

## **VIP ohne inneres Stützgerüst am Beispiel von VI-Gläsern**

Prof. Dr.-Ing. Georg-Wilhelm Mainka ist Leiter des FG Baukonstruktionen und Bauphysik im Fachbereich Bauingenieurwesen an der Universität Rostock. Er studierte Bauingenieurwesen an der TU Braunschweig, wo er anschließend wiss. Assistent und Oberingenieur am Institut für Baukonstruktion und Vorfertigung (Prof. Paschen) war. Als ö.b.u.v. Sachverständiger für Bauphysik und Schäden an Gebäuden bearbeitete er gleichzeitig das Forschungsvorhaben „Wärmebrückenkatalog“. 1988 promovierte er über „Konstruktion und Bemessung von Köcherfundamenten“ an der TU Berlin, wo er anschließend Akad. Rat am FG allgemeiner Ingenieurbau (Prof. Cziesielski) wurde. 1993 erhielt er den Ruf an die Universität Rostock.

### **1 Zweck und Ziel der VI-Gläsern**

Evakuierte Dämmstoffplatten als „Vakuum-Isolations-Paneele“, abgekürzt VIP, zeichnen sich dadurch aus, dass zwischen zwei absolut dampfdichten parallelen Schichten ein Teil der Luft herausgesaugt und dadurch die Wärmeübertragung durch Leitung und Konvektion erheblich reduziert wird. Bei ebenen Elementen versucht der äußere atmosphärische Überdruck die dampfdichten Schichten zusammenzudrücken, so dass hier ein möglichst gering leitendes Stützgerüst zwischen ihnen erforderlich ist. Bei zweischeibigen Gläsern beeinträchtigt jedoch das Stützgerüst die Durchsicht. Entwicklungen und Prototypen hierzu existieren mit folgenden Stützungen:

- Mikroskopische Keramikkugeln, die jedoch auch sichtbeeinträchtigend wirken
- Dünnscheiben Glaszylinder, die jedoch einen Tunnelblick erzeugen.

Ziel ist es, hochdämmende Fensterscheiben unter Ausnutzung der Vakuumtechnik mit einer möglichst ungetrübten Durchsicht zu entwickeln.

### **2 Die Idee der VI-Gläser**

#### **2.1 Parallele Scheiben ohne Stützgerüst**

Wird kein Stützgerüst zwischen die Scheiben angeordnet und der Zwischenraum evakuiert, so werden die Scheiben auf Biegung beansprucht. Die hierdurch erzeugten Biegeverformungen bewirken entweder/oder, dass

- die beiden Scheiben sich berühren. Ein thermischer Kurzschluss entsteht
- der Abstand zwischen den Scheiben extrem groß werden muss. Die Biegebeanspruchung führt bei normal großen Scheiben zum Bruch
- die Scheibendicken extrem dick werden müssen. Die Fenster werden zu schwer.

## 2.2 Thermosflasche

Thermosflaschen der alten Art bestehen aus zwei konzentrischen Glaszylindern mit relativ dünnen Wandungen, zwischen denen die Luft evakuiert wird. Der innere Zylinder bekommt tangentielle Zug- und der äußere tangentielle Druckspannungen, die wegen der geschlossenen Form mit sich und dem äußeren atmosphärischen Druck im Gleichgewicht sind:

$$\sigma = \mu^* p_A / (R * d)$$

Wegen der geringen Radien R kommt es trotz der geringen Glasdicke d auch bei einem höheren Anteil  $\mu$  des atmosphärischen Druckes  $p_A$  nicht zu einem Versagen insbesondere der inneren zugbeanspruchten Schale

## 2.3 Runde Fensteröffnungen

Werden Scheiben über einer runden Fensteröffnung mit dem Radius  $R_F$  gleichmäßig aufgewölbt, so entsteht die Form einer Kugelkalotte mit dem Radius R. Bei einem einseitigen Luftüber- oder -unterdruck  $\mu^* p_A$  entsteht in der Schale wegen der zweiachsigen Lastabtragung eine Spannung

$$\sigma * d = \mu^* p_A / 2R$$

An den Rändern muss diese Spannung aus „Gewölbewirkung“ aufgenommen werden. Bei flachen Kalotten (großes R) entspricht diese Spannung etwa dem „Horizontalschub“

$$H' = \sigma * d = \mu^* p_A / 2R$$

Dies kann auf 2 Arten aufgenommen werden:

### 2.3.1 2 gleiche, gegengekrümmte Schalen mit dazwischenliegender Planscheibe

Werden die beiden Glasschalen konkav aneinander und die Planscheibe dazwischen gelegt und verbunden (geschweißt, gelötet, geklebt), so entstehen, wenn die Zwischenräume gleichmäßig evakuiert (kleines Loch in der Scheibe) werden, in den Schalen gleichförmige Druckspannungen. Deren „Horizontalschub“  $2H'$  kann dann gemeinsam von der Scheibe aufgenommen werden, die dann zweiachsig Zug erhält. Da die Scheibe nicht der Witterung ausgesetzt ist, kann die Zugtragfähigkeit nicht durch Alterung (Kerbspannungen) herabgesetzt werden. Diese Konstruktion ist nur sehr schwer.

### 2.3.2 2 gleichsinnig gekrümmte Schalen.

Werden zwei verschieden gekrümmte Kalotten übereinander gesetzt und der Zwischenraum evakuiert, so bekommt die äußere Schale ähnlich wie bei der Thermosflasche Druck und die innere Zug. Der hierbei aufzunehmende Horizontalschub  $H'$  je Schale kann durch zug- bzw. druckbeanspruchte Randträger als Ringkräfte  $F_R$  aufgenommen werden.

$$F_R = H' / R_F$$

Hierzu ist lediglich eine Dichtung zwischen den Rändern notwendig, die durch den atmosphärischen Druck zusammengepresst werden.

Werden die Ränder schubfest verbunden (verschweißt, gelötet, geklebt), so heben sich die Horizontalschübe nahezu auf, und es verbleiben im Rand nur die kleine Differenz der Ringkräfte  $\Delta F_R$ .

## 2.4 Rechteckige oder quadratische Fensteröffnungen

Runde Fensteröffnungen sind nur in Ausnahmefällen im Wohnungs- und Geschäftshausbau praktikabel, Rechte Winkel optimieren die Herstellung und die Lichtausbeute. Deshalb soll versucht werden, das oben Gesagte auf rechtwinklige Öffnungen zu übertragen. Problematisch ist hier, dass bei der Aufwölbung der Scheiben

- kein konstanter Radius mehr möglich ist,
- unterschiedliche Horizontalschübe an den Glasrändern auftreten und
- diese nicht mehr durch Ringkräfte im Randträger aufgenommen werden können. Biegebeanspruchte Randträger müssten damit sehr weit werden.

In den unter 2.3 angegebenen Gleichungen stellt der Term  $\kappa = 1/R$  die Krümmung dar. Diese lässt sich bei flachen Bögen aber auch durch das Pfeilverhältnis  $f/2R_F$  abschätzen, wobei  $f$  der Stich, d.h. die höchste Erhebung der Schale ist. Mit den Formeln der Bogenstatik und der Beachtung, dass bei Schalen über quadratischem Grundriss die Lastabtragung zweiachsig erfolgt, ergibt sich der Horizontalschub zu

$$H' = \mu \cdot p_A \cdot R_F / 8 \cdot 2R_F / f$$

d.h. der Horizontalschub ist

- proportional zum Evakuierungsgrad  $\mu$
- proportional zur Fenstergröße
- umgekehrt proportional zur Krümmung der Schale und damit zum Pfeilverhältnis

Auch hier gibt es zur Aufnahme von  $H'$  wieder die bereits oben diskutierten prinzipiellen Lösungen

### 2.4.1 2 gleiche, gegengekrümmte Schalen mit dazwischenliegender Planscheibe

Hier gilt das unter 2.3.1 Gesagte, wenn für den gewählten Stich (Pfeilhöhe) der Schalenform eine der Stützlinie angepasste Schalenform gefunden wird, so dass in ihr nur Druckspannungen auftreten.

### 2.4.2 2 gleichsinnig gekrümmte Schalen.

Ziel ist es hierbei, dass die Schalen nur durch Normalkräfte und nicht durch Momente beansprucht werden, so dass in ihr nur über die Querschnitte konstante Normalspannungen herrschen und dass sich die daraus resultierenden Horizontalschübe  $H'$  der beiden Scheiben an jedem Teil des gemeinsamen Randes aufheben, d.h.  $\Delta H' = 0$ . Dies ist nur möglich, wenn die Schalen die gleiche Form haben.

Da die Schalen jedoch einen Zwischenraum haben müssen, der evakuiert werden soll, muss dieser Abstand groß genug sein, damit bei der Verformung der Schalen kein Kontakt zwischen ihnen auftritt (thermischer Kurzschluss).

Der Abstand  $a$  der Schalen bewirkt jedoch am Rand, dass dort durch die beiden gleichgroßen, aber entgegengesetzten Horizontalschübe ein Krepelmoment entsteht, welches minimiert und unschädlich gemacht werden muss.

### 3 Statische Nachweise

Die Berechnungen wurden von Dr.-Ing. K. Johannsen, IBC Mainz mit dessen FE-Programm für den Lastfall: Atmosphärischer (Teil-)Druck  $\mu^* p_A$  durchgeführt.

Die Ergebnisse sind in nachfolgender Tabelle für  $\mu = 1$  und eine Scheibendicke von 7 mm zusammengestellt, in der Anlage ist ein Ergebnis einer Viertelscheibe geplottet.

Fenstergröße $L_F$ [mm]	Stich $f$ [mm]	Pfeilverhältnis $f/L_F$	Scheibenabstand $a$ [mm]	Durchbiegung $w$ [mm]	Max. $\sigma_{1,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	
					Scheibenmitte	Scheibenoberfl.
1000	50	1/20	13	1	235	377
1000	70	1/14	13	1	182	278
800	50	1/16	13	< 1	152	260
600	50	1/12	13	< 1	86	145
1000	50	1/20	3	1	276	457

#### Erläuterung der Ergebnisse

- Die Ergebnisse unterstützen die in 2.4 getroffenen Aussagen, dass der Horizontalschub und damit die Spannungen sehr stark von der Fenstergröße und dem Pfeilverhältnis (Krümmung) abhängt
- Die Durchbiegungen sind extrem klein
- Die Schalenform ist noch nicht ideal gewählt, es treten noch zu große Abweichungen zwischen den Spannungen in Schalenmitte und an der Oberfläche auf.
- Bei kleineren Fenstergrößen und vernünftigem Pfeilverhältnis liegen die Spannungen im Bereich unterhalb der Festigkeit des Glases.

### 4 Forschungsbedarf

#### 4.1 Form optimieren

Hierbei geht es zunächst darum, die Form der Schale so zu variieren, dass sie der Stützlinie (Seifenhaut) entspricht und keine Biegemomente auftreten

Weiterhin muss der Rand so konstruiert werden, dass das Krepelmoment minimiert wird.

#### 4.2 Herstellung der Gläser:

Zunächst müssen die für diese Anwendung günstigsten Glassorten ermittelt werden.

Sodann müssen Verfahren ermittelt werden, die Scheiben exakt zu profilieren und gegf. zu beschichten. Technologien sind z.B. bei der Herstellung von Autogläsern bekannt.

Schließlich müssen die einzelnen Scheiben an den Rändern schubfest miteinander verbunden (verschweißt, verlötet, geklebt) werden.

Ähnlich wie die Autogläser können die VI-Gläser nicht mehr nach Maß angefertigt werden, sondern müssen konfektioniert in Standardabmessungen angeboten werden. Hier müssen die Architekten ähnlich wie bei den VIPs in Rastern denken.

### **4.3 Lastfall Temperatur**

Normale Gläser haben einen sehr hohen Temperatureausdehnungskoeffizienten  $\alpha_t$ . Bei Temperaturänderungen können hier große Verformungen, oder bei deren Behinderung hohe Spannungen auftreten, die zum Versagen führen können. Evtl. müssen Gläser mit geringem  $\alpha_t$  verwendet werden, wie man sie aus chemischen Laboren oder Ceran-Kochfeldern her kennt.

### **4.4 Nachweis der Gebrauchstauglichkeit**

Die Gläser müssen für eine möglichst Lange Zeit ihre Gebrauchsfähigkeit behalten. Hierzu sind sie im Labor unter zeitgerafften Klimabedingungen zu testen und sind auch der kontrollierten Freibewitterung zu unterziehen. Es muss eine Zulassung beim DIBt angestrebt werden.

### **4.5 Wärmebrückenwirkung am Rand**

Die VI-Gläser mögen im normalen Bereich eine phantastische Wärmedämmung aufweisen, im Randbereich kommen jedoch Innen- und Außenscheibe zusammen und bilden eine gravierende Wärmebrücke. Ihr Einfluss ist zu bestimmen.

Der Einfluss wird geringer bei größeren Scheiben, hier sind jedoch Grenzen durch die Statik gegeben.

Die Ränder und damit die Wärmebrücken können mit hochdämmenden Rahmenprofilen, wie sie z.B. für Passivhäuser verwendet werden, abgedeckt werden.

### **4.6 Nachweis der Transparenz und der Durchsichtigkeit**

Es muss die Akzeptanz der Verzerrung durch die gekrümmten Scheiben für verschiedene Krümmungen ermittelt werden. Z.T. möchte man gerade einen Butzenscheibeneffekt haben. Für die Anforderung der absoluten Verzerrfreiheit kann im sitzenden und stehenden Augenbereich hochdämmende Isolierverglasung eingesetzt werden, im Brüstungs- und Überkopfbereich können VI-Gläser verwendet werden.

### **4.7 VI-Gläser als EC-Gläser**

Stellen VI-Gläser eine ideale Wärmedämmung im Winter dar, so kann es im Sommer durch die Sonneneinstrahlung zu einer Überhitzung des Innenraumes kommen. Ideal wäre hierbei eine Kombination mit der Technologie der elektrochromen (EC-) Gläser, bei denen der Transmissionsgrad nahezu stufenlos regelbar ist. Zu beachten ist hier jedoch, dass die heutigen EC-Gläser die Sonnenenergie absorbieren und sich dabei erhitzen. Dies muss in 4.3 berücksichtigt werden.

## **5 Aussichten**

Vor 150 Jahren wurde anlässlich der Weltausstellung in London von Paxton der „Crystal-Palace“ errichtet. Er stellte den Beginn des industrialisierten und industriellen Bauens dar, gekennzeichnet durch

- Ausgeklügelte Tragstruktur mit elementierten gusseisernen Bauteilen
- Hohe Transparenz des Bauwerkes durch die gläserne Hülle
- Straffe Baustellenorganisation mit vielen Hilfsmitteln
- Zeit- und Kostenminimierung

Aber:

- Miserable Wärmedämmung
- Kein Sonnenschutz

Um heute den hohen bauphysikalischen Anforderungen an die neue Glasarchitektur zu genügen, werden z.B. dreischalige Ablufffassaden verwendet. Sie sind

- Teuer in der Herstellung
- Aufwändig in der Wartung
- Schwer

Die vorgestellten VI-Glas-Fassaden hingegen

- Sind sehr gut dämmend im Winter
- Mit EC-Regelung: Besitzen guten Sonnenschutz im Sommer
- Wegen fehlendem Medium: Bieten optimalen Schallschutz
- Mit Lotus-Oberflächenvergütung: benötigen minimale Wartung

## 6 Danksagung

Herrn Dr.-Ing. K. Johannsen vom IBC INGENIEURBAU-CONSULT GmbH, Mainz möge an dieser Stelle gedankt werden für die aufwändigen FE-Berechnungen und die stetigen Diskussionen über das Tragverhalten dieser Gläser, denen er anfangs skeptisch gegenüber stand.

Herrn Küppers von der WIRO Wohnen in Rostock sei hier gedankt für die Diskussion über die Anwendbarkeit und das Angebot, diese Konstruktion in eines seiner Gebäude einzubauen.

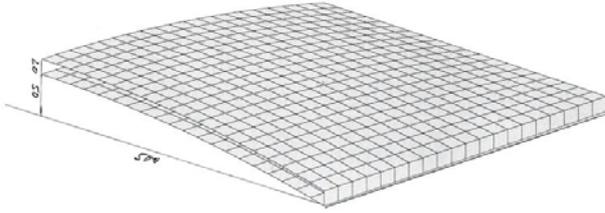
Herrn Dr. Bertram und Herrn Kratz von PTJ Projektträger Jülich danke ich an dieser Stelle für die Aufmunterungen, an diesem Projekt weiter zu arbeiten.

Und schließlich:

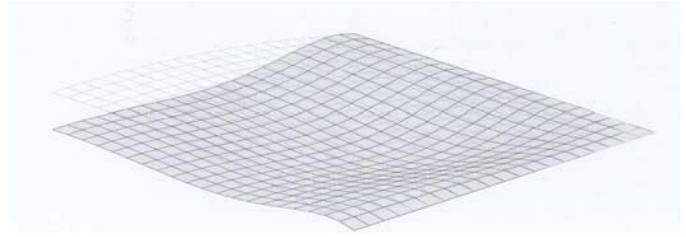
Herr Prof. Cziesielski, einem meiner Lehrmeister, möge entschuldigen, dass ich zu seiner morgigen Abschiedsvorlesung nicht in Berlin sein kann. Wir wünschen ihm, den Kollegen und Mitarbeitern eine schöne Feier

### Anlage: Ergebnisse einer FE-Berechnung

Parameter:		Ausgaben für 1/4 System	
Fenstergröße: 1000 * 1000 mm <sup>2</sup>	1	System	Ü= 4
Stich 50 mm	2	Verformung obere Scheibe	Ü=50
Scheibenabstand licht 13 mm	3	HS 1 obere Scheibe Mitte	
Scheibendicke 7 mm	4	HS 2 obere Scheibe Mitte	
Glas: E-Modul 700.000 N/mm <sup>2</sup>	5	HS 1 obere Scheibe Oberfläche	
Last: Atm. Druck 100 kN/m <sup>2</sup>	6	HS 2 obere Scheibe Oberfläche	



Geometrie der Scheibe (1/4)



Verformung der oberen Scheibe  $\bar{u} = 50$

1.+2. Hauptspannung der oberen Scheibe

Scheibenmitte

