

Verletzlichkeit und technische Festigkeit von Glas

Von Herwig Scheidler, Mainz

(Vortrag auf dem HVG-Kolloquium „Festigkeit von Glas und Glasgegenständen“ am 26. Oktober 1976 in Frankfurt (Main))

(Mitteilung aus dem Laboratorium des Jenaer Glaswerks Schott & Gen., Mainz)

(Eingegangen am 24. Juni 1977)

Die „technische Festigkeit“ von Glas erfaßt neben den eigentlichen materialspezifischen Kenngrößen auch den Oberflächenzustand eines Glasgegenstandes. Sie ist somit abhängig von den Verletzungen, die dieser Gegenstand im Laufe seiner Lebensdauer erleidet.

Es werden für gekühltes und vorgespanntes Glas Beispiele für die Beeinflussung der Biegebruchspannung durch unterschiedliche Verletzungen durch Schmirgeln und Schlag diskutiert. An diesen Beispielen wird ersichtlich, daß das Entstehen und die Wirksamkeit von Verletzungen stark

abhängen von der makroskopischen Oberflächenstruktur, von Vorverletzungen sowie vom Spannungszustand der Oberfläche. Es wird daher angeregt, zur Erfassung der Verletzlichkeit eine charakteristische Kenngröße zu definieren und in die Normung aufzunehmen.

Auf die Bedeutung der Zeit- und Flächenabhängigkeit der Festigkeit bei der Angabe einer „technischen Festigkeit“ wird hingewiesen und hierzu ein Arbeitsdiagramm vorgestellt, mit dem insbesondere die Flächenabhängigkeit anschaulich dargestellt und relativ einfach erfaßt werden kann.

Susceptibility to damage and the effective strength of glass

The effective strength of glass depends on the surface condition of the object as well as the characteristic properties of the material itself. It is thus dependent on the susceptibility to damage of the object during its working life.

The effects of various amounts of damage by impact and abrasion on the bending strength are considered for examples of annealed and toughened glass. From these examples it is clear that the occurrence and effect of damage is strongly dependent on the macroscopic surface structure, previous

damage and the stresses in the surface. It is thus suggested that a characteristic parameter should be defined to describe susceptibility to damage and incorporated in standard specifications.

How time and surface area dependence affect the value in specifying an effective strength is shown and a working diagram given from which the surface area dependence, in particular, is clearly demonstrated and relatively easily determined.

Vulnérabilité et résistance technique du verre

La „résistance technique“ du verre dépend de l'état de surface d'un objet en verre de même que des paramètres spécifiques du matériau. Elle dépend par conséquent des détériorations que cet objet subit au cours de son utilisation.

On cite des exemples de l'influence que peuvent exercer sur la résistance à la flexion, des blessures provoquées par un traitement à l'émeri ou par des chocs exercés sur du verre recuit et trempé. Au vu de ces exemples, il apparaît évident que la formation et l'efficacité des blessures dépendent fortement de la structure superficielle macroscopique, de la

présence de blessures antérieures de même que des contraintes existant en surface. On a pensé à définir une grandeur permettant de caractériser la vulnérabilité en vue d'une normalisation.

On suggère de considérer la „résistance technique“ comme pouvant expliquer la dépendance de la résistance vis-à-vis du temps et de l'état de la surface et on présente à ce sujet un diagramme de travail au moyen duquel on peut représenter intuitivement la dépendance de l'état de surface et l'expliquer d'une manière relativement simple.

1. Einleitung

Unter dem Begriff „technische Festigkeit“ soll im folgenden diejenige Festigkeit verstanden werden, mit der bei einem Glasgegenstand auf Dauer gerechnet werden kann, unter Berücksichtigung aller Oberflächenverletzungen, die dieser Gegenstand durch Schlag oder scheuernde Beanspruchungen im Laufe seiner Lebensdauer erhält.

Jeder, der sich mit Festigkeitsproblemen von Glas beschäftigt, weiß, daß sich diese technische Festigkeit von der theoretischen Glasfestigkeit stark unterscheidet und ebenso, daß zur Beurteilung der Gebrauchseigenschaft technische Festigkeit die Kenntnis der materialspezifischen Kenngrößen des Glases, wie spezifische Bruchenergie, Reißerweiterungskraft, kritischer Kerbstellenradius oder dgl., nicht ausreichend ist.

Die Gebrauchseigenschaft technische Festigkeit charakterisiert somit auch den Zustand der Glasoberfläche und ist abhängig sowohl von der Herstellungstechnologie als auch vom praktischen Einsatz des Glasartikels. Zur Kennzeichnung der technischen Festigkeit müssen daher die Festigkeit z. B. als Biege-

bruchspannung nach der Herstellung sowie die später möglichen Verletzungen und ihr Einfluß auf die Festigkeit bekannt sein.

Daß die Festigkeit bereits im Anlieferungszustand je nach Gegenstand und Herstellungstechnologie stark streut, ist allgemein bekannt. So ist z. B. bei Shand [1] eine Zusammenstellung (Tabelle 1) zu finden: Man erkennt die typischen breiten Streubereiche der Festigkeit nicht nur zwischen verschiedenen, sondern ebenso innerhalb eines Herstellungsverfahrens. Diese breiten Bereiche sind bedingt in erster Linie durch unterschiedlichen Verletzungszustand der Glasoberfläche. Als Berechnungsgrundlage sind selbstverständlich diese Angaben nicht ausreichend.

Bekannt ist weiterhin, daß sich die Biegebruchspannung des Glases mit der Dauer der anliegenden Belastung ändert. Zu dieser Zeitabhängigkeit der Festigkeit normal verletzter Oberflächen finden sich z. B. bei Greil [2] und Shand [1] Kurven, die in Bild 1 zusammengefaßt sind. Sie zeigen, daß für gekühlte Gläser bereits bei Belastungszeiten von einigen Stunden nur noch etwa 50 bis 60% der Festigkeit anzusetzen ist,

die bei der normalen Biegezugprüfung mit Belastungszeiten von etwa 1 s ermittelt wird. Die angegebenen Kurven gelten für normal gehandhabte Glaserzeugnisse mit statistisch verteilten Oberflächenfehlern.

Thermisch vorgespannte Gläser zeigen nur eine geringfügige Zeitabhängigkeit, da durch die Druckvorspannung in der Oberfläche die Rißspitzen der Oberflächenverletzungen „zusammengedrückt“ werden. Allerdings trifft das nur zu, solange die bei Belastung anliegende Zugspannung geringer ist als die Oberflächendruckspannung.

Relativ wenige Angaben, die für das jeweils eigene praktische Festigkeitsproblem unmittelbar genutzt werden können, sind in der Literatur zu finden über die Art und Wirkung der in der Praxis möglichen Verletzungen, insbesondere über deren quantitative Beeinflussung der Festigkeit. Das gleiche trifft für die Abhängigkeit der Festigkeit von der Größe der zugbelasteten Oberfläche zu.

Es ist somit auch heute noch sehr schwierig, einigermaßen sichere Voraussagen über die nutzbare technische Festigkeit eines Glasartikels unter seinen spezifischen Einsatzbedingungen zu machen. Gerade diese Aufgabenstellung wird aber immer häufiger, und es reicht daher nicht mehr aus, auf Erfahrungswerte und Sicherheitsfaktoren zurückzugreifen. Bei manchen Einsatzfällen bleibt bei dieser Vorgehensweise — auf Grund des mangelnden Verstehens der Zusammenhänge — immer noch eine Unsicherheit bestehen. Andererseits wird in vielen Fällen die tatsächlich zur Verfügung stehende technische Festigkeit viel zu wenig ausgenutzt; insbesondere, wenn bei Gläsern mit definiert veränderter Oberfläche, für die nur wenig Erfahrungswerte vorliegen, mit den gleichen Sicherheitsfaktoren oder Erfahrungswerten wie bei normal hergestellten Glasgegenständen gearbeitet wird.

Im Zusammenhang mit der Entwicklung neuer Spezialgläser und Glaskeramiken wird man in letzter Zeit immer mehr gezwungen, sich intensiv mit diesen Festigkeitsproblemen auseinanderzusetzen. Ziel der Untersuchungen ist es daher, Wege zu finden, die unter Berücksichtigung insbesondere der verschiedensten Verletzungsarten sowie der Zeit- und Flächenabhängigkeit der Festigkeit eine etwas genauere Voraussage der technischen Festigkeit erlauben.

Über einige der unter dieser Zielsetzung erhaltenen Ergebnisse soll im folgenden berichtet werden. Daß hierbei überwiegend Ergebnisse angesprochen werden, die an Floatglas ermittelt wurden, liegt lediglich daran,

Tabelle 1. Festigkeit von Glasgegenständen (Prüfung an Luft; Belastungsdauer unter Bruchlast: etwa 3 s; nach Shand [1])

Herstellungsverfahren (unterschiedliche Oberflächenfehler)	Biegezugfestigkeit			
	in kp/cm ²		in N/mm ²	
Oberfläche sandgestrahlt	105 bis	280	10 bis	27
Preßartikel	210 bis	560	21 bis	55
Blasartikel				
heiße Eisenform	280 bis	630	27 bis	62
geschmierte Form	350 bis	700	34 bis	69
Innen-Oberfläche	1050 bis	2800	103 bis	275
gezogenes Rohr	420 bis	1050	41 bis	103
poliertes Flachglas	560 bis	1120	55 bis	110
gezogenes Fensterglas	560 bis	1400	55 bis	137
Glasfasern				
gekühlt	700 bis	2800	69 bis	275
frisch gezogen	2100 bis	28000	206 bis	2750

daß für eine hinreichende statistische Absicherung der Ergebnisse immer sehr viele Proben notwendig und diese in gleichmäßiger Qualität bei Floatglas leicht herstellbar sind. Prinzipiell gelten diese Ergebnisse jedoch ebenso für Spezialgläser oder Glaskeramiken, wie an entsprechenden Parallelversuchsreihen bestätigt wurde.

Die folgenden Aussagen beschränken sich in erster Linie auf quasistatische Biegezugbeanspruchungen, da hier die Zusammenhänge noch überschaubar und weitgehend zu verallgemeinern sind. Bei Stoßbeanspruchungen ist eine solche Verallgemeinerung nur in Ausnahmefällen zulässig; der Einfluß der Verletzungen auf Stoßprüfergebnisse ist jedoch — im Vergleich zu quasistatischen Biegebeanspruchungen — noch wesentlich stärker. Somit ist auch gerade zur Abschätzung der praktischen Stoßbelastbarkeit die Kenntnis der Verletzlichkeit von Glasgegenständen von entscheidender Bedeutung. Hierüber soll in einer späteren Mitteilung berichtet werden.

2. Durchgeführte Untersuchungen

2.1. Biegebruchspannungen bei unterschiedlichen Verletzungen

Die Biegebruchspannungen wurden an Proben in Anlieferungsqualität sowie nach verschiedenen, definierten Verletzungen bestimmt. Interessiert in erster Linie die Festigkeit der Fläche, wird zur Prüfung generell die Doppelringmethode mit einem Durchmesser Verhältnis von 1:5 und einer Probengröße von

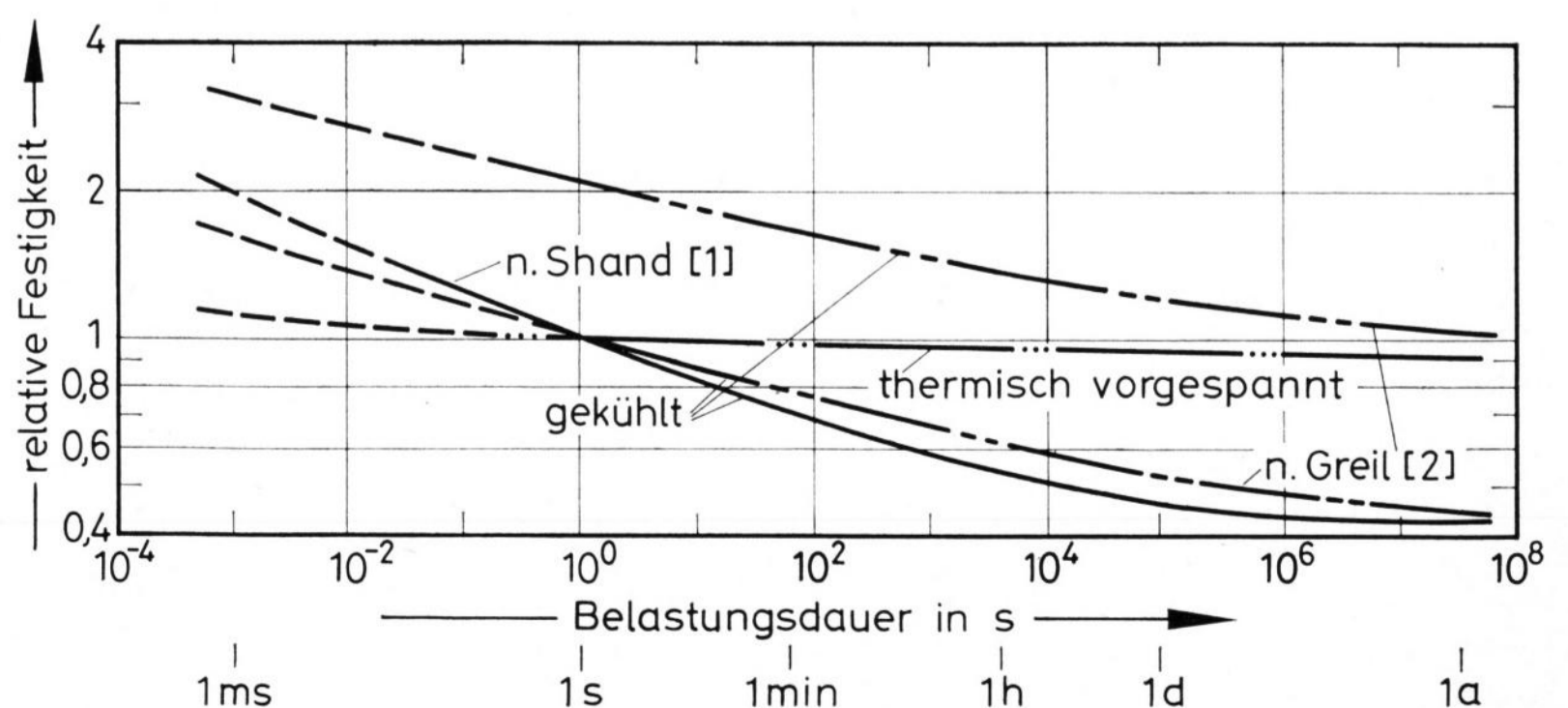


Bild 1. Relative Festigkeit von Glas in Abhängigkeit von der Belastungsdauer für gekühltes und für thermisch vorgespanntes Glas.

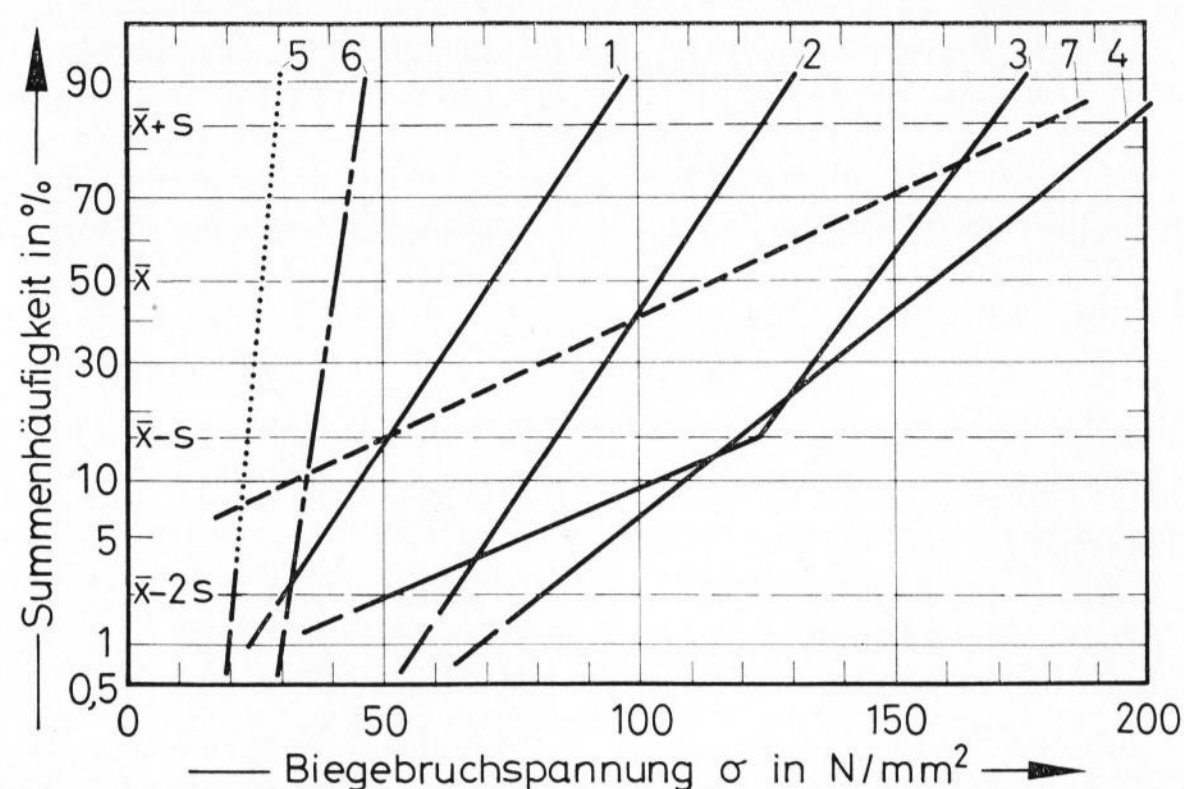


Bild 2. Biegebruchspannung von Floatglas. Kurven 1 bis 4: in Anlieferungsqualität; Kurven 5 und 6: nach Schmirgeln (Schleifpapier) der Oberfläche mit 40er bzw. 220er SiC-Körnung; Kurve 7: nach Verletzung der Oberfläche durch das Schlaggerät nach Wegner [3] bei einer Prüfkraft von 1,5 kp.

100 × 100 mm verwendet. Kommt es auf die Festigkeit des Randes an, wird mit der Balkenbiegemethode geprüft. Die Probenanzahl liegt jeweils bei 20 bis 25. Vor der Prüfung lagern die Proben zweckmäßigerweise etwa 24 h unter definierten Bedingungen.

Als für die Praxis aussagekräftig, andererseits auch leicht und hinreichend reproduzierbar durchzuführen, haben sich folgende Verletzungsarten erwiesen:

a) Verletzung durch SiC-Schleifpapier der Standardkörnung 220. Diese Verletzungsart ist geringfügig stärker als die Verletzungen, mit denen in der Praxis, z. B. bei Außenverglasungen, die häufig geputzt werden, gerechnet werden muß, bzw. ist sie etwas geringer als die Verletzung, die bei normal gehandhabten Glaskochgeschirren anzusetzen ist.

b) Als weitere Verletzungsart wird eine Verletzung durch ein Sand- oder SiC-Schleifpapier der Standardkörnung 40 gewählt. Diese Verletzungsart entspricht z. B. dem Verkratzen der Glasoberfläche mit einem Diamantgriffel und stellt somit eine Extremverletzung dar.

Diese beiden schmirgelnden Verletzungsarten a) und b) werden durchgeführt, indem an den Proben die bei der Prüfung unter Zugbeanspruchung liegende Fläche mit einem entsprechenden Schmirgelpapier durch leicht kreisende Bewegungen von Hand so verletzt wird, daß die entstehenden Kratzer in vielfachen Richtungen verlaufen und jeder Quadratmillimeter der zugbeanspruchten Fläche mindestens von einer Kratzspur durchzogen wird.

c) Neben diesen kratzenden Verletzungen wird als weitere Beschädigungsart eine Schlagverletzung mit dem aus der Emailindustrie bekannten Kugel-Schlaggerät nach Wegner [3] mit einem Kugeldurchmesser von 5 mm verwendet. Ein Schlag mit diesem Gerät, bei einer eingestellten Prüfkraft von 1,5 kp, entspricht etwa einer Verletzung durch die Spitze eines aus 10 cm Höhe fallenden, 75 g schweren Schraubenziehers.

Zur Auswertung der bei den jeweiligen Festigkeitsmessungen erhaltenen Ergebnisse hat sich die Darstellung im Summenhäufigkeitspapier als am aussagekräftigsten erwiesen. Hierdurch werden Unterschiede

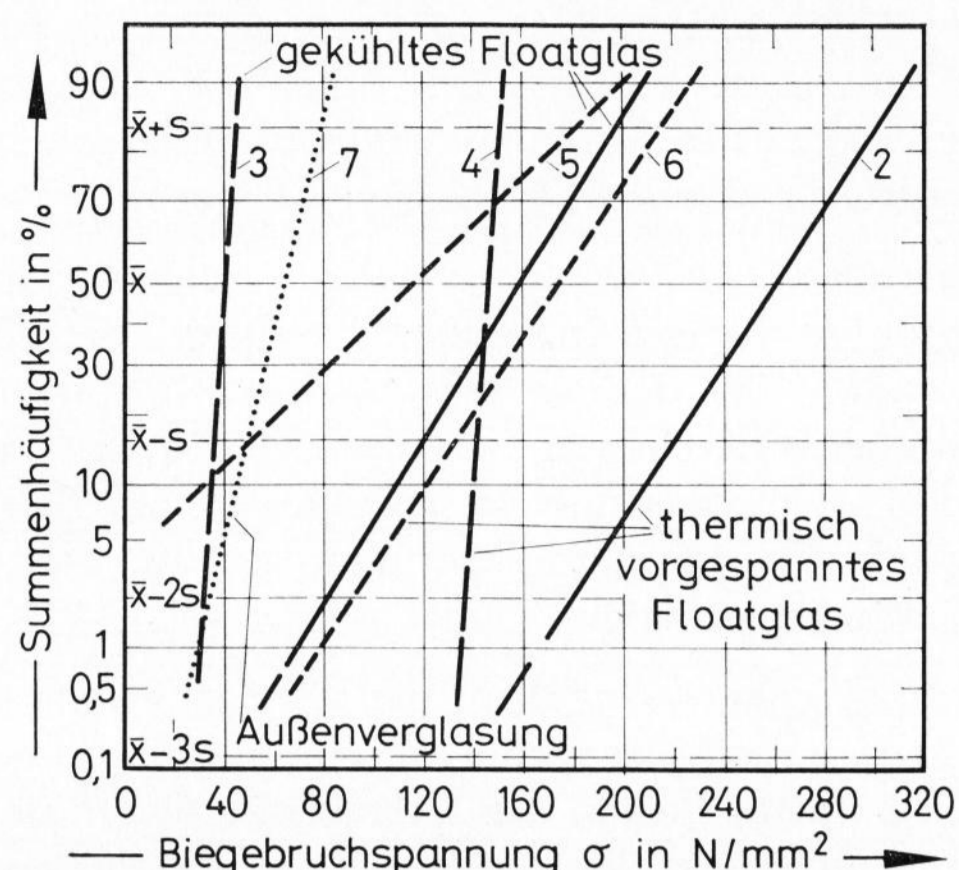


Bild 3. Biegebruchspannungen von gekühltem und von thermisch vorgespanntem Floatglas (Dicke jeweils 5 mm) sowie von einer Flachglasscheibe aus einer Außenverglasung. Kurven 1 und 2: in Anlieferungsqualität; Kurven 3 und 4: nach Schmirgeln (Schleifpapier) der Oberfläche mit 220er bzw. 40er SiC-Körnung; Kurven 5 und 6: nach Verletzung der Oberfläche durch das Schlaggerät nach Wegner [3] bei einer Prüfkraft von 1,5 kp; Kurve 7: Flachglasscheibe, die mehrere Jahre in einem Industriegebäude als Außenverglasung eingesetzt war; Probengröße: 100 × 100 × 5 mm.

zwischen einzelnen Probenserien wesentlich besser ersichtlich als bei der Gegenüberstellung von Mittelwerten und Standardabweichungen. Darüber hinaus lassen die Geraden im Summenhäufigkeitspapier durch eventuelle Knickpunkte erkennen, ob eine einheitliche Verletzungsursache vorgelegen hat. Der Vorteil dieser Darstellung liegt jedoch insbesondere auch darin, daß mit ihr ein besseres Verständnis für die Zeit- und Flächenabhängigkeit der Festigkeit erreicht wird.

Bild 2 zeigt z. B. einige Summenhäufigkeitskurven von Floatglas in vier unterschiedlichen Anlieferungsqualitäten sowie von zwei durch 220er und 40er Schmirgel verletzten Serien. Bei letzteren ist es unerheblich, von welcher der Anlieferungsqualitäten ausgegangen wird. Die Summenhäufigkeitskurve 7 zeigt die starke Streuung der Biegebruchspannung, wenn Anlieferungsqualität 3 mit dem Schlaggerät nach Wegner [3] bei einer eingestellten Prüfkraft von 1,5 kp verletzt wird.

Die Veränderung der Festigkeit durch die verschiedenen Verletzungen wird in erster Linie an der starken Reduzierung der mittleren Festigkeit (50% Bruchwahrscheinlichkeit bzw. Summenhäufigkeits-%, \bar{x}) ersichtlich. Bei Bruchwahrscheinlichkeiten unter 5% (Bereich $(\bar{x} - 2s)$) ist diese Erniedrigung der Festigkeit wesentlich geringer. Der Knickpunkt der Geraden von Anlieferungsqualität 3 zeigt, daß hier zwei unterschiedliche Verletzungsarten der Oberfläche vorgelegen haben.

Entsprechende Kurven — im Vergleich zu gekühltem Glas — zeigt Bild 3 für thermisch vorgespanntes Glas (5 mm). Diese thermisch vorgespannten Proben ergaben im Anlieferungszustand (Kurve 2) einen Mittelwert (\bar{x}) von 260 N/mm² mit einer Standardabweichung ($\bar{x} - s$) von ± 40 N/mm². Nach Verletzung durch 220er Schmirgel (Kurve 4) wird die mittlere Biegebruchspannung auf 145 N/mm² erniedrigt, gleichzeitig wird jedoch die Standardabweichung wesentlich kleiner — deutlich ersichtlich an der großen Steigung

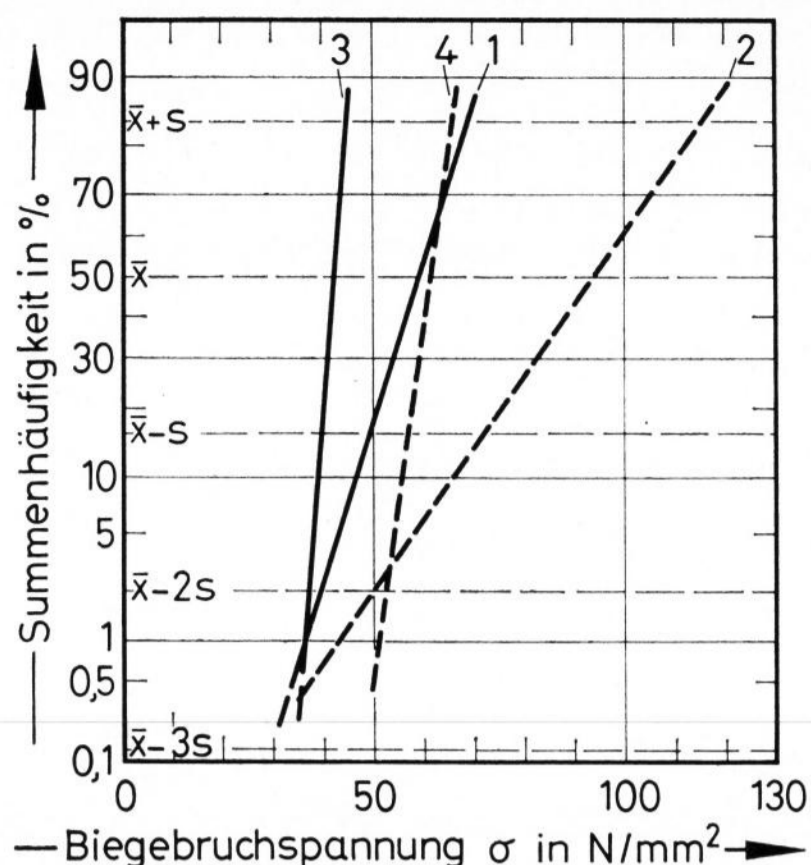


Bild 4. Biegebruchspannung eines Ornamentflachglases in Anlieferungsqualität (Kurve 1: glatte Seite; Kurve 2: strukturierte Seite) sowie nach Verletzung mit 220er SiC-Körnung (Kurve 3: glatte Seite; Kurve 4: strukturierte Seite).

dieser Geraden —, so daß bei Bruchwahrscheinlichkeiten unter 0,5% (Bereich $(\bar{x} - 3s)$) die Biegebruchspannung beider Qualitäten nur noch minimal voneinander abweicht.

Weiter ist aus Bild 3 zu erkennen, daß bei einer z. B. durch Biegung verursachten Zugbeanspruchung ($\hat{=}$ Biegebruchspannung, Abszisse) von 160 N/mm² für das vorgespannte Glas (Kurve 2) die Bruchwahrscheinlichkeit (Ordinate) bei ungefähr 0,5% liegt, während sie bei dem gekühlten Glas (Kurve 1) — mit guter Oberflächenbeschaffenheit — bei etwa 50% liegt. Andererseits beträgt bei gleicher „Sicherheit“ bzw. bei einer für beide Qualitäten gleichen Bruchwahrscheinlichkeit ($\hat{=}$ Summenhäufigkeit) von z. B. 5% die Biegebruchspannung nach Verletzung mit 220er Schmirgel für das gekühlte Glas (Kurve 3) 35 N/mm² im Vergleich zu etwa 140 N/mm² bei dem vorgespannten Glas (Kurve 4). Bei Berücksichtigung der Zeitabhängigkeit (siehe Abschnitt 2.3.) verschiebt sich dieses Verhältnis nochmals zugunsten des vorgespannten Glases.

Außerdem fällt in Bild 3 die relativ große Steigung der Kurve der geschlagenen Probenreihe (Kurve 6) auf. Sie zeigt, daß das thermisch vorgespannte Glas wesentlich unempfindlicher gegenüber Schlagbeschädigungen reagiert, d. h. eine geringere (Festigkeitserniedrigung)

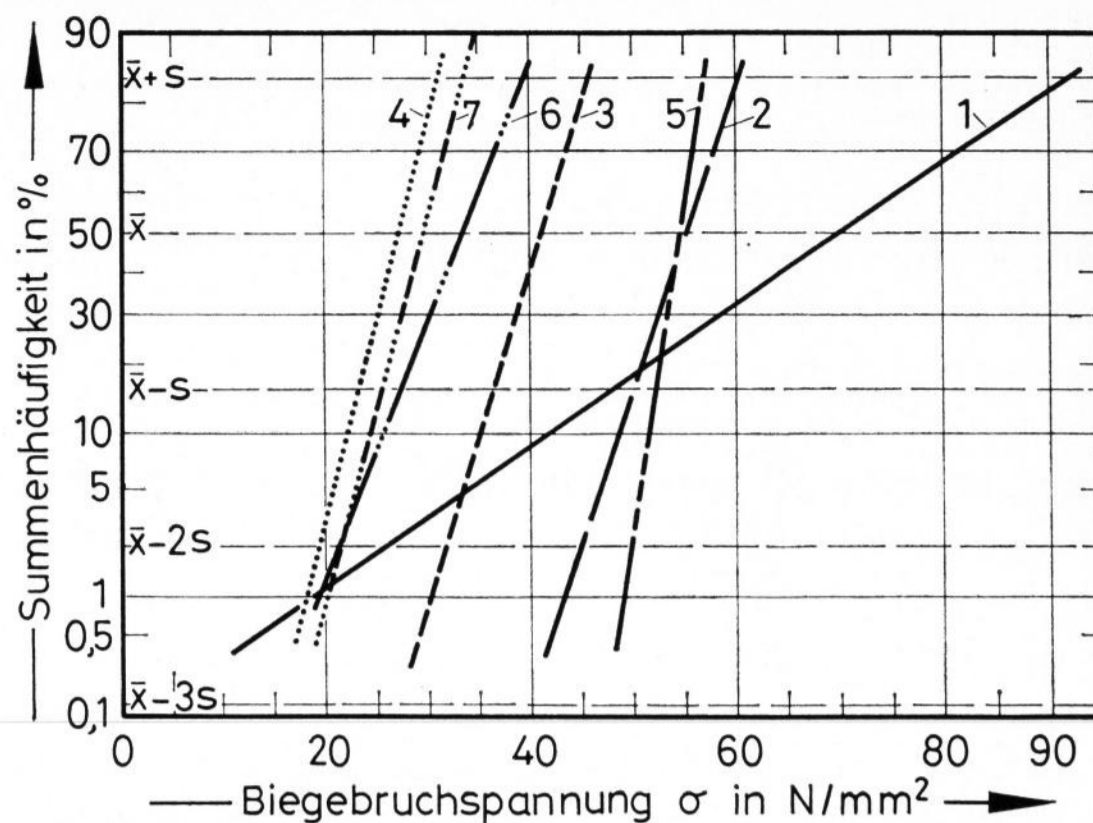


Bild 5. Biegebruchspannung von Floatglas nach verschiedenen Oberflächenverletzungen. Kurve 1: in Anlieferungsqualität; Kurve 2: durch Strahlen mit Al₂O₃ (Strahlkorund 220); Kurve 3: durch Schmirgeln mit SiC-Körnung 220; Kurve 4: durch Schmirgeln mit SiC-Körnung 40; Kurve 5: durch Strahlen mit Al₂O₃ und anschließendes Schmirgeln mit SiC-Körnung 220; Kurve 6: durch Strahlen mit Al₂O₃ und anschließendes Schmirgeln mit SiC-Körnung 40; Kurve 7: durch Schmirgeln mit SiC-Körnung 40 und anschließendes Schmirgeln mit SiC-Körnung 220.

erfährt als nicht vorgespanntes, gekühltes Glas (Kurve 5). Das vorgespannte Glas ist darüber hinaus nach dieser Schlagverletzung immer noch fester als das gekühlte Glas in Anlieferungsqualität (Kurve 1).

Zum Vergleich wurde in dieser Abbildung die Summenhäufigkeitskurve einer Probenreihe mit aufgenommen, die aus einer Glasscheibe herausgeschnitten wurde, nachdem diese Scheibe (normales Flachglas) mehrere Jahre in einem Industriegebäude als Außenverglasung eingesetzt worden war. Man erkennt, daß diese Kurve im Bereich einer Standardverletzung mit 220er Schmirgel liegt.

Durch die beschriebenen Verletzungen wird zwar grundsätzlich die Biegebruchspannung reduziert, und im allgemeinen werden durch die Verletzungen die Summenhäufigkeitskurven steiler. Je nach Glasart, je nach Spannungszustand oder je nach makroskopischer Struktur der Glasoberfläche kann jedoch diese Verschiebung trotz gleicher Verletzungsart quantitativ stark unterschiedlich sein. Einige Beispiele hierfür liefern die Bilder 4 bis 6.

Bild 6. Reduzierung der Biegebruchspannung von Glas nach Verletzung der Oberfläche durch Schmirgeln und Schlag. Kurven 1 und 2: gekühltes Glas (5 mm); Kurven 3 und 4: thermisch vorgespanntes Glas (5 mm); Kurven 5 und 6: chemisch vorgespanntes Glas 1,5 mm (Druckspannungsschicht: 100 μm).

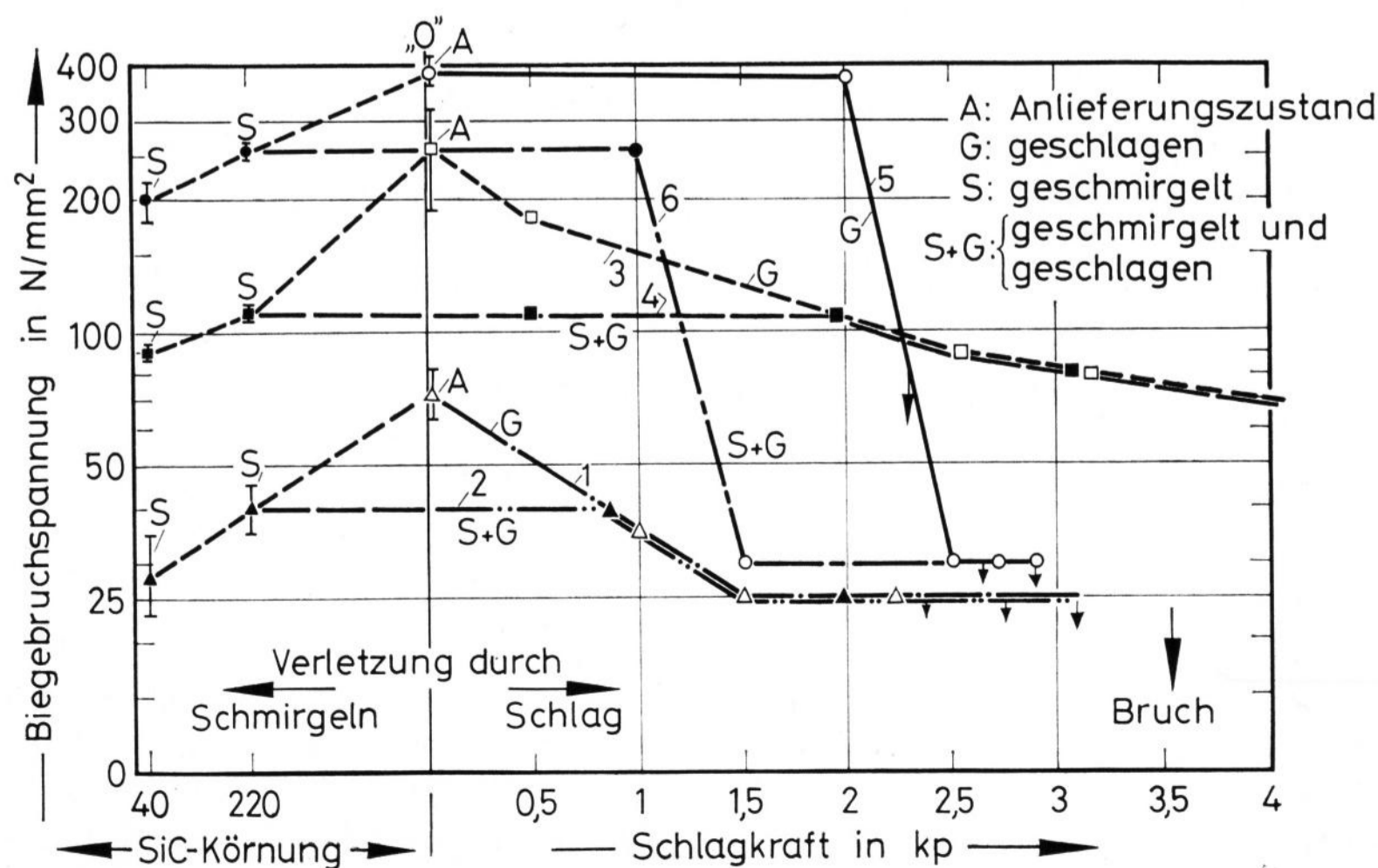


Bild 4 zeigt die Summenhäufigkeitsgeraden der Biegebruchspannung eines Ornamentflachglases. Dieses Ornamentglas hat eine glatte und eine strukturierte Seite. Die strukturierte Seite zeigt bienenwabeförmig angeordnete, abgerundete Vertiefungen ($\approx 0,2$ mm). Geprüft wurde die Biegebruchspannung beider Seiten im Anlieferungszustand sowie nach Verletzung mit 220er Schmirgel. Man erkennt, daß bei diesem Glas die mittlere Biegebruchspannung der strukturierten Seite um etwa 60% (etwa 95 N/mm^2 im Vergleich zu 60 N/mm^2) höher liegt als die der glatten Seite (Kurve 1), wobei die Steigung der Geraden der glatten Seite größer ist. Die Ursache für diese höhere Festigkeit der strukturierten Seite liegt vermutlich darin, daß Verletzungen während der Herstellung und beim Transport auf der strukturierten Seite weniger entstehen bzw. wirksam sind als auf der glatten Seite. Als Beweis für diese geringere Verletzlichkeit können die Kurven nach Verletzung mit 220er Schmirgel angesehen werden. Auch hier weist die strukturierte Seite, trotz gleicher Verletzungsweise, nach der Verletzung noch eine höhere Festigkeit als die glatte Seite auf, bei annähernd gleicher Steigung beider Kurven. Die Festigkeit der strukturierten Seite ist in diesem Falle selbst nach Verletzung mit 220er Schmirgel noch besser als die der glatten Seite im Anlieferungszustand.

Sehr interessant und überraschend waren die Ergebnisse, die in Bild 5 dargestellt sind. Zunächst wurde an Floatglasproben im Anlieferungszustand (Kurve 1) wiederum die Summenhäufigkeitsverteilung der Biegebruchspannung ermittelt. Anschließend wurde das gleiche Glas oberflächlich verletzt durch

- a) sehr feines Strahlen mit Strahlkorund SSB 220, mittlere Körnung etwa $60 \mu\text{m}$ Korngröße (Kurve 2),
- b) durch 220er Schmirgel (Kurve 3),
- c) durch 40er SiC-Schmirgel (Kurve 4).

Die Festigkeiten (Kurven 2 bis 4) zeigen den bekannten Abfall mit zunehmender Verletzung. Im Anschluß daran wurden nun entsprechend verletzte Proben des gleichen Glases nach dem Strahlen noch ein zweites Mal verletzt durch 220er (Kurve 5) bzw. 40er (Kurve 6) Schmirgel. Überraschenderweise sind die Festigkeiten dieser mehrfach verletzten Proben (Kurven 5 und 6) immer höher als die der jeweils mit dem größten Medium nur einmal verletzten Proben (Kurven 3 und 4). Dies trifft qualitativ auch zu, wenn die Reihenfolge der Verletzung umgekehrt wird, also z. B., wenn zuerst mit 40er Schmirgel verletzt und dann gestrahlt oder nach der Verletzung mit 40er Schmirgel nochmals mit 220er Schmirgel verletzt wird (Kurve 7). Bemerkenswert ist z. B. auch, daß die gestrahlten (Kurve 2) sowie die zusätzlich mit 220er Schmirgel (Kurve 5) verletzten Proben bis zu Bruchwahrscheinlichkeiten von etwa 20% höhere Biegebruchspannungen aufweisen als die Proben des gleichen Glases in Anlieferungsqualität.

Eine eindeutige Erklärung für diese unerwartete Festigkeitserhöhung durch Mehrfachverletzung gibt es noch nicht. Daß sie echt ist, muß angenommen werden, da sie mehrfach überprüft und z. T. auch bei praktischen Fällen beobachtet wurde. Eine mögliche Deutung ist, daß bei diesen Proben durch die sehr nahe beieinanderliegenden Verletzungen bei Zugbelastungen die auftretenden Spannungsüberhöhungen in den Rißspitzen

durch Verminderung der Kraftliniendichte schwächer sind als bei Vorliegen von nur wenigen Einzelrissen.

Deutlich anders wirkt sich der Einfluß der durch Schmirgeln verursachten Verletzungen auf die Festigkeit bzw. Biegebruchspannung aus, wenn man zusätzlich Schlagverletzungen mit einbezieht. In Bild 6 ist für drei Gläser

- a) gekühltes Glas, 5 mm dick,
- b) thermisch vorgespanntes Glas, 5 mm dick und
- c) chemisch vorgespanntes Glas, 1,5 mm dick, Druckspannungszone $100 \mu\text{m}$;

auf der Ordinate („O“) die Biegebruchspannung im Anlieferungszustand (A) dargestellt.

Links von dieser Ordinate sind die Biegebruchspannungen dieser Gläser nach Verletzung mit 220er und 40er Schmirgel aufgetragen. Auf der rechten Seite sind die mittleren Biegebruchspannungen angegeben von Proben, die vor der Biegezugprüfung zunächst durch das Schlaggerät nach Wegner mit verschiedenen Schlagkräften (rechte Abszisse) auf der später bei der Biegezugprüfung unter Zugspannung stehenden Seite verletzt wurden.

Für die drei untersuchten Proben gekühltes Glas, thermisch vorgespanntes Glas und chemisch vorgespanntes Glas wurden je zwei Kurven erhalten: Bei der ersten Serie (G) wurden die Proben — ausgehend vom Oberflächenzustand in Anlieferungsqualität — lediglich durch Schlag (Gerät nach Wegner) bei verschiedenen Schlagkräften verletzt und anschließend an diesen Proben die Biegebruchspannung ermittelt. Bei der zweiten Serie (S + G) wurden die Proben zunächst mit 220er Schmirgel verletzt (S) und erst danach zusätzlich durch Schlag wie bei Serie (G) beschädigt.

Die Kurven zeigen nach Meinung des Autors sehr eindeutig, wie die einzelnen Glassorten auf die in der Praxis oft gemeinsam wirkenden Kratz- und Schlagverletzungen reagieren. Das normal gekühlte Glas (Kurve 1) zeigt durch Schlagverletzungen eine relativ rasche Abnahme der Biegebruchspannung auf etwa 25 N/mm^2 , die sich dann auf diesem Niveau solange hält, bis bei höherer Schlagkraft ($\approx > 3 \text{ kp}$) schließlich alle Proben bereits beim Schlag (d. h. vor der Biegezugprüfung) brechen. An einigen Proben aus einer Prüferserie setzt der Bruch (angedeutet durch senkrechten Pfeil \downarrow) schon bei geringeren Schlagkräften ein. Die durch Schmirgeln vorverletzte Fläche (Kurve 2) zeigt den gleichen Festigkeitsabfall, nur liegt hier der Start bei entsprechend tieferer Biegebruchspannung (etwa 40 N/mm^2). Beide Kurven gehen bei Schlagkräften um 1 kp ineinander über.

Ein ähnliches Verhalten zeigt das thermisch vorgespannte Glas (Kurven 3 und 4), nur, daß hier die Werte wesentlich höher und der prozentuale Abfall der Festigkeit geringer sind. Eine teilweise Zerstörung dieser vorgespannten Proben beim Schlag (\downarrow) tritt erst bei Schlagkräften oberhalb 4 kp ein. Auch hier läuft die Kurve für die vorbeschädigten Proben ((S + G), Kurve 4) in die Kurve der nicht vorgeschädigten Proben (G, Kurve 3) ein.

Ein deutlich anderes Verhalten zeigt das chemisch vorgespannte Glas. Hier ist ein erheblicher Einfluß der Vorbeschädigung auf den Festigkeitsabfall durch Schlag

festzustellen. Setzt bei diesem Glas im Anlieferungszustand (Kurve 5) der Abfall der Festigkeit auf das Grundniveau des nicht vorgespannten Glases (von ungefähr 30 N/mm²) erst bei Schlagkräften von etwa 2 kp ein, beginnt er bei vorgeschädigten Proben (Kurve 6) bereits bei etwa 1 kp, und die verbleibende Festigkeit nach dieser Vorverletzung entspricht bereits bei Schlagkräften um etwa 1,5 kp (etwa — wie bereits angegeben — vergleichbar der Verletzung durch einen fallenden Schraubenzieher) nur noch der durch entsprechenden Schlag verletzten gekühlten Glasprobe (Kurve 1).

Aus diesem Ergebnis wird die praktische Erfahrung mit chemisch vorgespannten Gläsern verständlich. Auch nach schmirgelnder Verletzung, die im allgemeinen bei der labormäßigen Charakterisierung eingesetzt wird, zeigen diese Gläser noch eine relativ hohe Festigkeit (≥ 200 N/mm²), vorausgesetzt, die Druckspannungszone ist hinreichend dick, d. h. größer als etwa 70 bis 100 μ m und wird durch diese Verletzung nicht durchdrungen.

Werden chemisch vorgespannte Gläser jedoch, wie in der Praxis vielfach der Fall, sowohl durch Verkratzen als auch durch Schlag verletzt, bleibt bereits bei mittleren Schlagbeanspruchungen von der ursprünglich hohen Festigkeit nur noch sehr wenig erhalten. Eine Festigkeitssteigerung durch chemische Vorspannung ist also nur dann praktisch von Nutzen, wenn entweder bei speziellen Gegenständen schlagende Verletzungen weitgehend ausgeschlossen sind oder wenn die Oberfläche durch zusätzliche Maßnahmen vor Schlagverletzungen geschützt wird.

Andererseits wird der große Vorteil der bewährten thermischen Vorspannung ersichtlich. Auch bei starken Schlagbeanspruchungen bleibt bei diesen — gut — vorgespannten Gläsern noch ein hohes Festigkeitsniveau (≈ 50 N/mm²) erhalten.

Die an diesen Beispielen gezeigte unterschiedliche Verletzlichkeit von Glasoberflächen, die noch durch weitere belegt werden könnte, und ihr unterschiedlicher Einfluß auf die Festigkeit legt die Frage nahe, ob es nicht zweckmäßig ist, zur besseren Charakterisierung der technischen Glasfestigkeit eine besondere Kenngröße zur Erfassung der Verletzlichkeit einzuführen. Zum Beispiel könnte man diese Kenngröße mit „Schädigungsbeiwert“ bezeichnen, der den absoluten oder prozentualen Abfall der Biegebruchspannung nach definierten, durch Normung festgelegten Verletzungsarten kennzeichnet. Zumindest sollte künftig der unterschiedlichen Verletzlichkeit der Gläser eine größere Bedeutung beigemessen werden als dies heute im allgemeinen geschieht, da ohne deren Kenntnis keine Aussage zur technischen Festigkeit möglich ist.

2.2. Flächenabhängigkeit der Festigkeit

Außer in der unterschiedlichen Verletzlichkeit liegt eine der Unsicherheiten in der Voraussage der technischen Festigkeit sicherlich in der Unkenntnis der quantitativen Zusammenhänge zwischen der Größe der zugbelasteten Oberfläche und deren Einfluß auf die Festigkeit, d. h. in der Flächenabhängigkeit der Festigkeit. Systematische, für die Praxis unmittelbar anwendbare Untersuchungen hierzu sind leider nicht zugänglich, obwohl sich zahlreiche Arbeiten mit dieser Thematik

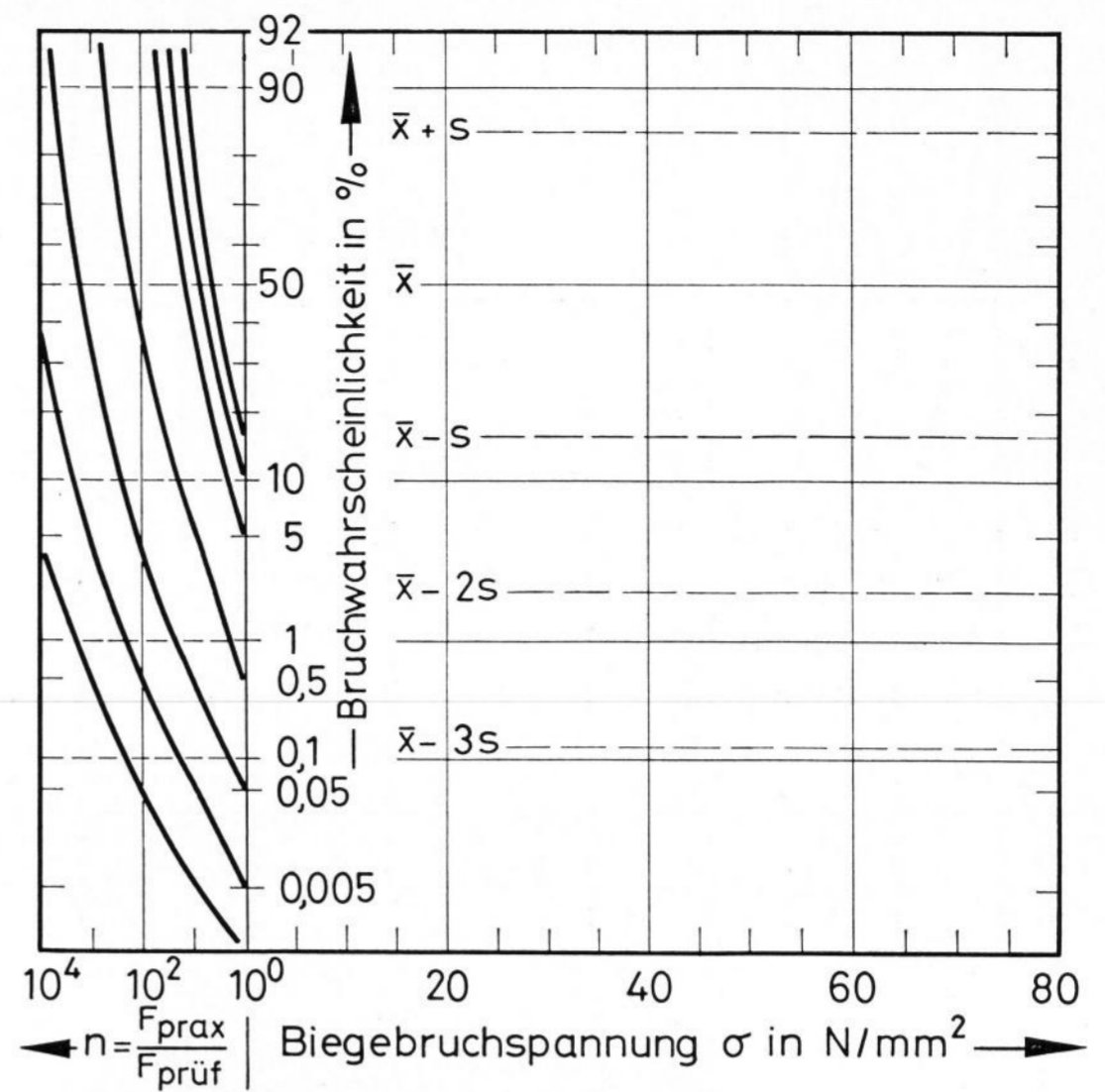


Bild 7: Arbeitsdiagramm zur Ermittlung der Flächenabhängigkeit der Biegebruchspannung. F_{prax} : unter Zugspannung (gleiche Spannungsverteilung) stehende Fläche in der Praxis; $F_{\text{prüf}}$: unter Zugspannung (gleiche Spannungsverteilung) stehende Fläche des Labor-Prüfkörpers.

befassen und allgemeine Zusammenhänge bekannt sind. So hat sich z. B. vor Jahren Reitmayer [4] mit diesen Problemen befaßt und einige praktische Versuche mit verschieden großen Spezialglasscheiben durchgeführt. Seine experimentellen Ergebnisse verglich Reitmayer mit einem relativ einfachen, auf rein statistischen Gesichtspunkten basierenden, mathematischen Ansatz. Dieser Ansatz geht, wie bei vielen anderen Verfassern auch, davon aus, daß mit größer werdender Oberfläche die Anzahl von Verletzungen und somit die Wahrscheinlichkeit eines Bruches bei kritischen Belastungen entsprechend den Wahrscheinlichkeits-Gesetzmäßigkeiten zunehmen. Nach diesem Ansatz läßt sich die Bruchwahrscheinlichkeit (w_n) für eine n-mal so große Fläche berechnen, wenn die Bruchwahrscheinlichkeit (w_0) der Einheitsfläche (F_0) sowie das Flächenverhältnis (n) bekannt sind.

$$w_n = 1 - (1 - w_0)^n.$$

Gemäß dieser Beziehung wurden für verschiedene Flächenverhältnisse n (unter gleicher Zugbeanspruchung der Flächen) und bei einer angenommenen Bruchwahrscheinlichkeit w_0 des Laborprüfkörpers die zugehörigen Bruchwahrscheinlichkeiten w_n der n-mal größeren Fläche berechnet.

Die so berechneten W_n -Werte ($= w_n$ in %) wurden über den jeweiligen zugehörigen Flächenverhältnissen parallel zur Ordinate eines Summenhäufigkeitspapiers aufgetragen und für jeweils konstantes W_0 zu Kurven verbunden. Durch diese Darstellungsweise in Kurvenscharen konnte ein vorläufiges Arbeitsdiagramm (Bild 7) erstellt werden. Es stellt einen Versuch dar, die Flächenabhängigkeit der Festigkeit in das bekannte und bewährte Summenhäufigkeitspapier mit einzubauen, um hierdurch eine einfache Handhabung zu ermöglichen. Rechts von der Ordinate können in bekannter Weise die Summenhäufigkeitskurven der untersuchten Gläser eingetragen werden, während in der linken Hälfte die W_n -Kurvenscharen fester Bestandteil des Arbeitsdiagrammes sind.

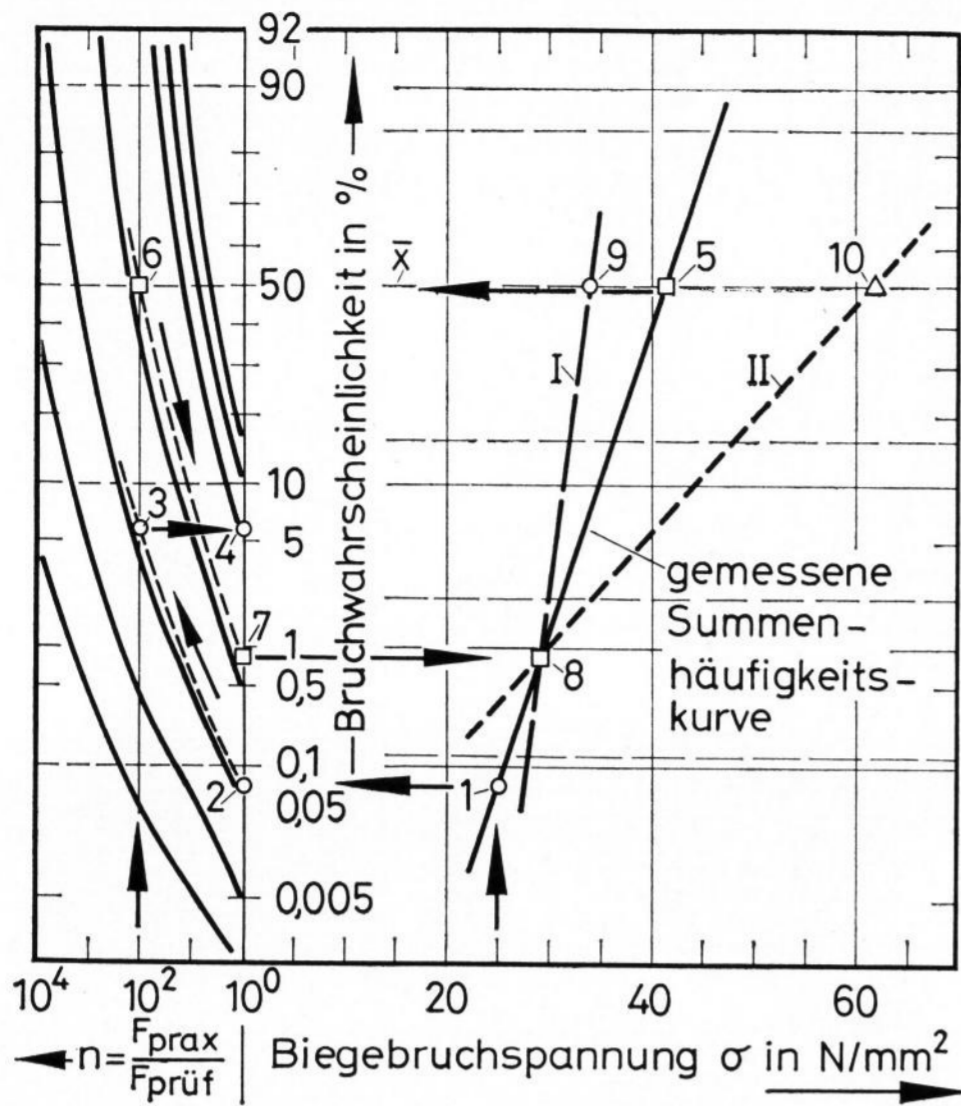


Bild 8. Veränderung der Bruchwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der Größe der unter Zugspannung stehenden Fläche (bei gleicher Spannungsverteilung).

Selbstverständlich will das so geschaffene Diagramm keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben. Es lohnt sich jedoch, ein entsprechendes Diagramm weiter zu verbessern und mathematisch allgemeingültig abzusichern, da mit diesem vorliegenden Blatt bereits sehr gut gearbeitet wird und viele praktische Ergebnisse auf einfache Weise gedeutet werden können.

Die Arbeitsweise mit diesem Diagramm wird an einigen nachfolgenden Beispielen erläutert.

An Hand von Bild 8 kann z. B. folgende Fragestellung beantwortet werden:

Mit welcher Bruchwahrscheinlichkeit muß bei einer 100mal so großen zugbeanspruchten Fläche und einer Biegezugspannung von 25 N/mm² gerechnet werden, wenn beim Laborprüfkörper mit einer, an einer hinreichenden Probenmenge bestimmten Festigkeitsverteilung die Bruchwahrscheinlichkeit (ebenfalls bei einer Biegebruchspannung von 25 N/mm²) 0,07% beträgt?

Zur Lösung dieser Frage wird zunächst in das Arbeitsdiagramm die gemessene Summenhäufigkeitskurve der Laborprüfkörper eingetragen. Ausgehend von 25 N/mm² Biegebruchspannung und der gemessenen Summenhäufigkeitskurve ergibt sich zunächst Schnittpunkt 1 mit einer Bruchwahrscheinlichkeit von etwa 0,07% (Ordinatenmaßstab, Punkt 2). Parallel zu der eingezeichneten, nächstliegenden W_n -Kurve findet man nun Schnittpunkt 3 mit der 100mal so großen Fläche ($n = 10^2$). Von diesem Schnittpunkt aus geht man parallel zur Abszisse nach rechts und kann sofort auf der Ordinate (Punkt 4) ablesen, daß die Bruchwahrscheinlichkeit der 100mal so großen Fläche bei einer Biegezugspannung von 25 N/mm² etwa 6% betragen wird.

Ebenso läßt sich an Hand von Bild 8 folgende Frage beantworten:

Welche Verschiebung der mittleren Biegebruchspannung ($\bar{\sigma}$) ist zu erwarten, wenn die zugbeanspruchte Fläche in der Praxis 100mal größer ist als die des Laborprüfkörpers?

Die mittlere Biegebruchspannung (Schnittpunkt 5) des

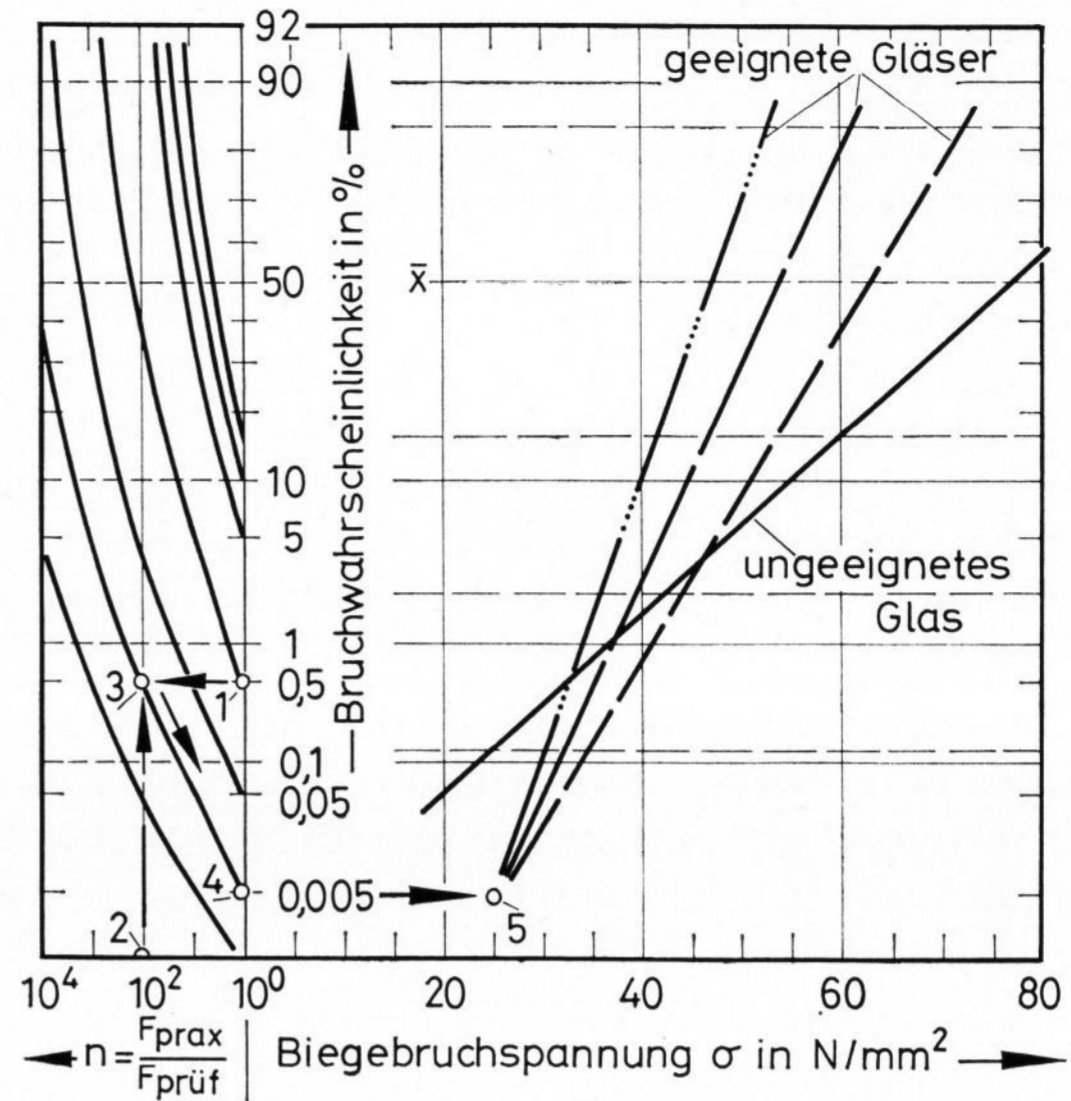


Bild 9. Auswahl eines Glases unter Berücksichtigung der Flächenabhängigkeit der Festigkeit unter vorgegebener zulässiger Bruchwahrscheinlichkeit und auftretender Zugspannung ($\hat{=}$ Biegebruchspannung).

Laborprüfkörpers beträgt etwa 42 N/mm². Als Schnittpunkt der 100mal so großen ($n = 10^2$) Fläche mit $\bar{\sigma}$ ergibt sich Punkt 6. Von Punkt 6 aus geht man parallel zu der nächstliegenden W_n -Kurve auf den Wert $n = 10^0$ des Ordinatenmaßstabes; es ergibt sich Punkt 7. Von Punkt 7 aus geht man dann parallel zur Abszisse bis zum Schnittpunkt 8 mit der eingezeichneten Summenhäufigkeitskurve. Dieser Schnittpunkt 8 ist der zu erwartende Mittelwert $\bar{\sigma}$ der 100mal so großen Fläche. Somit erniedrigt sich bei 100mal größerer Fläche der Mittelwert von etwa 42 auf etwa 29 N/mm².

Bei dieser Darstellungsweise der Flächenabhängigkeit der Festigkeit ist auch eindeutig zu erkennen (vergleiche insbesondere die gestrichelten Kurven I und II), daß die Flächenabhängigkeit ihrerseits eine Funktion des Verletzungszustandes ist. Je stärker die Verletzungen sind, um so geringer ist die mittlere Festigkeit und um so steiler verläuft die Summenhäufigkeitskurve (I); um so geringer ist dann aber die Verschiebung der Festigkeit bei größer werdender Fläche (z. B. $\bar{\sigma}$ von Punkt 9 nach 8 bei 100mal größerer Fläche). Ist andererseits die Oberfläche wenig verletzt (z. B. im Anlieferungszustand), so ist die Flächenabhängigkeit sehr groß (Kurve II, z. B. $\bar{\sigma}$ von Punkt 10 nach 8, ebenfalls bei gleichem Flächenverhältnis von $n = 10^2$).

Eine andere Fragestellung ist in Bild 9 dargestellt:

Wie groß muß bei einer für einen Glasartikel im praktischen Einsatz zugelassenen Bruchwahrscheinlichkeit von 0,5% die Biegebruchspannung des Laborprüfkörpers sein, wenn in der Praxis die zugbelastete Fläche dieses Artikels 100mal größer als die des Laborprüfkörpers ist und die auftretende Spannung 25 N/mm² beträgt?

Aus der zugelassenen Bruchwahrscheinlichkeit 0,5% (Punkt 1) und der gegenüber dem Laborprüfkörper 100mal größeren Fläche (Punkt 2) ergibt sich der Schnittpunkt 3. Von diesem Punkt 3 aus, entlang der nächstliegenden W_n -Kurve findet sich auf der $n = 10^0$ -Ordinate die für die 100mal kleinere Fläche des entsprechenden Laborprüfkörpers zulässige Bruchwahrscheinlichkeit von etwa 0,005% (Punkt 4). Als Schnitt-

punkt der Bruchwahrscheinlichkeit 0,005% und der auftretenden Spannung ($\hat{=}$ Biegebruchspannung) 25 N/mm² ergibt sich Punkt 5.

Die Antwort auf die gestellte Frage lautet dann, daß für den vorliegenden Fall all die Gläser geeignet sind, deren Summenhäufigkeitskurven (der Laborprüfkörper) die Linie der Bruchwahrscheinlichkeit 0,005% oberhalb einer Biegebruchspannung von 25 N/mm² schneiden.

Glaserzeugnisse, deren Summenhäufigkeitskurven die Linie der Bruchwahrscheinlichkeit 0,005% unterhalb von 25 N/mm² schneiden, sind ungeeignet, auch, wenn z. B., wie in Bild 9 dargestellt, die mittleren Festigkeiten (\bar{x}) wesentlich höher liegen als die der erstgenannten „geeigneten“ Gläser.

Auf diese Art und Weise läßt sich mit dem vorläufigen Arbeitsdiagramm eine ganze Reihe ähnlicher Fragestellungen zur Flächenabhängigkeit beantworten und auch anschaulich darstellen. Das Diagramm ermöglicht es somit, recht einfach und sicherer als bisher die technische Festigkeit größerer Glasgegenstände aus Laborergebnissen abzuschätzen.

2.3. Zeitabhängigkeit der Festigkeit

Wie in Abschnitt 1. erwähnt, ist im Prinzip die Zeitabhängigkeit der Festigkeit des Glases bekannt, und in zahlreichen Veröffentlichungen sind grafische Darstellungen über die Veränderung der Festigkeit mit der Dauer der anliegenden Belastung zu finden. Diese Angaben erfassen jedoch nur Glaserzeugnisse in Anlieferungsqualität, ohne definierte Angabe des Verletzungszustandes der Oberfläche. Nach bisher vorliegenden Teilergebnissen gehen jedoch — wie leicht zu verstehen ist — in diese Zeitabhängigkeit sehr stark die Art und der Anteil von Oberflächenverletzungen ein und somit die Verletzlichkeit der verschiedenen Gläser. Sobald diese Untersuchungen über den Einfluß unterschiedlicher Verletzungen und verschiedener Belastungsniveaus auf die Zeitabhängigkeit der Festigkeit abgeschlossen sind, wird hierüber gesondert berichtet.

Unabhängig von diesem zusätzlichen Einfluß der Verletzungen muß aber in jedem Falle bei der Abschätzung der technischen Festigkeit deren Zeitabhängigkeit (Höhe der Belastung und Belastungsdauer, summiert über die angenommene gesamte Lebensdauer des Glasgegenstandes) stets mitberücksichtigt werden. Verwendet man z. B. die in Bild 1 — für Anlieferungsqualität — angegebenen Zeitabhängigkeiten, so ergeben sich bei einer angenommenen Belastungsdauer von einem Jahr die in Bild 10 dargestellten Verschiebungen der Biegebruchspannungen für thermisch vorgespanntes und gekühltes Glas.

Dargestellt in Bild 10 sind Summenhäufigkeitskurven, die bei der Laborprüfung mit einer Belastungszeit von etwa 1 s erhalten wurden für:

- gekühltes Glas (Kurve 1),
- zwei unterschiedliche Qualitäten eines thermisch vorgespannten Glases (Kurven 2 und 3).

Nimmt man für die Praxis eine Belastungszeit von insgesamt einem Jahr an, so ist entsprechend den Angaben nach Bild 1 nur noch mit einer Festigkeitsverteilung gemäß den Kurven 1', 2' und 3' zu rechnen.

Aus dieser Darstellung sind folgende Ergebnisse zu entnehmen:

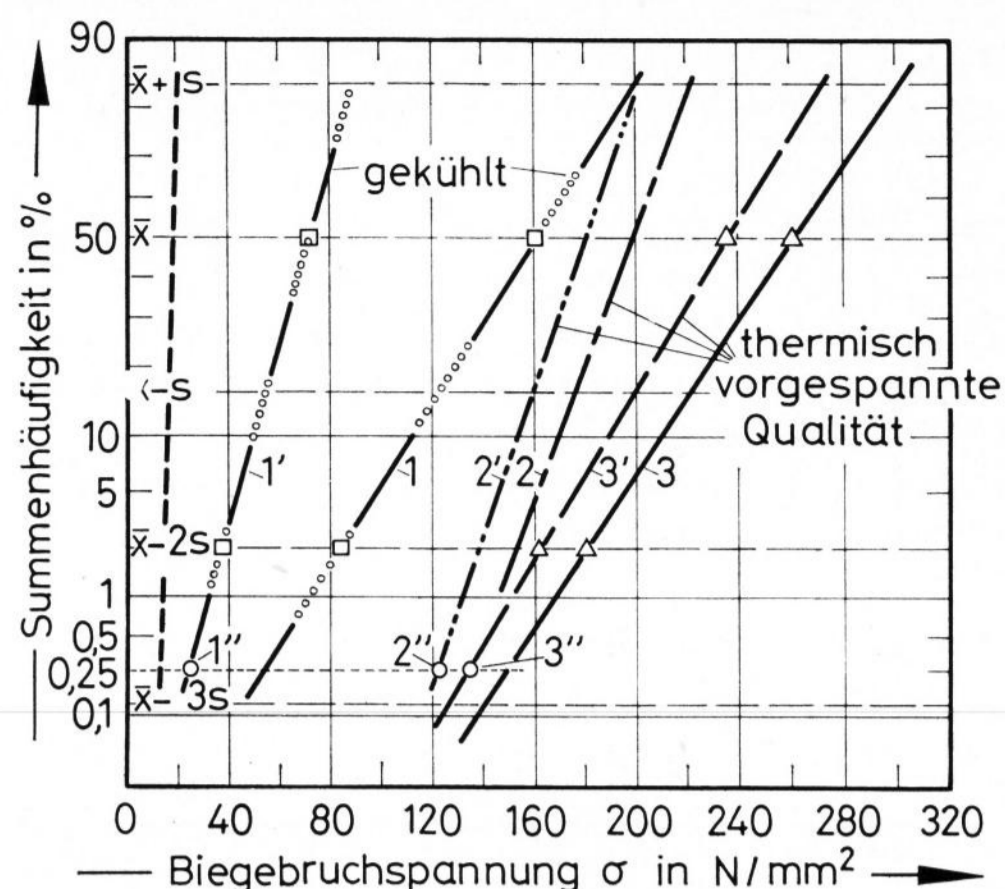


Bild 10. Veränderung der Biegebruchspannung von gekühltem und thermisch vorgespanntem Floatglas in Anlieferungsqualität und nach einer angenommenen Belastungsdauer von einem Jahr (Zeitabhängigkeit der Festigkeit).

a) Ermittelt man bei Laborprüfungen einer sehr guten Qualität eines gekühlten Floatglases (Kurve 1) eine mittlere Festigkeit (\bar{x}) von etwa 160 N/mm², so ist bei einer Belastungszeit von einem Jahr nur noch mit einer mittleren Festigkeit von etwa 70 N/mm² (Kurve 1') zu rechnen. Entsprechend verschiebt sich der ($\bar{x} - 2s$)-Wert von ungefähr 85 auf etwa 35 N/mm².

b) Bei thermisch vorgespanntem Glas und einer Dauerbelastung, die z. B. mit 100 N/mm² kleiner ist als die thermisch erzeugte Oberflächendruckspannung, reduziert sich bei einem Jahr Belastungsdauer die mittlere Festigkeit (\bar{x}) für die durch Kurve 3 angegebene Qualität von etwa 260 N/mm² lediglich auf ungefähr 235 N/mm² (Kurve 3') bzw. erniedrigt sich der ($\bar{x} - 2s$)-Wert von etwa 180 nur auf etwa 165 N/mm².

c) Der ($\bar{x} - 2s$)-Wert des thermisch vorgespannten Glases unter obiger Annahme ist selbst nach einer Belastungsdauer von einem Jahr noch genauso groß wie der \bar{x} -Wert des gekühlten Glases bei Anlieferung.

d) Betrachtet man andererseits z. B. eine zulässige Bruchwahrscheinlichkeit ($\hat{=}$ Summenhäufigkeit) von 0,25%, so kann hierfür, bei Berücksichtigung einer Belastungszeit von einem Jahr, für das gekühlte Glas lediglich eine Biegebruchspannung von etwa 25 N/mm² (Punkt 1'') angesetzt werden, während bei der durch Kurve 3' angegebenen Qualität des thermisch vorgespannten Glases bei „gleicher Sicherheit“ die bei eventueller Rechnung anzusetzende Festigkeit etwa 134 N/mm² (Punkt 3'') beträgt. Selbst bei der durch Kurve 2' angegebenen Qualität, mit relativ schlechter thermischer Vorspannung, beträgt die entsprechende Biegebruchspannung noch etwa 120 N/mm² (Punkt 2'').

Man erkennt an diesen Beispielen einerseits wiederum den Vorteil des thermisch vorgespannten Glases. Zum anderen ist aber auch die Gefahr zu erkennen, wenn bei Berechnungen der Festigkeit an Stelle des beschriebenen Verfahrens nur mit Sicherheitsfaktoren gearbeitet wird, die den unterschiedlichen Spannungszustand und dessen Einfluß auf die Zeitabhängigkeit der zu vergleichenden Gläser nicht erfassen können. Verwendet man z. B. gleiche Sicherheitsfaktoren zur Berücksichtigung einer

Tabelle 2. Verfahrensschritte zur Ermittlung der technischen Festigkeit eines Glasgegenstandes

1. Aufgabenstellung
↓
2. Ermittlung der Biegebruchspannung an repräsentativen Laborproben im Anlieferungszustand und nach definierten Verletzungen Darstellung der Ergebnisse im Summenhäufigkeitspapier
↓
3. Abschätzung der in der Praxis für diesen Glasgegenstand möglichen Verletzungen Zuordnung zu Biegebruchspannungen entsprechend Punkt 2
↓
4. Abschätzung der Belastungszeit über die gesamte Lebensdauer Der zu erwartende Festigkeitsabfall gegenüber den Punkten 2 und 3 ist zu berücksichtigen
↓
5. Berechnung/Abschätzung der zugbelasteten Fläche Berücksichtigung der Flächenabhängigkeit bei zugelassener Bruchwahrscheinlichkeit
↓
6. Aussage zur technischen Festigkeit, mit der bei diesem Glasgegenstand über die gesamte Lebensdauer gerechnet werden kann

Zeitabhängigkeit, würde entweder das gekühlte Glas zu positiv oder das thermisch vorgespannte in diesem Beispiel zu negativ beurteilt werden.

3. Vorhersage der technischen Festigkeit

Die vorstehenden Ausführungen hatten in erster Linie das Ziel aufzuzeigen, welche wesentlichen Parameter bei der Beurteilung der technischen Festigkeit von Glas unbedingt berücksichtigt werden müssen. Das beschriebene Verfahren ist abschließend nochmals in Tabelle 2 kurz zusammengefaßt. Bei Berücksichtigung dieser aufgezeigten Parameter dürfte eine relativ sichere Angabe der technischen Festigkeit möglich sein. Voraussetzung ist, daß entsprechende, möglichst allgemeingültige quantitative Angaben zu den verschiedenen Einflußgrößen vorliegen. Die Ausführungen dieser Arbeit wollen daher zusätzlich anregen, die heute noch fehlenden Unterlagen zu erarbeiten. Insbesondere wird vorgeschlagen, den Begriff einer Verletzlichkeit zu definieren und nach Möglichkeit in der Normung zu verankern.

Allen Mitarbeitern des Anwendungstechnischen Labors dankt der Autor für die exakte Durchführung der zahlreichen Messungen. Sein besonderer Dank gilt den Herren Dipl.-Phys. O. Lindig, Dr. G. Exner, Dipl.-Phys. K. Kristen und Dr. H. Höneß, die ihn bei der Bearbeitung des gesamten Problemkreises „Verletzlichkeit und technische Festigkeit von Glas“ durch intensive Diskussionen sehr unterstützt haben.

4. Literatur

- [1] Shand, E. B.: Glass engineering handbook. 2nd ed. New York: McGraw-Hill 1958. [Ref. Glastechn. Ber. 32 (1959) S. 303.]
- [2] Greil, E.: Festigkeit von Glas. GIT-Arbeitsblatt. Beil. zu: Glas-Instrum.-Techn. 8 (1964) Nr. 8.
- [3] Norm DIN 51155 (Februar 1960): Prüfung von Email; Schlagversuch. Berlin u. Köln: Beuth-Vertr. 1960.
- [4] Reitmayer, F. (Mainz): Pers. Mitt.

77R1498