

Der Einsatz von Verbundglasrohren als konstruktiver Werkstoff erschließt im Bauwesen völlig neue ästhetische und statische Möglichkeiten. Bauprojekte, deren Tragkonstruktionen aus Festigkeitsgründen bisher nur mit den Werkstoffen Stahl und Beton ausgeführt werden konnten, sind nun in Teilbereichen auch im transparenten Werkstoff Verbundglasrohr denkbar. Darüber wurde bereits in der glaswelt 7/2003, Seite 28, ausführlich berichtet

Glasrohr als konstruktives Element im Bauwesen (III):

Stärker als Stahl

Herbert Jung



Bild 1: Fassade des Tower Place, London: hier kamen tragende Glasrohre erstmals zum Einsatz

Festigkeit von Verbundglasrohren

Die wichtigste Größe für den Einsatz von Verbundglasrohren in der Architektur und im Bauwesen ist die Festigkeit. Dabei ist zwischen der reinen Materialfestigkeit unter der Beanspruchungslast und der Reststandfestigkeit im Falle einer Beschädigung des Verbundglasrohres zu unterscheiden.

Die Materialfestigkeit ist von der Beanspruchungsart abhängig; unter Drucklast ist sie ungefähr eine Zehnerpotenz größer als im Fall von Zug- und Biegezugbeanspruchung. Bei Dauerbeanspruchung beträgt der Wert für die maximal zulässige Zug- und Biegezugspannung σ_z (zul.) = 7 N/mm², für die entsprechende Druckspannung σ_D (zul.) = 60 N/mm². Für beide Werte sind jedoch erhebliche Sicherheitszuschläge einbezogen. Bei der Auslegungsberechnung von Verbundglasrohren werden grundsätzlich nur die geometrischen Daten des durchgehenden inneren Tragrohres herangezogen. Die äußeren Schutzschalen bleiben dabei unberücksichtigt, da die Stützwirkung der Schalen bisher noch nicht untersucht wurde.

Allein schon wegen dem krassen Unterschied zwischen zulässiger Zug- und Druckbeanspruchbarkeit von Glasrohren ist bei der konstruktiven Auslegung von Bauelementen von Anfang an darauf zu achten, daß die Rohre im vorgesehenen Einsatzfall nur mit Druckspannungen beaufschlagt werden. Konstruktiv gelöst wird dieses Problem dadurch, daß im Zentrum eines Verbundglasrohres ein Zugstab oder Zugseil eingebracht werden, welche wiederum zentrisch durch die Basisplatten der beiden Rohrendenteile geführt und mit einem Hydraulikzylinder auf die gewünschte Vorspannung gebracht werden. Durch diese Zugspannung wird das Tragrohr einer permanenten Druckspannung ausgesetzt. Somit wird aber auch ermöglicht,

Zugkräfte über das Glasrohrsystem zu übertragen, ohne das Glasrohr selbst Zugspannungen auszusetzen. Die Vorspannkraft im Seil sollte ca. 50 % höher liegen als die im Einsatzfall zu übertragenden Zugkräfte, um genügend Sicherheit gegen Setzbeträge im

Dauereinsatz zu erhalten. Das Auftreten von unerwünschten Biegebeanspruchungen im Verbundglasrohr wird durch die Kräfteinleitung über einen gelenkigen Anschluß (z. B. Kugelgelenk) im Rohrendenteile ausgeschlossen.

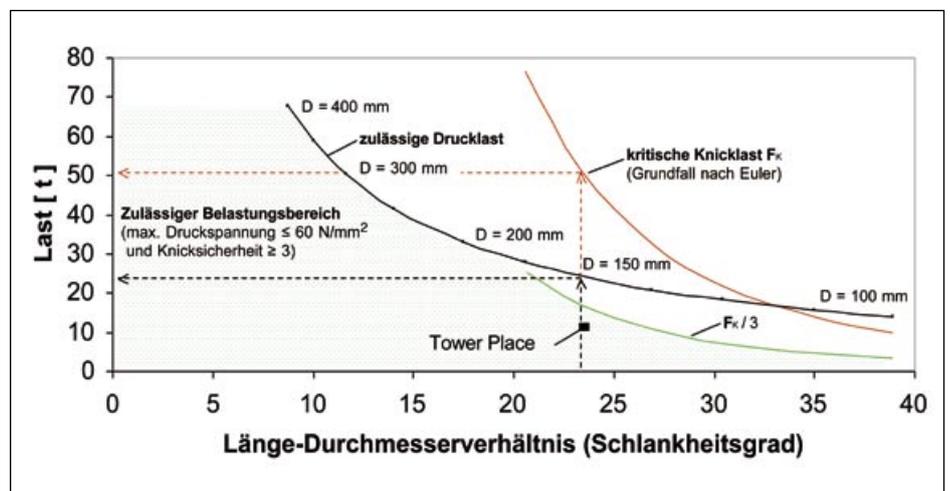
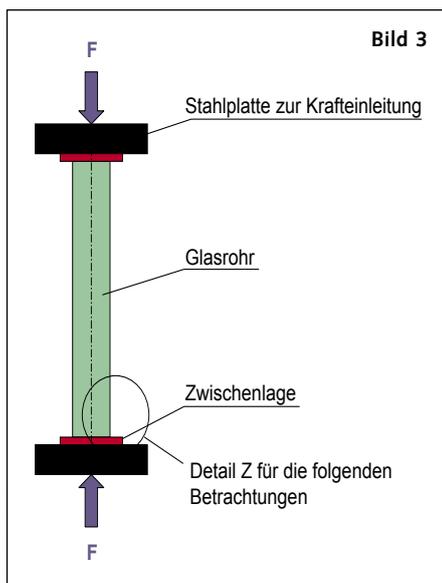


Bild 2: Lastkurven für Glasrohre in Abhängigkeit vom Schlankheitsgrad (Rohrlänge = 3500 mm, Wanddicke = 9 mm)



Bilder: Schott

Knicksicherheit

Die zweite wichtige Kenngröße für die Auslegungsberechnung von Verbundglasrohren ist ihre Knicksicherheit.

In Bild 2 sind die Lastkurven für Glasrohre aus „Duran 8330“ in Abhängigkeit von ihrem Länge-Durchmesserverhältnis (L/D) für die Rohrlänge 3500 mm bei einer Wanddicke von 9 mm dargestellt. Die schwarze Kurve zeigt die maximal übertragbaren Lasten für unterschiedliche Rohrdurchmesser bei der zulässigen Druckbeanspruchung von 60 N/mm². Nach dieser Kurve darf z. B. ein Rohr mit Außendurchmesser 150 mm ($W_D = 9$ mm) mit 24,5 t belastet werden.

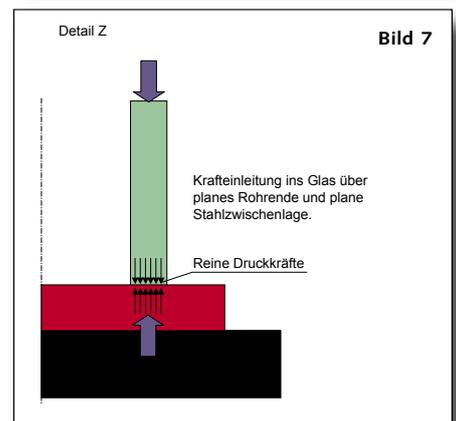
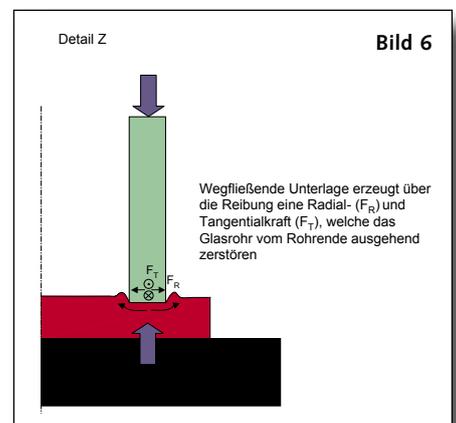
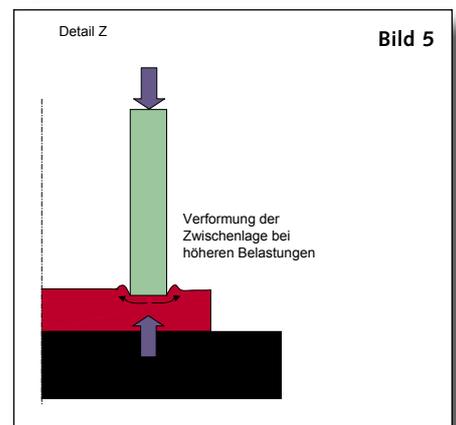
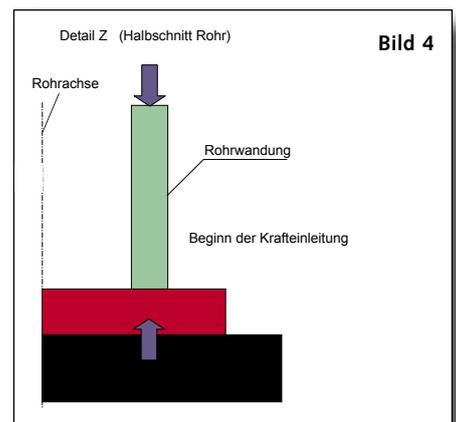
Die rote Kurve oberhalb der Drucklastkurve gibt die kritische Knicklast F_K (Lastfall II nach Euler) für die jeweiligen Rohrdurchmesser an. Im eben genannten Fall würde die kritische Knicklast einen Wert von 51,5 t annehmen. Für tragende Glaskonstruktionen gilt in der Statik ein Sicherheitsbeiwert mit Faktor 3. Damit erhält man die grüne Kurve $F_K/3$ für ausreichende Knicksicherheit. Diese schneidet die Kurve für die zulässige Drucklast bei einem Länge-Durchmesserverhältnis von ca. 20. D. h., daß für Verbundglasrohre nur unter einem Länge-Durchmesserverhältnis $L/D \leq 20$ eine ausreichende Knicksicherheit besteht. Andererseits würden Rohre mit einem Durchmesser < 100 mm und $L/D \geq 33$ bereits durch Ausknicken versagen, ohne je die zulässige Druckspannung von 60 N/mm² erreicht zu haben. Das grün hinterlegte Gebiet stellt somit den zulässigen Belastungsbereich (zulässige Druckspannung ≤ 60 N/mm² und Knicksicherheit ≥ 3) für Verbundglasrohre der Länge 3,5 m und einer Wanddicke von 9 mm dar.

Im Falle des ersten Einsatzes von Verbundglasrohren, es handelt sich um das Tower Place Projekt des Architekturbüros Foster & Partners, London (Bild 1), werden die Rohre einer Gesamtdrucklast von 12,5 t ausgesetzt. Das L/D-Verhältnis beträgt hier ca. 24. Die Knicksicherheit hat den Faktor 4. Bei diesem Projekt haben die Verbundglasrohre die Aufgabe, die auftretenden Windlasten aus einer Flachglasfassade (Länge 60 m, Höhe 22 m) in das Dachtragwerk einzuleiten. Diese Fassade ist Bestandteil eines gläsernen Atriums, das die Freifläche zwischen zwei Gebäudeteilen einhaust. Die auftretenden Windkräfte betragen beim Jahrhundertsturm im November 2002 ± 50 kN pro Verbundglasrohr. Das innenliegende Edelstahlteil ist zur Übertragung der Windsoglasten mit einer Kraft von 75 kN vorgespannt.

Werkstoffgerechte Krafteinleitung

Die bislang in der Glasverarbeitung übliche Meinung, die einzig glasgerechte Methode zur Einleitung von Kräften ins Glas erfolge über eine möglichst weiche, verformungsfähige Zwischenlage zwischen der Glasoberfläche und dem Kraftübertragungselement, hat sich in den Untersuchungen bei Schott-Rohrglas sehr schnell als ungeeignet für die Übertragung von hohen Kräften ins Glas herausgestellt. Diese aber sind kennzeichnend für den Einsatz von Glasrohren als statischem Element in Architektur und Bauwesen. Die Methode der weichen Glaseinbettung hat sich zwar für die Einleitung von geringen Kräften (≤ 20 N/mm²) als geeignet erwiesen, doch werden bei Überschreitung dieser Grenze durch das plastische Fließen der Zwischenlagen ungünstige Zugspannungen ins Glas eingebracht.

Dies soll anhand der folgenden Bilder näher erläutert werden. In Bild 3 ist die stirnseitige Einspannung eines Glasrohres zwischen zwei kraftübertragenden Stahlplatten dargestellt. Als Zwischenlage zwischen Stahlplatte und Glasrohr dient eine Zwischenlage z. B. aus Polyamid. Die über die Stahlplatten und die Zwischenlagen ins Glasrohr eingeleitete Kraft wird bei den folgenden Schemabildern fortlaufend gesteigert. Bei Beginn der Krafteinleitung (Bild 4) mit Druckspannungswerten von wenigen N/mm² tritt keine bzw. nur eine sehr geringe Verformung der Zwischenlage auf. Bei weiterer Kraftzunahme (Bild 5) beginnt eine deutlich sichtbare Verformung der Zwischenlage. Bei Beginn des plastischen Fließens der Zwischenlage werden in der Mikrostruktur des Zwischenlagenmaterials je nach Material Atome oder ganze Moleküle durch die vorhandene Druckbeanspruchung





Zwischenlagenmaterialien und deren kurzzeitige Einsatzgrenzen

Bisherige Zwischenlagenmaterialien:

Polyamid 6.6 ohne Glasfaserverstärkung	ca. 30 N/mm ²
Hartholz mehrschichtig verklebt	ca. 50 N/mm ²
Gummi je nach shore A Härte	20–50 N/mm ²
Aluminium	ca. 30 N/mm ²
Blei	ca. 30 N/mm ²

Stahlzwischenlagen:

St 37	ca. 100 N/mm ²
Hochfeste Stähle	> 500 N/mm ²

Sicherheitsfaktor für den langzeitigen Einsatz von Verbundglasrohren unter einer Druckbeanspruchung von 60 N/mm² vorhanden ist. Um herauszufinden wo die Belastbarkeitsgrenze von Glasrohren liegt, wurden einzelne Prüflinge bis zum Bruch weiterbelastet. Dabei wurden Werte bis 850 N/mm² erreicht. Aber auch bei solch hohen Druckspannungen ist festzustellen, daß die Bruchauslösung immer vom Rohr-Ende ausgehend erfolgte und in keinem einzigen Fall im Inneren des Rohres selbst stattfand. Die Grundfestigkeit von Glasrohren liegt somit in einem noch höheren Bereich und konnte bei den durchgeführten Versuchen nicht ermittelt werden. ■

verdrängt und weichen (radial und tangential) unter der Glasoberfläche nach allen Seiten hin aus. Durch die auftretende Reibungskraft zwischen dem wegfließenden Zwischenlagenmaterial und der Glasoberfläche werden radiale und tangential Zugspannungen in die glasseitige Kontaktfläche übertragen (Bild 6), die bei Überschreitung der Glaszugfestigkeit zu Rissen (Tangentialspannung) oder Ausmuschelungen (Radialspannung) im Rohrendebereich führen. Je nach bislang verwendetem Zwischenlagenmaterial (siehe Infokasten) ist dies bereits bei Druckspannungen unterhalb 60 N/mm² der Fall.

lich mit Druckkräften beaufschlagt (Bild 7). Nur so wurde es möglich, Serienprüfungen ($n > 100$) für die Druckbelastbarkeit von Glasrohren durchzuführen, bei denen alle Prüfrohren mit einer Druckspannung von 400 N/mm² getestet wurden. Dabei konnte festgestellt werden, daß kein einziges Glasrohr unterhalb dieses Spannungswertes in irgendeiner Weise beschädigt oder gar zerstört wurde. Mit dieser Prüfung wurde letztendlich sichergestellt, daß ein ausreichender

Der Autor:

Dipl.-Ing. Herbert Jung leitete zum Zeitpunkt dieser Forschungsarbeiten die Entwicklung von Rohrsystemen bei Schott-Rohrglas. Er ist seit August 2003 im Bereich Industrial Engineering tätig.

Zwischenlage aus Stahl

Für die Übertragung der beim Einsatz von Verbundglasrohren gewünschten Lasten hat sich einzig die direkte Lagerung des Rohrendes auf einer Unterlage aus Stahl als erfolgreich herausgestellt. Das ist aber nur durch eine präzise Bearbeitung des Rohrendes möglich, die speziell für diese Anwendung bei Schott-Rohrglas entwickelt wurde. Lokale Spannungsspitzen können bei dieser Materialkombination nicht abgebaut werden, sondern müssen sich im Bereich der zulässigen Eigenelastizität des Glases befinden. Demzufolge ergibt sich der grundlegende Zusammenhang; je höher die gewünschte Glasbelastung, desto größer ist auch die Anforderung an die Ebenheit des Glasrohrendes und der Gegenfläche aus Stahl. Auch die Festigkeit der verwendeten Stahlgegenfläche ist von großer Bedeutung für die Übertragbarkeit hoher Kräfte. Sie richtet sich ebenso wie die erforderliche Ebenheit des Glasrohrendes nach der gewünschten Belastung. Je höher auch hier wieder die gewünschte Belastung, desto größer müssen die Werte für die Zugfestigkeit und die Fließgrenze der verwendeten Stahlsorte sein. Erst durch die Kombination eines präzisen Rohrendes und der Verwendung geeigneter Stahlgegenflächen ergeben sich Kraftflußlinien, die das Glasrohrende fast ausschließ-