine Festigkeit bei kurzzeitiger Beanspruchung, und zwar sowohl bei Flachglas (12) als auch bei Hohlglas (13). Für das letztere konnte gezeigt weroden, daß der Bruch unter Dauerlast um so früher eintritt, je näher die dabei gewählte Beanspruchung an die kurzzeitig tragbare herankommt. Diesem Unterschied ist der Logarithmus der Standzeit proportional.

Es wurde versucht, zu zeigen, daß die Ergebnisse, die bei der Ermittlung der mechanischen Eigenschaften von Glas erhalten werden, z. T. erheblich von Faktoren abhängen, die durch die Versuchsausführung selbst gegeben sind, oder die willkürlich festgelegt werden, niemals aber bei einer Versuchsreihe in ihrer ganzen Variationsbreite erfaßt werden können. Einige dieser Einflüsse sind systematisch untersucht, andere umstritten, manche vielleicht überschätzt.

Da Glas sowohl in der chemischen Technik als auch im Bauwesen in zunehmendem Maße als tragender bzw. als mechanisch beanspruchter Baustoff verwendet wird, verdienen und erhalten die mechanischen Eigenschaften des Glases steigende Beachtung. Eine Festigkeitslehre des Glases ist im Entstehen begriffen. Sie wird in höherem Grade, als es bei anderen Werkstoffen nötig ist, die Faktoren berücksichtigen müssen, die die Ergebnisse der Festigkeitsprüfung beeinflussen.

Zusammenfassung.

Der zunächst a priori aufgestellte Satz, daß die Eigenschaften eines Glases sich additiv aus denen seiner Komponenten zusammensetzen und also aus der Analyse berechnen lassen, gilt als erwiesen für zahlreiche physikalische Eigenschaften (Härte, Dichte, Ausdehnung u. a.). Unter gleichen Versuchsbedingungen ist der Einfluß der Zusammensetzung auch für die mechanischen Eigenschaften des Glases deutlich. Ihn überragt hier jedoch bei weitem der Einfluß der Versuchsbedingungen (Probengröße, -form, -oberfläche, Dauer der Beanspruchung, Temperatur u. a.), sowie der der Gesetzmäßigkeiten des Bruchvorgangs. Hierfür werden Beispiele gegeben.

Die systematische Erforschung dieser Einflüsse ist von mehreren Seiten begonnen worden. Es wird nötig sein, sie zu fördern, denn die wachsende Verwendung von Glas als Baustoff sowohl in der chemischen Technik wie im Bauwesen verlangt nach einer Festigkeitslehre des Glases. Sie ist in der Entwicklung begriffen und wird an den aufgezeigten Problemen nicht vorbeigehen können.

Schrifttum.

(1) G. Berndt, Verhdl. Dtsch. Physikal. Ges., **21** (1919), S. 110.

(2) E. Albrecht, erscheint in den „Glastechnischen Berichten“ 1937.

(3) O. Graf, Glastechn. Ber., **3** (1925), S. 153; **6** (1928), S. 158, 582; Z. Verein Dtsch. Ing., **72** (1928), S. 566—573. (Ref. Glastechn. Ber., **6** (1928/29), S. 603) und anderen Orts.

(4) A. J. Holland u. W. E. S. Turner, J. Soc. Glass Technol., **18** (1934), S. 225—251. (Ref. Glastechn. Ber., **13** (1935), S. 329.)
(5) A. A. Griffith, Phil. Trans. Roy. Soc. London, A, **221** (1920), S. 163.
(6) A. Smekal, Glastechn. Ber., **13** (1935), S. 141, 222.
(7) G. Gehlhoff u. M. Thomas, Z. techn. Physik., **7** (1926), S. 105—126. (Ref. Glastechn. Ber., **4** (1926/27), S. 103—105.)
(8) A. Winkelmann u. O. Schott, Wiedemanns Ann., **51** (1894), S. 697.
(9) H. Kamerlingh-Onnes u. C. Braak, Comm. Leiden, **9** (1908), Nr. 106.
(10) K. Wirtz, Z. f. Physik, **93** (1935), S. 292. (Ref. Glastechn. Ber., **13** (1935), S. 174.)
(11) B. Longmuir u. W. E. S. Turner, J. Soc. Glass Technol., **18** (1934), S. 252—259. (Ref. Glastechn. Ber., **13** (1935), S. 329.)
(12) L. v. Reis, Glastechn. Ber., **13** (1935), S. 239.
(13) K. H. Borchard, Sprechsaal Keramik usw., **67** (1934), S. 576—577; **68** (1935), S. 147—149, 324 bis 326. (Ref. Glastechn. Ber., **13** (1935), S. 63, 131, 328.)
K. H. Borchard, Glastechn. Ber., **12** (1934), S. 334—339; **13** (1935), S. 243—244.
(14) W. Mangler, Z. f. Physik, **93** (1934), S. 173. (Ref. Glastechn. Ber., **13** (1935), S. 174.) (11 312)

DK 539.4 : 666.11

Aussprache über „Die mechanische Festigkeit des Glases“

in der Sitzung der Fachgruppe II des 2. Internationalen Glas-Kongresses, London, 9. Juli 1936.

Bericht erstattet von Dipl.-Ing. E. Albrecht, Berlin.

Vorbemerkung der Schriftl.: Wir freuen uns, im Anschluß an die vorstehend wörtlich wiedergegebenen Kongreßbeiträge Albrecht, Holland u. Turner, Smekal einen Ueberblick über den Sitzungsverlauf veröffentlichen zu können.

Die Frage: Kann man überhaupt (und wenn ja, unter welchen Voraussetzungen) etwas Bestimmtes über die Festigkeit des Glases aussagen? — wurde in drei Vorträgen von Holland[1]), Albrecht[2]) und Navias[3]) von verschiedenen Seiten her angegangen. Der vierte vorgesehene Vortrag von Smekal[4]) mußte leider ausfallen, da der Referent nicht am Kongreß teilnehmen konnte.

Die mechanische Festigkeit von Glas ist bekanntlich sehr von den Versuchsbedingungen abhängig. Albrecht[2]) zählte einige von diesen auf und betonte den Einfluß des Probenquerschnitts, der sich vermutlich durch eine doppelt logarithmische Beziehung ausdrücken läßt. Holland[1]) berichtete über Versuche, bei denen der Einfluß bestimmter Faktoren unter sonst gleichen Bedingungen planmäßig verfolgt wurde. Als Proben dienten Streifen aus Flachglas. Der Einfluß der Streifenbreite und -Dicke, der Kantenbearbeitung, sowie das Verhältnis Dauerstandfestigkeit zu Kurzfrist-Festigkeit konnte erfaßt, z. T. in die Form empirischer Gesetze gekleidet werden. Ziel der Versuche ist, die Bedingungen festzustellen, die ein Standardverfahren erfüllen muß. Unter dem gleichen Blickwinkel sind in den Vereinigten Staaten umfangreiche Versuche angestellt worden, über die Navias berichtete. Bereits festgelegt wurde die Verwendung eines gut gekühlten (Restspannung = 1% der Bruchspannung) Glasstabes von 1/4" (rd. 6,4 mm) Durchmesser, 5" (127 mm) Länge, der auf zwei Schneiden in 4" (102 mm) Abstand gelagert und mit zwei Schneiden in 2" (51 mm) Entfernung belastet wird. Noch sind die Abweichungen zwischen den Mittelwerten, die die einzelnen Beobachter bei der gleichen Glassorte finden, und die Streuungen der Einzelwerte um die Mittelwerte beträchtlich. Auf beide hat die Art der Vorbehandlung erheblichen Einfluß; doch kann noch nicht entschieden werden, welche Behandlungsart zu wählen ist.

In der Aussprache betonte Albrecht, daß sich die Erscheinungen, von denen Holland und Navias berichteten, zwanglos durch die Theorien von Smekal erklären lassen. Da der Vortrag Smekals[4]) ausgefallen war, wurden die Grundzüge seiner Theorie[5]) kurz dargestellt. Die englischen und amerikanischen Bemühungen um ein Standardverfahren zielen darauf ab, die Festigkeit von Glas als Glas zu erfassen. So wertvoll diese Arbeiten sind, sollte darüber doch nicht vergessen werden, daß es noch eine andere Fragestellung gibt, die nach der Festigkeit von Glas als Konstruktionselement, besonders von Flachglas als Baustoff. Als Beispiel wurde erwähnt, daß die maximale Größe von Schaufensterscheiben nicht durch die technischen Schwierigkeiten der Herstellung, sondern durch die Festigkeit des Glases begrenzt werden wird. Im gleichen Sinne äußerte sich Polívka, der auf seine Formel[6]) verwies, nach der sich die Abnahme der Festigkeit mit wachsender Scheibengröße berechnen läßt.

Da die Aussprache über die mechanische Festigkeit von Glas ergeben hatte, daß ein bestimmtes Prüfverfahren zwar noch nicht eingeführt werden kann, daß weitere Versuche aber erwünscht sind, wurde beschlossen, die Internationale Glaskommission zu bitten, dieser Frage ihr Augenmerk zu schenken und sie weiter zu fördern[7]).

Im zweiten Teil der Sitzung wurde Sicherheitsglas in Beiträgen von Versen[8]) und Finn behandelt. Versen (C. S. R.) legte einen Entwurf für internationale Normen für Sicherheitsglas vor. Anschließend berichtete Finn (USA) über die amerikanische Vornorm für Sicherheitsglas [American Tentative Standard Safety Code for Safety Glass][9]), die von dem amerikanischen Normenausschuß (A. S. A.) unter der Federfüh-

---

[1]) A. J. Holland und W. E. S. Turner, J. Soc. Glass Technol., **18** (1934), S. 225—251 (Ref. Glastechn. Ber., **13** (1935), S. 329); **20** (1936), S. 72—83 (Ref. Glastechn. Ber., **14** (1936), S. 290), 279—302, 428 (Ref. im vorliegenden Hefte, S. 289—290).

[2]) E. Albrecht, englische Fassung in J. Soc. Glass Technol., **20** (1936), S. 429—431; deutsche Fassung in Glastechn. Ber., **15** (1937), H. 7, S. 285—287.

[3]) L. Navias, J. Soc. Glass Technol., **20** (1936), S. 530—535. (Ref. in einem der nächsten Hefte.)

[4]) „Ueber die Natur der mechanischen Festigkeitseigenschaften der Gläser“, englische Fassung in J. Soc. Glass Technol., **20** (1936), S. 432—448; deutsche Fassung im vorliegenden Heft, S. 259—270.

[5]) Vgl. frühere Veröffentlichungen Smekals, Glastechn. Ber., **13** (1935), S. 141—151 und 222—232.

[6]) J. Polívka, Glastechn. Ber., **14** (1936), S. 252 bis 253.

[7]) Vgl. Glastechn. Ber., **14** (1936), S. 404 r. u.

[8]) F. Versen, englische Fassung in J. Soc. Glass Technol., **20** (1936), S. 454—460; deutsche und tschechische Fassung in Tchéco Verre. **4** (1937), Nr. 2, S. 29 bis 31. (Ref. Glastechn. Ber., **15** (1937), H. 6, S. 247 bis 248.)