

Stefan Peters  
 Andreas Fuchs  
 Jan Knippers  
 Stefan Behling

# Ganzglastreppe mit transparenten SGP-Klebeverbindungen – Konstruktion und statische Berechnung

Auf der glasstec 2006 in Düsseldorf, der weltweit größten Messe der glaserzeugenden und glasverarbeitenden Industrie, wurde von der Firma Seele eine Ganzglastreppe mit einer freien Spannweite von sieben Metern errichtet. Die beiden tragenden Wangen bestehen aus jeweils einer mehrlagigen Floatglasscheibe ohne Stoß. Neben der großen Spannweite der Glasscheiben ist vor allem die Verwendung einer neuartigen Klebtechnik mittels hochtransparenter SGP (SentryGlas® Plus)-Folien bemerkenswert. Im Mittelpunkt dieses Aufsatzes stehen das statische Konzept der Treppe sowie die Ausführung und Bemessung der Klebeverbindungen.

## Glass staircase with transparent SGP bonding foils – structural details and analysis.

*At the Glasstec 2006 in Düsseldorf, the worlds largest fair for the glass-producing and trading industry, a glass staircase with a free span of 7,0 m was erected by the company Seele. Each of the supporting walls of the staircase consists of one laminated float glass pane without any joints. In addition to the large span of the glass panes an innovative aspect is the new adhesive joining technique using the highly transparent SGP (SentryGlas® Plus) foils. This report focuses on the structural layout of the staircase as well as on the application of the new bonding technique and the structural analysis of the adhesive joints.*

## 1 Einleitung

Im konstruktiven Glasbau werden für Anschlußdetails meist gebohrte Punkthalter oder mechanische Klemmteller verwendet. In solchen Verbindungen treten häufig Spannungsspitzen auf, die der spröde Werkstoff Glas nicht duktil abbauen kann. Dagegen werden beim Kleben die Anschlußkräfte flächig eingeleitet. Außerdem wird eine Vorschädigungen der Verglasung durch mechanische Bearbeitung der Anschlußpunkte vermieden. Diese offenkundigen Vorteile führen zu intensiven Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet des Klebens von Glas. Die Untersuchungen konzentrieren sich dabei vor allem auf Silikonklebstoffe, die wegen ihrer hervorragenden Alterungsbeständigkeit unter bestimmten Bedingungen bauaufsichtlich zugelassen sind, und auf höherfeste und hochtransparente Acrylate. Eine neue Alternative hierzu stellen die transparenten SGP-Folien (SentryGlas Plus®) dar, die derzeit als Zwischen-

schicht von hochbeanspruchten Verbundgläsern (blast resistance) eingesetzt werden. Die Glastreppe, die im folgenden beschrieben wird, soll zeigen, daß diese neue Technik auch für lastabtragende Verbindungsdetails des konstruktiven Glasbaus eingesetzt werden kann und damit neue Anwendungen ermöglicht, die weit über die Zwischenschicht von Verbundgläsern hinausreichen.

## 2 Ganzglaskonstruktionen und Klebeverbindungen

Schon seit einigen Jahren werden Fassaden realisiert, bei denen die Verglasung linienförmig mit Silikon auf eine Unterkonstruktion aus Aluminium geklebt wird. Silikon zeichnet sich durch eine sehr hohe Beständigkeit gegen Umgebungseinflüsse aus. Die dicke und elastische Silikonfuge ist in der Lage, die unterschiedlichen thermischen Dehnungen der Fügepartner dauerhaft aufzunehmen. Nachteilig sind allerdings die niedrige An-

fangsfestigkeit, die zu vergleichsweise großen Klebeflächen führt, sowie die trüb bis opake Einfärbung, die die Transparenz der Glaskonstruktionen beeinträchtigt.

Daher gibt es ein großes Interesse an höherfesten und hochtransparenten Klebstoffen, wie zum Beispiel UV- und lichthärtende Acrylate, die derzeit Gegenstand mehrerer Untersuchungen sind [1]. Dabei zeigt sich, daß sowohl Material und Oberfläche der Fügepartner als auch Geometrie und Dicke der Klebefuge einen wesentlich größeren Einfluß auf die Tragfähigkeit haben, als bei den gutmütigen Silikonverklebungen. Besonderes Augenmerk muß auf die Alterungsbeständigkeit gelegt werden. Nicht in allen Fällen konnten hierfür befriedigende Werte nachgewiesen werden. Dies gilt insbesondere für dickere Klebefugen (> 2 mm), die bei linienförmigen Verklebungen zum Ausgleich von thermischen Dehnungsdifferenzen und Fertigungstoleranzen erforderlich sind [2].

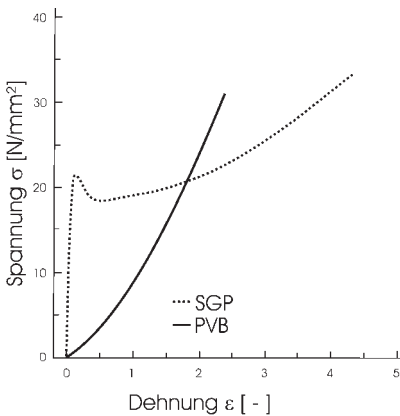
Auch Polyvinylbutyral (PVB) ist ein hochtransparenter Klebstoff, der im Glasbau eingesetzt wird. Dabei handelt es sich um einen amorphen Thermoplast, dessen Glasübergangstemperatur im Bereich der Raumtemperatur liegt (von 12 bis 23 °C je nach Herstellerangabe), so daß sein Verhalten stark temperatur- und zeitabhängig ist und eine ausgeprägte Neigung zum Kriechen zeigt. PVB wird daher nur als Zwischenschicht in Verbundsicherheitsgläsern eingesetzt und kann für lastabtragende Verklebungen nicht verwendet werden.

Eine Alternative zu PVB stellen die SGP-Folien dar (SentryGlas Plus® der Firma Dupont). Dies sind ebenfalls transparente amorphe Thermo-

**Tabelle 1. Vergleich effektiver Schubmodul  $G$  (MPa) von SGP- und PVB-Folien (nach [8])**

**Table 1. Comparison of effective shear modulus of SGP and PVB foils**

	T °C	3 Sek	1 Min	1 Std	1 Tag	1 Mo	1 Jahr
PVB	20 °C	8,060	1,640	0,840	0,508	0,372	0,266
	30 °C	0,971	0,753	0,441	0,281	0,069	0,052
	40 °C	0,610	0,455	0,234	0,234	0,052	0,052
	50 °C	0,440	0,290	0,052	0,052	0,052	0,052
SGP	20 °C	125,000	96,000	42,700	21,600	9,700	6,500
	30 °C	65,700	35,400	14,600	6,900	3,100	2,900
	40 °C	22,200	11,600	5,100	2,900	2,800	2,000
	50 °C	7,100	3,800	2,900	2,600	2,000	2,000



**Bild 1. Last-Verformungsverhalten von SGP-Folien und PVB-Folien (nach [8])**  
**Fig. 1. Load bearing behaviour of SGP and PVB foils**

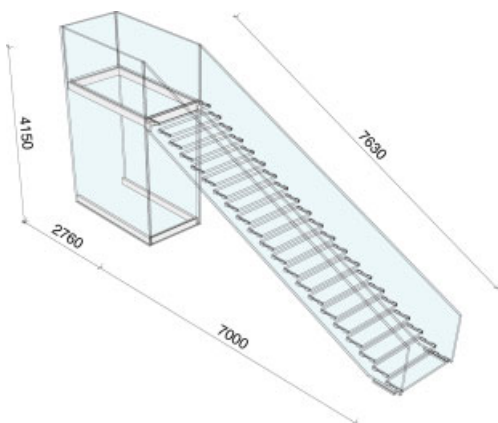
plaste, die allerdings eine gänzlich andere Last/Verformungscharakteristik zeigen (Bild 1 und Tabelle 1). Insbesondere die Anfangssteifigkeit bei Raumtemperatur ist deutlich höher. Derzeit werden umfangreiche Untersuchungen zur Charakterisierung des mechanischen Verhaltens und der Al-

terungsbeständigkeit von SGP durchgeführt [3]. Wegen der höheren Glasübergangstemperatur von 55 °C fällt die Steifigkeit erst ab einer Temperatur von ca. 40 °C spürbar ab. Bis zu dieser Grenze erreichen Verbundgläser mit SGP-Folie fast die Steifigkeit einer monolithischen Einzelscheibe gleicher Dicke. Die Folien werden bisher vor allem für Zwischenschichten von hochbeanspruchten Verbundgläsern (blast resistance) verwendet. Die günstigen mechanischen Eigenschaften legen jedoch ihre Verwendung für lastabtragende Verklebungen nahe, wie dies bei dieser Treppe vermutlich zum ersten Mal erfolgt ist.

**3 Konzeption und Gestaltung der Treppe**

Im Anschluß an die glasstec 2004 begann ein intensiver Dialog zwischen der Firma Seele und dem IBK Forschung + Entwicklung über die Möglichkeiten und das gestalterische Potential der neuen Laminieretechnik im Bereich des

konstruktiven Glasbaus und der Fassadentechnik. Im Verlauf eines kontinuierlichen Entwicklungsprozesses kristallisierten sich Anfang 2006 zwei Konstruktionen heraus, die zur glasstec 2006 realisiert werden konnten und die geeignet schienen, die Leistungsfähigkeit dieser neu entwickelten Technologie zu demonstrieren: eine frei spannde Ganzglastreppe und eine 6 m hohe Ganzglasfassade. Erfahrungen aus unterschiedlichsten Forschungsprojekten flossen in die Konzeptionen der Treppe ein. Die heute üblichen Glaskonstruktionen trennen oftmals noch zwischen linearen Verbindungselementen aus Stahl oder Aluminium und der flächigen Verglasung. Diese Art der Konstruktion nutzt das konstruktive Potential des Glases nicht vollständig aus. Für einen ganzheitlichen Konstruktionsansatz ist ein kraftschlüssiger Verbund erforderlich, wofür sich die Klebe- bzw. Laminieretechnik als ideale Fügetechnik anbietet. Dank der neuartigen, hochtransparenten Verfahren scheinen die Glasscheiben vor den auf das konstruktiv notwendige minimierten Beschlagteilen zu schweben – in Wahrheit bilden sie eine kraftschlüssige Einheit. Durch die Verbindungstechnik werden die einzelnen Elemente zu einer tragfähigen Gesamtkonstruktion gefügt, gleichzeitig wird aber auch die Montage bzw. Demontage ermöglicht. Die Glastreppe ist nicht nur ein Objekt der angewandten Forschung, sondern versteht sich gleichzeitig auch als Beitrag zur Verankerung dieser neuen Technologie in Architektur und Design (Bilder 2 und 3).



**Bild 2. Isometrie Treppe (IBK Forschung und Entwicklung)**  
**Fig. 2. Isometry of staircase**



**Bild 3. Gesamtansicht Treppe (Foto: Seele)**  
**Fig. 3. General view of staircase**

#### 4 Gesamtstabilität

Die Konstruktion des Treppenlaufes beschränkt sich auf nur zwei Elemente, die Wangen und die horizontalen Stufen. Zu Gunsten der Klarheit der Konstruktion sollte auf vertikale Setzstufen versichtet werden. Somit standen diese auch nicht für die Aussteifung der Konstruktion zur Verfügung. Die Beanspruchung der Wangen teilt sich in zwei wesentliche Bestandteile: erstens in die eines gelenkig gelagerten Einfeldträgers unter vertikaler Belastung mit einer Spannweite von 7 m und zweitens in die eines eingespannten Geländers mit einer horizontalen Belastung (Holmlast).

Die Biegespannungen der Wangen um die starke Achse sind durch die große statische Höhe relativ gering. Die Stabilität der Wangenträger wurde durch einen Spannungsnachweis nach Theorie II. Ordnung überprüft. Die Imperfektionsfigur wurde affin zur Geometrie der ersten Eigen-schwingung gewählt (Bild 4).

Bei der horizontalen Beanspruchung durch die Holmlast sind die Einspannung der Wange über die Stufengeometrie sowie die Auflagerpunkte an den Enden maßgebend für deren Dimensionierung. Die Verbindung der Stufen mit den Wangen erfolgte gelenkig, um Beanspruchungsspitzen aus einer Auflagereinspannung zu vermeiden. Die gesamte horizontale Aussteifung der Treppe erfolgt über eine Scheibenwirkung

der Stufen. Dies gelingt über zwei Befestigungspunkte je Stufenseite, die im vorliegenden Fall dem angreifenden Moment aus der Holmlast einen Hebelarm von ca. 9 cm entgegensetzen. Die Befestigungspunkte müssen so neben den vertikalen Auflagerkräften als maßgebende Belastung ein Kräftepaar aus Zug und Druck übertragen. Durch die Aktivierung der Scheibensteifigkeit der Stufen ist dieses Prinzip auch für deutlich größere Treppenbreiten anwendbar. Die Wirksamkeit dieses Mechanismus wird allerdings durch die Neigung der Treppe bestimmt: je flacher die Treppe, desto geringer die aussteifende Wirkung und desto größer die auftretenden Kräfte (Bild 5).

Für die Berechnung mit Finiten Elementen wurde ein Volumenelementmodell mit der Nachbildung des schichtenweisen Aufbaus der Wangen aus drei Floatglasscheiben mit 15 mm Dicke und zwei Schichten SGP-Folie mit 1,52 mm Dicke erstellt. Dieses Modell diente der Ermittlung der globalen Spannungen und Verformungen. Vergleichende FE-Berechnungen haben gezeigt, daß die Steifigkeit nur geringfügig niedriger ist als bei einer Modellierung mit einer monolithischen Scheibe. Die räumlichen Berechnungsmodelle wurden neben dem Eigengewicht durch eine vertikale Verkehrslast von  $5,0 \text{ kN/m}^2$  und eine Holmlast von  $1,5 \text{ kN/m}$  belastet. Letztere entspricht den Ansätzen für die Glastreppe des Apple Stores in Nagoya, Japan.

Eine zentrale Fragestellung in der Entwurfsphase des Projektes war, ob die Gebrauchstauglichkeit durch Querschwingungen beeinträchtigt werden könnte. In vertikaler Richtung waren aufgrund der großen statischen Höhe der Wangenträger keine Probleme zu erwarten. Es wurden horizontale Eigenfrequenzen von etwa 4 Hz unter Eigengewicht und 3 Hz unter Vollast ermittelt. Unerwünschte Effekte sind im allgemeinen nicht zu erwarten, wenn die horizontale Eigenfrequenz über 3,5 Hz liegt [4], [5]. Die fertige Treppe bestätigte später die Berechnungen, da sie durch eine sehr hohe Steifigkeit überzeugte. Auch bei vollem Messebetrieb waren weder vertikale noch horizontale Schwingungen spürbar.

#### 5 Details und Detailnachweise

Für die Fügung der Treppe waren im wesentlichen drei konstruktive Details, das untere und obere Auflager der Wangen sowie der Anschluß der Treppenstufen an die Wangen, zu lösen. Exemplarisch soll an letzterem die Vorgehensweise für die Auslegung und Dimensionierung verdeutlicht werden. Die Konstruktion und Fügung des Glaspodestes, welche den oberen Treppenabschluß bildete, werden hier nicht weiter behandelt.

Die Beanspruchung der Fügungspunkte zwischen Stufen und Wangen setzten sich aus den vertikalen Stufenaullagerlasten und den bereits be-

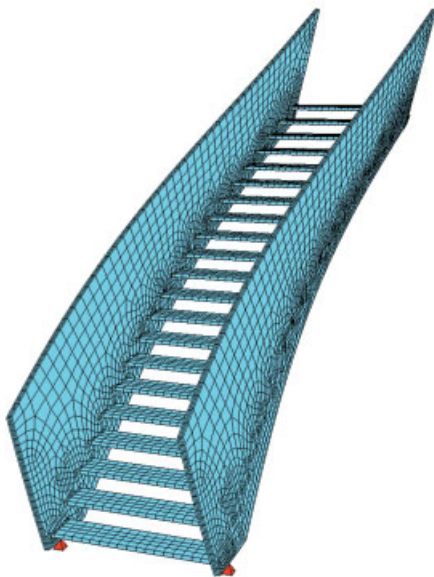


Bild 4. Erste Eigenform der Treppe  
Fig. 4. First eigen-value of staircase

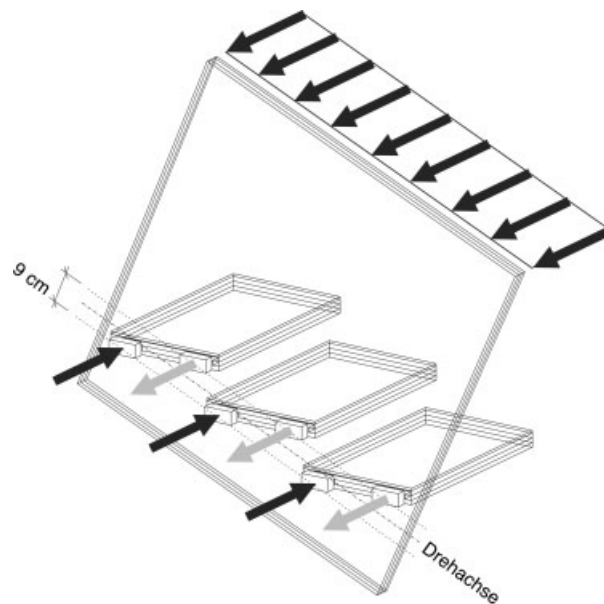


Bild 5. Aktivierung der Scheibensteifigkeit der Stufen über Zug- und Druckkräfte  
Fig. 5. Activation of in-plane stiffness by a pair of compression and tension forces

schriebenen Zug- und Druckkräften zur Stabilisierung der Wangen zusammen. Eine problemlose Austauschbarkeit von beschädigten Stufen war wichtiger Bestandteil des Konzeptes und führte letztlich zu der gewählten konstruktiven Lösung, welche aufgeklebte Beschlagteile auf der Wangeninnenseite und einlamierte Stahlbleche im VSG-Aufbau der Stufe vorsah. Eine wesentliche geometrische Forderung aus der Statik war eine symmetrische Einleitung der Zug- und Druckkräfte in die Beschlagteile zum Erreichen einer möglichst gleichmäßigen Spannungsverteilung in der Klebefläche. In der endgültigen Umsetzung wurden für die Beschlagteile Edelstahlteile aus Flachstahl der Dicke 15 mm mit einer Fläche von 100 × 39 mm gewählt, die zur Stufenseite hin schienenartig ausgefräst waren, um die Treppenstufenanschlüsse auf-

nehmen zu können. Der stufenseitig, auf Höhe der mittleren der drei tragenden Scheiben einlamierte Flachstahl bildet zum einen das vertikale Auflager der Stufen und gleichzeitig die zug- und druckfeste Verbindung zum Beschlagteil der Wange durch insgesamt vier stirnseitig eingedrehte Edelstahlschrauben M8, die zudem den Toleranzausgleich sichern (Bilder 6 und 7).

Die Befestigung jeder Treppenstufe über insgesamt vier (je Stufenseite zwei) geklebte Halter mit der Wange läßt auch das Versagen einer dieser Klebepunkte zu, ohne ein Herabfallen einer Stufe zu verursachen.

Die FE-Nachweise der Details und Klebeverbindungen erfolgten an Ausschnittsmodellen. Die hierbei ermittelten Ergebnisse sind von sehr vielen Parametern abhängig, die von der Wahl des Berechnungsprogramms

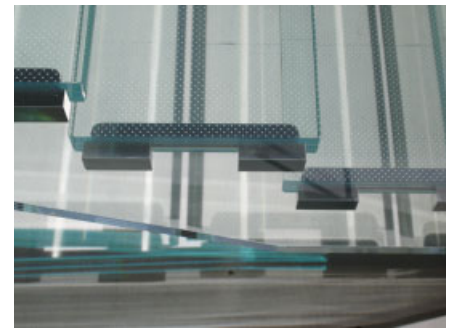


Bild 7. Befestigungspunkt Wange (Foto: IBK Forschung und Entwicklung)  
Fig. 7. Photo of step joint

und dessen Volumenelementen, der Vernetzung bis hin zu den Ansätzen für Materialeigenschaften der Klebschichten reichen. Daher müssen die FE-Berechnungen für den Nachweis der Klebeverbindungen an Bauteilversuchen verifiziert werden (Bilder 8 und 9).

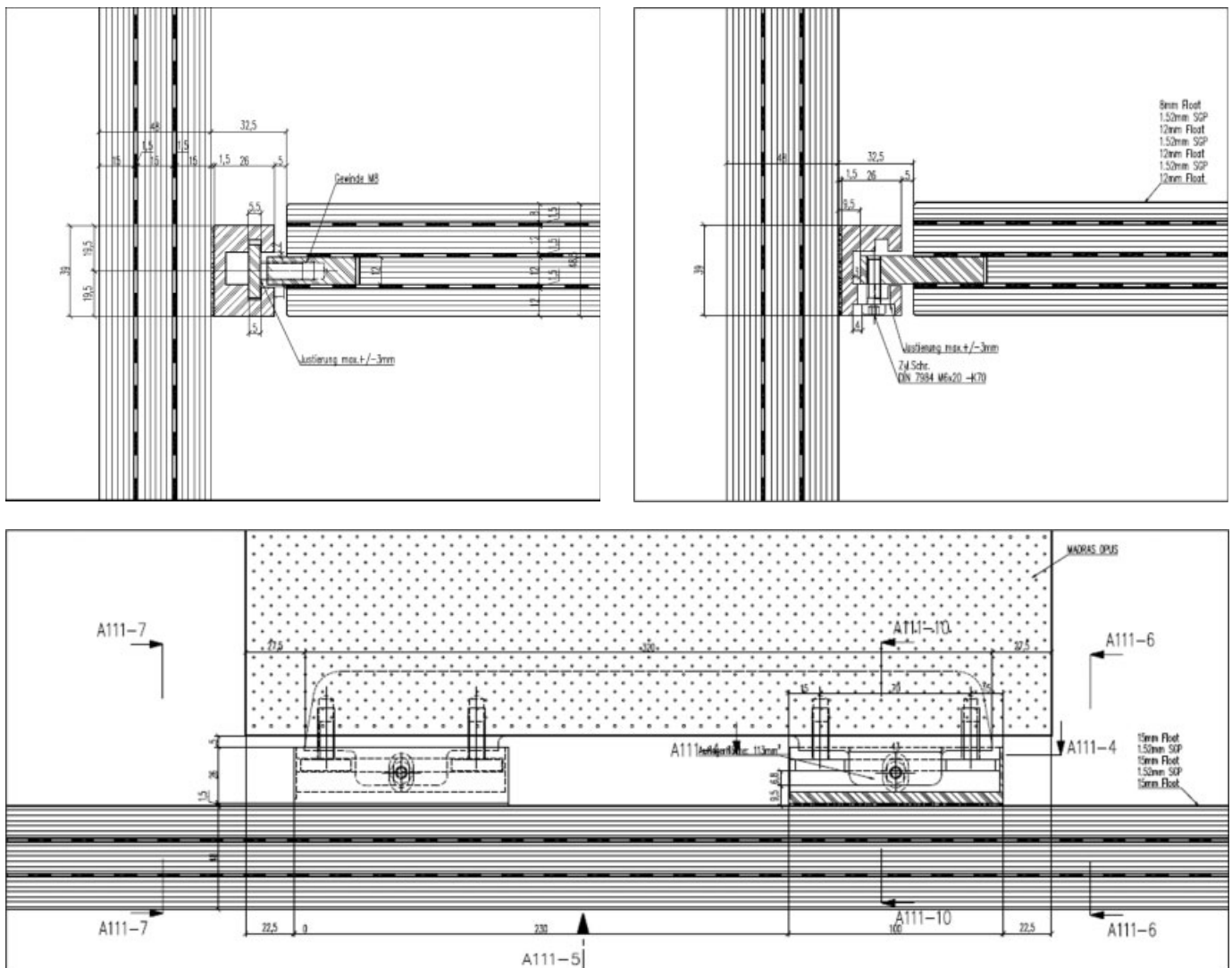


Bild 6. Befestigungspunkt Stufen/Wange (Zeichnungen: Seele)  
Fig. 6. Detailed drawing of step joint

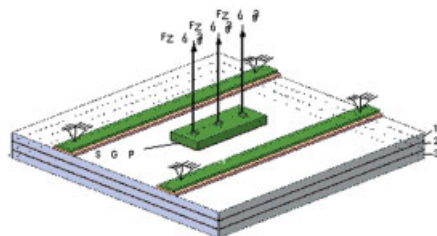
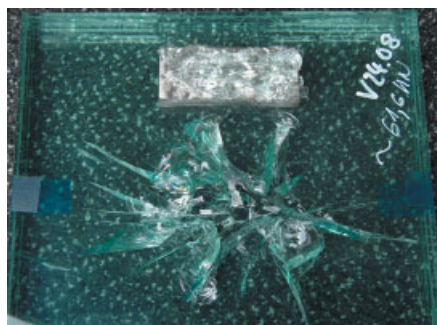


Bild 8. Zugversuch und dazugehöriges FE-Modell  
Fig. 8. Tension test and corresponding FE-model

Die Versuchsaufbauten orientieren sich an den Belastungen, die auch an der Treppe auf die Beschlagteile erwartet wurden: Zug, Druck, Biegezug auf Floatflächen sowie auf VSG-Float-Stirnseiten. Neben der Erfassung der typischen Bruchbilder dienten diese Versuche vor allem auch der Ermittlung von Bruchfestigkeiten  $R_{u,5}$  als Anwendungsgrenzen für die unterschiedlichen Belastungen. In Anlehnung an die ETAG Nr. 002 wurde für die Ermittlung der Bruchfestigkeiten aus Versuchsergebnissen an Klebproben folgender Toleranzbereich angewandt:

$$R_{u,5,\sigma,\tau} = \bar{x} - \tau_{a\beta} \cdot s$$

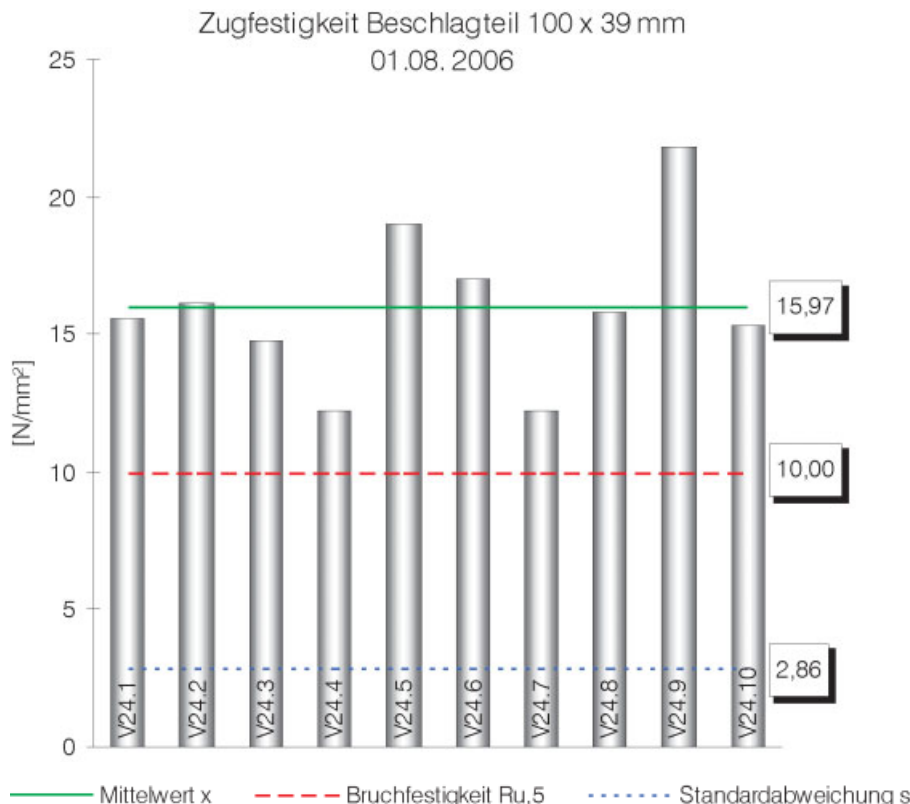


Bild 9. Balkendiagramm mit Versuchsergebnissen und Vergleich Mittelwert/Bruchfestigkeit (für den Zugversuch)  
Fig. 9. Test results in comparison to design values

Arithmetischer Mittelwert:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$$

Standardabweichung:

$$s = + \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2}{n-1}}$$

$\tau_{a\beta}$  Variablen in Abhängigkeit von der Zahl der Prüfkörper [6]

Die Annahmen entsprechen folgendem Schrankenkriterium: Mit einer Wahrscheinlichkeit von 75 % überschreiten 95 % der zukünftigen Prüfergebnisse den Wert  $R_{u,5}$  (Bild 8).

In der weiteren Vorgehensweise wurden die Bauteilversuche ebenfalls mit FE-Modellen nachgerechnet. Dabei wurden die gleichen Vernetzungen und Materialgesetze gewählt, wie sie bei den Details der Treppe Anwen-

dung finden sollten. Dadurch erhielt man für jede untersuchte Belastungsart zugehörige Bruchspannungsverläufe im Glas bzw. in den SGP-Schichten, die für die Dimensionierung der Treppendetails als Anwendungsgrenze gelten sollten. Der Sicherheitsbeiwert  $\gamma$  als Verhältnis von diesen Bruchspannungen zu den unter realer Beanspruchung errechneten Spannungen wurde bei dieser Treppe zu etwa 3 bis 4 gewählt. Die Interaktion gleichzeitig auftretender Zug- und Schubspannungen wurde in Anlehnung an [7] folgendermaßen durchgeführt:

$$\left( \frac{\sigma_{Z,Sd}}{\sigma_{Z,Rd}} \right)^2 + \left( \frac{\tau_{Sd}}{\tau_{Rd}} \right)^2 < 1$$

- $\sigma_{Z,Sd}$  einwirkende Zugspannung senkrecht zur Klebefläche
- $\sigma_{Z,Rd}$  Widerstand senkrecht zur Klebefläche
- $\tau_{Sd}$  einwirkende Schubspannung längs zur Klebefläche
- $\tau_{Rd}$  Widerstand längs zur Klebefläche

Zahl der Prüfkörper	5	6	7	8	9	10	15	30	$\infty$
Variable $\tau_{a\beta}$	2,46	2,33	2,25	2,19	2,14	2,10	1,99	1,87	1,64

## 6 Aufbau und Montage

Für den Erhalt der Standgenehmigung war die Prüfung der Konstruktion in statischer und bautechnischer Hinsicht durch einen von der Messe Düsseldorf beauftragten externen Prüfingenieur notwendig. Der Tatsache, daß es sich um einen neuartigen Technologieträger auf einer Innovationsmesse handelt, wurde bei der Prüfung Rechnung getragen. Die neuartige Verbindungstechnik konnte in einem sehr engen Zeitrahmen durch Versuche und Berechnungen nachgewiesen werden. Den Umfang einer sonst notwendigen „Zustimmung im Einzelfall“ erreicht dieses Verfahren allerdings nicht.

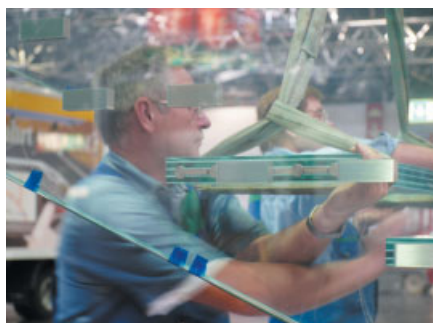
Die Fertigung solch großformatiger Glasbauteile stellt sehr hohe Anforderungen an die ausführenden Firmen. Sowohl der Zuschnitt der Glasteile, die Verklebung der einzelnen Scheiben zu VSG mit Verklebung der Edelstahlbeschlagteile als auch die Nachbearbeitung der Glaskanten konnten beim Auftraggeber auf dem firmeneigenen Glasbearbeitungszentrum und im Autoklav aus einer Hand an einem Ort in einem sehr engen Zeitfenster ausgeführt werden. Die Beherrschung der Warmverklebung über Druck und Temperatur in einem Autoklav erfordert große technische Erfahrung in der Vorbehandlung, Ausrichtung und Fixierung der Fügeteile sowie in der Wahl des Temperaturprogramms für die Herstellung der Verklebungen.

Für die Montage der Treppe auf der Messe wurde zuerst das separat stehende Glaspodest aufgestellt und am Boden verdübelt. Im Anschluß wurden die Treppenwangen mit ihren Abmessungen von  $8,50 \times 1,30$  m und



*Bild 10. Nachbearbeitung der Wangen mit laminierten Beschlagelementen (Foto: Seele)*

*Fig. 10. Mechanical finishing of supporting walls with laminated joints*



*Bild 11. Montage auf der Messe (Foto: IBK Entwicklung und Forschung)*  
*Fig. 11. Erection at the fair*

einem Gewicht von 1,3 t in die beiden Auflager eingehoben und zunächst in ihrer Lage stabilisiert. Danach wurden die Stufen in die Beschlagteile der Wangen eingeschoben und fixiert. Nach dem Einbau aller Stufen konnten die Hilfsbefestigungen entfernt werden. Insgesamt wurden für den Aufbau der Treppe ca. vier Tage mit je vier Monteuren benötigt (Bild 11).

## 7 Schlußbemerkungen

Auch wenn bis zu einer zukünftigen Zulassung dieser Bauweise noch umfangreiche Untersuchungen hinsichtlich der Alterungsbeständigkeit durchzuführen sind, zeigt die Treppe das große Potential dieser neuen Klebertechnologie. Dies wurde auch durch den Innovationspreis Glas und Architektur der Messe Düsseldorf, mit dem die Treppe ausgezeichnet worden ist,

und vor allem durch das große Interesse der Messebesucher bestätigt.

### Projektbeteiligte:

Fertigung und Montage:  
Seele GmbH & Co KG, Gersthofen  
Konzeption und Gestaltung:  
TTI GmbH an der Universität Stuttgart,  
IBK Forschung + Entwicklung,  
Prof. Dipl.-Ing. Stefan Behling,  
Dipl.-Ing. Andreas Fuchs  
Berechnung und Konstruktion:  
TTI GmbH an der Universität Stuttgart,  
ITKE Entwicklung und Anwendung,  
Prof. Dr.-Ing. Jan Knippers,  
Dr.-Ing. Stefan Peters  
Durchführung Bauteilversuche:  
FH München  
Labor für Stahl- und Leichtmetallbau  
Prof. Dr.-Ing. Ömer Bucak

### Literatur

- [1] Weller, B., Prautzsch, V., Tasche, S., Vogt, I., Jansen, I.: Fügen und Verbinden mit UV- und lighthärtenden Acrylaten. Stahlbau 75 (2006), H. 6. S. 521–528.
- [2] Peters, S.: Kleben von GFK und Glas für baukonstruktive Anwendungen. Forschungsbericht Nr. 27 des Instituts für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen, Prof. Dr. Jan Knippers, Universität Stuttgart, 2006.
- [3] Bucak, Ö., Schuler, C., Meißner, M.: Verbund im Glasbau – Neues und Bewährtes. Stahlbau 75 (2006), H. 6, S. 529–543.
- [4] Petersen, C.: Dynamik der Baukonstruktionen. Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg und Sohn Verlagsgesellschaft, 2000.
- [5] Bachmann, H.: Lebendige Fußgängerbrücken – Eine Herausforderung. Bau-technik 81 (2004), H. 4, S. 227–236.
- [6] ETAG Nr. 002: Leitlinie für die Europäische Technische Zulassung für Gelebte Glaskonstruktionen: Teil 1: Gestützte und ungestützte Systeme.
- [7] Vallée, T.: Adhesively bonded Lap Joints of pultruded GFRP shapes. Dissertation, ETH Lausanne, CCLab, 2003.
- [8] Bennison, S.: Structural Properties of Laminated Glass: Werkstoffangaben zu SentryGlas® Plus (DuPont).

### Autoren dieses Beitrages:

Prof. Dr.-Ing. Jan Knippers, Dr.-Ing. Stefan Peters, Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen, Universität Stuttgart, Keplerstraße 11, 70188 Stuttgart;  
Prof. Dipl.-Ing. Stefan Behling, Dipl.-Ing. Andreas Fuchs, Institut für Baukonstruktionen und Entwerfen, Lehrstuhl 2, Universität Stuttgart, Keplerstraße 11, 70178 Stuttgart