

## Biegebruchspannung von Floatglas und thermisch vorgespanntem Floatglas

### Beschreibung der Prüfmethode und statistische Berechnung der Gebrauchsfestigkeit

Von Hubert Woelk und Kurt Elsenheimer, Köln-Porz

(Mitteilung aus der Vereinigte Glaswerke GmbH, Aachen, Werk Porz)

(Eingegangen am 18. August 1978)

Die theoretische Festigkeit von Glas wird – wie auch bei anderen Werkstoffen – durch die atomaren Bindungen bestimmt und kann im Prinzip aus der Zusammensetzung berechnet werden; die Gebrauchsfestigkeit liegt jedoch wegen seiner Sprödigkeit und nahezu idealen Homogenität erheblich unter diesem Wert. Festigkeitsangaben für Gläser können daher nicht als Materialkennwert wie z. B. bei Stahl angesehen werden; sie dienen lediglich zur Festsetzung von

Glasdicken, die eine ausreichend geringe Bruchwahrscheinlichkeit für bestimmte Beanspruchungen gewährleisten.

Es werden die hauptsächlich gebräuchlichen Prüfverfahren zur Bestimmung der Biegebruchspannung beschrieben und die damit erhaltenen Prüfergebnisse zur Grundlage von Aussagen über die Gebrauchsfestigkeit gemacht.

### Bending strength of float glass and thermally toughened float glass Description of testing methods and statistical calculation of the practical strength

The theoretical strength of glass (as with other materials) is related to the atomic bonding. It can in principle be calculated from its composition, but the practical strength is normally considerably lower because of its brittleness and because it is almost completely homogeneous. Strength data for glasses cannot be based on the true characteristics of the material as is the case with steel, for example,

but must be considered only as a means of determining the thickness of glass for which the probability of fracture is sufficiently small in the particular condition being considered.

The main useful methods of testing bending strength are described and the results obtained interpreted on the basis of assumptions about the practical strength.

### Résistance à la rupture en flexion du verre flotté et du verre flotté trempé thermiquement Description des méthodes de contrôle et de calcul statistique de la résistance technique

La résistance mécanique théorique du verre, de même que celle des autres matériaux, est fonction des liaisons atomiques. En principe, il est donc possible de la calculer à partir de la composition. La résistance mécanique pratique, par contre, est nettement inférieure et ceci en raison de la fragilité et de l'homogénéité presque idéale du verre. Les valeurs de résistance obtenues ne sauront donc être considérées comme des valeurs caractéristiques du matériau comme c'est

le cas pour l'acier par exemple, elles servent uniquement à la détermination des épaisseurs garantissant une probabilité de fracture suffisamment faible pour des contraintes définies.

On décrit surtout les méthodes de contrôle usuelles pour la détermination de la résistance à la rupture en flexion. Les résultats des contrôles servent de base à la définition de la résistance technique.

Unter der Festigkeit des Glases versteht man seine Widerstandsfähigkeit gegen mechanische Einwirkungen wie Zug, Druck, Stoß und – speziell bei großen Flachglastafeln – gegen Biegung. Der theoretische Wert der Festigkeit wird durch die atomaren Bindungen bestimmt und kann im Prinzip aus der Zusammensetzung berechnet werden. Wie bei allen Werkstoffen liegt die Gebrauchsfestigkeit jedoch erheblich unter diesem Wert [1 bis 3], wobei bei Glas (wegen seiner Sprödigkeit und nahezu idealen Homogenität) der Einfluß der Oberflächenbeschaffenheit besonders ins Gewicht fällt [4 bis 6]. Kerbstellen auf der Oberfläche wirken hier aus zwei Gründen stärker festigkeitsmindernd als bei anderen Werkstoffen:

- die Sprödigkeit des Glases verhindert einen Abbau von Spannungsspitzen im Kerbgrund durch plastisches Fließen während der üblichen Beanspruchungsdauer und
- ein sich ausbreitender Bruch wird nicht durch Kristallgrenzen gestoppt.

Festigkeitsangaben für Gläser können daher nur bei ideal unverletzten Gläsern als Materialkennwert wie z. B. bei Stahl angesehen werden; im Falle der handelsüblichen Gläser dienen sie lediglich zur Festsetzung von Glasdicken, die eine ausreichend geringe Bruchwahrscheinlichkeit für bestimmte Beanspruchungen gewährleisten. Von diesen Überlegungen ausgehend, hat Scheidler [5] als „technische Festigkeit“ denjenigen Festigkeitswert definiert, „mit dem bei einem Glasgegenstand auf Dauer gerechnet werden kann“.

Ziel dieser Arbeit ist es, die für die bestimmten Anwendungsfälle im Bauwesen am besten geeigneten Verfahren zur Ermittlung der Biegebruchspannung so zu beschreiben, daß Hersteller und Anwender in der Lage sind, aus den Ergebnissen von Stichprobenmessungen an kleinformatigen Normscheiben praxisgerecht die „technische Festigkeit“ von Gebrauchsgläsern zu bestimmen.

Der Beitrag stützt sich auf umfangreiche Festigkeitsuntersuchungen an Floatglas (Dicken 6, 8, 10 und

12 mm). An Hand derselben sollte festgestellt werden, ob die heute gebräuchlichen Rechenwerte

- 30 N/mm<sup>2</sup> für gekühltes Floatglas,
- 40 N/mm<sup>2</sup> für einseitig farbig beschichtetes vorgespanntes Floatglas,
- 50 N/mm<sup>2</sup> für thermisch vorgespanntes Einscheibensicherheitsglas aus Floatglas (ESG)

den Sicherheitsanforderungen im Bauwesen voll gerecht werden.

An Hand großer Prüfreihen wurde untersucht, ob es möglich ist, den wahren Kleinstwert der Biegebruchfestigkeit einer Glaskategorie aus einer vergleichsweise kleinen Stichprobe durch Extrapolieren der Wahrscheinlichkeitsgerade der Gaußschen Normalverteilung zu bestimmen, indem man die Streuung der Meßwerte durch definiertes Verletzen der Oberfläche bis auf ein Minimum reduziert.

### 1. Beschreibung und Bewertung der bekannten Prüfverfahren

Zur Bestimmung der Biegebruchspannung sind im wesentlichen folgende Verfahren bekannt und im praktischen Gebrauch:

#### a) Balkenmethode:

Die Probescheibe ruht auf zwei Stützen, die als Schneiden oder Walzen ausgebildet sind. Die Belastung erfolgt durch Einzelkräfte, die ebenfalls über Schneiden oder Walzen eingeleitet werden.

#### b) Doppelringmethode:

Hierbei wird die Probescheibe auf einer kreisrunden schneidenförmigen Auflage gelagert und über einen konzentrisch angeordneten schneidenförmigen Druckring mit kleinerem Durchmesser belastet.

#### c) Flächendruckmethode:

Die Belastung der allseitig am Rand gelagerten Probe erfolgt durch gleichmäßig verteilte Last (Flächendruck).

#### 1.1. Balkenmethode

Bei dieser Methode werden rechteckige Proben der Glasscheiben auf zwei Auflagerrollen mit bestimmtem Abstand aufgelegt, und es wird über eine oder zwei Biegerollen eine mit konstanter Geschwindigkeit steigende Last  $F$  bis zum Bruch aufgegeben (Bild 1). Die Prüfung von Proben mit der Abmessung (1100 × 360) mm<sup>2</sup> ist in DIN 52303 genormt [7]. Die zeitliche Lastzunahme wurde in dieser Norm so festgelegt, daß die Probe stetig, entsprechend einer Zunahme der Biegebeanspruchung von 25 N/(mm<sup>2</sup> min) durchgebogen wird.

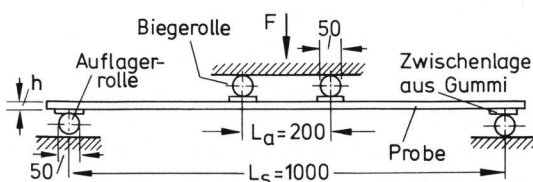


Bild 1. Schematische Darstellung der Balkenmethode.

Die Biegespannung  $\sigma = M/W$  (in N/mm<sup>2</sup>) errechnet sich bei rechteckigem Querschnitt mit dem Widerstandsmoment  $W = (b h^2)/6$  und bei symmetrisch im Abstand  $L_a$  angreifenden Kräften  $F + F_z$  (siehe Bild 1) wie folgt:

$$\sigma = (F + F_z) \frac{3(L_s - L_a)}{2 b h^2} + \sigma_G.$$

$\sigma_G$  ist die Beanspruchung durch das Eigengewicht der Probe:

$$\sigma_G = \frac{3}{4} \cdot \frac{\rho g}{10^6 h} L_s^2,$$

für Floatglas ( $\rho = 2,5 \text{ g/cm}^3$ ) wird

$$\sigma_G = \frac{18,4}{h} \left( \frac{L_s}{1000} \right)^2;$$

damit vereinfacht sich die Spannungsberechnung nach DIN 52303 zu:

$$\sigma = \frac{F + F_z}{0,3 h^2} \cdot \frac{360}{b} + \frac{18,4}{h}.$$

Setzt man zur Berechnung der Durchbiegung der Probe ( $w_0$  in mm) in Scheibenmitte  $(L_s - L_a)/2 = Z$ , so wird:

$$w_0 = 0,75 L_s^2 Z \left[ 1 - \frac{4}{3} \left( \frac{Z}{L_s} \right)^2 \right] \frac{F}{E b h^3},$$

$$w_0 = 0,25 L_s^2 \left[ 1 - \frac{4}{3} \left( \frac{Z}{L_s} \right)^2 \right] \frac{\sigma}{E h}.$$

Entsprechend der Prüfanordnung nach DIN 52303 gilt für a) nichtvorgespanntes Floatglas:

$$w_0 = 8,86 \frac{F}{h^3} = 2,66 \frac{\sigma}{h};$$

b) vorgespanntes Floatglas (ESG):

$$w_0 = 9,20 \frac{F}{h^3} = 2,73 \frac{\sigma}{h}.$$

Die Durchbiegung unter den Biegerollen ist hierbei etwa 5 % kleiner. Zwischen den Biegerollen bildet die Biegelinie einen Kreisbogen, mit dem Radius

$$R = E J/M = (E b h^3)/(6 F Z),$$

berechnet aus dem Flächenträgheitsmoment  $J = b h^3/12$  und dem Biegemoment  $M = F Z/2$ . In dem durch die beiden Druckschneiden begrenzten Bereich des Prüflings ist theoretisch die dabei erzeugte Biegespannung konstant: ihre Richtung ist die der Längsachse des Prüflings (Bild 2).

Zur Bestimmung der Lage des Bruchzentrums kann man die Proben auf der druckbelasteten Oberfläche mit Klebefolie abkleben, das Ergebnis wird hierdurch nicht beeinflusst. Bei Bruchausgang außerhalb des  $\sigma_{\max}$ -Bereiches – was fast nie eintritt – ist die Biegebruchspan-

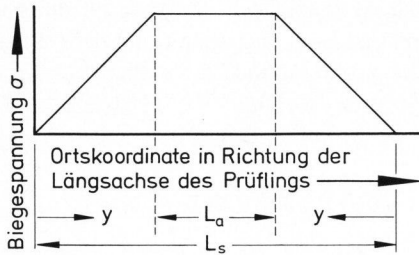


Bild 2. Theoretischer Verlauf der Biegespannung in rechteckiger Probe bei der Balkenmethode.

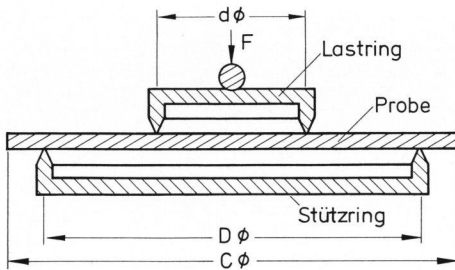
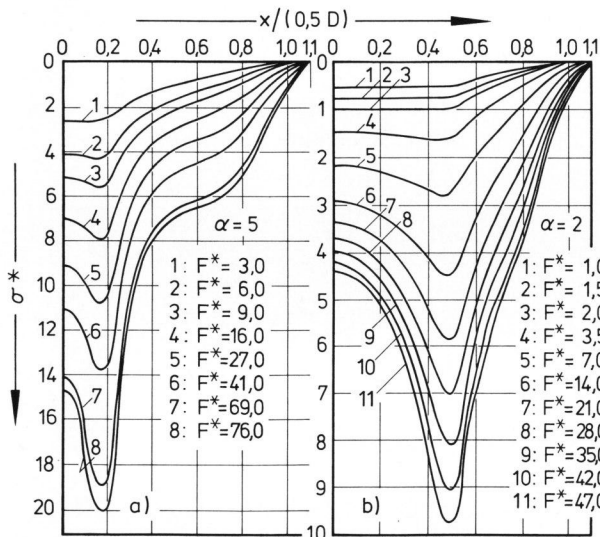


Bild 3. Schematische Darstellung der Doppelringmethode.



Bilder 4a und b. Bezogene Spannung  $\sigma^*$  in Abhängigkeit vom relativen Abstand von der Probenmitte und für verschiedene bezogene Belastungen  $F^*$ , ermittelt nach dem Doppelringverfahren; a)  $\alpha = 5$ ; b)  $\alpha = 2$ .

nung  $\sigma_{bB}$  nach dem Strahlensatz zu ermitteln ( $y =$  Abstand des Bruchortes von der benachbarten Auflagerrolle,  $0 < y < Z$ ):

$$\sigma_{bB} = \frac{2 y}{L_s - L_a} \sigma_{max}$$

Der Biegeversuch läßt sich mit beliebigen Probenabmessungen und Rollenabständen durchführen. Die Beanspruchungsverhältnisse sind statisch bestimmt und leicht überschaubar, die Prüfung erfordert einen vergleichsweise geringen Aufwand.

Die Vorteile dieses Verfahrens liegen also auf der Hand. Trotzdem stellt das Verfahren einen Kompromiß dar, denn – im Gegensatz zu der in der Praxis am häu-

figsten vorliegenden Beanspruchung auf Grund allseitiger Auflage – wird auch die Glaskante dem maximalen Biegemoment unterworfen, d. h. der Festigkeitswert, der mit Hilfe dieser Methode bestimmt wird, hängt je nach Vorspannung auch von der Bearbeitungsart bzw. dem Schädigungsgrad der Kanten ab. Neuere Untersuchungen deuten außerdem darauf hin, daß bei der Balkenbiegemethode im Bereich der Probenlängskanten Spannungsüberhöhungen auftreten. Hierüber wird zu gegebener Zeit an anderer Stelle berichtet werden.

1.2. Doppelringmethode

Wenn sich festigkeitsmindernde Kantenbeschädigungen auf das Prüfergebnis nicht auswirken sollen, muß man dafür sorgen, daß der Rand der Probe nicht oder nur geringfügig beansprucht wird. Die in diesem Falle sich anbietende Methode ist das Doppelringverfahren, bei dem die zu untersuchende Probe auf einen kreisrunden Schneidering aufgelegt und über einen konzentrisch dazu angeordneten Schneidering mit kleinerem Durchmesser belastet wird (Bild 3).

Die mathematischen Zusammenhänge dieses Verfahrens wurden von vielen Verfassern untersucht, ohne daß es bis jetzt zu einem allseits befriedigenden Ergebnis und zu eindeutigen Festlegungen für das Verfahren gekommen ist [8 bis 12]. Die Schwierigkeiten liegen darin, daß nur sehr kleine Flächen einer maximalen Biegespannung ohne störende Membranspannung unterworfen werden können. Sobald die Krümmung der Probe unter dem Lastring merklich größer ist als im Zentrum, ist die Bestimmung der Spannungen mit einfachen geschlossenen Formeln nicht mehr möglich, es kommt zu lokalen Spannungsüberhöhungen unter dem Lastring, die mathematisch recht schwer zu erfassen sind.

Den Zusammenhang zwischen der bezogenen Prüfkraft  $F^*$  und der bezogenen Spannung  $\sigma^*$  geben beispielsweise ausgewählte Diagramme von Kao [11] (Bild 4a für Ringverhältnis  $\alpha = 5$  und Bild 4b für Ringverhältnis  $\alpha = 2$ ) wieder. Dabei sind:

$$F^* = \frac{F}{E} \left( \frac{D}{2 h^2} \right)^2,$$

$$\sigma^* = \frac{\sigma}{E} \left( \frac{D}{2 h^2} \right)^2.$$

Im quasilinearen Bereich (Membranspannung  $\ll$  Biegespannung) gilt folgende Gesetzmäßigkeit für die Spannung in der durch den Lastring begrenzten Fläche:

$$\sigma = \frac{3}{2 \pi} \left[ (1 - \nu) \frac{D^2 - d^2}{2 C^2} + (1 + \nu) \ln \frac{D}{d} \right] \frac{F}{h^2}.$$

Diese Beziehung gilt sowohl für die Radial- als auch für die Tangentialspannung: beide Spannungen sind gleich groß und ortsunabhängig. Die Durchbiegung des Prüflings im Ringzentrum ist

$$w_0 = \frac{3}{8\pi} (1 - \nu^2) \left[ \left( \frac{D}{d} \right)^2 \left( 1 + \frac{(1 - \nu)(D^2 - d^2)}{2(1 + \nu)C^2} \right) - \left( 1 + \ln \frac{D}{d} \right) \right] \frac{d^2 F}{h^3 E}$$

Wann der quasilineare Bereich überschritten wird, hängt vom Verhältnis der Ringdurchmesser ab. Läßt man – um eine möglichst große Prüffläche zu bekommen – einen Fehler bei der Spannungsbestimmung von etwa 2,5 % zu, so beträgt die maximale Durchbiegung im Zentrum nach Kao [11] (siehe Bild 5):

bei Ringverhältnis:  $\alpha = 2, \quad w_0 \leq 0,3 h$ ;  
 bei Ringverhältnis:  $\alpha = 5, \quad w_0 \leq 1,0 h$ .

Bei gegebener Querszahl  $\nu = 0,22$  für Floatglas kann man hieraus den größtmöglichen Durchmesser des Lastringes (und damit die mit dem maximalen Biegemoment beanspruchte Fläche) bestimmen:

$$\sigma = K_1 \frac{F}{h^2},$$

$$K_1 = 0,186 \frac{\alpha^2 - 1}{\alpha^2 \gamma^2} + 0,583 \ln \alpha;$$

$$w_0 = K_2 \frac{F d^2}{E h^3},$$

$$K_2 = 0,1136 \left[ \alpha^2 \left( 1 + 0,32 \frac{\alpha^2 - 1}{\alpha^2 \gamma^2} \right) - (1 + \ln \alpha) \right].$$

Die Bedingung  $w_0 \leq c h$  ist eingehalten, wenn der Lastringdurchmesser

$$d \leq h \sqrt{\frac{K_1}{K_2}} E c \sqrt{\frac{1}{\sigma}}$$

ist.

Da  $\sqrt{\frac{K_1}{K_2}} c$  sowohl für  $\alpha = 2$  als auch für  $\alpha = 5$  nahezu den gleichen Zahlenwert ergibt ( $\approx 0,58$  bei  $\gamma = 1,45$ ), ist es im Prinzip gleichgültig, welches Ringverhältnis man wählt. Für das Ringverhältnis  $\alpha = 5$  sprechen praktische Gesichtspunkte (geringere Anforderungen an das Zentrieren des Ringes) und die Empfehlungen in der Literatur.

Tabelle 1 gibt die Grenzen des quasilinearen Bereichs wieder. In der ersten Spalte ist die maximale Biegespannung angegeben, die im Prüfling erzeugt werden soll; im Falle der Belastung bis zum Bruch ist die maximal zu erwartende Biegebruchspannung zugrunde zu legen. Der rechte Teil der Tabelle gibt den größtmöglichen Lastringdurchmesser für verschiedene Glasdicken an. Will man den quasilinearen Bereich nicht überschreiten, ist der Lastringdurchmesser kleiner oder gleich den angegebenen Werten zu wählen. Die verschiedenen Werte des Elastizitätsmoduls beziehen sich auf unvorspanntes Floatglas (74 000 N/mm<sup>2</sup>) und vorgespanntes Floatglas (72 000 N/mm<sup>2</sup>).

Ganz unbeanspruch bleibt der Probenrand auch bei der Doppelringmethode nicht. So traten bei 8 mm dicken kreisförmigen Proben, deren Durchmesser 10 %

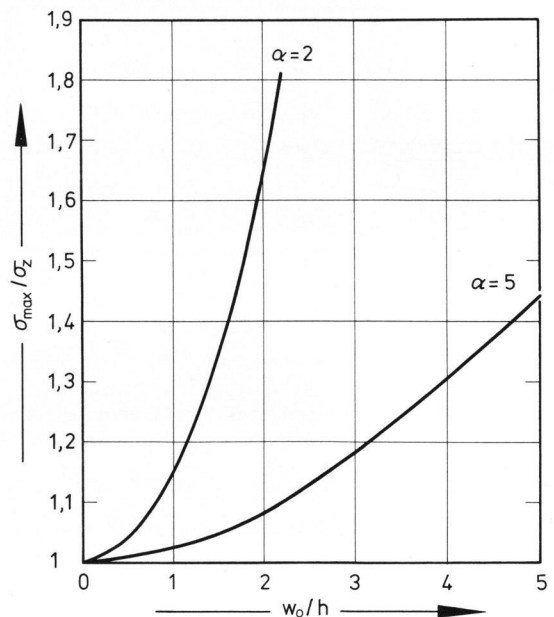


Bild 5. Spannungsüberhöhung  $\sigma_{\max}/\sigma_z$  unter dem Lastring (Doppelringverfahren) in Abhängigkeit von der relativen Durchbiegung  $w_0/h$  nach [11].

Tabelle 1. Empfohlener Größtwert des Lastringdurchmessers für verschiedene Biegespannungen und Glasdicken

maximale Biegebruchspannung in N/mm <sup>2</sup>	0,58 $\sqrt{E/\sigma}$	E-Modul in N/mm <sup>2</sup>	Maximalwerte für Lastringdurchmesser in mm							
			Glasdicke in mm							
			4	5	6	8	10	12	15	19
50	22,31	74 000	89	112	134	178	223	268	335	423
100	15,78	74 000	63	79	95	126	158	189	237	300
150	12,71	72 000	51	64	76	102	127	158	191	241
200	11,00	72 000	44	55	66	88	110	132	165	209

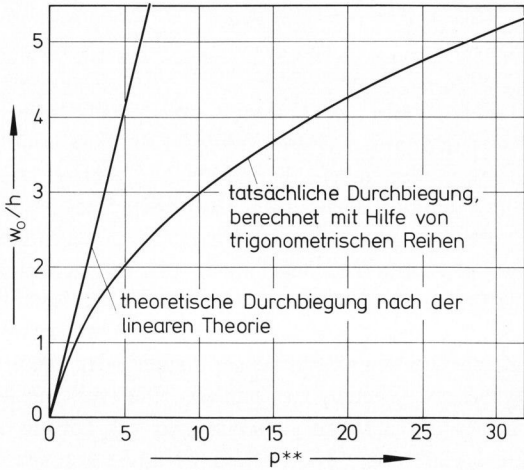


Bild 6. Maximale Durchbiegung der ringsum gestützten quadratischen Platte bei gleichmäßiger Flächenbelastung  $p^{**} = p/E (a/(2 h))^4$ .

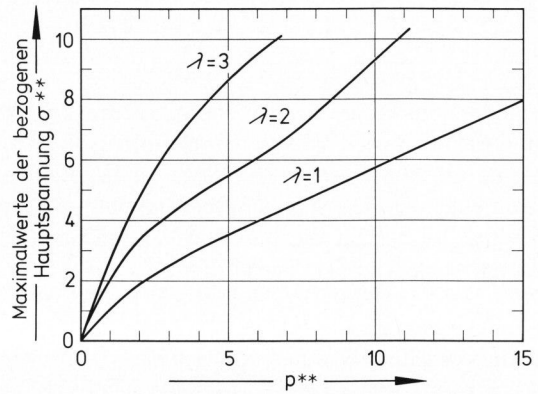


Bild 7. Theoretische Maximalwerte der bezogenen Hauptspannungen  $\sigma^{**}$  in Abhängigkeit vom bezogenen Druck  $p^{**}$  für verschiedene Seitenverhältnisse  $\lambda$ .

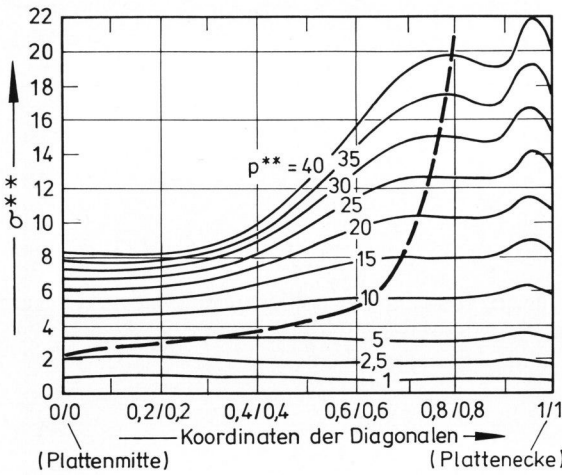


Bild 8. Theoretischer Verlauf der bezogenen Hauptspannung  $\sigma^{**}$  auf den Diagonalen der Maximalspannungsfläche für verschiedene bezogene Drücke  $p^{**}$  an Hand einer Lösung mit trigonometrischen Reihen.

größer war als der des Stützrings, bis zu 100 % Kantenbrüche auf als Folge von Tangentialspannungen an der Kante. Deshalb und aus praktischen Erwägungen empfehlen sich quadratische Proben mit dem fiktiven Durchmesser  $1,21 \times$  Kantenlänge (arithmetisches Mittel aus äußerem und innerem Kreisdurchmesser). Innerhalb des quasilinearen Bereichs sind die daraus resultierenden Fehler vernachlässigbar.

Hinreichend brauchbare Aussagen liefert die den gesamten Bauglasbereich abdeckende Prüfanordnung mit

- Lastringdurchmesser: 100 mm,
- Stützringdurchmesser: 250 mm,
- Probenformat: (300 × 300) mm<sup>2</sup>.

Für dieses Beispiel gilt im quasilinearen Bereich:

$$\sigma_{bB} = 0,61 \frac{F}{h^2}.$$

Die mit dieser Anordnung gefundenen Werte sind praxisgerecht, ihr Fehler liegt innerhalb der Streuung, die

bei der Bestimmung der Biegebruchspannung durch andere Einflüsse ohnehin auftritt.

Als Geschwindigkeit der Spannungszunahme hat sich in der Praxis der Wert 100 N/(mm<sup>2</sup> min) bewährt, die Prüfzeiten liegen dabei zwischen 20 s und 2 min. Zur Bestimmung der rechnerischen Prüfzeit legt man im bruchnahen Bereich die Tangente an die Kraft-Zeit-Kurve. Auf die Umrechnung von Ergebnissen verschiedener Geschwindigkeiten der Spannungszunahme wird später eingegangen.

### 1.3. Flächendruckmethode

Den Baustatiker interessiert insbesondere die Widerstandsfähigkeit von Glas bei Beanspruchung durch Flächenlasten durch konstanten bzw. wechselnden Winddruck oder -sog [13]. Es liegt daher nahe, die Biegebruchspannung in gleicher Weise zu ermitteln [14 und 15].

Daß es bis auf wenige Ausnahmen hier noch nicht zu einem gängigen Verfahren gekommen ist, hat folgende Gründe:

Ein Flächendrucktest ist zeitaufwendig, weil die Probe bei Wasserdruck-Belastung in einen Rahmen eingebaut werden muß und bei Prüfung mit Sandlast teure und ebenfalls zeitaufwendige Handarbeit anfällt.

Egner [15] hat die mathematischen Zusammenhänge untersucht. Seiner Arbeit sind die nachfolgenden Überlegungen und Diagramme entnommen (Bilder 6 bis 8). Wie man sieht, besteht auch hier – wie bei der Doppelringmethode – eine annähernde Linearität zwischen Spannung und Last nur bei Durchbiegungen bis zur halben Plattendicke. Wird dieser Wert überschritten, muß man mit Hilfe der Kurven in Bild 7 die maximale Biege-  
spannung bestimmen:

$$\sigma = \sigma^{**} E \left( \frac{2 h}{a} \right)^2.$$

Als Prüfmethode zur Bestimmung der Werkstoff-Kennfestigkeit eignen sich – analog zur Doppelringmethode

– nur Anordnungen, bei denen  $p^{**} < 5$  ist (annähernd gleiche Hauptspannungen in der Platte, siehe Bild 8).

Die daraus sich ergebende maximale Seitenlänge  $a$  der quadratischen Probe berechnet sich nach folgender Gleichung:

$$a \leq h \sqrt{\frac{14 E}{\sigma}}$$

Die Autoren haben dieses Verfahren im Laufe der Untersuchungen nicht angewendet; sie sind der Meinung, daß mit Hilfe der Doppelringmethode ausreichende Aussagen über die Biegebruchspannung ohne Kanteneinfluß gemacht werden können.

### 2. Auswertung von Versuchsergebnissen

Wie schon eingangs erwähnt, ist das Festigkeitsverhalten von Glas durch seine Kerbempfindlichkeit gekennzeichnet, d. h. die Biegebruchspannung wird durch die bruchauslösende Kerbe bestimmt. Bei vollkommen gleichmäßig und zahlreich über die Oberfläche verteilten und definierten Kerbstellen ist die Berechnung eines Festigkeitsmittelwertes sinnvoll, da die Streuung der Einzelwerte gering ist. Das ist jedoch bei Oberflächen handelsüblicher Gläser nicht der Fall, denn nicht nur innerhalb einer Meßreihe treten große Streuungen bis zu 30 % auf, auch die Mittelwerte der verschiedenen Meßreihen weichen untereinander ab, wenn der Stichprobenumfang nicht groß genug ist.

Deshalb reicht der Mittelwert einer Testreihe zur Beurteilung der Glasfestigkeit nicht aus; man muß versuchen, von den erhaltenen Meßwerten auf den geringstmöglichen Festigkeitswert zu schließen. Hier ist die Darstellung der Einzelwerte oder der in Klassen zusammengefaßten Werte im Wahrscheinlichkeitsnetz von Vorteil, worauf auch in früheren Arbeiten [4 und 5] bereits hingewiesen wurde.

Nun liegt aber bei den Meßwerten der Biegebruchspannung grundsätzlich insofern eine schiefe Verteilung

vor, als negative Festigkeitswerte aus physikalischen Gründen ausscheiden. Darüber hinaus zeigen die hier referierten und weitere Messungen, daß die gefundenen Biegebruchspannungen gewisse Grenzwerte niemals unterschritten haben (Bilder 9a und b). Daraus folgt: Die Extrapolation der Gaußschen Summenhäufigkeitskurven ist sehr problematisch; sie liefert in der Regel zu hohe Bruchwahrscheinlichkeiten im Bereich der niedrigen Festigkeitswerte.

Trägt man die Versuchsergebnisse im Wahrscheinlichkeitsnetz mit logarithmisch geteilter Abszisse auf, so erhält man eher eine lineare Abhängigkeit, die bis zu den gemessenen Kleinstwerten reicht. (Inwiefern eine Auswertung nach Weibull [16] zuverlässigere Aussagen erlaubt, wird derzeit untersucht.)

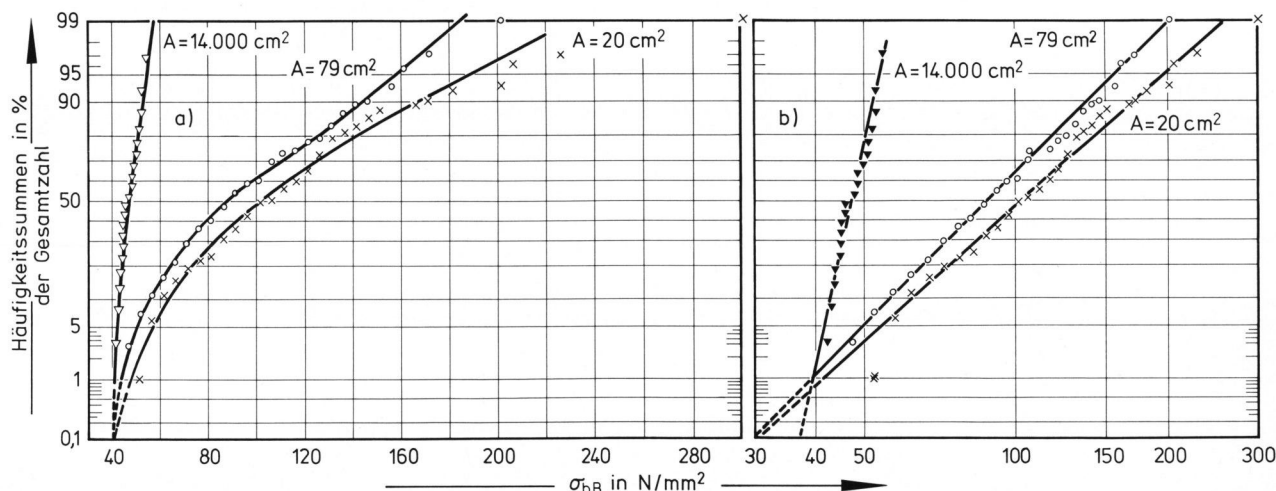
### 3. Darstellung und Interpretation der Versuchsergebnisse

Die Darstellung der Versuchsreihen erfolgte im Wahrscheinlichkeitsnetz mit logarithmischer Teilung. Es ergaben sich in guter Näherung Geraden.

Wie die Versuchsergebnisse zeigen, laufen innerhalb einer Glaskategorie, das sind Gläser mit gleicher Oberflächenbeschaffenheit und gleichem Vorspannungsgrad, alle Wahrscheinlichkeitsgeraden einem gemeinsamen geometrischen Ort zu, einem Wert  $\sigma_0$ , der zwischen den Summenhäufigkeiten 0,1 und 1 % liegt. Dieser Wert  $\sigma_0$  ist als der Wert der Biegebruchspannung einer Glaskategorie zu interpretieren, der in der Praxis nicht mehr unterschritten wird (Bilder 9a und b).

Treten festigkeitsmindernde Kerben nur vereinzelt auf, spielt die Oberflächengröße eine Rolle. Kleine Prüfflächen liefern Meßreihen mit großer Streuung, was zu Geraden mit geringer Steigung führt; mit größer werdender Prüffläche nimmt die Steigung solange zu, bis sie derjenigen von Gläsern mit definiert verletzter Oberfläche gleicht.

Nicht immer ist es notwendig, bei dem Abschätzen des Festigkeitsverhaltens von Glas einer bestimmten



Bilder 9a und b. Biegebruchspannung von verschieden großen nichtvorgespannten Floatglasscheiben. Darstellung der Meßwerte im Wahrscheinlichkeitsnetz a) mit linear geteilter Abszisse, b) mit logarithmisch geteilter Abszisse.

Kategorie unter der so bestimmten geringstmöglichen Biegebruchspannung zu bleiben, sondern es interessiert zuweilen die zu erwartende Biegebruchspannung bei höheren Wahrscheinlichkeiten (z. B. P = 50 % aller Fälle). In diesem Bereich, d. h. ab P = 5 %, kann aus den Werten einer bestimmten Fläche mit dem von Scheidler [5] angegebenen Arbeitsdiagramm auf andere Flächengrößen mit hinreichender Genauigkeit umgerechnet werden.

Da im unteren Bereich die Wahrscheinlichkeitsgeraden abknicken (Bild 9a) und sich asymptotisch dem Wert  $\sigma_0$  nähern, wird vorgeschlagen, Umrechnungen nach folgender Formel vorzunehmen:

$$\lg \frac{\sigma_i}{\sigma_0} = \left( \frac{A_j}{A_i} \right)^{1/n} \cdot \lg \frac{\sigma_j}{\sigma_0}$$

In Tabelle 2 sind einige experimentell gefundene Zahlenwerte von n angegeben. Daraus geht hervor, daß definiert verletztes Floatglas eine deutlich geringere Flächenabhängigkeit zeigt als Glas mit handelsüblicher Oberflächenbeschaffenheit.

### 3.1. Einfluß der Oberfläche

#### 3.1.1. Nichtvorgespanntes Floatglas

Die Kurven in Bild 10 zeigen, daß sich der Einfluß des Oberflächenzustandes auf die Steigung der Wahrscheinlichkeitsgeraden und die Lage des jeweiligen Kleinstwertes  $\sigma_0$  auswirkt. Unter Oberflächenzustand wird dabei die jeweilige Verletzungsart der Oberfläche verstanden. Es ist bekannt, daß geritztes Glas sich längs der sogenannten Schnittkante leicht brechen läßt, was auch in Kurve 8 zum Ausdruck kommt; trotzdem beträgt die Mindest-Biegebruchspannung immerhin noch etwa 12 N/mm<sup>2</sup>.

Ein „unverletztes“ Glas, das unmittelbar dem Floatglasband entnommen und mit Hilfe der Doppelringmethode geprüft wurde (Prüffläche 13 cm<sup>2</sup>), weist ein  $\sigma_0$  von etwa 100 N/mm<sup>2</sup> und einen Mittelwert von 190 N/mm<sup>2</sup> auf (Kurve 1).

Handelsübliche Gläser und gebrauchte Gläser liegen mit ihren theoretischen  $\sigma_0$ -Werten bei etwa 40 N/mm<sup>2</sup>,

wobei die Steigung der Kurve im wesentlichen von der geprüften Oberflächengröße abhängt (Kurven 2, 3, 4).

Prüfserien mit definiert verletzter Oberfläche (Kurven 5, 6, 7) zeigen, daß je nach Verletzungsart der zugehörige  $\sigma_0$ -Wert den Kleinstwert der handelsüblichen Gläser mehr oder weniger unterschreitet, die höchste Unterschreitung liefern naßgeschliffene Gläser. Die Steigung der Wahrscheinlichkeitsgeraden von definiert verletzten Proben ist groß und nahezu unabhängig von der mit dem maximalen Biegemoment beanspruchten Flächengröße (Doppelringmethode) und vom Zustand der Kanten (Balkenmethode). Das definiert Verletzen der Glasoberfläche, beispielsweise mit Naß-Schleif-Papier der Körnung 220 (NSP 220) kann zur Berechnung des Kleinstwertes handelsüblicher Gläser nicht angewendet werden, auch wenn man auf Grund der geringen Streuung der Einzelwerte mit kleinen Stichprobengrößen arbeiten kann.

#### 3.1.2. Vorgespanntes Floatglas

Verletzungen der Oberfläche und der Kante (auf letztere wird in Abschnitt 3.2. eingegangen) wirken bei thermisch vorgespanntem Glas weniger festigkeitsmindernd. Das kommt daher, daß infolge der Vorspannung des Glases erst die Druckvorspannung der Oberfläche durch die angelegte Biege-Zugspannung überwunden werden muß, bevor Risse geöffnet werden und somit in die im Kern liegende Zugspannungszone laufen können, wodurch der Bruch ausgelöst wird.

Die Kurven 1 bis 6 in Bild 11 zeigen diese Abhängigkeit. In Kurve 1 sind 170 nach DIN 52303 geprüfte Musterscheiben dargestellt. Die Oberfläche dieser Proben war weitgehend unbeschädigt, der gemessene Kleinstwert beträgt 119 N/mm<sup>2</sup>. In Kurve 2 sind zum Vergleich großformatige Platten aus derselben Herstellung wiedergegeben. Bei einer Losgröße von fünf Stück ergab sich ein gemessener Kleinstwert von 141 N/mm<sup>2</sup>. Beide Serien liefern bei statistischer Auswertung ein  $\sigma_0$  von etwa 130 N/mm<sup>2</sup>, die Wahrscheinlichkeitsgeraden unterscheiden sich nur durch ihre Steigung (die Spannungszunahme-Geschwindigkeit betrug bei dieser Untersuchung 25 N/(mm<sup>2</sup> min)).

Kurve 3 zeigt das Ergebnis von Untersuchungen an großformatigen gebrauchten Platten verschiedener Ab-

Tabelle 2. Experimentell bestimmte Zahlenwerte von n für die Umrechnung von Biegebruchspannungen für bestimmte Flächengrößen

Glasart	Oberflächenzustand	Flächengröße in cm <sup>2</sup>		$\sigma_{bb}$ in N/mm <sup>2</sup> bei P = 50 %		n
		A <sub>i</sub>	A <sub>j</sub>	A <sub>i</sub>	A <sub>j</sub>	
nichtvorgespanntes Floatglas	handelsüblich	14 000	20	48	104	5,3
( $\sigma_0 = 35$ N/mm <sup>2</sup> )	sandgestrahlt	14 000	79	48	90	4,7
		10 000	100	40	44	8,6
ESG ( $\sigma_0 = 130$ N/mm <sup>2</sup> )	handelsüblich	8 300	$\frac{720 + 79}{2}$	150	170	4,8

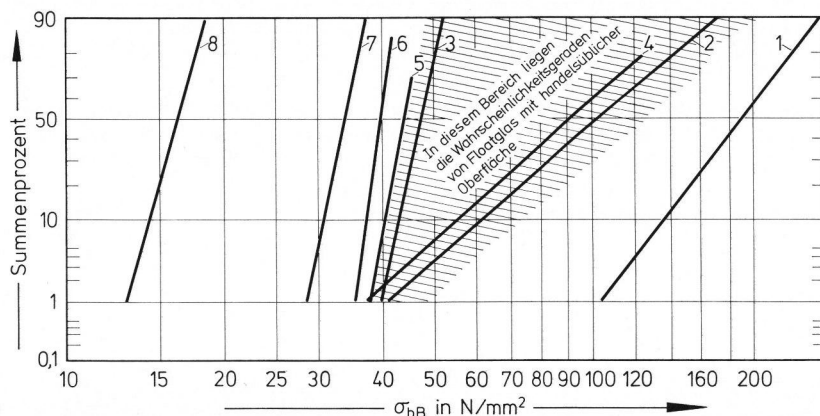


Bild 10. Biegebruchspannung von nichtvorgespanntem Floatglas mit unterschiedlicher Oberflächenbeschaffenheit.

- 1: unbehandelt,
- 2: handelsüblich, Prüffläche 20 cm<sup>2</sup>,
- 3: handelsüblich, Prüffläche 14 000 cm<sup>2</sup>,
- 4: natürlich gealtert, Einsatzalter etwa 10 Jahre,
- 5: sandstrahlmattiert, Prüffläche 100 cm<sup>2</sup>,
- 6: sandstrahlmattiert, Prüffläche 10 000 cm<sup>2</sup>,
- 7: mit Naßschleifpapier der Körnung 220 definiert verletzt und sofort getestet, Prüffläche 79 cm<sup>2</sup>,
- 8: mit Glasschneider unter Verwendung von Schneidöl geritzt und sofort getestet, Prüfflächen 720 und 14 000 cm<sup>2</sup>.

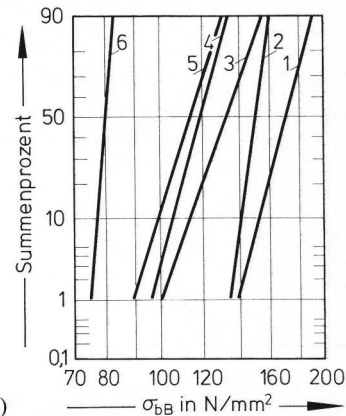


Bild 11. Biegebruchspannung von vorgespanntem Floatglas (ESG und einseitig farbig beschichtetes ESG) mit unterschiedlicher Oberflächenbeschaffenheit. Die Meßreihen 1, 2, 5 und 6 sind mit  $v_{\sigma} = 25 \text{ N}/(\text{mm}^2 \text{ min})$  ermittelt worden.

- 1: handelsüblich, Prüfflächen 79 und 720 cm<sup>2</sup>,
- 2: handelsüblich, Prüffläche 8300 cm<sup>2</sup>,
- 3: natürlich gealtertes ESG, Prüffläche etwa 10 000 cm<sup>2</sup>,
- 4: mit Naßschleifpapier der Körnung 220 definiert verletzt und sofort getestet, Prüffläche 79 cm<sup>2</sup>,
- 5: einseitig farbig beschichtetes ESG, Prüffläche 720 cm<sup>2</sup>,
- 6: einseitig farbig beschichtetes ESG, Prüffläche 8300 cm<sup>2</sup>.

messungen nach der Balkenmethode. Die durch den Gebrauch erfolgten Oberflächenbeeinträchtigungen können die Festigkeit, wie eingangs schon gesagt, bis zu einem theoretischen, d. h. extrapolierten Kleinstwert von 100 N/mm<sup>2</sup> mindern. Das gleiche Ergebnis erhält man, wenn man vorgespannte Proben mit definiert verletzter Oberfläche (NSP 220) nach der Doppelringmethode mit einer Prüffläche von 79 cm<sup>2</sup> testet (Kurve 4). Die tatsächlich gefundenen Kleinstwerte 102 N/mm<sup>2</sup> bei 87 großformatigen gebrauchten Proben und 108 N/mm<sup>2</sup> bei den geschliffenen Proben liegen leicht über diesem extrapolierten Kleinstwert.

Die Kurven 5 und 6 stellen die Biegebruchspannungs-Verteilung von einseitig farbig beschichtetem, vorgespanntem Floatglas dar. Die Probenahme und die Probengrößen entsprechen der Untersuchung, die an den Kurven 1 und 2 dargestellt ist.

Ob die erneute Minderung des Kleinstwertes auf einer tiefergreifenden Verletzung der Oberfläche durch die Beschichtung beruht oder ob die Druckvorspannung auf der beschichteten Seite durch thermische Vorgänge geringer ist, wird zur Zeit untersucht.

### 3.2. Einfluß der Kante

Es wurde schon darauf hingewiesen, daß bei Festigkeitsuntersuchungen nach der Balkenmethode der Zustand der Kante eine Rolle spielt.

#### 3.2.1. Nichtvorgespanntes Floatglas

Die Feststellung des Bruchortes an jeweils 30 bis 40 Proben mit verschiedener Kantenbeschaffenheit ergab folgende Resultate:

a) Die sogenannte Brechecke (das ist die der Ritzspur gegenüberliegende Ecke der Glaskante) liefert im Mittel höhere Festigkeitswerte als die sogenannte Ritzecke und roh bearbeitete Kanten. Die Festigkeit dieser Kante (Ecke) ist mit der Flächenfestigkeit eines handelsüblichen Glases (Kurven 2 und 3 in Bild 10) vergleichbar. Der Anteil der Kantenbrüche bei Prüfung der Brechecke auf Zug betrug 50 bis 60 % bei einem gemessenen Kleinstwert von 45 N/mm<sup>2</sup>.

b) Die Ritzecke (das heißt die Ecke mit der Ritzspur) liefert ausschließlich Kantenbrüche, wobei der Kleinstwert sich nicht von dem Kleinstwert der Brechecke unterscheidet, die mittlere Festigkeit jedoch deutlich tiefer liegt (kleinere Streuung der Einzelwerte).

c) Roh bearbeitete Kanten (mit NSP gesäumt bzw. grob geschliffen) geben ebenfalls ausschließlich Kantenbrüche, verbunden mit einer Erniedrigung des Kleinstwertes  $\sigma_0$ .

#### 3.2.2. Vorgespanntes Floatglas

Bei vorgespanntem Floatglas wird fast nie ein Bruch gefunden, dessen Bruchspiegel unmittelbar an der Kante liegt, vielmehr liegt der Bruchsprung von „Kantenbrüchen“ 5 bis 20 mm von der Kante entfernt. Möglicherweise ist das der Grund dafür, daß bei allen Versuchen an vorgespannten Gläsern kein signifikanter Unterschied zwischen „Flächenbrüchen“ und „Kantenbrüchen“ gefunden wurde (siehe Tabelle 3). Die Tabelle zeigt an den Proben der Kurven 1, 2 und 5, 6 von Bild 11, daß sowohl die Streuung als auch die Kleinstwerte bei „Kantenbrüchen“ und bei „Flächenbrüchen“ nahezu gleich sind, der Anteil der Kantenbrüche liegt für

Tabelle 3. Biegebruchwerte von „Kanten“- und „Flächen“-brüchen von vorgespanntem Floatglas

Glasdicke 10 mm	Kantenbrüche				Flächenbrüche				
	Anzahl in %	$\sigma_{bb}$ in N/mm <sup>2</sup> bei P = 50%	s in N/mm <sup>2</sup>	gefundener Kleinstwert in N/mm <sup>2</sup>	Anzahl in %	$\sigma_{bb}$ in N/mm <sup>2</sup> bei P = 50%	s in N/mm <sup>2</sup>	gefundener Kleinstwert in N/mm <sup>2</sup>	n
vorgespanntes unbeschichtetes Glas	78	171	14	119	22	171	16	128	165
vorgespanntes Glas mit farbig beschichteter Oberfläche	33	114	15	91	67	115	11	93	171

unbeschichtetes Glas bei 78 %. Einseitig farbig beschichtetes Einscheibensicherheitsglas zeigt das gleiche Bild, jedoch verschiebt sich die Anzahl der Brüche in Richtung Flächenbrüche.

Für vorgespanntes Glas ist somit sowohl die Balkenmethode als auch die Doppelringmethode anwendbar, wobei jedoch der Balkenmethode wegen der extensiveren Prüfmöglichkeit und der besseren Überschaubarkeit der mathematischen Zusammenhänge der Vorzug gegeben werden sollte.

### 3.3. Einfluß der Belastungsgeschwindigkeit

In Anlehnung an internationale Gepflogenheiten [17] wurden die hier beschriebenen Festigkeitsuntersuchungen mit der Spannungszunahme-Geschwindigkeit von 100 N/(mm<sup>2</sup> min) durchgeführt. Dieser Wert entspricht zwar nicht der DIN 52303 (25 N/(mm<sup>2</sup> min)), ist aber für Reihenuntersuchungen wegen der eingesparten Zeit vorteilhafter. Außerdem dürften die in der Praxis vorkommenden Belastungsgeschwindigkeiten eher dem Wert 100 N/(mm<sup>2</sup> min) als dem Wert 25 N/(mm<sup>2</sup> min) entsprechen, wenn man Biegebeanspruchungen an Gebäuden durch schnell wechselnde Windlasten [13] (Böen), Stöße usw. betrachtet. Untersuchungen haben ergeben, daß bei  $v_{\sigma} = 25$  N/(mm<sup>2</sup> min) alle Werte um etwa 5 N/mm<sup>2</sup> niedriger, bei  $v_{\sigma} = 200$  N/(mm<sup>2</sup> min) alle Werte um etwa 5 N/mm<sup>2</sup> höher als bei der Untersuchung mit 100 N/(mm<sup>2</sup> min)

## 4. Zusammenfassung

Zur Bestimmung der Biegebruchspannung von Floatglas wurden die Doppelringmethode und die Balkenmethode untersucht. Beide Verfahren liefern vergleichbare Ergebnisse.

Die Balkenmethode ist in DIN 52303 genormt und als Prüfmethode überwiegend im Gebrauch. Ihr Vorteil besteht darin, daß die Beziehung zwischen Prüfkraft und Biegespannung mathematisch exakt vorliegt — der Träger auf zwei Stützen ist statisch bestimmt. Der Balkenprüfung können Proben mit beliebig großen Flächen unterworfen werden.

Nichtvorgespanntes Glas weist an der Kante durch den Zuschnitt verursachte Beschädigungen auf, die bei

Biegebeanspruchung bevorzugt Bruch auslösen. Deshalb kann man nach DIN 52303 ermittelte Biegebruchspannungen dann nicht zur Beurteilung von gekühlten Gläsern heranziehen, wenn bei deren bestimmungsgemäßem Gebrauch die Kante nicht mit dem maximalen Biegemoment belastet wird, wie dies bei gekühltem Glas fast immer der Fall ist.

Der Doppelringmethode wird man folglich den Vorzug geben, wenn der schwächende Kanteneinfluß nicht wirksam sein soll, ihr Anwendungsgebiet ist das gekühlte Glas. Leider kann man die Prüffläche hierbei nicht beliebig groß wählen, ein annähernd gleichmäßiges maximales Biegemoment liegt spätestens bei Durchbiegung > Prüflingsdicke nicht mehr vor. Kommt es darauf an, die größtmögliche Fläche zu testen, kann die optimale Prüfanordnung der Tabelle 2 entnommen werden. Im übrigen hat sich die Ringkombination  $d = 100$  mm Durchmesser/D = 250 mm Durchmesser für alle Bauglasdicken gut bewährt; Proben mit den Abmessungen (300 × 300) mm<sup>2</sup> lassen sich leicht beschaffen und sind handlich.

Durch das Vorspannen hat die Kante von Einscheibensicherheitsglas (ESG) hohe Druckvorspannung, vom Ritzen und Brechen bzw. von der Kantenbearbeitung herrührende Risse werden zusammengedrückt und können sich bei Beanspruchung unterhalb der Flächenfestigkeit nicht auswirken. Zur Prüfung von ESG empfiehlt sich die Balkenmethode.

Um von der Biegebruchspannung zur technischen Festigkeit zu gelangen, muß man von den relativ wenigen Meßwerten (üblicherweise 10 Messungen) auf den kleinstmöglichen Wert schließen. Dafür bieten sich die Regeln der Statistik an. Die hier diskutierten Meßergebnisse wurden mit einer logarithmischen Gaußverteilung statistisch ausgewertet, es ergaben sich im Wahrscheinlichkeitsnetz Geraden.

Trotz verschiedener Oberflächenzustände und bis um den Faktor 700 variiertes Flächengröße schnitten sich die Geraden stets in einem engbegrenzten Bereich zwischen den Wahrscheinlichkeitslinien 0,1 und 1 %. Die danach bestimmten Werte  $\sigma_0$  der Biegebruchspannung sind als theoretische Minimalwerte zu interpretieren, die in der Praxis nicht mehr unterschritten werden.

Sie betragen (in Klammern die tatsächlichen gemessenen Kleinstwerte)

$\sigma_0 = 35 \text{ N/mm}^2$  für nichtvorgespanntes Floatglas (42 N/mm<sup>2</sup>),

$\sigma_0 = 75 \text{ N/mm}^2$  für einseitig farbig beschichtetes vorgespanntes Floatglas (77 N/mm<sup>2</sup>),

$\sigma_0 = 100 \text{ N/mm}^2$  für vorgespanntes Floatglas (102 N/mm<sup>2</sup>).

Damit liegen die von der Glasindustrie empfohlenen Rechenwerte von:

30 N/mm<sup>2</sup> für nichtvorgespanntes Floatglas,

40 N/mm<sup>2</sup> für einseitig farbig beschichtetes vorgespanntes Floatglas,

50 N/mm<sup>2</sup> für thermisch vorgespanntes Floatglas (ESG)

mit überzeugender Sicherheit unter der tatsächlichen Bruchwahrscheinlichkeit.

Die so erhaltenen Werte für die „technische Festigkeit“ sind besser fundiert als diejenigen, welche aus den arithmetischen Mittelwerten von Meßreihen unter Ansatz von Sicherheitsbeiwerten gewonnen werden. Für

vom Kleinstwert abweichende Biegebruchspannungen, die anderen Summenhäufigkeiten zugeordnet sind (z. B. die Mittelwerte mit  $P = 50\%$ ), kann die Flächenabhängigkeit nach einer empirischen Beziehung berechnet werden. Hierzu sind aber weitere Untersuchungen notwendig.

Im Gegensatz zu Scheidler [5] hat sich bei nichtvorgespannten Gläsern ergeben, daß die Oberflächenbehandlung mit Naßschleifpapier NSP 220 nicht geeignet ist, den Kleinstwert für Glas in handelsüblicher Qualität theoretisch darzustellen. Diese Methode führt auf zu niedrige Werte, die in der Praxis nicht erreicht werden und damit nicht repräsentativ sind.

Die Autoren danken den Herren Dr. Blank, Dipl.-Ing. Hochbrügge, Dipl.-Phys. Lindig und Dr. Krämling für die fachliche Unterstützung bei der Besprechung und Konzipierung dieser Arbeit. Weiterhin haben die Ergebnisse fruchtbarer Beratungen in den Arbeitsausschüssen AA 360.3 und AA 363 des Fachnormenausschusses Materialprüfung sowie von Diskussionen mit Prüffämtern und Bauaufsichtsbehörden ihren Niederschlag in dieser Arbeit gefunden. Allen Diskussionsteilnehmern sei hiermit ebenfalls gedankt.

#### 5. Formelzeichen

a	Länge (bei Rechtecken längere Seite) in mm	n	Konstante, die die Abhängigkeit $\sigma_{bb} = f(A)$ charakterisiert
A	Fläche in cm <sup>2</sup>	p	Druck in N/mm <sup>2</sup>
A <sub>i, j</sub>	beanspruchte Probenflächen in cm <sup>2</sup>	p**	bezogener Druck (Flächendruckmethode): $p^{**} = \frac{p}{E} \left( \frac{a}{2h} \right)^4$
b	Breite (bei Rechtecken kürzere Seite) in mm	P	Bruchwahrscheinlichkeit
c	auf die Probendicke bezogene Durchbiegung: $w_0/h$	R	Radius in mm
C	Durchmesser der Probe in mm	s	Standardabweichung
d	Durchmesser des Lastrings in mm	v <sub>σ</sub>	Spannungszunahme-Geschwindigkeit in N/(mm <sup>2</sup> min)
D	Durchmesser des Stützrings in mm	w	Durchbiegung der Probe in mm
E	Elastizitätsmodul in N/mm <sup>2</sup>	w <sub>0</sub>	Durchbiegung in mm im Probenzentrum
	nichtvorgespanntes Floatglas: $E = 74\,000 \text{ N/mm}^2$	W	Widerstandsmoment in mm <sup>3</sup>
	vorgespanntes Floatglas: $E = 72\,000 \text{ N/mm}^2$	x	Abstand vom Probenzentrum in mm
F	Kraft in N	y	Abstand des Bruchorts von der benachbarten Auflagerrolle in mm
F <sub>max</sub>	Maximalkraft in N	Z	Rechengröße bei der Balkenmethode in mm: $Z = (L_s - L_a)/2$
F <sub>z</sub>	Gewichtskraft der Biegerollen in N	α	Ringverhältnis D/d
F*	bezogene Prüfkraft (Doppelringmethode): $F^* = \frac{F}{E} \left( \frac{D}{2h^2} \right)^2$	γ	auf den Stützring bezogener Überstand des Prüflings: C/D
g	Fallbeschleunigung = 9,81 m/s <sup>2</sup>	λ	Seitenverhältnis a/b
h	Probendicke in mm	ν	Querszahl (Poisson-Zahl); für Floatglas: $\nu = 0,22$
J	Flächenträgheitsmoment in mm <sup>4</sup>	ρ	Dichte in g/cm <sup>3</sup> (Floatglas: $\rho = 2,5 \text{ g/cm}^3$ )
L <sub>a</sub>	Abstand zwischen Kraftangriffspunkten in mm	σ	Biegespannung in N/mm <sup>2</sup>
L <sub>s</sub>	Stützweite in mm		
M	Biegemoment in N/mm		

$\sigma_{bB}$	Biegebruchspannung in N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_0$	Biegespannung in N/mm <sup>2</sup> , die nicht zum Bruch der Probe führt
$\sigma_G$	Biegespannung in N/mm <sup>2</sup> auf Grund der Gewichtskraft der Probe	$\sigma^*$	bezogene Spannung (Doppelringmethode): $\sigma^* = \frac{\sigma}{E} \left( \frac{D}{2h} \right)^2$
$\sigma_{i,j}$	Biegespannung in N/mm <sup>2</sup> bei der Flächengröße $A_{i,j}$ mit der Bruchwahrscheinlichkeit $P_{i,j}$	$\sigma^{**}$	bezogene Hauptspannung (Flächendruckmethode):  $\sigma^{**} = \frac{\sigma}{E} \left( \frac{a}{2h} \right)^2$
$\sigma_{max}$	maximale Biegespannung in N/mm <sup>2</sup>		
$\sigma_z$	Biegespannung in N/mm <sup>2</sup> im Probenzentrum		

## 6. Literatur

- [1] Griffith, A. A.: The phenomena of rupture and flow in solids. *Phil. Trans. Royal Soc. London A* **221** (1920) S. 163–198.
- [2] Holland, A. J. und Turner, W. E. S.: Die Bruchfestigkeit des Glases und ihre Beeinflussung durch Ritze und Fehlstellen. *Glastechn. Ber.* **15** (1937) S. 270–282.
- [3] Symposium sur la résistance mécanique du verre et les moyens de l'améliorer. Florence, 25.–29. sept. 1961. C. r. Charleroi: Union Sci. Continentale du Verre 1962. [Ref. *Glastechn. Ber.* **35** (1962) S. 420.] (Hier findet sich auch die Literatur bis 1960.)
- [4] Schönbrunn, G.: Einfluß der Oberflächenschädigung auf das Festigkeitsverhalten von Glas. *Glastechn. Ber.* **49** (1976) S. 103–113.
- [5] Scheidler, H.: Verletzlichkeit und technische Festigkeit von Glas. *Glastechn. Ber.* **50** (1977) S. 214–222.
- [6] Stahn, D.: Zur Erfassung der technischen Festigkeit von Glas. *Glastechn. Ber.* **51** (1978) Nr. 9, S. 226–234.
- [7] Norm DIN 52 303 (November 1976): Prüfung von Glas; Biegeversuch. Berlin: DIN 1976. [Ref. *Glastechn. Ber.* **50** (1977) 77R0095.]
- [8] Vitman, F. F.; Bartenev, G. M.; Pukh, V. P. u. a.: A method for measuring the strength of sheet glass. *Glass and Ceram.* **19** (1962) S. 412–414.
- [9] Vitman, F. F. und Pukh, V. P.: A method for determining the strength of sheet glass. *Ind. Lab.* **29** (1963) S. 925–930.
- [10] Fayet, A.: Détermination de la résistance mécanique de plaques circulaires de verre mince à l'aide d'un test de flexion par anneaux concentriques. *Verres et Réfract.* **26** (1972) S. 35–44. [Ref. *Glastechn. Ber.* **46** (1973) 73R1297.]
- [11] Kao, R.; Perrone, N. und Capps, W.: Large-deflection solution of the coaxial-ring-circular-glass-plate flexure problem. *J. Amer. ceram. Soc.* **54** (1971) S. 566–571. [Ref. *Glastechn. Ber.* **46** (1973) 73R1299.]
- [12] Novotný, V. und Kubišta, P.: Messung der Biegefestigkeit von Flachglas. (Orig. tschech.) *Sklář a Keram.* **24** (1974) S. 70–74. [Ref. *Glastechn. Ber.* **47** (1974) 74R1466.]
- [13] Norm DIN 1055, Teil 4 (Mai 1977), Teil 45 (Entwurf Mai 1977): Lastannahmen für Bauten; Verkehrslasten, Windlasten nicht schwingungsanfälliger Bauwerke; Aerodynamische Formbeiwerte für Baukörper. Berlin: DIN 1977.
- [14] Schardin, H. und Kerkhof, F.: Ein neues Verfahren zur Bestimmung der Biegefestigkeit von Tafelglas. *Glastechn. Ber.* **28** (1955) S. 124–131.
- [15] Egner, K.: Ermittlung der zulässigen Biegebeanspruchungen großer Glasscheiben bei gleichmäßig verteilter Flächenbelastung. Berlin, München, Düsseldorf: Ernst 1973.
- [16] Weibull, W. A.: A statistical distribution function of wide applicability. *J. appl. Mechan.* **18** (1951) S. 293–297.
- [17] USA-Norm ASTM C 158-72: Standard methods of flexure testing of glass (Determination of modulus of rupture). Philadelphia, Pa.: Amer. Soc. Testing Mater. 1972.