Zeitschrift: Tec21
Herausgeber: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
Band: 128 (2002)
Heft: 12: Fokus Glas

Artikel: Auf Biegen und Brechen: Versuchsreihe des Instituts für Stahlbau an der EPLF (ICOM) zur Stabilität von tragenden Glaselementen
Autor: Luible, Andreas
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-80395

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

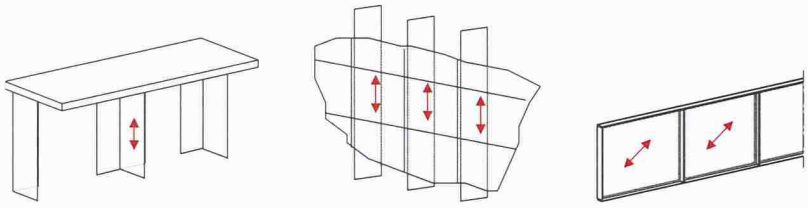
Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 25.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Andreas Luible



1
Druckbeanspruchung in tragenden Elementen aus Glas: Glasstütze, vertikale Glasträger und Schubfeld von links nach rechts

Auf Biegen und Brechen

Versuchsreihe des Instituts für Stahlbau an der EPFL (ICOM) zur Stabilität von tragenden Glaselementen

Dass Glas tragen kann, haben erste praktische Anwendungen bereits bewiesen. Es gibt aber noch wenige wissenschaftlich begründete Methoden zur Berechnung von tragenden Elementen aus dem spröden Material. Erste Versuchsreihen an der EPFL haben gezeigt, dass unter anderem Imperfektionen sowie Befestigungsarten und -materialien für die Stabilität von tragenden Glaselementen von entscheidender Bedeutung sind.

Glas hat in den letzten Jahren zu neuartigen, innovativen und dank seiner Transparenz zu architektonisch einzigartigen Tragwerken geführt. Lange Zeit hatten Glasscheiben in Fenstern lediglich eine ausfachende Funktion; immer grösser herstellbare Glasformate und Glasveredelungsmöglichkeiten erlauben es, Glasscheiben auch zur planmässigen Abtragung von Lasten einzusetzen. Die wichtigsten Veredelungsverfahren sind das thermische Vorspannen der Gläser zu Einscheiben-Sicherheitsglas (ESG) und teilvorgespanntem Glas (TVG) sowie die Weiterverarbeitung zu Verbundsicherheitsglas (VSG). Die Glasschwerter des Kultur- und Kongresszentrums in Luzern[1], die Treppenaussteifung durch Glasausfachungen von Treppenwangen[2], die Glasträger im Neubau des UEFA-Gebäudes bei Nyon[3], Fachwerkkonstruktionen aus Glas[4] und neuartige Fassaden und Überkopf-Verglasungen[5] zeigen, dass Glas als ein statisch vollwertiges Tragelement eingesetzt werden kann.

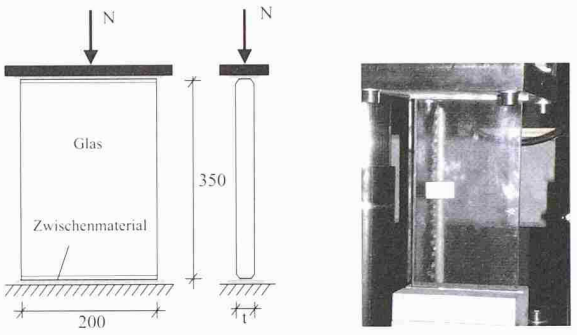
Aufgrund des spröden Materialverhaltens von Glas stellt sich die Frage, ob an derartige Konstruktionen nicht höhere Anforderungen hinsichtlich der Sicherheit gegen Versagen gestellt werden müssen, wie beispielsweise an Tragstrukturen aus Stahl oder Beton. Derzeit existieren nur wenige wissenschaftlich begründete Methoden für die Bemessung von tragenden Elementen aus Glas. Das hat dazu geführt, dass in den letzten Jahren in vielen Forschungsinstituten das Tragverhalten von Glas untersucht wird.

Zur Realisierung von Glaskonstruktionen bedarf es in der Regel immer anderer Materialien; sie haben die Aufgabe, die Glasscheiben untereinander zu fixieren und sie mit der Tragstruktur des Gebäudes zu verbinden. Der Werkstoff Stahl spielt hier eine entscheidende Rolle, da es derzeit fast nur mit filigranen Stahlprofilen oder Stahlseilen möglich ist, die durch das Glas erzielte Transparenz einer Fassade möglichst wenig zu beeinträchtigen. Diese enge Verbindung zwischen Stahl und Glas und der Mangel an Know-how erklärt, wieso es sich das Institut für Stahlbau (ICOM) der Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) zur Aufgabe gemacht hat, ein Sicherheitskonzept zu erarbeiten, das dem Material Glas gerecht wird. In diesem Rahmen wird derzeit ein Bemessungskonzept hinsichtlich der Stabilität von Glaskonstruktionen entwickelt.

Stabilität im Glasbau

In vielen der genannten Beispiele innovativer Glaskonstruktionen wird Glas nicht mehr nur als Platte beansprucht, sondern (wie am Beispiel der erwähnten Treppenwange[2]) werden Kräfte über die Glaskante in die Scheibenebene eingeleitet und weite Bereiche der Glasscheibe auf Druck beansprucht (Abb.1). Im Vergleich zur maximal aufnehmbaren Zugspannung ist die Druckfestigkeit von Glas (390–590 N/mm^2)[6] um ein Vielfaches höher. Im Hinblick darauf und auf die grosse Schlankheit der Gläser ist das bemessungsentscheidende Kriterium bei derartigen Konstruktionen nicht die maximal aufnehmbare Druckspannung, sondern das Stabilitätsversagen der Gläser.

In dem am ICOM laufenden Forschungsprojekt werden die drei elementaren Stabilitätsprobleme, nämlich Knicken, Beulen und Kippen, von Einfach- und Verbundgläsern untersucht. In einer ersten Phase wurde zunächst das Knicken von Glasscheiben experimentell betrachtet und anhand von analytischen und numerischen Berechnungsmodellen versucht, das Knickverhalten abzubilden.
Dieser Beitrag stellt die wichtigsten Versuchsergebnisse dar und zeigt den Vergleich mit den gewählten Modellen. Derzeit wird anhand der gewonnenen Versuchsdaten ein Bemessungskonzept erarbeitet. Eine Ausweitung der Arbeit auf die Stabilitätsprobleme Kippen und Beulen ist in der nächsten Phase der Arbeit geplant. Vor den eigentlichen Knickversuchen wurden in einer experimentellen Vorstudie mögliche Lasteinleitungen über die Glaskante experimentell untersucht.



2
Versuchsaufbau der Lasteinleitungsversuche

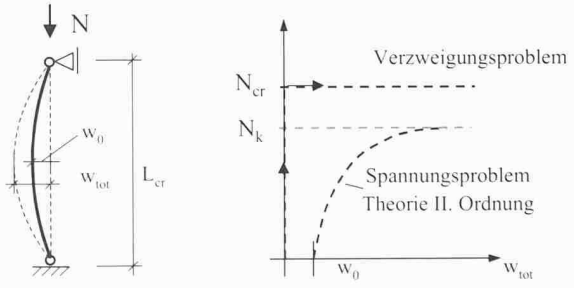
Lasteinleitungsversuche

Ziel der Lasteinleitungsversuche war es, die Eignung verschiedener Zwischenmaterialien zur Einleitung von Kräften in die Glaskante, die Druckfestigkeit des Glases und eine mögliche Lasteinleitungskonfiguration für alle weiteren geplanten Versuche zu untersuchen.

Versuchsbeschreibung

Bei den Versuchen handelte es sich um Kantendruckversuche an stehenden Floatgläsern mit Glasstärken von 8 und 10 mm in thermisch vorgespanntem Glas (TVG), Einfachglas (ESG) und Verbund-Sicherheitsglas (VSG, 8/1,52/8 mm und 10/1,52/10 mm). Die Kantenlänge der Prüfkörper betrug 200 mm × 350 mm, was dem kleinsten thermisch vorspannbaren Glasformat entspricht (Abb. 2). Die Glaskanten waren rodiert und mit einer Fase versehen. Bei den geprüften Zwischenmaterialien kamen im Fassadenbau verwendete Materialien (Plastikklotzung, PVC, Neopren) sowie Aluminium ($\sigma_{0,2} = 105\,N/mm^2$) und Stahl (FE E 235) mit unterschiedlichen Abmessungen (Tab. 1) zum Einsatz. Gemessen bzw. beobachtet wurde die Kraft N, die Verformung in Kraftrichtung sowie der Ort des Primärrisses im Glas.

3
Plastische Verformung der Zwischenmaterialien: links der Stahl aus Versuch F, rechts das Aluminium aus Versuch E



4
Verzweigungsproblem – Spannungsproblem

Typ	Anordnung des Zwischenmaterials	Material	Stärke	N_{max}	σ_{mittl}
A	220	Aluminium	5 mm	276 kN	138 N/mm²
B	180	Aluminium	5 mm	267 kN	141 N/mm²
C	50 80 50	Aluminium	5 mm	208 kN	208 N/mm²
D	20 120 20	Aluminium	5 mm	159 kN	398 N/mm²
E	30	Aluminium	5 mm	166 kN	553 N/mm²
F	30	Stahl	5 mm	184 kN	613 N/mm²

Tab. 1
Ergebnisse der Versuche zur unterschiedlichen Lasteinleitung in thermisch vorgespanntem Glas (TVG) von 10 mm Dicke mit den Zwischenmaterialien Aluminium und Stahl

Versuchsergebnisse

Es zeigte sich bei den Lasteinleitungsgsversuchen der Einfachgläser, dass Materialien wie die Plastikklotzung, PVC und Neopren ungeeignet sind, planmässig hohe Kräfte über die Glaskante einzuleiten. Sowohl die Plastikklotzung als auch das Neopren wurden von der Glaskante schon bei geringen Belastungen durchtrennt, und es kam zu einem Kontakt zwischen der Auflagerkonstruktion und der Glaskante. Die PVC-Zwischenschicht hielt den Kräften bis zum Ausknicken der Gläser stand. Bei Anhalten der Prüfmaschine konnte jedoch ein starker Lastabfall festgestellt werden, was auf Kriechverformungen im PVC schliessen lässt.

Die Versuche mit den Zwischenmaterialien Aluminium und Stahl zeigten die besonders hohe Druckfestigkeit von Glas. Alle geprüften Gläser sind erst nach dem Ausknicken zu Bruch gegangen. In Tabelle 1 sind die Versuchsergebnisse für TVG 10 mm dargestellt.

Der Primärriss lag entweder in der Biegezugzone (Typ A – C) oder im Bereich der Lasteinleitung (Typ D – F). Die Brüche im Bereich der Lasteinleitung traten jedoch erst ein, nachdem sich aufgrund der grossen Biegeverformung die Glaskante im Auflagerbereich verdrehte und es somit zu einer lokalen Spannungskonzentration kam. Bei Versuchen vom Typ A kam es schon bei Versuchsbeginn zu örtlichen Abplatzungen der Ecken. Alle Zwischenmaterialien zeigten plastische Verformungen, was darauf hindeutet, dass die Druckspannungen im Glas höher als die Fliessgrenze der Zwischenmaterialien waren (Abb. 3).

Alle gemessenen Druckkräfte N_{max} (Tab. 1) waren höher als die kritische Euler-Knicklast $N_{cr} = 94$ kN eines entsprechenden beidseitig gelenkig gelagerten Druckstabes. Der Grund dafür ist, dass die Glaskante im Verhältnis zur Höhe der Gläser relativ breit ist und somit je nach Anordnung des Zwischenmaterials eine teilweise Einspannwirkung erzeugt wurde. Tabelle 1 zeigt die aus den Druckkräften zurückgerechnete mittlere Kantendruckspannung σ_{mittl} während des Versuchs.

Die Lasteinleitungsversuche an den VSG-Scheiben zeigten das gleiche Verhalten wie die Einfachgläser. Alle Gläser sind erst nach dem Ausknicken zu Bruch gegangen, wobei der Primärriss unabhängig vom Versuchstyp immer im Bereich der Lasteinleitung zu finden war.

Verbundgläser aus thermisch vorgespanntem Glas können erst nach dem Vorspannen laminiert werden. Da eine nachträgliche mechanische Bearbeitung vorgespannter Gläser nicht mehr möglich ist, kann eine absolut ebene Kante somit nicht hergestellt werden. Die gemessenen Kantensprünge der Prüfkörper lagen bei bis zu 2 mm. Diese Unebenheit muss in der Praxis durch das Zwischenmaterial ausgeglichen werden, um beide Gläser möglichst gleichmässig zu belasten und ausserplanmässige Exzentrizitätsmomente zu vermeiden. In den Lasteinleitungsversuchen wurde bewusst versucht, diese Unebenheit nicht auszugleichen. Die Art der Zwischenmaterialien entsprach bei allen Versuchen dem Typ C (Tab. 1). Die Ergebnisse für VSG aus 2 × 8 mm TVG in Tabelle 2 und der Vergleich mit zwei Einzelscheiben ohne Verbund zeigt, dass die Verbundfolie fast keinen Einfluss auf das Tragverhalten hat. Ein Vergleich mit der kritischen Eulerknicklast N_{cr} für zwei TVG-8-mm-Gläser ohne Verbund lässt auch hier eine Einspannwirkung erkennen.

Die Unebenheit der Kanten hatte keinen Einfluss auf die maximale Bruchlast, da sich die beiden Gläser gegeneinander so weit verschoben hatten, bis die Kantensprünge nahezu ausgeglichen waren. Zum Glasbruch kam es erst, nachdem beide Gläser ausgeknickt waren und aufgrund der Rotation der Glaskante auf der Zwischenschicht die Bruchspannung an der Kante erreicht wurde. Für die im folgenden Kapitel beschriebenen Knickversuche wurden Kantenunebenheiten mit dem Hochleistungs-Zweikomponentenkleber Araldit ausgeglichen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden: Die Hauptversagensursache in allen Versuchen war Knickversagen. Die Versuche bestätigten die hohe Druckfestigkeit von Glas[6]. Die Lasteinleitung sollte in einem Abstand von mindestens 10 mm von der Ecke angeordnet sein. Auf dem Gebiet der Lasteinleitung in Glaskanten sind weitere Forschungsarbeiten notwendig.

Stabilität

Unter Stabilitätsversagen nach der linear elastischen Stabilitätstheorie versteht man das plötzliche Versagen einer Tragstruktur aufgrund einer Überschreitung der kritischen Last bzw. der Verzweigungslast. Schon eine minimale Auslenkung oder Störung des perfekten Systems reicht aus, um das Tragsystem versagen zu lassen. Die kritische Last kann deshalb in der Realität nicht erreicht werden, da jedes Bauelement Vorverformungen aufweist oder die Lasten nicht exakt in der Systemachse eingeleitet werden können. Mit zunehmender Steigerung der Last nähert sich diese – bei einer überproportionalen Zunahme der Verformungen – asymptotisch der kritischen Last an, bis die maximal vom Material aufnehmbaren Spannungen erreicht werden. In Wirklichkeit handelt es sich somit bei der zu untersuchenden Problematik um ein Spannungsproblem nach Theorie II. Ordnung (Abb. 4).

Notwendigkeit eines neuartigen Bemessungskonzepts für Glas

Es stellt sich die Frage, ob es noch nicht existierende Bemessungsmethoden gibt, die auf Glas anwendbar sind. Aktuelle im Stahlbau verwendete Bemessungsver-

	Versuch 1: VSG 2x 8 mm	Versuch 2: VSG 2x 8 mm	Versuch 3: 2x TVG 8 mm ohne Verbund
N_{max}	253 kN	246 kN	240 kN
N_{cr}	96 kN		

Tab. 2
Versuchsergebnisse der Lasteinleitung in Verbundsicherheitsglas (VSG) mit zwei je 8 mm dicken Gläsern

fahren für Stabilitätsprobleme[7,8] basieren auf den charakteristischen Eigenschaften von Stahl. Im Folgenden soll gezeigt werden, weshalb diese nicht ohne weiteres auf Glas übertragbar sind.

1. Die *Herstellungstoleranzen* unterscheiden sich von denen des Stahlbaus. 2. *Vorverformungen* entstehen im Glas hauptsächlich beim thermischen Vorspannen. Sie unterscheiden sich deshalb von denen des Stahlbaus. 3. Glas besitzt ein bis zum Bruch *idealelastisches Materialverhalten* und hat keine Fliessgrenze wie Stahl. Eine zusätzliche Sicherheit gegen Stabilitätsversagen, die sich im Stahlbau durch eine Ausnützung der Plastifizierung und Stahlverfestigung ergibt, existiert bei Glas nicht. 4. Es kann für Glas keine absolute *Zugfestigkeit* definiert werden, da der Vorgang des Glasbruchs in Wirklichkeit ein Vorgang des Risswachstums im Glas ist. Die im Fall eines Glasbruchs ermittelte Bruchspannung ist abhängig von der Höhe der Vorspannung, von der Oberflächenschädigung, von der Grösse der zugbeanspruchten Oberfläche, von der Zugspannungsverteilung auf der Glasoberfläche, von den Umgebungsbedingungen sowie von der Einwirkungsdauer und der Lastgeschichte. Ein für Glas sinnvolles Bemessungskonzept muss deshalb auf den Grundlagen der Bruchmechanik erstellt werden. Ziel der Forschungsarbeit ist es jedoch, das aus dem Stahlbau vertraute Nachweisformat für Stabilitätsprobleme auf den Werkstoff Glas zu übertragen.

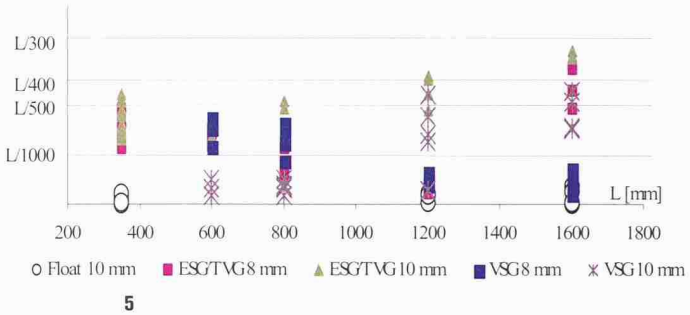
Knicken

Für die experimentelle Untersuchung der Knickproblematik wurden zunächst Knickversuche an stehenden Glasstreifen durchgeführt.

Probenmaterial

Die untersuchten Probekörper waren aus TVG und ESG mit einer Stärke von 8 mm und 10 mm bzw. VSG aus 2 × 8 mm TVG und 2 × 10 mm TVG und hatten eine Breite von 200 mm. Die Länge der Gläser lag zwischen 350 mm und 1600 mm. Die Kanten waren rodiert und mit einer Fase versehen. Vor den Versuchen wurden die Abmessungen sowie die Art und Grösse der Vorverformungen der Glasscheiben gemessen. Bei den VSG-Scheiben wurden zusätzlich die Kantensprünge gemessen. Abbildung 5 zeigt die gemessenen Vorverformungen w_0 abhängig von der Länge. Zu erkennen ist eine Zunahme der Verformung mit der Länge der Gläser und die geringe Vorverformung der nicht vorgespannten Floatgläser ($w_0 < L/2000$). Dies bestätigt, dass die Vorverformung im Glas in erster Linie durch den thermischen Vorspannprozess verursacht wird, wobei kein Unterschied zwischen TVG und ESG bzw. zwischen 8 mm und 10 mm starken Gläsern festgestellt werden konnte. Die Art der Vorverformung war in allen Fällen sinusförmig mit w_0 in Scheibenmitte.

Bei allen vorgespannten Gläsern wurde die thermisch eingeprägte Vorspannung mittels eines Differential-Stress-Refractometers (DSR-Gerät) bestimmt. Tabelle 3 zeigt den Mittelwert und das 5-%-Fraktil der gemessenen Werte. Zu erkennen ist der grosse Unterschied zwischen TVG 8 mm und TVG 10 mm. Die Vorspannung der TVG 8 mm sollte 57 N/mm² nicht überschreiten[9]. Der Vorspanngrad von TVG in VSG darf nicht zu hoch sein, weil im Fall eines Glasbruchs durch die damit verbundenen kleineren Glaskrümel die Resttragfähigkeits-Eigenschaften nicht mehr gewährleistet werden können.



5

Gemessene Vorverformung w_0 der Gläser

	TVG 8 mm	TVG 10 mm	ESG 8 mm	ESG 10 mm
Mittelwert	62.5	47.5	105.1	100.7
5% Fraktil	52.4	41.9	95.6	92.6

Tab. 3

An 84 Gläsern gemessene Vorspannung, Mittelwerte und 5-%-Fraktil

Versuchsaufbau

Bei dem Versuchsaufbau wurde der Knickfall eines an beiden Enden ideal gelenkig gelagerten Druckstabes gewählt. Hierfür wurden zwei Stahllager gefertigt, die mittels Kugellager gelenkig und fast reibungsfrei mit der Unterkonstruktion verbunden sind (Abb. 6). Die Position der beiden Stahllager ist derart festgelegt, dass die Rotationsachse exakt auf der Glaskante verläuft und damit eine richtungstreue Last in der Systemachse eingeleitet werden kann. Die Knicklänge entspricht somit der Länge der Glasscheiben. Die Glasscheiben werden seitlich durch Schrauben gehalten und können mit einer Präzision von bis zu 0,1 mm zentriert werden. Die Lasteinleitung erfolgte bei den Einfachgläsern über eine Zwischenschicht aus Aluminium (Typ B, Tab. 1).

Bei den Verbundgläsern wurde das Aluminiumplättchen mit Araldit-Zweikomponentenkleber befestigt, um eine gleichmässige Lasteinleitung auch bei Kantenunebenheiten zu garantieren.
Während der Versuche wurde die Gesamtdruckkraft mit 4 Kraftmessdosen gemessen, ebenso die vertikale Verschiebung der beiden Lager und die horizontale Verschiebung in Scheibenmitte mittels induktiver Wegaufnehmer. Bei den Knickversuchen an VSG-Scheiben wurde ausserdem die Umgebungstemperatur gemessen.

Versuchsdurchführung

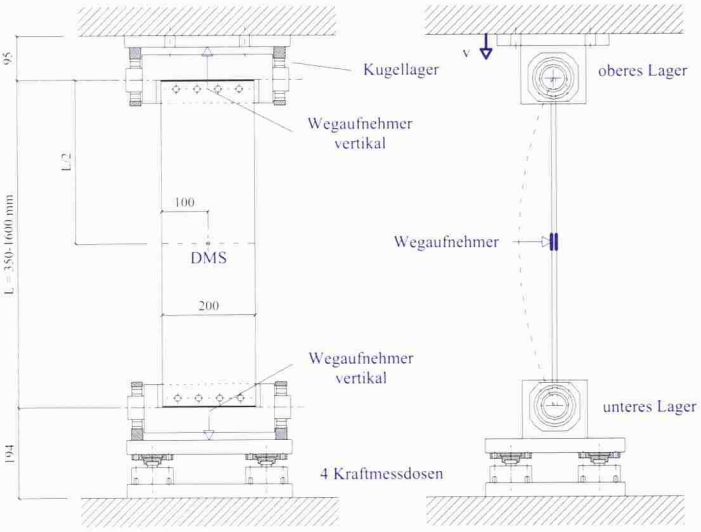
Die Versuchsreihe wurde im November 2001 in der Prüfhalle des Instituts für Stahlbau (ICOM) an der EPF Lausanne durchgeführt. Bis Ende Januar 2002 erfolgten etwa 70 Knickversuche (Abb. 7). Alle bisherigen Versuche erfolgten weg- und kraftgesteuert, wobei bei den VSG-Scheiben die Belastungsgeschwindigkeit und die Raumtemperatur variiert wurden. So war es möglich, den zeit- und temperaturabhängigen Einfluss der Verbundfolie auf das Knickverhalten zu untersuchen. Alle Versuchskörper wurden bis zum Glasbruch belastet.

Einfachglas

Beim Einfachglas zeigten die Versuche eine sehr gute Übereinstimmung mit der analytischen Lösung, die sich aus der Differentialgleichung für einen beidseitig gelenkig gelagerten elastischen Druckstab ergibt.

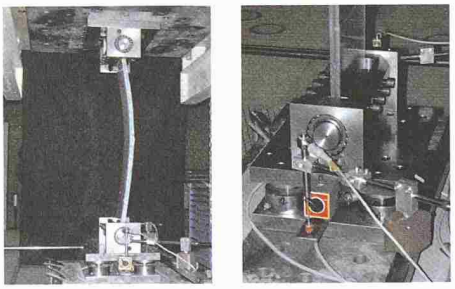
$$EIw(x)^{I}+N\left[w_0 \sin \frac{\pi x}{L} + e + w(x)\right]=0$$

Abbildung 8 zeigt die Last-Verformungskurve eines TVG 8 mm mit einer Knicklänge von 800 mm. Zu sehen sind eine Gegenüberstellung von Versuch und analytischer Lösung sowie die asymptotische Annäherung an die idealelastische kritische Last N_{cr}. Die gemessene Glasstärke lag bei 7,85 mm, die gemessene Vorverformung w_0 in Glasmitte lag bei bei 0,55 mm. Die gute Qualität des Versuchstands lässt sich durch Ermittlung der Vorverformung aus den Versuchsdaten mittels eines Southwell-Plots[10], mit dem sich ein Wert von 0,50 mm für w_0 ergab, beweisen.



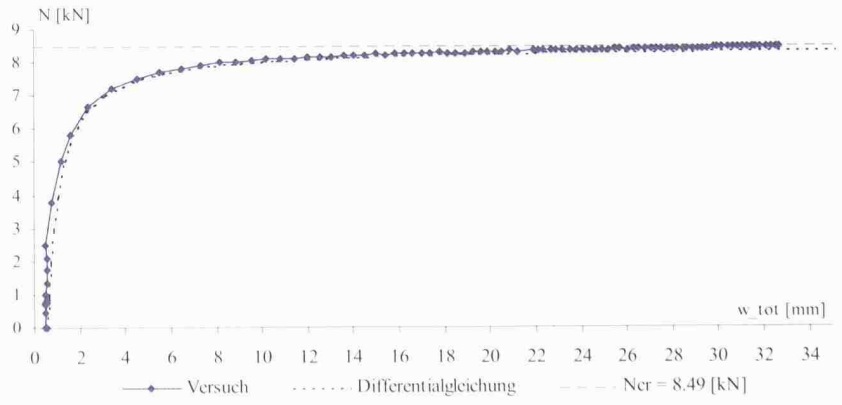
6

Schnitt (links) und Seitenansicht (rechts) des Versuchsstandes für die Knickversuche



7

Auf Biegen und Brechen belastetes Glas: Versuchsstand der Knickversuche mit Verbund-Sicherheitsglas aus 2 × 8 mm dickem, teilvorgespanntem Glas (TVG) in einer Länge von 800 mm. Links die ausgeknickte Scheibe nach dem Glasbruch, rechts das Detail des unteren Auflagers



8

Last-Verformungskurve des Einfachglases, Vergleich von Versuchsergebnissen und analytischer Lösung. Die beiden Kurven entsprechen sich weitgehend

Verbundsicherheitsglas (VSG)

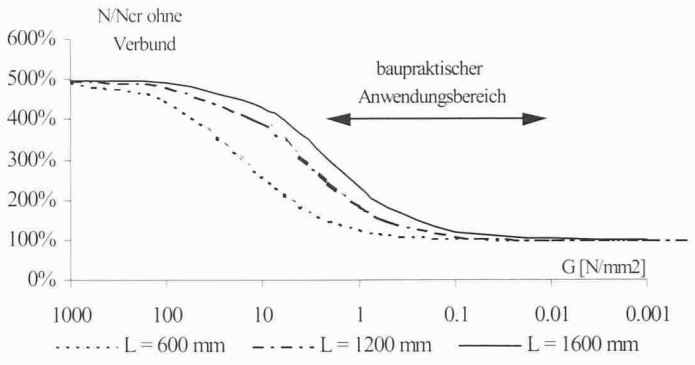
Verbundsicherheitsglas besteht aus mindestens zwei Glasscheiben, die mit einer Zwischenschicht aus Polyvinylbutyral (PVB) verbunden werden. VSG-Scheiben, vor allem aus TVG, verfügen über eine gewisse Resttragfähigkeit auch nach Glasbruch und sind deshalb im konstruktiven Glasbau interessant. Im ungebrochenen Zustand entsteht durch die PVB-Folie ein gewisser Schubverbund zwischen den Glasscheiben, wodurch sich die Tragfähigkeit verbessert. Polyvinylbutyral ist ein teilkristalliner Thermoplast, dessen mechanische Eigenschaften von der Dauer der Belastung und der Temperatur abhängt. Bei einer kurzzeitigen Belastung (Wind, Anprall) und tiefen Temperaturen besitzt die Folie einen relativ hohen Schubmodul ($G > 2\ N/mm^2$), wohingegen bei hohen Temperaturen (Fassade im Sommer) und lang andauernder Belastung (Eigengewicht) aufgrund des geringen Schubmoduls ($G < 0{,}8\ N/mm^2$), fast keine Schubkräfte mehr übertragen werden können. Aus diesem Grund darf derzeit ein günstig wirkender Schubverbund bei VSG generell nicht angerechnet werden. Neuere Bemessungsvorschläge[11,12], die auf Untersuchungen des Schubtragverhaltens von PVB basieren[13,14,15], sehen allerdings eine Berücksichtigung einer günstig wirkenden PVB-Folie für kurzzeitige Belastungen (Wind, Anprall) vor.

Zur Berücksichtigung der PVB-Schicht bei der Berechnung von VSG existieren zwei Ansätze: 1. Die PVB-Folie wird als eine während der gesamten Lastdauer elastische Zwischenschicht angenommen. Der elastische Schubmodul wird anhand der Temperatur und der angenommenen Lastdauer aus Tabellenwerken oder Versuchsdaten[13] ermittelt. Die Berechnung kann mit einfachen analytischen Berechnungsmodellen (Sandwichtheorie) durchgeführt werden. Die PVB-Folie wird ihrem Materialverhalten entsprechend viskoelastisch modelliert[15,16], womit die Zeit- und die Temperaturabhängigkeit des Schubmoduls genauer abgebildet werden können. Im Berechnungsmodell kann die PVB-Folie beispielsweise durch rheologische Feder-Dämpfer-Modelle (generalisierte Maxwell-Modelle) oder durch den Einsatz von linear viskoelastischen finiten Elementen[17] abgebildet werden.

Der erste Ansatz eignet sich für eine praktische Anwendung im Sinne einer Handrechnung. Für eine exakte Abbildung des Lastverformungsverhaltens der Versuche der VSG-Scheiben ist dieser jedoch nicht befriedigend, da nur der Schubmodul zu einem bestimmten Zeitpunkt bei einer bestimmten Temperatur festgelegt werden kann. Für die numerische Berechnung der VSG-Scheiben wurde deshalb der zweite viskoelastische Ansatz gewählt, wobei die PVB-Schicht mit linear viskoelastischen Elementen, wie in Anmerkung 16 vorgeschlagen, modelliert wurde.

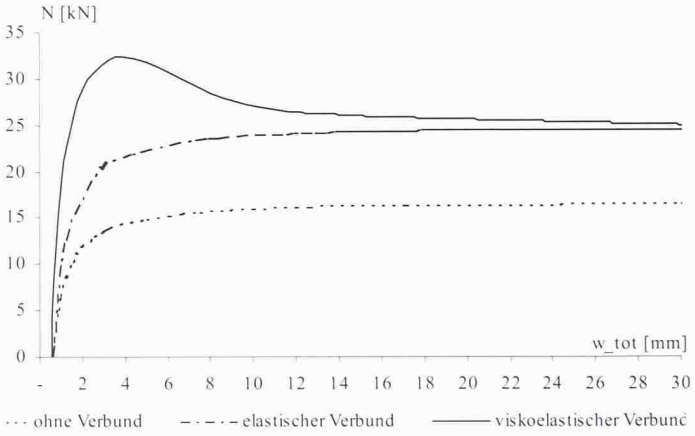
Berechnungsmodelle VSG

Das Knickverhalten von Verbund-Sicherheitsglas wurde mittels zweier Berechnungsmodelle untersucht. Für eine erste Abschätzung der Auswirkungen eines elas-



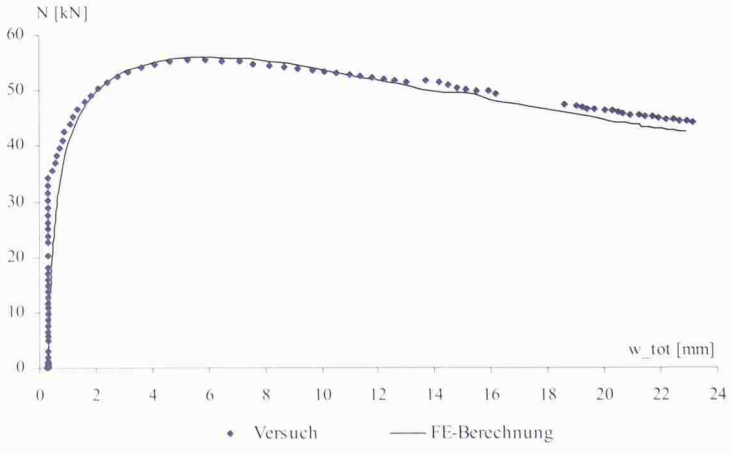
9

Einfluss der Zwischenfolien aus Polyvinylbutyrat (PVB) auf die Knicklast von Verbundsicherheitsglas aus 2 × 10-mm-Glasscheiben mit einer 1,52 mm dicken PVB-Folie



10

Lastverformungskurven: Verbundsicherheitsglas ohne Verbund, mit elastischem Verbund und mit viskoelastischem Verbund



11

Lastverformungsdiagramm eines weggesteuerten Knickversuches, Vergleich zwischen Versuch und Simulation

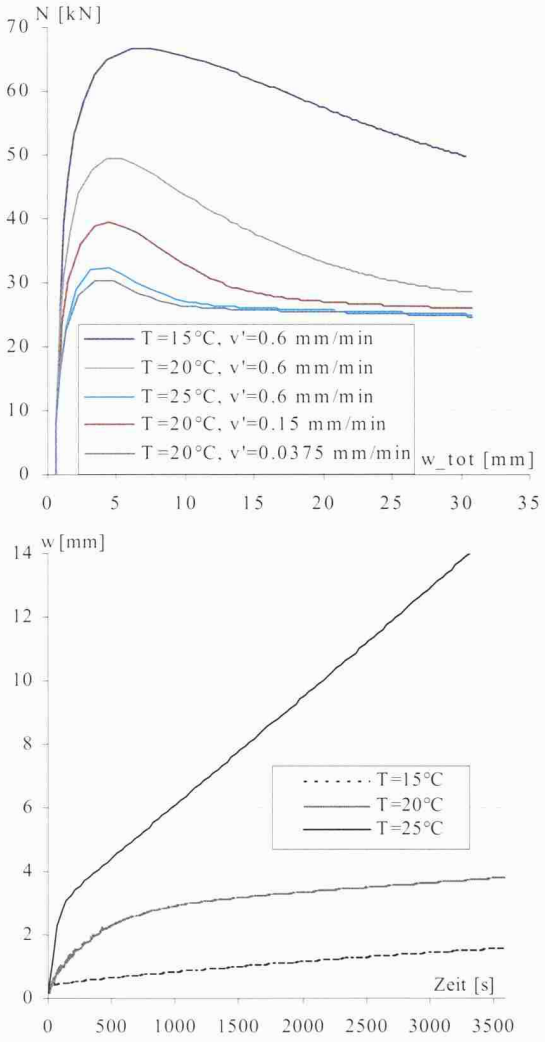
tischen Verbundes auf die Knicklast der beiden Glasscheiben genügt ein einfaches analytisches Modell, das auf der in den Sechzigerjahren im Flugzeugbau entwickelten Sandwichtheorie[18,19] basiert. Diese geht von der Differentialgleichung eines Sandwichbalkens aus, der aus zwei biegesteifen Deckschichten besteht, die ihrerseits über eine schubweiche Mittelschicht miteinander gekoppelt sind. Der elastische Schubmodul G der Mittelschicht kann zum Beispiel aus den Tabellen[13] bestimmt werden. Abbildung 9 zeigt, wie sich eine schubweiche Zwischenschicht auf die elastische Knicklast einer VSG-Scheibe für unterschiedliche Knicklängen auswirkt. Betrachtet man die im baupraktischen Anwendungsbereich realistischen Werte von PVB (grauer Bereich), so kann im günstigsten Fall für eine Knicklänge von 1600 mm eine Laststeigerung gegenüber einer Scheibe ohne Schubverbund von ca. 300 % erreicht werden. Eine Mitwirkung der PVB-Folie ist auch von der Länge der Scheiben und damit von der Systemsteifigkeit abhängig. Je geringer die Knicklänge der Scheiben ist, desto geringer ist bei gleichem Schubmodul des PVB die zu erwartende Laststeigerung. Dies erklärt den geringen Einfluss der PVB-Folie beim Ausknicken der VSG-Scheiben bei den Lasteinleitungsversuchen (Tab. 2).

Ein Sandwichmodell mit einer elastischen Zwischenschicht erlaubt es jedoch nicht, das Lastverformungsverhalten der VSG aus den Knickversuchen zu simulieren. Aus diesem Grund wurde ein numerisches Berechnungsmodell mit dem Finite-Elemente-Programm ANSYS 5.6.2[20] erstellt. Der Druckstab wird hierbei als zweidimensionales Solidmodel mit elastischen Elementen für das Glas und die Kleberschicht der Lasteinleitung und mit linear viskoelastischen Elementen für die PVB-Folie modelliert. Die Materialkennwerte der linear viskoelastischen PVB-Elemente wurden aus[15] entnommen. Ein Vergleich mit den in Anmerkung 13 dargestellten Untersuchungen zeigt eine gute Übereinstimmung der Materialkennwerte für den baupraktisch sinnvollen Temperatur- und Zeitbereich.

Die Vorverformung der Glasscheiben wird nach einer vorausgehenden Eigenwertanalyse in Form der ersten Eigenform auf das System aufgebracht. Nach dem Aufbringen der Vorverformungen erfolgt eine nichtlineare Berechnung. Das Modell lässt sowohl eine verformungsgesteuerte als auch eine kraftgesteuerte Berechnung zu.

Abbildung 10 zeigt die Lastverformungskurven der Modelle mit elastischem bzw. mit viskoelastischem Schubtragverhalten für ein VSG 8 / 1,52 / 8 (Knicklänge 800 mm, Vorverformung 0,6 mm, Temperatur 25 °C) sowie die Lastverformungskurve von zwei Glasscheiben ohne Schubverbund. Die Belastung erfolgte verformungsgesteuert mit einer konstanten Geschwindigkeit von v'=0,6 mm/min.

Zu erkennen ist die Laststeigerung durch die PVB-Folie gegenüber zwei Glasscheiben ohne schubübertragende Zwischenschicht. Die Lastverformungskurve des viskoelastischen Modells zeigt das typische Tragverhalten eines viskoelastischen Materials. Der hohe anfängliche



12

Auswirkungen von Temperaturunterschieden und Belastungsgeschwindigkeiten auf das Tragverhalten von Verbundsicherheitsglas (VSG 8/1,52/8) mit einer Länge von 800 mm; oben verformungsgesteuerte Simulation bei unterschiedlichen Temperaturen und Belastungsgeschwindigkeiten, unten: kraftgesteuerte Simulation (N=22 kN) bei unterschiedlichen Temperaturen

Schubmodul führt zunächst zu einer Laststeigerung gegenüber dem elastischem Verbund. Nach überschreiten der Maximallast kommt es zu einem raschen Lastabfall, der aufgrund des Relaxationsverhaltens der PVB-Folie mit einer starken Verformungszunahme begleitet ist. Der Endwert der Last liegt ungefähr auf dem Niveau des elastischen Modells. Dieses Verhalten konnte auch durch die Versuchsergebnisse bestätigt werden. Abbildung 11 zeigt als Beispiel das Lastverformungsdiagramm eines weggesteuerten Knickversuchs und der entsprechenden Berechnung mit dem viskoelastischen FE-Modell für ein VSG 8 / 1,52 / 8 mm mit einer Länge von 800 mm und einer Vorverformung von 0,3 mm. Der Versuch wurde bei einer Temperatur von 18,0 °C durchgeführt. Da die Verformungsgeschwindigkeit v' einen entscheidenden Einfluss auf das Tragverhalten hat und die Verformungsgeschwindigkeit der Prüfmaschine über die Versuchsdauer nicht konstant war, wurde die Verformungsgeschwindigkeit für die FE-Berechnung direkt aus den Versuchsdaten übernommen.

Die durchgeführten Versuche und Simulationsrechnungen zeigten den grossen Einfluss der Temperatur und der Belastungsgeschwindigkeit auf das Tragverhalten von VSG. Gerade bei Raumtemperaturen genügt eine Temperatursenkung von 10 °C, um das Lastmaximum zu verdoppeln (Abb. 12, links). Gleiche Auswirkungen hat eine Erhöhung der Belastungsgeschwindigkeit. Im Diagramm der Abbildung 12 ist rechts für eine konstante Belastung der Verformungsverlauf über eine Belastungsdauer von 3600 s für unterschiedliche Temperaturen dargestellt. Zu erkennen ist die wesentlich stärkere Verformungszunahme bei höheren Temperaturen. Ein Schubverbund durch die PVB-Folie eines VSG kann die Knicklast gegenüber einer Berechnung ohne Verbund somit erhöhen. Die Erhöhung der Knicklast hängt aber in grossem Masse von der Temperatur und der Dauer der Belastung ab, weshalb eine Anrechnung des Schubverbunds nur für kurzzeitige Lasten wie Wind oder Anprall sinnvoll scheint.

Weitere Arbeit

Derzeit werden die Versuchsdaten aller Knickversuche systematisch ausgewertet und mit den Ergebnissen der Berechnungsmodelle verglichen. Auf Basis dieser Arbeit wird ein Bemessungs- und Sicherheitskonzept für Knicken von Glasscheiben, unter Berücksichtigung der speziell für Glas zu beachtenden Einflussparameter, erarbeitet. Im weiteren Teil der Forschungsarbeit wird das Beul- und Kippverhalten von Glasscheiben experimentell und analytisch untersucht und das Bemessungsverfahren entsprechend erweitert.

Andreas Luible, dipl. Ing. TU München, Assistent am Institut für Stahlbau (ICOM) an der EPF Lausanne, Andreas.Luible@epfl.ch.
Michel Crisinel, dipl. Ing. EPFL, Projektleiter am ICOM, Michel.Crisinel@epfl.ch.

Anmerkungen

1 Kultur- und Kongresszentrum Luzern KKL, Fassade 1/99, Schweizerische Zentralstelle für Fenster- und Fassadenbau SZFF, Zürich.
2 Hess, R., Tragendes Glas, Stahlbau 67 (1998), Heft 4, Ernst & Sohn, Berlin.
3 Vögtlin, R., Une enveloppe et ses détails innovateurs, Fassade 4/99, Schweizerische Zentralstelle für Fenster- und Fassadenbau SZFF, Zürich.
4 Knaack, U., Fachwerke aus Glas, Fassade 3/01, Schweizerische Zentralstelle für Fenster- und Fassadenbau SZFF, Zürich.
5 Laufs, W., Luible, A., Voruntersuchung zur Typisierung von Gebäudehüllen aus Glas, Ecole polytechnique fédérale, Lausanne, 1999 (Rapport ICOM 403).
6 Fink, A., Ein Beitrag zum Einsatz von Floatglas als dauerhaft tragender Konstruktionswerkstoff im Bauwesen, Dissertation, TU Darmstadt, 1999.
7 SIA 161, Construction métallique, SIA Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zürich, 1990.
8 Eurocode 3, Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten, Teil 1-1 Allgemeine Bemessungsregeln für den Hochbau, CEN, Europ. Komitee für Normung, ENV 1993-1-1:1992.
9 Sedlacek, G., Blank, K., Laufs, W., Güsgen, J., Glas im Konstruktiven Ingenieurbau, Bauingenieur-Praxis, Verlag Ernst & Sohn, 1999.
10 Timoshenko, S., P., Gere, J., M., Theory of elastic Stability, McGraw-Hill, 1961.
11 Empfehlung für die Bemessung und Konstruktion von Glas im Bauwesen, Der Prüfingenieur, April 2001.
12 ASTM Standard E 1300-97, Standard Practice for Determining Load Resistance of Glass in Buildings, ASTM, April 1997.
13 Sobek, W., Kutterer, M., Messmer, R., Untersuchungen zum Schubverbund bei Verbundsicherheitsglas. Ermittlung des zeit- und temperaturabhängigen Schubmoduls von PVB, Bauingenieur 75, 2000.
14 Bucak, Ö., Schuler, C., Meyer, A., Beyle, H.-P., Fried, A., Zur Berücksichtigung der Verbundwirkung bei VSG mit PVB-Zwischenschichten, VDI-Berichte Nr. 1527, äBauen mit Glas, 2000.
15 Duser van , A., Jagota, A., Bennison, S., J., Analysis of Glass/Polyvinyl Butyral Laminates Subjected to Uniform Pressure, Journal of Engineering Mechanics, Vol. 125, No. 4, April, 1999.
16 Bohmann, D., Ein numerisches Verfahren zur Berechnung von Verbundglasscheiben, Dissertation, Lehrstuhl für Stahlbau, RWTH-Aachen, Shaker-Verlag, 1999.
17 Ferry, J., D., Viscoelastic properties of polymers, 3rd Ed., Wiley, New York, 1980.
18 Plantema, F., J., Sandwich Construction. The bending and Buckling of Sandwich Beams, Plates and Shells, John Wiley & Sons, New York, 1966.
19 Stamm, K., Witte, H., Sandwichkonstruktion, Springer Verlag, Wien, New York, 1974.
20 ANSYS 5.6.2, ANSYS Inc. 1994.

Bucak, Ö., Glas im Konstruktiven Ingenieurbau, Stahlbau-Kalender 1999, Verlag Ernst & Sohn, 1999.
Schittich, C., Staib, G., Balkow, D., Schuler, M., Sobek, W., Glasbau-Atlas, Birkhäuser Verlag 1998.
Schittich, C., Staib, G., Balkow, D., Schuler, M., Sobek, W., Construire en verre, Presses polytechniques et universitaires romandes, 2001.

Der Verfasser dankt dem SFN für die finanzielle Unterstützung der Forschungsarbeit und der Firma Verres Industriels Moutier für die gute Zusammenarbeit und die grosszügige Bereitstellung der Prüfkörper.