

## Über die mechanische Belastbarkeit gekoppelter Glassysteme mit Luft- oder Gaseinschluß

VON FRIEDRICH KATHEDER, Wernberg i. d. Oberpfalz

(Mitteilung aus dem Physikalischen Laboratorium der Deutschen Tafelglas AG, Werk Wernberg)

(Eingegangen am 7. Februar 1958)

Das Festigkeitsverhalten von Doppelscheiben bei einseitiger Belastung wird behandelt. Es wird gezeigt, daß man doppelschalige Verglasungseinheiten als gekoppelte Systeme betrachten kann, wobei die eingeschlossene Luft im Innern als Koppelungsglied dient. An Hand von theoretischen Überlegungen werden die maximalen Bruchlastwerte im Vergleich zu Einzelscheiben diskutiert und die leistungsmäßige Überlegenheit von Doppelsystemen dargelegt. Die theoretischen Forderungen konnten durch experimentelle Untersuchungen bestätigt werden.

### 1. Einführung

Fenster oder verglaste Türen in Werksanlagen und Wohnungen sind stets Orte erhöhter Wärmedurchlässigkeit und führen so zu Verlusten an Heizenergie. Weiter dringt Lärm von der Straße oder angrenzenden Räumen durch diese Stellen bevorzugt ein. Der Wunsch, hier Abhilfe zu schaffen, führte zur Entwicklung einer neuen Art von Doppelverglasung, der sogenannten Doppel- bzw. Mehrfachscheibe. Das charakteristische Merkmal dieser neuen Verglasungsart ist die zwischen zwei Scheiben dicht eingeschlossene Gas- oder Luftschicht. Die Glasplatten sind zu diesem Zweck ringsum mit einer Profilleiste aus Metall oder Kunststoff umgeben, die einen bestimmten Scheibenabstand gewährleistet und die Luftschicht zwischen ihnen hermetisch von der Umgebung abschließt. Diese Anordnung kann mehrfach hintereinander wiederholt werden.

Die schall- und wärmetechnischen Eigenschaften solcher Verglasungseinheiten sind schon in verschiedenen Arbeiten untersucht worden; desgleichen das mechanische Verhalten gegenüber Druckschwankungen, die durch Veränderung des Luftdrucks und der Temperatur auftreten. Was jedoch noch fehlt, sind Untersuchungen darüber, wie sich solche Objekte bei einseitiger Belastung benehmen, etwa infolge von Winddruck oder bestimmter Einbauweisen. Nachfolgend werden deshalb einige Betrachtungen und Experimente zu diesem Fragenkreis mitgeteilt.

### 2. Luftpolsterwirkung bei Belastung von Doppelscheiben

Ein Doppelscheibensystem der angegebenen Art mit verschieden starken Einzelscheiben der Dicke  $h_1$  und  $h_2$  wird sich bei einseitiger Belastung mechanisch verformen, wobei die Biegungepfeile der beiden Einzelscheiben von verschiedener Größe sein werden. Die im Innern eingeschlossene Luft wirkt hierbei als Koppelungsglied, das die Energie von Scheibe 1 auf Scheibe 2 überträgt. Aus der Schwingungsmechanik sind die möglichen Arten einer mechanischen Koppelung hinlänglich bekannt; man spricht bei Schwingungsproblemen von starrer Koppelung oder von loser Koppelung, je nach der Größe der Zeitdauer, innerhalb welcher der Energieaustausch vom System 1 zum System 2 und umgekehrt sich vollzieht. Der Begriff „Koppelung“ gilt aber auch ganz allgemein für Systeme, die gegenseitig aufeinander einwirken, ohne daß damit ein Schwingungsvorgang verbunden sein muß, wobei mehr oder weniger große Energiebeträge von einem System zum anderen übertragen werden. Koppelungsverhältnisse dieser Art lassen sich in einem Doppel-

scheibensystem je nach Wahl des Scheibenabstandes beliebig verwirklichen. Im folgenden seien drei mögliche Fälle betrachtet:

#### 2.1. Fall einer starren Koppelung

(Doppelscheibe mit sehr kleinem Scheibenabstand „d“, gleich dicke Einzelscheiben der Dicke „h“,  $d \leq h$ .)

Bei kleinem Scheibenabstand wird sich bei einseitiger Belastung die eingeschlossene Luft wie eine steife Feder<sup>1)</sup> verhalten. Die Koppelung zwischen Scheibe 1 und Scheibe 2 ist verhältnismäßig starr. Die Biegungepfeile beider Scheiben werden annähernd gleich sein (vergl. Bild 1). Grenzfall 1.

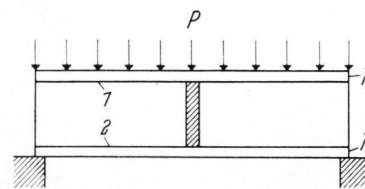


Bild 1. Schema einer starren Koppelung.

#### 2.2. Fall einer losen Koppelung

(Doppelscheibe mit großem Scheibenabstand „d“, gleich dicke Einzelscheiben der Dicke „h“,  $d \gg h$ .)

Die Koppelung zwischen Scheibe 1 und Scheibe 2 ist wesentlich loser. Die eingeschlossene Luft wirkt wie ein weiches Polster; man hat es mit einer Luftfeder mit geringer Steifigkeit zu tun. Als Ersatzschema kann eine Anordnung nach Bild 2 dienen. Die Durchbiegung von Scheibe 1 ist in diesem Fall größer als von Scheibe 2.

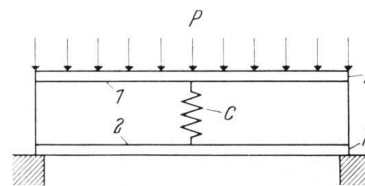


Bild 2. Schema einer weichen Koppelung.

#### 2.3. Fall einer nicht gekoppelten Anordnung

Macht man den Scheibenabstand immer größer, so wird schließlich bei einseitiger Belastung die Druckzunahme im eingeschlossenen Luftraum vernachlässigbar klein. Zwischen Scheibe 1 und Scheibe 2 besteht dann praktisch keine Koppelung mehr. Unter Belastung biegt sich nur mehr die obere Scheibe durch. Grenzfall 2.

### 3. Experimentelle Untersuchungen zur Durchbiegung von Doppelscheibensystemen

Um die vorstehend durchgeführten Überlegungen zu erhärten, wurden an einigen Scheibensystemen die

<sup>1)</sup> Derartige Doppelscheiben haben eine nicht sonderlich günstige Schalldämmung. Diese wird um so besser, je weicher das eingeschlossene Luftpolster wirkt; daher die Forderung nach größeren Scheibenabständen.

Durchbiegungen unter Last bestimmt. Es wurde dazu eine Versuchsanordnung gemäß Bild 3 benutzt, wie sie nachher auch für die Bestimmung der Bruchfestigkeit herangezogen wurde. Als Versuchsobjekte dienten Cudo-Doppelscheiben der Deutschen Tafelglas AG. Der konstruktive Aufbau dieser Verglasungseinheiten läßt bei Belastung eine elastische Verformung zu, die nach Aufhebung des Drucks praktisch 100%ig zurückgeht. Außerdem darf infolge einer gewissen Plastizität des Distanzierungsmaterials in Verbindung mit bestimmten Klebesubstanzen der Einspannungszustand der beiden Einzelscheiben im Metallprofil als sehr weich bezeichnet werden, so daß die Verhältnisse weitgehend einer Anordnung mit freiaufliegenden belasteten Platten gleichen. In gleicher Weise wären natürlich auch andere Doppelscheibenfabrikate hierfür geeignet, deren Aufbau analoge Merkmale aufweist.

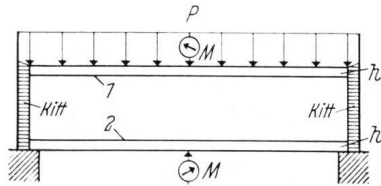


Bild 3. Schema einer Durchbiegungsmessung mittels Meß-Uhren bei Belastung.

Die Durchbiegung unter einer bestimmten Last (Wassersäule zwischen 5 und 15 cm) wurde mit Hilfe von Meßuhren abgelesen<sup>2)</sup>.

### 3.1. Meßergebnisse

Die gefundenen Meßergebnisse sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Tabelle 1. Durchbiegung von Scheiben bei einseitiger Belastung<sup>1)</sup>

Druck [cm WS]	Scheibenabstand											
	4 mm			8 mm			12 mm			20 mm		
	f <sub>1</sub> [mm]	f <sub>2</sub> [mm]	f <sub>2</sub> /f <sub>1</sub>	f <sub>1</sub> [mm]	f <sub>2</sub> [mm]	f <sub>2</sub> /f <sub>1</sub>	f <sub>1</sub> [mm]	f <sub>2</sub> [mm]	f <sub>2</sub> /f <sub>1</sub>	f <sub>1</sub> [mm]	f <sub>2</sub> [mm]	f <sub>2</sub> /f <sub>1</sub>
5	1,50	1,22	0,81 <sub>4</sub>	1,70	1,40	0,82 <sub>3</sub>	1,50	1,24	0,82 <sub>6</sub>	1,30	1,10	0,84 <sub>6</sub>
10	2,60	2,40	0,92 <sub>3</sub>	3,10	2,70	0,87 <sub>1</sub>	2,60	2,29	0,88 <sub>0</sub>	2,50	2,20	0,88 <sub>0</sub>
15	3,70	3,55	0,95 <sub>9</sub>	4,20	3,90	0,92 <sub>9</sub>	3,60	3,35	0,93 <sub>1</sub>	3,70	3,40	0,92 <sub>0</sub>
Scheibendicke ob. Scheiben unt. Scheiben [mm]	2,78 <sub>5</sub> 2,69 <sub>0</sub>			2,61 <sub>5</sub> 2,57 <sub>5</sub>			2,61 <sub>5</sub> 2,67 <sub>0</sub>			2,69 <sub>0</sub> 2,70 <sub>0</sub>		

<sup>1)</sup> Scheibengröße 50 × 100 cm; f<sub>1</sub> = Biegepeil der oberen Scheibe; f<sub>2</sub> = Biegepeil der unteren Scheibe.

Betrachtet man die Verhältniszahlen f<sub>2</sub>:f<sub>1</sub> in Abhängigkeit vom gegenseitigen Scheibenabstand, so läßt sich ein bestimmter Zusammenhang zwischen beiden Größen nicht feststellen. Indessen sind auch die Einzelscheibendicken der hier untersuchten vier Doppelscheiben nicht restlos gleich, so daß Vergleiche untereinander mit gewissen Fehlern behaftet sind. Es ergibt sich aber ziemlich eindeutig, daß in allen vier Fällen die

<sup>2)</sup> Die in der Tabelle 1 aufgeführten Biegepeile f<sub>2</sub> und f<sub>1</sub> können im Sinne der hier angestellten Betrachtungen — streng genommen — nicht miteinander ins Verhältnis gesetzt werden, da die Stützweite von Scheibe 2 infolge einer allseitigen Auflage von etwa 2,3 cm ringsherum etwas kleiner ist als die von Scheibe 1. (Vergl. Bild 3). Für die aus den vorliegenden Messungen gezogenen Schlußfolgerungen spielt indessen dieser Fehler keine wesentliche Rolle. Bei gleicher Stützweite beider Scheiben würde das Verhältnis f<sub>2</sub>:f<sub>1</sub> etwas größer ausfallen.

Koppelungsverhältnisse noch annähernd gleich sind, d. h. auch ein Luftpolster von 20 mm Tiefe wirkt im wesentlichen noch als steife Feder<sup>3)</sup>. Dieser Befund wird gestützt durch die später noch zu besprechenden Bruchlastmessungen. Auch hier zeigt sich, daß bei Scheibenabständen von 4–20 mm der Koppelungsgrad zwischen oberer und unterer Scheibe im wesentlichen gleich ist.

Eine eindeutige und reelle Abhängigkeit besteht jedoch zwischen Durchbiegungsverhältnissen und Größe der Belastung. Für jede der vier untersuchten Doppelscheiben nimmt mit wachsender Belastungshöhe dieses Verhältnis zu. Das bedeutet, daß die Koppelung mit zunehmender Lastaufnahme starrer wird infolge der mit wachsender Durchbiegung der oberen Scheibe erhöhten Kompression des Luftpolsters. Das Experiment bestätigt somit die im Abschnitt 1 angestellten Überlegungen über die Rolle der Luftschicht als Übertragungselement der wirksamen Kräfte. Gleichzeitig ergibt sich, daß in Doppelscheibensystemen bei einseitiger Lastaufnahme (Wind- oder Wasserdruck) die Belastung auf beide Einzelscheiben aufgeteilt wird, wobei die beiden Anteile bei hoher Belastung sich angenähert wie 1:1 verhalten. Wie später noch gezeigt wird, stimmen die Ergebnisse der Bruchlastbestimmungen mit diesem Befund voll überein.

### 4. Theoretische Betrachtungen über die mechanische Festigkeit von Doppelscheibensystemen

Die mechanische Leistungsfähigkeit eines Doppelscheibensystems läßt sich mit Hilfe der in Abschnitt 3

aufgeführten Durchbiegungsverhältnisse beurteilen. Der Zahlenwert dieses Verhältnisses gibt ein Maß dafür, wie sich die jeweils wirksame Kraft auf die beiden Einzelscheiben des betreffenden Systems aufteilt. So bedeutet z. B. ein Verhältnis 1:1, daß die beiden gleich dicken Einzelscheiben jeweils nur die Hälfte der aufgeprägten Belastung aufzunehmen haben. Mit diesem Wert ist der günstigste Fall erreicht, d. h. ein Doppelscheibensystem kann dann die doppelte Belastung aushalten. Dieser optimale Fall kann auch theoretisch mittels der BACHSchen Plattentheorie behandelt werden.

<sup>3)</sup> Wie bereits erwähnt, wird diese Tatsache auch bei Schalldämmungsmessungen bestätigt. Erst bei wesentlich größeren Scheibenabständen wird die Steifigkeit der Luftfeder so vermindert, daß sich die Schalldämmwirkung erheblich verbessert.

4.1. Durchbiegung einer Einzelscheibe und einer Doppelscheibe

Der Biegungspfeil  $f_E$  einer Einzelscheibe der Dicke  $h_E$  mit den Abmessungen  $2a \times 2b$  errechnet sich bei gleichförmig verteiltem Belastungsdruck  $p$  gemäß der Formel:

$$f_E = \psi \cdot \frac{b^4}{E \cdot h_E^3} \cdot p \quad (1)$$

Hierin ist:

- $\psi$  = dimensionsloser Beiwert, der vom Seitenverhältnis  $2a : 2b$  und von der Art der Einspannung abhängig ist.
- $b$  = halbe kurze Seite in [cm]
- $E$  = Elastizitätsmodul in [kg/cm<sup>2</sup>]
- $h$  = Schichtdicke in [cm]
- $p$  = Belastungsdruck in [kg/cm<sup>2</sup>]
- $f_E$  = Biegungspfeil in [cm].

Der auf einer Doppelscheibe lastende Druck  $p$  verteilt sich auf beide Einzelscheiben. Daher muß gelten:

$$p = p_1 + p_2$$

Für gleich dicke Einzelscheiben der Dicke  $h_D = h_1 = h_2$  wird unter Annahme einer vollständigen Kraftübertragung (starre Koppelung) der auf einer Einzelscheibe ruhende Druck:

$$p_1 = p_2 = \frac{p}{2}$$

d. h. jede Scheibe des Systems nimmt nur einen Druck von  $\frac{p}{2}$  auf. Die Biegungspfeile beider Einzelscheiben sind dann gleich groß, nämlich:

$$f_1 = f_2 = f_D$$

und für jede Einzelscheibe des Systems gilt die Beziehung:

$$f_D = \psi \cdot \frac{b^4}{E \cdot h_D^3} \cdot \frac{p}{2} \quad (2)$$

Für  $h_D = h_E$  besagt diese Gleichung, daß die Durchbiegung einer Einzelscheibe der Dicke  $h_E$  in einem Doppelscheibensystem bei der Belastung  $p$  nur halb so groß ist wie im Falle der Einzelscheibe.

Zum Vergleich sei die Dicke einer gleich großen Einzelscheibe berechnet, deren Durchbiegung bei der gleichen Belastung  $p$  gleich der einer Einzelscheibe eines Doppelscheibensystems ist, sodaß  $f_E = f_D$  wird. Führt man diese Bedingung in Gleichung 1 und 2 ein, dann erhält man:

$$\frac{1}{h_E^3} = \frac{1}{2 \cdot h_D^3}$$

oder

$$h_E = \sqrt[3]{2 \cdot h_D} \quad (3)$$

Eine um den Faktor  $\sqrt[3]{2} = 1,26$  dickere Glasscheibe

zeigt somit die gleiche Durchbiegung wie die Einzelscheibe eines Doppelsystems. In Tabelle 2 sind einige äquivalente Dicken von Doppel- und Einzelscheiben zum Vergleich zusammengestellt.

Von größerem Interesse erscheint die Frage, bei welcher Dicke eine Einzelscheibe bei gleicher Belastung  $p$  dieselbe Biegespannung  $\sigma_B$  aufweist wie die Einzelscheibe in einem Doppelscheibensystem, daß also  $\sigma_E = \sigma_D$  wird.

Für die Einzelscheibe bei einer Belastung  $p$  liefert die BACHSche Plattentheorie die Beziehung:

$$\sigma_E = \varphi_{x,y} \cdot \frac{b^2}{h_E^2} \cdot p \quad (4)$$

$\varphi_{x,y}$  = dimensionsloser Beiwert, der vom Seitenverhältnis  $2a : 2b$  und von der Art der Einspannung abhängig ist.

$\sigma_E$  bzw.  $\sigma_D$  = Biegespannung in [kg/cm<sup>2</sup>].

Bei gleicher Belastung  $p$  ergibt sich dann für die Einzelscheibe eines Doppelscheibensystems gleicher

Tabelle 2. Dicken gleicher Durchbiegung ( $f_E = f_D$ ) von Doppel- und Einzelscheiben bei starrer Koppelung

Scheibendicke im Doppelscheibensystem [mm]	Äquivalente Dicke einer Einzelscheibe [mm]
2	2,52
3	3,78
4	5,04
5	6,30
6	7,56

Abmessung, wenn die Last sich auf beide Scheiben gleichmäßig im Verhältnis 1:1 verteilt, die Beziehung:

$$\sigma_D = \varphi_{x,y} \cdot \frac{b^2}{h_D^2} \cdot \frac{p}{2} \quad (5)$$

Setzt man wiederum die Ausdrücke von Gleichung 4 und 5 einander gleich, so erhält man:

$$\frac{1}{h_E^2} = \frac{1}{2 \cdot h_D^2}$$

oder

$$h_E = \sqrt{2 \cdot h_D} \quad (6)$$

Dieser Ausdruck besagt, daß erst eine um das 1,414-fache dickere Einzelscheibe denselben Spannungszustand aufweist wie die Einzelscheibe eines Doppelscheibensystems. In Tabelle 3 sind wiederum einige Zahlenwerte zum Vergleich zusammengestellt.

Tabelle 3. Dicken gleicher Spannung ( $\sigma_E = \sigma_D$ ) für Doppel- und Einzelscheiben bei starrer Koppelung

Scheibendicke im Doppelscheibensystem [mm]	Äquivalente Dicke einer Einzelscheibe [mm]
2	2,83
3	4,24
4	5,66
5	7,07
6	8,48

Da die hier formulierten Beziehungen auch auf den Moment des Bruches zutreffen, wenn man an Stelle von  $\sigma_E$  und  $\sigma_D$  die Biegefestigkeiten  $\sigma_{BE}$  und  $\sigma_{BD}$  setzt, treffen die in Tabelle 3 aufgeführten Zahlenwerte auch für die Bruchfestigkeit zu. Die Vorteile eines Doppelscheibensystems sind damit augenfällig. Wie weiter noch gezeigt wird, erreicht allerdings die tatsächlich in der Praxis vorhandene Leistungsfähigkeit die theoretisch errechneten Werte von Tabelle 3 nicht völlig.

**5. Messung der Bruchfestigkeiten bei Einzelscheiben und Doppelscheibensystemen**

5.1. Meßanordnung

Eine experimentelle Prüfung der Bruchfestigkeit von Doppelscheiben läßt sich in verhältnismäßig einfacher Weise durchführen. Als Versuchsmaterial dienten wieder Cudo-Doppelscheiben.

Zur Messung der Berstdrucke wird ein einfacher bodenloser Behälter aus Eisenblech verwendet, der nach Einsetzen einer Scheibe kontinuierlich mit Wasser beschickt wird. Der Behälter besteht aus zwei Teilen. (Bild 4 und 5.) Werden größere Drucke gewünscht, so wird der obere Teil aufgeschraubt, bei kleinen Berstdrücken ist er entbehrlich.

Die zu prüfende Scheibe wird in den unteren Teil eingesetzt und liegt frei ohne Einspannung auf einer Holzleiste b, die ihrerseits auf dem Auflager a ruht. Zur Verhinderung des Wasserdurchtrittes wird die Prüfscheibe ringsherum mit einer plastischen Kittschicht abgedichtet. Die Belastungsgeschwindigkeit kann durch Regelung des Wasserzulaufs in großen Grenzen variiert werden. Die vorliegenden Meßergebnisse sind durchweg bei einem Belastungszuwachs von 3 kg/min gewonnen worden, entsprechend einem zeitlichen Druckgradienten von  $\frac{\Delta p}{\Delta t} = 0,0006 \text{ at/min.}$

Durch angebrachte benetzbare Meßstäbe kann die Wasserhöhe im Moment des Bruches ermittelt werden. Auf eine besondere große Meßgenauigkeit konnte im Rahmen dieser Untersuchung verzichtet werden. Der Fehler in der Bruchlastangabe beläuft sich auf 2–3 kg/m<sup>2</sup>. Alle angegebenen Bruchwerte sind um diesen Betrag zu niedrig, weil die durch die Scheibendurchbiegung gegebene Volumenzunahme bei der Messung nicht berücksichtigt wurde. Die im Meßbehälter herrschende Temperatur des Wassers betrug durchschnittlich 15–17°C. Mit der beschriebenen Apparatur wurden eine Reihe von Einzelscheiben<sup>4)</sup> verschiedener Dicke, Verbund-sicherheitsglas und Doppelscheiben mit verschiedenen Scheibenabständen bei gleichbleibender Dicke ihrer Einzelscheiben gemessen.

5.2. Versuchsergebnisse

Es ist bekannt, daß die Bruchfestigkeit von Glasscheiben außerordentlich starken Schwankungen unterliegt, da das Glas in unterschiedlicher Weise Restspannungen und Fehlstellen enthält. Dennoch zeigen die vorliegenden Prüfwerte, daß mit 6–10 Einzelmessungen je Versuchsreihe eindeutige Ergebnisse erzielt werden konnten.

Eine Zusammenstellung der Prüfungsbefunde ist in Bild 6 sowie in Tabelle 4 wiedergegeben. Der Mittelwert der Bruchfestigkeiten von Doppelscheiben ist in Bild 6 als gestrichelte Linie eingezeichnet. Die gestrichelte Kurve gibt die Abhängigkeit der Bruchlast von der Schichtdicke bei gezogenem Maschinenglas wieder. Zum Vergleich ist eine theoretisch berechnete Kurvenschar mit  $\sigma_{B_{max}}$  als Parameter beigefügt. Sie wurde, wie folgt, errechnet: Nach der Plattentheorie von BACH

<sup>4)</sup> Zum Vergleich ist auch eine Untersuchungsreihe an verschiedenfarbigem Opakglas — Detopakgläser der Deutschen Tafelglas AG — vorgenommen worden.

gilt für den Druck in Abhängigkeit von der Zugspannung:

$$p = \frac{h^2 \cdot \sigma_{x,y}}{b^2 \cdot \varphi_{x,y}} = K \cdot h^2.$$

Diese Gleichung stellt eine Parabel dar. Setzt man für  $\sigma_{x,y} = \sigma_{B_{max}}$  ein, so erhält man die Bruchlast  $p_{max}$ .

Nach dieser Beziehung sind die Berstdrucke für Stützweiten von  $2a = 95,4 \text{ cm}$  und  $2b = 45,4 \text{ cm}$  unter

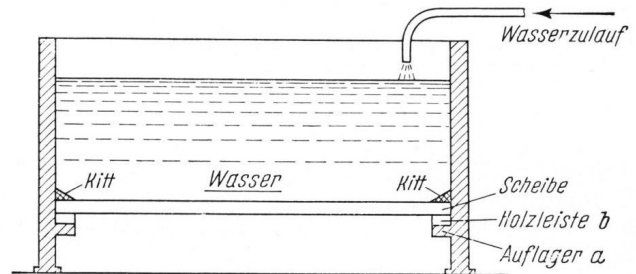


Bild 4. Vorrichtung zur Messung der Berstdrucke.

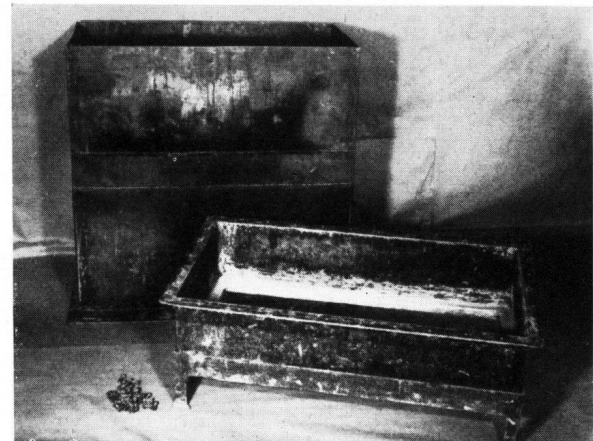


Bild 5. Apparatur zur Bestimmung der Berstdrucke.

Zugrundelegung von  $\sigma_{B_{max}}$  als Parameter ( $\sigma_B = 600, 400 \text{ kg/cm}^2$ ,  $a:b = 2,1$ ,  $\varphi_y = 2,5$ ) in Abhängigkeit von der Schichtdicke berechnet worden. Wie man sieht, stimmen für  $\sigma_{B_{max}} = 400 \text{ kg/cm}^2$  die berechnete und gemessene Kurve im Bereich größerer Dicken ungefähr überein. Das entspricht für Rohglas gut den Werten, die aus der Literatur bekannt sind.

Tabelle 4. Berstdrucke von Doppel- und Einzelscheiben in kg/m<sup>2</sup> bei Belastung mit Wasser<sup>1)</sup>

Berstdruck [kg/m <sup>2</sup> ]	Art der Scheiben
248	ED-Rohglas
428	MD-Rohglas
476	DD-Rohglas
636	Dickglas 4–5 mm)
951	„ (5–6 mm)
567	Detopak verschiedenfarbig 6–7 mm
610	Sigla ED/ED <sup>2)</sup>
913	Cudo <sup>3)</sup> MD-MD, Scheibenabstand 4 mm
860	Cudo MD-MD, „ 8 mm
959	Cudo MD-MD, „ 12 mm
966	Cudo MD-MD, „ 20 mm
835	Cudo: MD-Sigla ED/ED, „ 4 mm

<sup>1)</sup> Die Berstdruckwerte sind Mittelwerte aus je 10 Einzelmessungen bei Rohglas, Sigla und Detopak, und aus je 6 Einzelmessungen bei den Doppelscheiben. Scheibengröße 50 × 100 cm, Auflagebreite allseitig 2,3 cm.

<sup>2)</sup> Verbundsicherheitsglas der Deutschen Tafelglas AG.

ED: 1,8 mm + 0,2 mm  
– 0,05 mm.

<sup>3)</sup> Cudo: Doppelscheibe der Deutschen Tafelglas AG.

Wie bereits bei der Besprechung der Durchbiegungsmessungen in Abschnitt 3 betont wurde, läßt sich bei den Doppelscheiben zwischen den Bruchfestigkeiten und den Scheibenabständen keine Abhängigkeit ermitteln. Es ist offensichtlich im Bereich der Scheibenabstände von 4–20 mm kein besonders eklatanter Unterschied in der Steifigkeit des Luftpolsters vorhanden. Die gemessenen Differenzen sind nur als unvermeidliche Streuungen einer bei Gläsern immer vorhandenen, sehr großen Streubreite zu werten. Ein Blick auf Tabelle 4 zeigt aber in auffälliger Weise die Überlegenheit eines Doppelscheibensystems gegenüber Einzelscheiben. Die Berstdrucke von Doppelscheiben aus MD-MD sind durchweg um etwa den Faktor 2 vergrößert (einfache MD-Scheibe 428 kg/m<sup>2</sup>, Doppelscheiben im Mittel aus sämtlichen Werten etwa um 900 kg/m<sup>2</sup>). Damit bestätigt auch das Bruchexperiment die Richtigkeit der theoretischen Überlegungen im Abschnitt 4, wonach bei sehr hohen Belastungen sich der Druck gleichmäßig auf die beiden Einzelscheiben des Doppelsystems im Verhältnis 1:1 verteilt.

Aus dem Diagramm Bild 6 läßt sich auch die äquivalente Dicke einer Einzelscheibe entnehmen, wenn

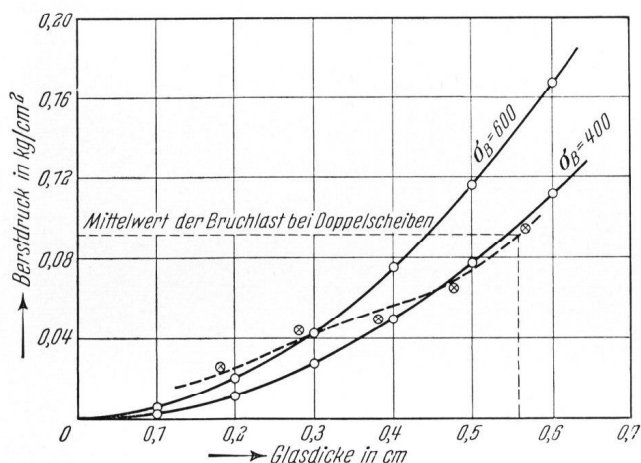


Bild 6. Berstdrucke von Glasscheiben in Abhängigkeit von der Glasdicke.

Scheibengröße 50 × 100 cm<sup>2</sup>, Stützweite: 2a = 95,4 cm, 2b = 45,4 cm,  $\frac{a}{b} = 2,1$ ,  $\sigma_y = 2,5$ , ⊕ = Experimentelle Kurve, ○ = Theoretische Kurve.

man den Mittelwert der Bruchlast bei Doppelscheiben mit dem entsprechenden Mittelwert von Einzelscheiben (gestrichelte Kurve) in Beziehung setzt. So ist z. B. eine Doppelscheibe aus 2 × MD einer Einzelscheibe der Dicke von etwa 5,5 mm äquivalent. Auf Grund der Ausführungen in Abschnitt 4 (Tabelle 3) ergab sich, daß das Dicken-Äquivalent einer Einzelscheibe nach Gleichung 6 um den Faktor  $\sqrt{2} = 1,414$  größer ist als bei den Scheiben des Doppelsystems. Der experimentelle Befund nach dem Diagramm in Bild 6 führt jedoch zu einem Zahlenfaktor von etwa 1,81. Diese Diskrepanz zwischen Theorie und Experiment macht offenbar, daß selbst bei gleich großen Biegespannungen die dickere Scheibe schon früher zu Bruch gehen kann. Es ist bekannt, daß in dickeren Gläsern die zur Auslösung des Bruches notwendige Spannung sehr oft kleiner ist als bei dünneren Gläsern.

Dies bedeutet mit anderen Worten, daß die Biegefestigkeit  $\sigma_{B_{max}}$  streng genommen keine Konstante ist<sup>5)</sup>.

Bei Berstdruckversuchen mit den beschriebenen Doppelscheiben und Verbundsicherheitsgläsern<sup>6)</sup> symmetrischen Aufbaus mit gleich dicken Einzelscheiben kann man häufig beobachten, daß die beiden Einzelscheiben des betreffenden Systems nicht gleichzeitig brechen. Es existiert bisweilen eine merkliche Bruchlastdifferenz der oberen und unteren Platte. Die Ergebnisse mit der vorliegenden Versuchsanordnung zeigten, daß in solchen Fällen immer zuerst die untere Scheibe bricht und kurz danach die unmittelbar belastete obere Scheibe.

## 6. Diskussion der Ergebnisse

Die gemessenen Bruchfestigkeiten bestätigen in klarer Weise, daß Doppelscheibensysteme der beschriebenen Art tatsächlich im Durchschnitt den doppelten Belastungsdruck wie Einzelscheiben der gleichen Dicke aufnehmen können. Es muß natürlich betont werden, daß diese nach den vorliegenden Meßergebnissen um 100% erhöhten Festigkeitswerte nur dann von Doppelscheiben erreicht werden, wenn das betreffende System auch wirklich hermetisch abgeschlossen ist, d. h. wenn unter dem Einfluß einer Belastung nicht durch irgendwelche Undichtigkeiten innerhalb der Anordnung die im Innern komprimierte Luft entweichen kann. Bei geringen Undichtigkeiten kapillaren Ausmaßes, durch welche die eingeschlossene Luft nur sehr langsam entweichen kann, darf indessen auch in diesem Falle mit einer gegenüber Einzelscheiben erheblich gesteigerten Lastaufnahme gerechnet werden, vor allem wenn es sich hierbei nur um zeitlich begrenzte Belastungen, beispielsweise kurzzeitige Windböen handelt. Bei groben Undichtigkeiten leistet allerdings auch ein Doppelscheibensystem praktisch nicht mehr als eine Einzelscheibe.

Betrachtet man die Absolutwerte der gemessenen Bruchlasten bei Doppelsystemen nach Tabelle 4, so kann dazu gesagt werden, daß derartige Windbelastungen selbstverständlich niemals auftreten. Nach DIN 1055 wird selbst bei hohen turmartigen Bauwerken von über 100 m Höhe nur mit einer Windbelastung von 130 kg/m<sup>2</sup> gerechnet. Scheibenzerstörung durch Winddruck wird deshalb auch weniger durch Überschreitung der maximalen Durchbiegung auftreten als vielmehr durch wiederholte Böen, die die Scheiben in Schwingungen versetzen, was vor allem bei großen Scheiben möglich ist, deren Eigenfrequenzen verhältnismäßig niedrig liegen. Auch kann der Fall eintreten, daß eine Scheibe als Ganzes aus ihrer Einfassung herausgedrückt wird.

Wesentlich wichtiger sind die Bruchdaten jedoch dort, wo ein Doppelscheibensystem als tragendes Bauelement in eine Konstruktion einbezogen wird.

Aus den gewonnenen Resultaten ergibt sich weiter eine Folgerung für die Herstellung von Doppelscheibensystemen. Größe und Dicke einer Fensterscheibe müssen wegen des Winddrucks in einer gewissen Beziehung zu

<sup>5)</sup> Die Biegefestigkeit  $\sigma_{B_{max}}$  von Gläsern ist eine komplexe Größe, die von Dicke und Größe des Glases, von der Art der Abkühlung bei der Herstellung, von der Oberflächenbeschaffenheit und Kantenbeschaffenheit und schließlich auch noch von Belastungsgeschwindigkeit und Belastungsdauer abhängt.

<sup>6)</sup> Eine Verbundsicherheitsglasscheibe stellt ebenfalls ein gekoppeltes Glassystem dar, wobei die Zwischenschicht als Koppelglied wirkt.

einander stehen, derart daß größere Scheibenabmessungen auch größere Dicken verlangen. Verwendet man Doppelscheiben, so kann man auf Grund der dargelegten Ergebnisse meist eine kleinere Dickenklasse verwenden als sie bei Einbau von Einfachscheiben notwendig wäre, also z. B. MD statt DD. Die hierbei erreichte Gewichtsersparnis sollte nicht übersehen werden.

Die in dieser Arbeit angestellten Versuche und Erörterungen lassen sich analog auch auf Dreifach- oder ganz allgemein auf Mehrfachsysteme übertragen. Bei einem Glasbauelement aus n-Glasscheiben gleicher

Dicke mit (n-1)-Luftpolstern erhält man theoretisch eine n-fache Belastungsfähigkeit und es besteht kein Zweifel, daß experimentelle Messungen an solchen gekoppelten Systemen diese theoretischen Erwägungen völlig bestätigen würden. Ob derartige Mehrfachglassysteme als konstruktive Bauelemente eine technische Zukunft besitzen, soll hier dahingestellt bleiben.

Für freundliche wissenschaftliche Hinweise ist der Verf. den Herren Dr. RODLOFF und Dipl.-Physiker QUENETT, Deutsche Tafelglas AG Witten (Ruhr), zu Dank verpflichtet.

7. Schrifttum

[1] GERSDORFER, O.: Feineinstell-Federsystem mit großer Übersetzung. VDI-Z. 98 (1956) S. 15-19.  
 [2] KITAIGORODSKI, I. I.: Technologie des Glases. München: Oldenbourg; Berlin: VEB-Verl. Technik 1957.  
 [3] Tafelglas-Daten. Bearb. O. VÖLCKERS. Frankfurt (M.): Fachverband d. Fensterglasindustrie 1954.  
 [4] Ohne Verf.: Glas im Bau. Ein technischer Leitfaden. [etwa 1955]. [Zu beziehen durch DETAG, Fürth (Bay.)]  
 [5] W., L.: Wer schafft eine brauchbare Doppelverglasung. Bauwirtsch. 1957, H. 47/48, S. 14-15.  
 [6] KRINGS, A. und OLINK, J. TH.: Wärmeübertragung durch Doppel- und Mehrfachscheiben mit direkt eingeschlossener Gasschicht. Glastechn. Ber. 30 (1957) S. 175-182.  
 [7] KÖHNE, K. H.: Herstellung von Doppelglasscheiben. Glas-Email-Keramo-Techn. 8 (1957) S. 1-4, 74-78, 121-124.  
 [8] Hütte. Taschenbuch des Ingenieurs. Bd. I. S. 728-730.  
 [9] SPIEKERMANN, H.: Verhalten von eingeglasten Drahtglasscheiben unter gleichmäßig verteilter Last. Glastechn. Ber. 28 (1955) S. 198-200. (30946)

DK 546.33-31:545.828

Die flammenspektrometrische Natrium-Bestimmung in aluminiumreichen Gläsern

Von FRIEDRICH HEGEMANN und LUDWIG SÜSS, Regensburg

(Mitteilung aus der Forschungsstelle für Geochemie am Mineralogischen Institut der Technischen Hochschule, München, und dem Staatlichen Forschungsinstitut für Angewandte Mineralogie, Regensburg)

(Eingegangen am 29. November 1957)

Beim einmaligen Aufschluß Al-reicher Gläser mit Flußsäure/Oxalsäure verbleibt eine schwer lösliche Na-Al-F-Verbindung im Rückstand. Durch wiederholte Behandlung mit Oxalsäure wird diese Verbindung zerstört und das gesamte Na in lösliche Form übergeführt. Mit der entwickelten Analysenvorschrift läßt sich eine genaue flammenspektrometrische Na-Bestimmung in Al-reichen Gläsern durchführen. Eine Meßvorschrift für das Spektralphotometer PQM II mit Flammzusatz der Firma Zeiss wird angegeben.

1. Einleitung

Beim Vergleich zwischen flammenspektrometrisch [1] und chemisch-analytisch ermittelten Na-Werten verschiedenartiger Gläser wurde festgestellt, daß zwar bei den meisten Gläsern die Na-Werte gut übereinstimmen, bei einigen Glasproben jedoch die flammenspektrometrischen Na-Werte zu niedrig ausfielen. Der Aufschluß der Glasproben erfolgte für die flammenspektrometrischen Analysen mit Flußsäure/Oxalsäure, für die chemische Analyse jedoch mit Flußsäure/Schwefelsäure. Weitere Untersuchungen ergaben, daß die flammenspektrometrischen Na-Werte nur bei Al-reichen Glasproben mit mehr als 3% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> zu niedrig gefunden wurden. Als Fehlerquellen wurden die folgenden zwei Möglichkeiten vermutet und überprüft: a) Die Erniedrigung der Na-Emission durch Störeinwirkung von Al-Ionen auf die Na-Anregung und b) die Bildung einer gegen Oxalsäure relativ beständigen, in Wasser schwer löslichen Na-Al-F-Verbindung beim Flußsäure/Oxalsäure-Aufschluß.

Für die Untersuchungen standen einige nach den chemischen Methoden analysierte Glasproben mit wechselnden Gehalten an Aluminium- und Alkalioxyden zur Verfügung<sup>1)</sup>. Zusätzlich wurden Mischun-

gen aus Natriumcarbonat und Aluminiumhydroxyd mit bestimmten Gehalten an Na<sub>2</sub>O und Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in gleicher Weise mit Fluß- und Oxalsäure behandelt und die so gewonnenen Probelösungen flammenspektrometrisch auf ihre Na-Gehalte untersucht.

Für die flammenspektrometrischen Messungen stand das Spektralphotometer PMQ II mit Flammzusatz der Firma Carl Zeiss, Oberkochen, zur Verfügung. Als Brenngas diente Wasserstoff (p = 200 mm WS) mit Sauerstoff (p = 0,30 atü).

2. Versuche zum Aufschluß Al-haltiger Proben

Wie wiederholt festgestellt, ergab der Aufschluß mit Flußsäure/Oxalsäure in der von F. HEGEMANN und B. PFAB beschriebenen Weise [1]<sup>2)</sup> zu niedrige Na-Werte, wenn der Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Gehalt der Proben über 3% lag. Der Aufschluß mit Flußsäure allein verlief bei genügender Zerkleinerung der Proben quantitativ. Da Fluorwasserstoff mit 60 Gew.-% Wasser ein bei 120° C siedendes azeotropes Gemisch bildet, wurde jeder Aufschluß nach dem Eindampfen auf dem Wasserbad 20 Minuten mit einer Infrarotlampe<sup>3)</sup> aus 20 cm Entfernung von

<sup>2)</sup> Aufschluß nach [1]: Probe mit 10 ml HF (40%) auf dem Wasserbad eingedampft, Zusatz von 10 ml heißem Wasser und 0,5 g Oxalsäure, nach erneutem Eindampfen zur Trockne überschüssige Oxalsäure im Trockenschrank bei 190° C abgeraucht. Viermaliges Auskochen des Rückstandes mit je 20 ml Wasser.

<sup>3)</sup> Herstellerfirma: Philips; Type 13352 E/99, 250 W.

<sup>1)</sup> Die Glasproben wurden freundlicherweise von der Aktien-Gesellschaft der Gerresheimer Glashüttenwerke und der DETAG, Werk Weiden, zur Verfügung gestellt. Es sei auch an dieser Stelle verbindlichst dafür gedankt.