

(68) Patent-Treuhand-Ges. für elektr. Beleuchtung, Berlin: DRP. 636 651 vom 13. 12. 34, ert. 24. 9. 1936.

(69) Jenaer Glaswerk Schott & Gen., Jena: DRP. 574 755 vom 13. 4. 1932, ert. 30. 3. 1933 (= Brit. Pat. 406 142 vom 13. 4. 1932, ert. 22. 2. 1934, (Ref. Glastechn. Ber., 12 (1934), S. 186), und = Oesterr. Pat. 143 996 vom 8. 4. 33, ert. 15. 7. 35).

(70) Corning Glass Works, Corning: USA-Pat. 1 964 321 vom 16. 1. 1933, ert. 26. 6. 1934 (= Engl. Pat. 411 029).

(71) E. Zschimmer u. P. Askenasy: DRP. 407 792 vom 5. 12. 1922, ert. 22. 12. 1924.

Dieselben: DRP. 408 531 (Zusatzpatent) vom 16. 12. 1922, ausgeg. 21. 1. 1925.

F. M. Locke und F. J. Locke: USA-Pat. 1 529 259 vom 9. 12. 22, ert. 10. 3. 1925.

Jenaer Glaswerk Schott & Gen., Jena: DRP. 541 554 vom 22. 3. 1923, ert. 17. 12. 1931. (Brit. Pat. 242 568 vom 9. 8. 25.) (Ref. Glastechn. Ber., 10 (1932), S. 300.)

(72) General Electric Comp.: Brit. Pat. 426 129 vom 28. 8. 1933, ert. 28. 3. 1935.

J. H. Partridge, a. a. O. [siehe (66)], S. 266 bis 274: Part I: „Glasses for high pressure mercury discharge lamps.“ (Ref. wie bei (66).)

(73) „Osa“-A.G.: Franz. Pat. 776 601 vom 8. 11. 1934, ert. 30. 1. 35 (Deutsche Prior. vom 21. 8. 33). [Quecksilberdampfampe aus cäsiumfestem Glas.]

(74) M. Thomas: „Ueber das Verhalten von Gläsern beim Verarbeiten vor der Lampe“, Glastechn. Ber., 14 (1936), S. 341—350. (11 277)

DK 539.4.012 : 666.17(045)

Einfluß der Belastungsgeschwindigkeit und der Gestalt der Belastungskurve auf den Meßwert der Festigkeit von Glashohlgefäßen.

Von Dr.-Ing. habil. K. H. Borchard, Porta Westfalica.

(Eingegangen 6. Januar 1937.)

Wenn man sagt, daß ein Glasstab eine Zugfestigkeit von 6 kg/mm^2 und ein Glashohlgefäß eine Festigkeit gegen Innendruck von 25 at besitze, so sind dies ohne weiteres keineswegs eindeutig definierte Werte, da das Ergebnis der Festigkeitsmessungen in hohem Grade von den Versuchsbedingungen abhängig ist. Zu diesen Versuchsbedingungen gehört auch die Gestalt der Belastung-Zeit-Kurve, nach der die Belastung des Prüflings vorgenommen wird. Ihr Einfluß soll untersucht werden. Es soll versucht werden, ein Verfahren zu entwickeln, das den Vergleich zweier Festigkeitswerte, die bei verschiedenen Belastungskurven gewonnen wurden, durch Umrechnung auf eine (Normal-)Belastungskurve ermöglicht.

Aufgabe.

Es ist bekannt, daß die Festigkeit eines Werkstoffes durch die Dauer der einwirkenden Kräfte beeinflußt wird, und zwar nimmt die Festigkeit mit der Dauer der Belastung ab. Diese bei Glashohlgefäßen früher wenig beachtete Erscheinung hat der Verfasser in einer früheren Arbeit „Ueber die Dauerfestigkeit und Bruchfestigkeit von Glasflaschen“ (5) behandelt. Die Frage, welchen Einfluß die Geschwindigkeit des Belastungsanstiegs und die Form der Belastung-Zeit-Kurve auf den Meßwert der Festigkeit bei Flaschen ausübt, ist bisher wenig geklärt. Ein Festigkeitswert ohne Angabe der Belastungskurve ist aber nicht eindeutig. Die Untersuchung ihres Einflusses soll in der vorliegenden Arbeit unsere Aufgabe sein.

Frühere Arbeiten.

Einen kurzen Hinweis auf Beziehungen zwischen Belastungsgeschwindigkeit und Festigkeit gab der Verf. an anderer Stelle auf Grund früherer Versuchsreihen (5). Er stellte fest, daß die Bruchfestigkeit der Glasflaschen bei Verringerung der Belastungsgeschwindigkeit abnimmt. Schon im Jahre 1899 fand Grenet (1) bei Untersuchungen über die Biegefestigkeit von Glasstäben und -platten für verschieden lange Versuchsdauern eine erhebliche Abnahme mit abnehmender Belastungsgeschwindigkeit. Auch Graf (2) kam zu ähnlichen Ergebnissen bei Biegeversuchen. G. Apelt (3) stellte eingehendere Versuche über den Einfluß der Belastungsgeschwindigkeit auf die Zerreißfestigkeit von Glasstäben an. Es zeigte sich, daß die Zerreißfestigkeit mit zunehmender Belastungsgeschwindigkeit stetig wächst, ein Ergebnis, das

sich mit den angeführten gelegentlichen Beobachtungen des Verf. deckt.

Die im folgenden beschriebenen Untersuchungen beziehen sich im Gegensatz zu dem vorstehend aufgeführten Schrifttum auf Flaschen.

Versuchseinrichtung und Versuchsausführung.

Die Versuche wurden mit dem vom Verf. angegebenen Dauerdruckprüfer ausgeführt (5) (20). Dieser Apparat arbeitet nach folgendem Prinzip:

Die mit Wasser gefüllte Flasche wird mit dem Hals durch eine Einspannvorrichtung wasserdicht gegen die Mündung eines Zylinders gepreßt, durch den von oben durch Betätigung eines Handrades eine Schraubenspinde in den Flaschenhals hineingedreht werden kann, so daß ein hydraulischer Druck erzeugt wird. Ein Manometer zeigt den Druck an. Den Apparat mit der zu prüfenden Flasche setzt man in eine Schutzhülse, um eine Gefährdung der bedienenden Person beim Zerspringen zu vermeiden.

Die Halsring-Einspannung (4) (10) hat gegenüber der noch vielfach verwendeten Bodeneinspannung den Vorteil, daß sich die Vorbeanspruchung der Flasche während des Versuchs auf einen Teil beschränkt, der sehr widerstandsfähig ist, und daß auf die Flasche keine das Meßergebnis beeinflussende äußere Gegenkraft einwirkt, wie dies bei der Bodeneinspannung der Fall ist. Wie Gooding (4) festgestellt hat, sind die Bruchfestigkeitswerte bei Bodeneinspannung etwa 30% höher als bei Halsring-Einspannung. Außerdem ist die Streuung der Meßwerte größer.

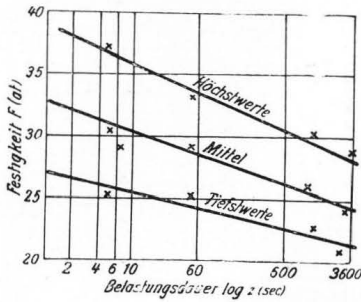


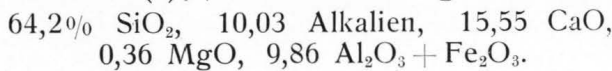
Bild 1.
Abhängigkeit der Festigkeit von der Dauer der Belastung bei linearem Belastungsanstieg.

Mit dem Dauerdruckprüfer ist jede Belastungsgeschwindigkeit und jede Form der Belastungskurve bei einiger Uebung unter Zuhilfenahme einer Stoppuhr zu erzielen.

Wegen der großen Streuung der Versuchswerte bei Glas ist es notwendig, das arithmetische Mittel aus einer größeren Zahl von Versuchswerten für jeden Kurvenpunkt zu bilden. Es wurde die vom Verf. gefundene Fehlerkurve zu Grunde gelegt und eine Versuchszahl von 10 bis 20 Flaschen je Kurvenpunkt für ausreichend erachtet (16).

Für die Versuche wurden gleichmäßige, gut durchgearbeitete Schlankhals-Flaschen mit folgenden Eigenschaften verwendet:

Hellgrüne schlanke 1/2 Liter-Flaschen mit Schraubmündung, Handfabrikat, Gewicht 225 g, kritischer (größter) Durchmesser am Uebergang des Zylinders in die Brust 75 mm (6), entsprechende kritische (kleinste) Wandstärke 3,5 mm, gute Kühlung (15), Versuchsmaterial von guter gleichmäßiger Qualität, Strahlenbrüche vorherrschend (9); Zusammensetzung:



Die Raumtemperatur betrug während der Versuche etwa 10°C (14).

Die Flaschen wurden nach der jeweils gewünschten Druck-Zeit-Kurve bis zum Bruch belastet. Neben den Mittelwerten aus 10 bis 20 Meßergebnissen wurden die jeweils höchsten und niedrigsten Meßwerte in ein Koordinatensystem eingetragen (Ordinate = Druck in at, Abszisse = Zeit im logarithmischen Maßstab).

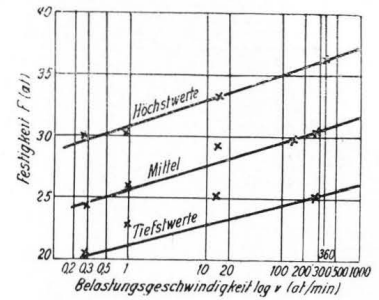
Abhängigkeit der Bruchfestigkeit von der Belastungsdauer und -geschwindigkeit bei linearem Belastungsanstieg.

Das Ergebnis der Versuche über die Abhängigkeit der Bruchfestigkeit von der Belastungsdauer bei linearem Belastungsanstieg bis zum Bruch zeigt Bild 1. Die Druckanstiegzeiten bis zum Bruch lagen zwischen 5 Sekunden und 60 Minuten. Man erkennt eine stetige Abnahme der Festigkeit mit zunehmender Belastungsdauer nach einem logarithmischen Gesetz.

Die Streuung ist gekennzeichnet durch die Kurven der Höchst- und der Tiefstwerte. Wenn man berücksichtigt, daß die Streuung bei Festigkeitsversuchen an Glas im allgemeinen sehr hoch ist, kann das vorliegende Ergebnis als befriedi-

Bild 2.

Abhängigkeit der Festigkeit von der Belastungsgeschwindigkeit bei linearem Belastungsanstieg.



gend angesehen werden. Im übrigen decken sich die Versuchsergebnisse mit früheren Versuchen des Verfassers über die Dauerfestigkeit von Glasflaschen (5). Die mittlere Festigkeit F läßt sich entsprechend Bild 1 durch folgende Gleichung darstellen:

$$F = F_B \left(\frac{92}{100} - \frac{8}{100} \cdot \log z \right) \text{ [in at]} \quad [1]$$

Hierin bedeutet:

F_B die Bruchfestigkeit [in at] bei einer Belastungsdauer von 5 Sek.,

z die Belastungszeit bis zum Bruch (in Min.).

Bezeichnet man das Verhältnis zwischen F und F_B mit e , so ergibt sich:

$$e = 92 - 8 \cdot \log z \text{ [in \%]} \quad [2]$$

In Bild 2 ist die Abhängigkeit der Festigkeit F von der Belastungsgeschwindigkeit v (in at/min.) bei linearem Belastungsanstieg dargestellt. Bedeutet F_B hier die mittlere Bruchfestigkeit bei $v = 360$ at/min, was einer Belastungsdauer von 5 Sek. bis zum Bruch entspricht, so ergibt sich

$$F = F_B \left(\frac{82,8}{100} + \frac{6,6}{100} \cdot \log v \right), \quad [3]$$

$$e = 82,8 + 6,6 \cdot \log v. \quad [4]$$

Die Bruchfestigkeit steigt demnach mit zunehmender Belastungsgeschwindigkeit nach einem logarithmischen Gesetz.

Man ersieht hieraus, daß der Einfluß der Belastungsgeschwindigkeit bei Festigkeitsuntersuchungen von Flaschen in Rechnung gestellt werden muß, wenn man zwei Ergebnisse einwandfrei vergleichen will.

Welche Geschwindigkeit für die Praxis zu wählen sein wird, soll später erörtert werden.

Im übrigen decken sich die vorstehenden Feststellungen qualitativ mit den Beobachtungen von Grenet, Graf und Apelt bei Versuchen mit Glasstäben und Glasplatten (1) (2) (3).

Die wichtigsten Formen der Belastungskurve.

Die wichtigsten Formen der Druck-Zeit-Kurve sind in Bild 3 dargestellt.

Für die Belastungskurve I ist schneller Anstieg mit nachfolgendem konstanten Druck charakteristisch. Der zeitlose Druckanstieg ist praktisch nur annähernd erreichbar. Mit dem Pumpen-Druckprüfer des Verfassers (5) konnte die Anstiegszeit auf z. B. 2 Sek. bis zur Erzielung von 30 at Ueberdruck herabgedrückt werden,

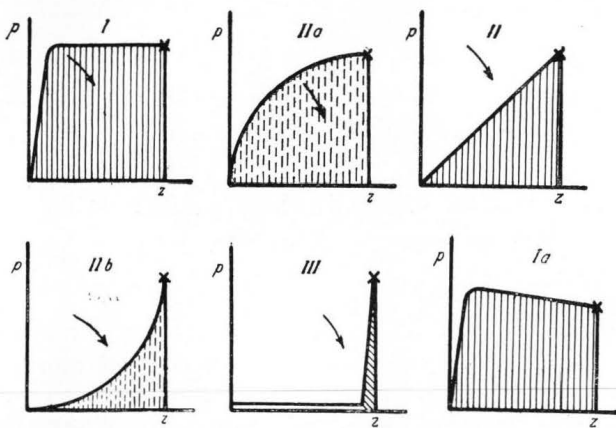


Bild 3. Die wichtigsten Grundformen der Belastungskurve. (Bei \times erfolgte der Bruch.)

- I Rechteckskurve
- IIa „Rückschreitende“ Belastungskurve (Pumpen-Druckprüfer)
- II Dreieckskurve
- IIb „Vorschreitende“ Belastungskurve (Spindeldruckapparat nach Borchard)
- III Spitzenkurve (Bruchfestigkeit)
- Ia Abfallende Belastung (Druckverlust durch Undichtigkeit).

so daß bei den Diagrammen mit einer Gesamtzeit von 10 Sek. und mehr bis zum Bruch ein Rechteck mit guter Annäherung erzielt werden konnte.

Bei Druckverlust als Folge von Undichtigkeiten entsteht als Abwandlung von I das Diagramm Ia, das der Vollständigkeit halber unten eingezeichnet worden ist.

Die „rückschreitende“ Belastungskurve IIa entspricht der Wirkungsweise des Pumpendruckprüfers (5). Die rückschreitende Form der Druck-Zeit-Kurve erklärt sich daraus, daß die Pumpe zu Beginn keinen oder wenig Gegendruck in der Flasche findet, so daß anfangs ein schneller Druckanstieg möglich wird, während mit zunehmendem Druck die Kompressionsarbeit der Pumpe immer schwieriger und dadurch die Geschwindigkeit der Druckzunahme immer kleiner wird.

Das Dreiecksdiagramm II kennzeichnet die konstante Belastungsgeschwindigkeit bis zum Bruch; hiernach sind die Versuche im vorigen Abschnitt ausgeführt worden.

Bei konstanter Umdrehungszahl der Spindel beim Spindeldruckprüfer des Verfassers (5) (20) ergibt sich die Druck-Zeit-Kurve IIb mit vorschreitendem Druckanstieg.

Die Spitzenkurve nach III kennzeichnet die übliche kurzzeitige Bruchfestigkeitsbestimmung, die den Anforderungen der Praxis am wenigsten gerecht wird (5).

In Bild 3 ist der Versuch angedeutet, die Kurvenform I systematisch in die Kurven IIa, II, IIb und III abzuwandeln. Geht man nämlich von der Rechteckform aus und verkleinert den Flächeninhalt unter der Druck-Zeit-Kurve im Sinne der in Bild 3 (I bis III) eingezeichneten Pfeile, so gelangt man zur rückschreitenden, zur Dreieckskurve, zur vorschreitenden und zur

Spitzenkurve. Der äußerste Fall der Spitzenkurve ist der, bei dem die gesamte Versuchsdauer praktisch Null wird.

Die Kurvenform Ia ist nur ein Sonderfall der Kurve I, der aber in der Praxis häufig vorkommt.

Untersucht man also die in Bild 3 dargestellten Kurvenformen, so wird man die wichtigsten grundsätzlichen Formen der Belastungskurven erfaßt haben.

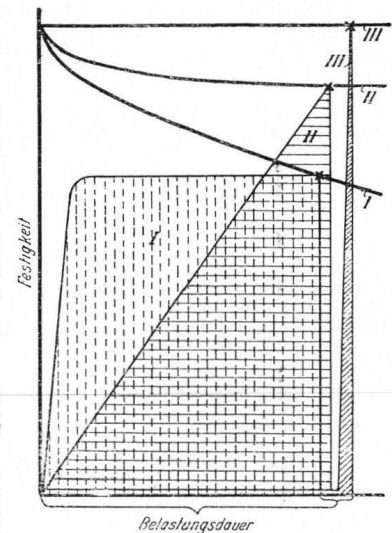


Bild 4. Einfluß der Belastungskurve auf die Festigkeit (schematisch).

Einfluß der Druck-Zeit-Kurve auf den Meßwert der Festigkeit.

In Bild 4 sind die drei Hauptkurvenformen I, II und III in einem Diagramm schematisch übereinandergezeichnet, wobei die Belastungsdauer in allen drei Diagrammen den gleichen Wert besitzt. Die Kreuze (Bruchpunkte) geben die bis zum Bruch verstrichene Zeit (Abszisse) und den im Augenblick des Bruches beobachteten Innendruck (Ordinate) an. Die Abszissen der Bruchpunkte weichen nur mit Rücksicht auf die übersichtlichere Darstellung etwas von einander ab; wären die Abszissen (Belastungsdauern) genau gleich lang gezeichnet, so hätten sich die Ordinaten der eingezeichneten Bruchpunkte der Kurven I und II sowie die Spitzenkurve III überdeckt.

Verändert man nun bei der Rechteckskurve I den konstanten Druck und mißt die zugehörigen Zeiten bis zum Bruch (Belastungsdauer), so ergibt sich die Kurve I; ebenso ergibt sich bei der Dreieckskurve II durch Veränderung der Belastungsgeschwindigkeit eine Veränderung des Bruchdrucks und der Bruchzeit entsprechend der Kurve II. Schließlich entspricht der Spitzenbelastungskurve III die Festigkeits-Zeit-Kurve III.

Bild 5 zeigt gemessene Festigkeitswerte, die für die vor allem interessierenden Belastungskurven I und II bei verschiedenen Belastungszeiten bis zum Bruch gefunden wurden. Die Festigkeits-Zeit-Kurve für die rückschreitende Belastungskurve IIa hätte zwischen den Festigkeits-Zeit-Kurven I und II, diejenige für die vorschreitende Belastungskurve IIb oberhalb von II, jedoch unterhalb von III eingetragen werden können.

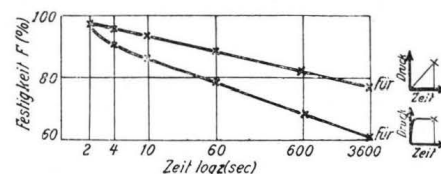


Bild 5. Abhängigkeit der Festigkeit von der Belastungsdauer bei dreieckiger I und rechteckiger Belastungskurve. (F_B für $z = 2$ sec.)

Man kann also folgendes feststellen: Mißt man für die in Bild 3 eingezeichneten Belastungskurven, die sämtlich die gleiche Zeit z bis zum Bruch (Belastungsdauer) aufweisen, den zugehörigen Bruchdruck, so steigt er in der Richtung von I über II a, II, II b und III. Mit anderen Worten: Der Meßwert der Festigkeit gegen Innendruck liegt um so höher, je kleiner der Flächeninhalt unter der Belastungskurve ist; dies gilt jedoch nur für Belastungskurven mit gleicher Belastungsdauer z . Schließlich kann man dieses qualitative Ergebnis folgendermaßen ausdrücken, da bei gleicher Belastungsdauer der mittlere Druck dem Flächeninhalt proportional ist:

„Der Meßwert der Festigkeit gegen Innendruck liegt für ein und dieselbe Belastungsdauer z um so höher, je kleiner der mittlere Druck des Belastungsdiagrammes war.“

Dies gilt auch in etwa für die abfallende Belastungskurve Ia in Bild 3, die sich also zwischen I und II a einordnen läßt. Hiernach kann bei Innendruckversuchen mit dem Pumpenapparat in erster Annäherung der mittlere Druck des Belastungsdiagrammes eingesetzt werden, wenn die Belastung während der Versuchsdauer abgefallen ist. Indessen wurden in früheren Arbeiten des Verf. Dauerversuche mit abfallender Belastung ausgeschieden, wenn sie zu genauen Vergleichszwecken verwendet werden sollten; dies dürfte sich trotzdem nach wie vor empfehlen.

Mathematische Durcharbeitung der Ergebnisse.

Ist F_B die Bruchfestigkeit der Flaschensorte gegen Innendruck in at, wobei die Zeit vom Beginn der Belastung bis zum Bruch der Flasche (Bruchzeit) bei den vorliegenden Versuchen des Verf. etwa 2 Sekunden*) betrug, und ist F der durchschnittliche Meßwert der Festigkeit der gleichen Sorte bei irgendeiner Bruchzeit, so beträgt die Festigkeitsverminderung m in at

$$m = F_B - F, \tag{5}$$

oder in Prozenten der Bruchfestigkeit

$$m = \frac{F_B - F}{F_B} \cdot 100 [\%]. \tag{5a}$$

Wird ferner der gemäß der Belastungskurve zeitlich veränderliche Druck p und die Zeit des Belastungsdiagrammes (Bruchzeit) z genannt, so ist der Inhalt J unter der Belastungskurve allgemein

$$J = \int_0^z p \cdot dz, \tag{6}$$

oder der mittlere Druck p_m des Belastungsdiagrammes

$$p_m = \frac{J}{z} = \frac{1}{z} \cdot \int_0^z p \cdot dz. \tag{7}$$

Wie lautet nun die Funktion f zwischen m und J bzw. p_m ?

*) Vgl. Bild 5.

$$m = f(J) = f\left(\int_0^z p \cdot dz\right) \tag{8}$$

$$m = f(p_m) = f\left(\frac{1}{z} \int_0^z p \cdot dz\right). \tag{9}$$

In Bild 6 ist die Festigkeitsverminderung m in Abhängigkeit vom mittleren Druck p_m dargestellt, wobei u. a. die Werte des Bildes 5 zu Grunde gelegt wurden und m und p_m in Prozenten der Bruchfestigkeit eingetragen sind. Betrachtet man zunächst nur solche Belastungsdiagramme, deren Basis (Bruchzeit) 60 Minuten beträgt, so erhält man die oberste Kennlinie des Diagrammes für verschiedene Formen der Belastungskurve. Auf dieser Kennlinie findet sich bei der römischen Ziffer I der Punkt für die Rechteckbelastungskurve (I), bei II der Punkt für die Dreiecksbelastungskurve (II), während bei III in der Nähe des Koordinaten-Ursprunges die Punkte für die Spitzenbelastungskurve III liegen. Zwischen I und II liegen die Punkte der rückschreitenden, zwischen II und III die der vorschreitenden Belastungskurven, wobei die zugehörige Belastungskurvenfläche von III über II nach I stetig wächst. In gleicher Weise sind Kennlinien für die erwähnten Formen der Belastungskurve eingetragen für folgende Bruchzeiten: 10 Minuten, 60 Sekunden, 10 Sekunden und 4 Sekunden. Wenn man die jeweils zu einer bestimmten Bruchzeit gehörenden Punkte

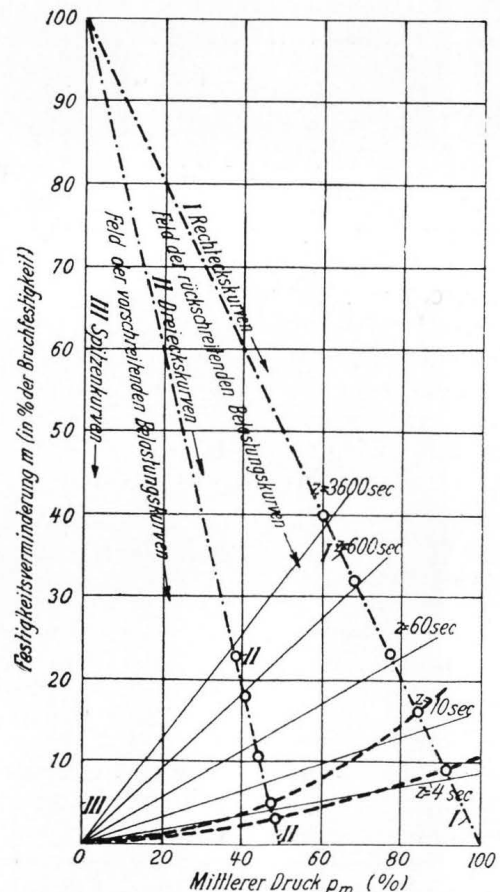


Bild 6. Abhängigkeit der Festigkeitsverminderung m vom mittleren Druck p_m der Belastungskurve (in % der Bruchfestigkeit) für verschiedene Bruchzeiten z .

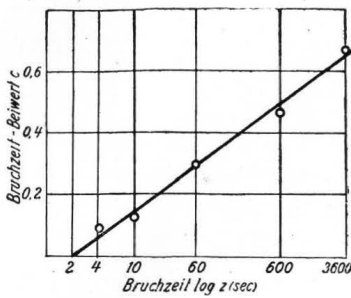


Bild 7.

Abhängigkeit des Bruchzeit-Beiwertes c von der Bruchzeit z im logarithmischen Maßstab.

miteinander verbindet, so ergeben sich leicht progressive Kennlinien, die jedoch in erster Annäherung durch im Koordinatenanfangspunkt entspringende Geraden ersetzt werden können. Die Abweichung ist bei den Kennlinien für Bruchzeiten von 4 Sekunden und 10 Sekunden verhältnismäßig am stärksten; bei den übrigen Kennlinien für größere Bruchzeiten ist die Annäherung durchaus befriedigend.

Man kann also feststellen:

„Die Festigkeitsverminderung ist innerhalb gewisser Grenzen und für eine und dieselbe Belastungsdauer z in erster Annäherung proportional dem Flächeninhalt unter der Belastungskurve und damit gleichzeitig proportional dem mittleren Druck.“

Also ist für $z = \text{constans}$:

$$m = c \cdot p_m = \frac{c}{z} \int_0^z p \cdot dz, \quad [10]$$

wo c als Bruchzeit-Beiwert bezeichnet werden soll. In Bild 6 sind die für die Rechtecksbelastungskurven bzw. für Dreiecksbelastungskurven geltenden Punkte miteinander durch strichpunktierte Linien I I bzw. II II verbunden. Durch die Grenzlinie II II ist die gesamte Diagrammfläche in ein Feld der vorschreitenden (zwischen III und II II) und in ein zweites Feld der rückschreitenden Belastungskurven (zwischen II II und I I) geteilt. Die Grenzlinie der Dreiecksbelastungskurven schneidet, wie man sieht, die Abszisse bei $p_m = \text{etwa } 50\%$, die der Rechteckskurven bei $p_m = \text{etwa } 100\%$, während beide Grenzlinien die Ordinate bei $m = 100\%$ treffen. Wollte man also in gleicher Weise die Grenzlinie für rückschreitende Belastungskurven eintragen, deren Flächeninhalt jeweils 75% einer Rechtecksbelastungskurve mit gleicher Bruchzeit beträgt, so müßte diese Gerade die Abszisse bei etwa $p_m = 75\%$ und die Ordinate bei $m = 100\%$ schneiden, usw.

Aus Bild 6 ist gleichzeitig ersichtlich, daß der erwähnte Bruchzeit-Beiwert c , welcher der Steigung der einzelnen Geraden entspricht, mit zunehmender Bruchzeit z wächst. Trägt man ihn in Abhängigkeit vom Logarithmus der Bruchzeit $\log z$ auf, wie dies in Bild 7 geschehen ist, so erhält man mit ausreichender Genauigkeit eine Gerade. Die Gleichung dieser Geraden hat die Form

$$c = u + w \cdot \log z, \quad [11]$$

oder in vorliegendem Fall unter Einsetzung der aus Bild 7 sich ergebenden Werte für u und w

$$c = 0,3 + 0,2 \cdot \log z, \quad [12]$$

wo z in Minuten auszudrücken ist.

Setzt man diesen Wert für c in Gleichung [10] ein, so erhält man

$$m = (0,3 + 0,2 \cdot \log z) p_m \quad [13]$$

$$\text{oder } m = (0,3 + 0,2 \cdot \log z) \cdot \frac{1}{z} \cdot \int_0^z p \cdot dz, \quad [14]$$

wo sich m in Teilen der Bruchfestigkeit ergibt, wenn man p und p_m ebenso in Teilen der Bruchfestigkeit einsetzt. Für die praktische Anwendung wird sich dagegen p und p_m aus dem Versuchsbericht in at ergeben, so daß man m in at erhält. Will man die Bruchfestigkeit in at errechnen, so braucht man nach Gleichung [5] die Festigkeitsverminderung lediglich zur gemessenen Festigkeit zu addieren.

Beträgt z. B. die Bruchzeit 60 Minuten, der mittlere Druck der Rechtecksbelastungskurve rund 15 at, so ist unter Voraussetzung obiger Werte

$$m = (0,3 + 0,2 \cdot \log z) \cdot 15 = (0,3 + 0,2 \cdot 1,778) \cdot 15 = \text{rd. } 10 \text{ at.} \quad [15]$$

Da die bei 60 Minuten gemessene Festigkeit 15 at und die errechnete Festigkeitsverminderung gegenüber der Bruchfestigkeit 10 at betrug, so würde die Bruchfestigkeit $15 + 10 = 25$ at betragen. In Prozenten der Bruchfestigkeit beziffert sich also die Festigkeitsverminderung auf 40% und die bei 60 Minuten gemessene Festigkeit auf 60% .

Die Beispiele ließen sich beliebig vermehren. Sie würden sich lediglich von den angeführten dadurch unterscheiden, daß bei nicht rechteckiger Belastungskurve p_m nicht gleich dem Meßwert der Festigkeit F ist.

Ein Vergleich mit Bild 6 beweist die ausreichende Uebereinstimmung.

Andererseits ist es nach dem Gesagten bei Näherungsrechnungen möglich, zwei Festigkeitsmessungen, deren Belastungskurven bis zum Bruch (z, F und p_m oder J) bekannt sind, miteinander zu vergleichen. Man braucht die gemessenen Festigkeitswerte lediglich auf die Bruchfestigkeit bei z. B. 2 Sekunden zu reduzieren, indem man die Festigkeitsverminderung in der beschriebenen Weise errechnet und zur gemessenen Festigkeit addiert:

$$F_B = F + (0,3 + 0,2 \cdot \log z) \cdot p_m. \quad [16]$$

Ebenso könnte man nach der Gleichung

$$F_1 + (0,3 + 0,2 \cdot \log z_1) p_{m1} = F_2 + (0,3 + 0,2 \cdot \log z_2) p_{m2} \quad [17]$$

einen Festigkeitswert F_1 bei den Versuchsbedingungen (z_1 und p_{m1}) auf einen Festigkeitswert F_2 bei anderen Versuchsbedingungen (z_2 und p_{m2}) umrechnen, indem man die Gleichung [17] nach F_2 auflöst.

Kritik der Ergebnisse.

Vorstehende Formeln und Reduktionsverfahren gelten innerhalb gewisser Grenzen [$z = 1$ bis 60 Minuten] (5) bei gleicher Versuchstemperatur (14) und Einspannmethode (10) unter der Voraussetzung, daß die geschilderten, an einigen Flaschensorten gemessenen Versuchsziffern allgemeine Anwendung finden dürfen. Es wäre deshalb wünschenswert, wenn das Versuchsmaterial erweitert werden könnte.

Indessen wird man mit dem hier entwickelten Verfahren innerhalb der erwähnten Grenzen vorläufig arbeiten können, solange es sich um Näherungsrechnungen handelt und keine eingehenderen Versuchszahlen vorliegen.

Ist nach Ablauf einer oder zweier Belastungsstunden (bei Rechtecksbelastung) kein Bruch erfolgt, so ist mit dem Eintritt eines Bruches nach den über ganze Wochen sich erstreckenden Beobachtungen kaum zu rechnen. Bei Dreiecksbelastung ist etwa mit den doppelten Zeiten zu rechnen. Dies besagt, daß nach Ablauf der erwähnten Zeiten keine weitere erhebliche Festigkeitsverminderung mehr zu erwarten und das Gebiet der Dauerfestigkeit erreicht ist. Daher brauchen längere Versuche bei der Bearbeitung der vorliegenden Aufgabe kaum durchgeführt zu werden.

Aus anderen Versuchen des Verf. hat sich ergeben, daß das Verhältnis zwischen Dauerstandfestigkeit und Bruchfestigkeit in erster Annäherung unabhängig war vom Versuchsmaterial (Glaszusammensetzung, Wandstärke, absolutem Wert der Bruchfestigkeit usw.), so daß die zeitabhängigen Festigkeitgleichungen des Verf. für verschiedenste Glasmaterialien mit ausreichender Genauigkeit angewandt werden konnten. Dieses Erkenntnis ist gleichzeitig geeignet, den Wert der in dieser Arbeit vorgelegten Ergebnisse günstig zu beeinflussen.

Ueber den Einfluß der Temperatur und des Einspannverfahrens wurde an anderer Stelle berichtet (14)(10).

Normalversuchsbedingungen.

Wie man sieht, ist ein Festigkeitsmeßwert alles andere als eine eindeutige Größe. Man kann sich sehr wohl vorstellen, daß zwei Laboratorien, die die gleiche Flaschensorte prüfen, Werte finden, die sich um z. B. 30% voneinander unterscheiden. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, daß Werke und Laboratorien entweder mit den gleichen Normal-

versuchsbedingungen arbeiten, oder, soweit sie nicht überall darstellbar sind, die Meßwerte auf diese Normalversuchsbedingungen zurückführen.

Als derartige Normalversuchsbedingungen könnten z. B. gelten:

- a) Versuchstemperatur: 15°C,
- b) Einspannverfahren: mit Halsring,
- c) Belastungsdiagramm: „Dreieckskurve“ (linearer Druckanstieg bis zum Bruch),
- d) Anstiegsgeschwindigkeit (zur Bestimmung der Bruchfestigkeit): 15 at/sec = 900 at/min.

Zusammenfassung.

Die Abhängigkeit des Meßwertes der Festigkeit gegen Innendruck von der Gestalt der Belastungskurve wird untersucht.

Aus früheren Versuchen des Verfassers ist die Abhängigkeit der Festigkeit von der Belastungsdauer bei rechteckiger Belastungskurve bekannt. Um die entsprechende Abhängigkeit bei dreieckiger Belastungskurve (Druckanstieg mit konstanter Geschwindigkeit bis zum Bruch) zu ermitteln, wurden neue Versuche angestellt und die Abhängigkeit in den Gleichungen [1] bis [4] sowie den Bildern 1, 2 und 5 (II) wiedergegeben.

Nach einer Besprechung der häufigsten Formen der Belastungskurven und ihrer versuchs-technischen Darstellung ergibt sich, daß der Meßwert der Festigkeit gegen Innendruck für eine und dieselbe Belastungsdauer um so höher liegt, je kleiner der mittlere Druck des Belastungsdiagrammes ist. Die Festigkeitsverminderung ist in den Gleichungen [13] und [14] innerhalb gewisser Grenzen ausgedrückt worden durch das Produkt aus dem mittleren Druck des Belastungsdiagrammes und einem Beiwert, der durch eine logarithmische Funktion der Belastungsdauer darstellbar ist.

Die erhebliche Abhängigkeit der Meßwerte von den Versuchsbedingungen führt zu dem Gedanken, Normalversuchsbedingungen aufzustellen, um den Vergleich von Festigkeitsuntersuchungen zu ermöglichen.

Um die einer bestimmten Belastungskurve entsprechende Festigkeitsverminderung zu ermitteln, wenn die aus dem Versuchsbericht bekannte Festigkeitsverminderung und die zugehörige Belastungskurve gegeben sind, wird man sich für praktische Zwecke der Darstellung in Bild 6 bedienen und entsprechend der gestellten Aufgabe intrapolieren.

Schrifttum.

- (1) M. Grenet, Bull. Soc. d'Encouragement de l'Ind., 1899, S. 839; Ref. bei Le Chatelier, „Kieselsäure und Silikate“ (Leipzig 1920), S. 247—249.
- (2) O. Graf: „Die Dauerfestigkeit der Werkstoffe“. Berlin 1929, Verlag J. Springer. (Bespr. Glastechn. Ber., 7 (1929/30), S. 264.)
- (3) G. Apelt: „Einfluß von Belastungsgeschwindigkeit und Verdrehungsverformung auf die Zerrei-

festigkeit von Glasstäben“. Z. f. Physik, 91 (1934), S. 336—343. (Ref. Glastechn. Ber., 13 (1935), S. 63.)

(4) E. J. Gooding: „Einfluß des Befestigungsverfahrens auf die Berstdruckprüfung von Flaschen“. J. Soc. Glass Technol., 16 (1932), S. 18—21. (Ref. Glastechn. Ber., 13 (1935), S. 329.)

(5) K. H. Borchard: „Ueber die Dauerfestigkeit und Bruchfestigkeit von Glasflaschen“. Sprechsaal Kera-

mik usw., 68 (1935), S. 147—149, 165—167. (Ref. Glastechn. Ber., 13 (1935), S. 131.)

(6) K. H. Borchar d: „Einfluß der Eigenschaften von Glashohlgefäßen auf ihre Festigkeit“. Glastechn. Ber., 12 (1934), S. 334—339.

(7) K. H. Borchar d: „Zur Ursache der Festigkeitsabnahme des Glases mit zunehmender Belastungsdauer“. Glastechn. Ber., 13 (1935), S. 52—57.

(8) K. H. Borchar d: „Zur Erkennbarkeit des Dauerbruches“. Glastechn. Ber., 13 (1935), S. 114—116.

(9) K. H. Borchar d: „Die Bruchuntersuchung“. Glashütte, 64 (1934), S. 115—118. [Berichtigung in Nr. 9, S. 152. In dieser Berichtigung sind die Worte „Brucherscheinung“ und „Bruchursache“ in Tabelle 1 zu vertauschen.] (Ref. Glastechn. Ber., 12 (1934), S. 348 und 440.)

(10) K. H. Borchar d: „Einfluß der Versuchsbedingungen auf die Festigkeitsmessungen von Hohlglas“. Sprechsaal Keramik usw., 68 (1935), S. 324 bis 326. (Ref. Glastechn. Ber., 13 (1935), S. 328.)

(11) K. H. Borchar d: „Zur Frage der Flaschenprüfung“. Sprechsaal Keramik usw., 67 (1934), S. 576 bis 577. (Ref. Glastechn. Ber., 13 (1935), S. 53.)

(12) K. H. Borchar d: „Die elastische Nachwirkung bei Glas“. Sprechsaal Keramik usw., 67 (1934), S. 297—299. (Ref. Glastechn. Ber., 13 (1935), S. 22.)

(13) K. H. Borchar d: „Um die Festigkeit des Glases“. Glashütte, 64 (1934), S. 47—48. (Ref. Glastechn. Ber., 12 (1934), S. 320.)

(14) K. H. Borchar d: „Einfluß der Temperatur auf die Festigkeit von Glasflaschen“. Glashütte, 65 (1935), S. 547—549. (Ref. im vorliegenden Hefte, S. 110.)

(15) K. H. Borchar d: „Verspannung und Festigkeit der Glasflaschen“. Glashütte, 64 (1934), S. 169 bis 171. (Ref. Glastechn. Ber., 12 (1934), S. 348.)

(16) K. H. Borchar d: „Meßgenauigkeit und Versuchszahl bei Glas“. Glashütte, 64 (1934), S. 435 bis 438. (Ref. Glastechn. Ber., 12 (1934), S. 320.)

(17) K. H. Borchar d und F. H. Zschack e: „Ueber den Einfluß chemischer Nachbehandlung auf die Festigkeit von Glasflaschen gegen Innendruck“. Glashütte, 66 (1935), S. 535—538. (Berichtigungen und Ref. s. im vorlieg. Hefte, S. 111.)

(18) K. H. Borchar d: „Graphische Qualitätsbeweise“. Glashütte, 65 (1935), S. 485—487. (Ref. im vorlieg. Heft, S. 111.)

(19) K. H. Borchar d: „Zur Lebensdauer der Glasflaschen“. Mineralwasserfabrikant (Lübeck), 37 (1933), Nr. 48, S. 879—880.

(20) K. H. Borchar d: „Festigkeitsuntersuchungen an Hohlgefäßen unter besonderer Berücksichtigung der Dauerfestigkeit“. (Gekürzter Vortragsbericht.) Glastechn. Ber., 13 (1935), S. 243—244. (11 213)

Nachwort der Schriftl.: Für eine eingehendere Beschäftigung mit den Fragen der Festigkeit des Glases bringen außer den vom Verf. genannten Arbeiten u. a. noch die folgenden wertvolle Material: A. Smekal, *Ergebn. d. exakten Naturwiss.*, 15 (1936), S. 106—188, und die dort unter Nr. 47, 50, 71, 92, 93, 100 angeführten Abhdl.; L. V. Black, *Bull. Amer. ceram. Soc.*, 15 (1935), S. 274—275 (Referate demnächst in den „Glastechn. Ber.“). Erwähnt seien ferner die in unserem Sonderheft „Festigkeit des Glases“ (Glastechn. Ber., 13 (1935), H. 7) veröffentlichten oder besprochenen Aufsätze.

Ein Hinweis auf diese Arbeiten schien uns im Hinblick auf die Problemstellung der vorliegenden Abhandlung und auf die von Herrn Borchar d in Angriff genommene mathematische Auswertung erwünscht.

DK 545.2 : 546.56 : 666.115 (045)

Zur Analyse farbiger Gläser. I. Die Bestimmung des Kupfers.

Von W. Geilmann und O. Meyer-Hoissen.

Institut für anorganische Chemie der Technischen Hochschule Hannover.

(Eingegangen 5. Januar 1937.)

An dem Beispiel der Cu-Bestimmung werden die Vorteile von Halb-Mikroverfahren für die praktische Analyse farbiger Gläser in Betriebslaboratorien gezeigt. Genaue Arbeitsvorschriften für ein erwiesenermaßen brauchbares Verfahren werden angegeben.

In einigen Mitteilungen¹⁾ konnte der Vorteil mikrochemischer Arbeitsverfahren für die qualitative und quantitative Erfassung einiger Glasbestandteile gezeigt werden.

Auch für die Untersuchung gefärbter Gläser mit den oft in geringer Menge vorhandenen färbenden Bestandteilen schienen Mikro- bzw. Halbmikroverfahren anwendbar, um in nicht zu großen Einwaagen den färbenden Stoff zu ermitteln.

Es ist nicht beabsichtigt, vollständig neue Arbeitsverfahren zu schaffen, sondern bereits bekannte Methoden sollten so ausgestaltet werden, daß mit den Mitteln eines Betriebslaboratoriums hinreichend genaue Werte zu erhalten waren.

Da nur in wenigen Fällen eine Mikrowaage zur Verfügung stehen wird, mußte die meist langwierige gravimetrische Mikroanalyse zugunsten der schnell durchführbaren maßanalytischen Bestimmungsverfahren unberücksichtigt bleiben, die ferner außer einigen fein geteilten Büretten nur wenig Spezialgerät benötigen.

Der Nachweis und die Bestimmung des Kupfers.

Ein einfaches, schnell durchführbares Verfahren zum Nachweis des Kupfers im Glase wurde bereits angegeben²⁾.

Bei Verwendung von 10 mg Glas sind Kupfergehalte von 0,005% sicher zu erkennen, so daß selbst die geringsten technisch verwandten Mengen einwandfrei in einigen Milligrammen Glas zu ermitteln sind.

Für die Auswahl eines quantitativen Bestimmungsverfahrens ist es wichtig, die zur Färbung technischer Gläser benutzten Kupferoxydmengen zu kennen.

Nach Schriftumsangaben bewegt sich der Gehalt zwischen 0,03 und 10%. Bei einer Einwaage von 1 g Glas wäre im ersten Falle 0,3 mg CuO zu bestimmen; im zweiten Falle in 0,1 g 10 mg. Von einem allgemein anwendbaren Verfahren wäre demnach zu verlangen, daß Kupfermengen zwischen 0,3 und 10 mg hinreichend genau erfaßbar sind. Diesen Anforderungen entspricht, bei Innehaltung besonderer Arbeitsvorschriften, das jodometrische Verfahren von de Haen-Low ebenso wie seine Modifikation durch Bruhns.

¹⁾ Glastechn. Ber., 7 (1929/30), S. 328; 8 (1930), S. 404; 9 (1931), S. 274; 12 (1934), S. 302; 13 (1935), S. 86 und 420.

²⁾ Glastechn. Ber., 7 (1929/30), S. 328.