

Synthese aus Glas und Stahl: Die Herz-Jesu-Kirche München

Dieser Bericht zeigt am Beispiel der Herz-Jesu-Kirche München auf, wie sich durch eine gelungene Synthese von Glas und Stahl die von der Architektur gestellte anspruchsvolle Aufgabe einer gläsernen Fassade nahezu ohne sichtbare Stahlbauteile erfolgreich verwirklichen läßt. Kernstück der Glasfassade sind dabei horizontale und vertikale Glasschwerter, die tragende Funktionen aufweisen und zum Zweck der Lastweiterleitung mit U-förmigen Edelstahlprofilen verklebt sind. Da die hierbei realisierte tragende Verklebung von Glas und Stahl mit einem Silikonklebstoff innovativen Charakter aufweist, steht der Nachweis der Tragfähigkeit dieser Verklebung im Mittelpunkt aufwendiger experimenteller und theoretischer Untersuchungen. Für die gewählte Konfiguration der Verklebung hat die Anwendung eines allgemeinen Finite Elemente Verfahrens einen tieferen Einblick in die Beanspruchung der Silikonverklebung erlaubt, was die Interpretation der experimentellen Ergebnisse erleichtert und entsprechende Schlußfolgerungen für das Bauvorhaben stützt.

Synthesis of Glass and Steel : The Herz Jesu Church of Munich

This report cites the Herz Jesu Church of Munich as a demonstration how to successfully realize – by an effective synthesis of glass and steel – a solution for the challenging task posed by architecture to build a facade of glass almost without visible steel components. The core of the glass facade consists of horizontal and vertical glass beams which incorporate load bearing functionality and which are bonded to stainless steel channels for the purpose of load transfer. As the hereby realized load carrying bond of glass and steel by a silicone adhesive is of innovative nature, focus has been given on the proof of load capacity by extensive experimental and theoretical investigations. Regarding the chosen configuration it has been shown that the application of a general purpose Finite Element Analysis allows a deeper insight into the stress of the silicone sealant facilitating the interpretation of the experimental results and supporting related conclusions for the building project.

1. Ein Glasquader für Messen und Gebete: Herz-Jesu-Kirche München

Wer heutzutage das Wort Kirchenneubau hört, denkt unwillkürlich an die Turnhallen-Architektur der 60er-Jahre-Kirchen, als im Sakralbau vor allem der Mehrzweckraum propagiert wurde. Ein Gotteshaus, das sich durch seine avantgardistische Gestaltung revolutionär von diesem Schema abhebt und der modernen Kirchenarchitektur durch seine extravagante Gestaltung neue Impulse verleihen wird [1], hat bei seiner festlichen Einweihung sowohl bei den Münchner Bürgern als auch in den Medien großes Aufsehen erregt.

Der äußere Baukörper dieses spektakulären Kirchengebäudes besitzt die zeitlose Form eines Quaders und ist nahezu vollständig in Glas ausgeführt (Bild 1). Der innovative Einsatz von Glas in der Fassade dient einerseits dazu, den Grundgedanken

der Architektur, der sich an einem Bergkristall orientiert, hervorzuheben und zu betonen. Andererseits spielt die Glashaut, deren Lichtdurchlässigkeit in Gebäudelängsrichtung gezielt abgestuft wurde, eine tragende Rolle bei der Gestaltung des Lichtraumes im Inneren der Kirche.

2. Das Skelett der Herz-Jesu-Kirche, ein Stahltragwerk

Die Konzeption des Stahltragwerks und der Glasfassade orientiert sich maßgeblich an den Rastern, die der quaderförmige Baukörper der Herz-Jesu-Kirche in den verschiedenen Gebäudeachsen aufspannt. Während Gebäudelängs- und Gebäudequerachse mit 6.72 m bzw. 6.39 m einer regelmäßigen Einteilung unterliegen, basiert das Raster in vertikaler Richtung aufgrund architektonischer Gesichtspunkte auf einer von 2.40 m auf 1.56 m in 0.12 m Schritten abnehmenden arithmetischen Reihe.

Die primäre Tragkonstruktion des Kirchengebäudes besteht aus acht biegesteifen Stahlrahmen mit einem Einzelgewicht von jeweils 27.6 Tonnen, die entsprechend dem Grundraster angeordnet sind (Bild 2). Die Stahlrahmen setzen sich jeweils aus zwei geschweißten Hohlprofilen zusammen, um aus optischen Gründen möglichst minimale Profilaußenabmessungen (2 x 170/420/60/25) zu erzielen. Eine weitere Maßnahme, die Rahmenträger optisch in den Hintergrund zu rücken, stellt das Zurückversetzen der Rahmen gegenüber der Glasfassade dar, wodurch der Eindruck eines fast vollständig aus Glas bestehenden Kubus verstärkt wird.



Bild 1. Ansicht Herz-Jesu-Kirche, München
Fig. 1. View Herz Jesu Church, Munich

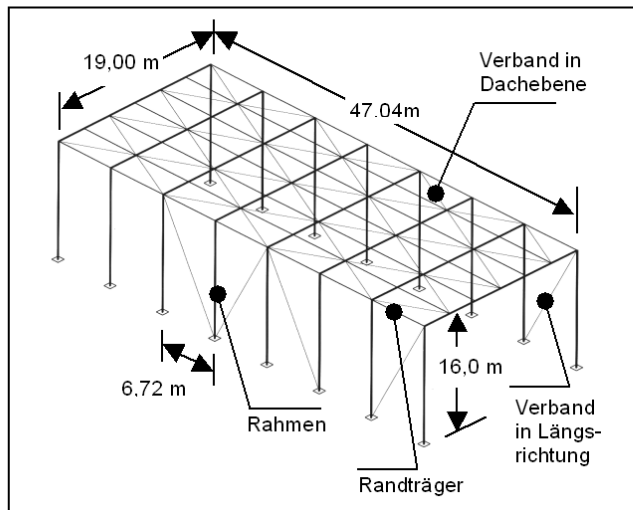


Bild 2. Statisches System der Herz-Jesu-Kirche
Fig. 2. Structural system of Herz Jesu Church

Die Lastableitung an den Fußpunkten der Rahmenstützen erfolgt jeweils mit einem Einbauteil (Bild 3). Diese Einbauteile sind so konstruiert, daß sie in der Lage sind, bei gleichzeitigem Ausgleich von Bautoleranzen in allen Richtungen die auftretenden Schnittkräfte – Einspannmomente bis zu 700 kNm und Horizontal-lasten von ca. 120 kN – weiterzuleiten. Die Wahl eines eingespannten Rahmens begründet sich durch das Auslegungsziel möglichst kleiner Deformationen des Tragwerks, um den Einfluß der Rahmenverformungen auf die Glasfassade gering zu halten [2].

In Gebäudelängsrichtung tragen Verbände in der Dachebene und an den Längsseiten die Aussteifungslasten in die Bodenplatte ein. Die Dachverbände sind im Hinblick auf die Fassade so angeordnet, daß die Rahmen in Querrichtung möglichst ähnliche Verformungen aufweisen, um Verspannungen innerhalb der Glasfassade zu minimieren.



Bild 3. Montage der Stahlrahmen
Fig. 3. Assembling of steel frames

3. Die Glasfassade als Haut der Herz-Jesu-Kirche

Im Vordergrund der konstruktiven Gestaltung der Glasfassade steht die architektonische Zielvorstellung, eine Glasfassade ohne deutlich sichtbare Stahlbauteile zu realisieren. Um die diesem Gedanken naheliegenden möglichst schlanken Tragstrukturen in der Fassade zu verwirklichen, bietet sich eine hängende Konstruktion für die Glasfassade an, bei der das Fassadeneigengewicht maßgeblich zur Stabilisierung des Tragwerks beiträgt (Bild 4). Die Glasfassade besteht dabei im wesentlichen aus den folgenden Komponenten:

Isolierglaselemente

Die Isolierglaselemente bilden das Kernstück der Glasfassade, wobei jeweils zwei Glaselemente ($b = 3,35 \text{ m}$) nebeneinander in einer Rastereinheit angeordnet sind. Die Lichtdurchlässigkeit der Isolierglaselemente ist für die gezielte Gestaltung des Lichtraumes im Kircheninneren durch unterschiedlich starke Bedrückung der Scheibenaußenseiten in Gebäudelängsrichtung abgestuft.

Horizontale Glasschwerter

Horizontal verlaufende Glasträger (Bild 5) verbinden die Fassaden- und Hängeprofile der Glasfassade über Bolzenverbindungen (Bild 6) mit den dahinterliegenden Rahmenstielen. Diese horizontalen Glasschwerter mit einer maximalen Spannweite von 6,7 m erstrecken sich über jeweils zwei Verglasungselemente. Sie gelten mit als derzeit längste Glasbauteile in Europa und bestehen aus 10/15/10 ESG.

Vertikale Glasschwerter

Die vertikal verlaufende Glasträger (Bild 7) bilden mittig und an den Enden der horizontalen Glasschwerter die Auflager. Die vertikalen Glasschwerter sind über zwei Bolzenverbindungen (Bild 8) an dem nachfolgend beschriebenen Hängeprofilen eingehängt und dienen somit als Konsolen. Die vertikalen Glasträger sind in 3x12 Floatglas ausgeführt und besitzen aufgrund der mit der Höhe abnehmenden Fassadenrasterung unterschiedliche Längen.

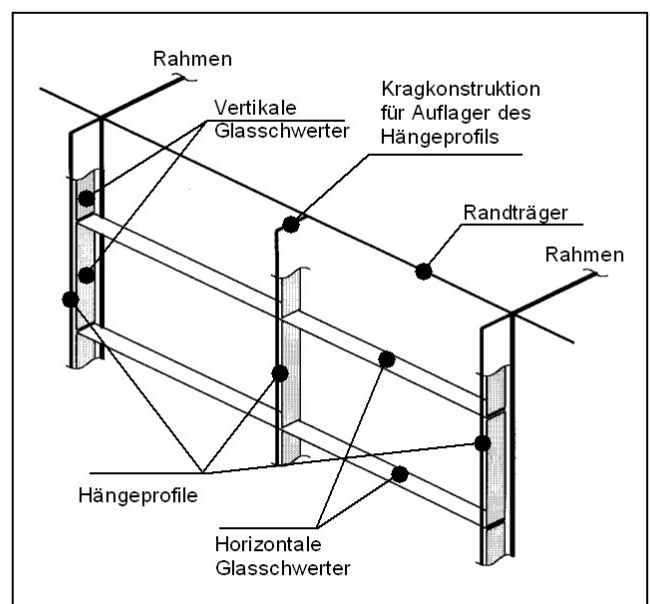


Bild 4. Ausschnitt der Hängekonstruktion der Glasfassade
Fig. 4. Suspender frame detail of the glass facade

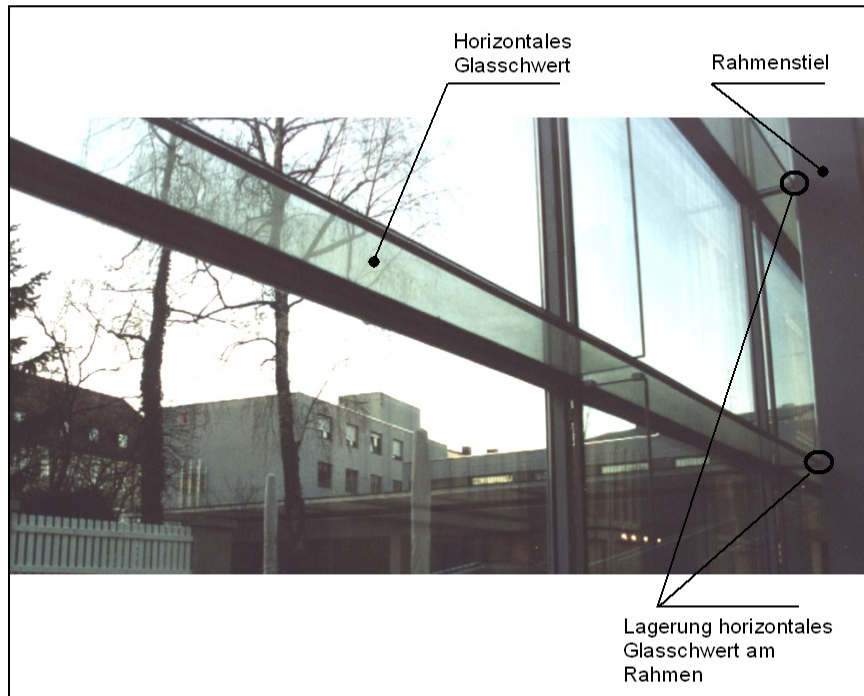


Bild 5. Ansicht horizontales Glasschwert
Fig. 5. View horizontal glass beam

Hängeprofile

Die Hängeprofile aus Edelstahl mit den Querschnittsabmessungen 70/50/4.5 stellen die zentrale Komponente der Glasfassade dar, da sie direkt die Isolierglaselemente, die vertikalen Glasschwerter und die Fassadenprofile aufnehmen. Die vertikal verlaufenden Hängeprofile sind jeweils zwischen den Isolierglaselementen angebracht und weisen Anschweißteile für den Anschluß der verschiedenen Fassadenelemente auf.

Fassadenprofile

Die Fassadenprofile verlaufen horizontal zwischen den Isolierglaselementen. Die Verbindung dieser Profile mit den horizontalen Glasschwertern erfolgt über vier Bolzenverbindungen pro Isolierglaseinheit. Steckverbindungen der Hängeprofile mit den Fassadenprofilen dienen zum thermischen Längenausgleich der Fassade in horizontaler Richtung bei gleichzeitiger Übertragungsmöglichkeit von Querkräften.

Die besondere konstruktive Ausführung der abgehängten Glasfassade erlaubt die Trennung der an den Glasscheiben auftretenden Belastungen (Eigengewicht, Windlast) in verschiedene Pfade. Die Isolierglaselemente liegen an Anschweißteilen der Hängeprofile auf, womit das Eigengewicht der schweren Glasteile direkt in die Hängeprofile eingeleitet wird.

Zusätzlich nehmen die Hängeprofile über die anmontierten vertikalen Glasschwerter die Gewichtslasten aller Glasschwerter auf. Im Unterschied dazu werden horizontal wirkende Windlasten, welche die Isolierglasscheiben in die Hänge- und Fassadenprofile einbringen, von den horizontalen Glasschwertern aufgenommen und direkt in die Rahmenstiele eingeleitet (Bild 5).

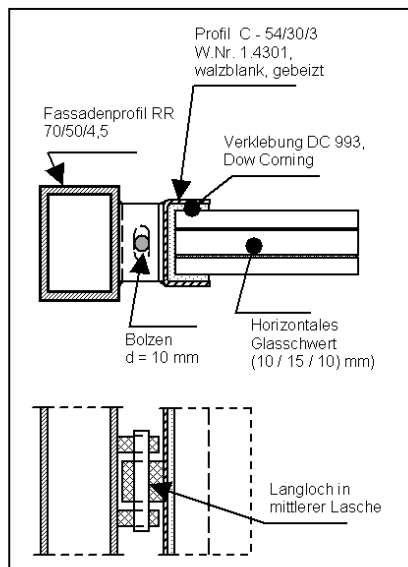


Bild 6. Detail Bolzenverbindung horizontales Glasschwert
Fig. 6. Detail pin joint horizontal glass beam



Bild 7. Ansicht vertikales Glasschwert
Fig. 7. View vertical glass beam

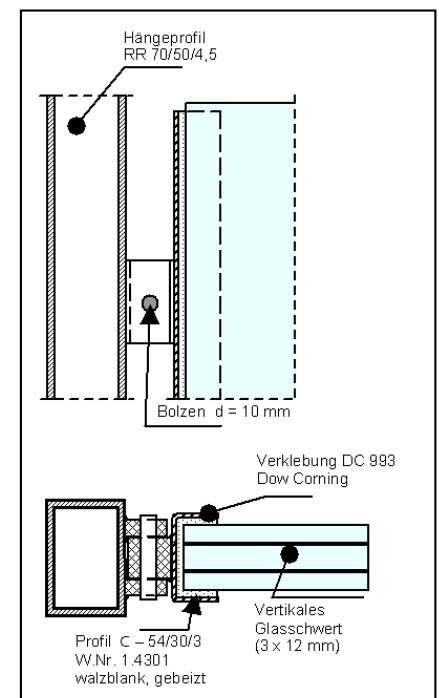


Bild 8. Detail Bolzenverbindung vertikales Glasschwert
Fig. 8. Detail pin joint vertical glass beam

Aufgrund der unterschiedlichen Funktionen der vertikalen und der horizontalen Glasschwerter sind verschiedene Nachweise über die Gestaltung dieser Verbundglasbauteile zu führen. Für die Auslegung der vertikalen Glasschwerter als Glasstützen und somit als Druckbauteile stehen Stabilitätsprobleme wie Kippen und Knicken im Vordergrund der Nachweisführung. Entsprechend den gültigen Vorschriften erfolgt der Nachweis unter der Annahme unabhängiger Einzelglasscheiben ohne Berücksichtigung einer Verbundwirkung der die Scheiben verbindenden PVB-Folien.

Für die Auslegung der horizontalen Glasschwerter maßgebend ist die Durchbiegung unter Eigengewicht und der zur horizontalen Biegung führende Windlastfall, wobei auch hier die entsprechenden Nachweise ohne Einbeziehung der PVB-Folie zu erbringen sind. Für architektonische Belange – zum Beispiel für die Ermittlung der Durchbiegung sichtbarer Glaskanten unter Eigengewicht – und für konstruktive Fragestellungen in Form von Freigängigkeitsuntersuchungen o.ä. wurden begleitende numerische Untersuchungen hingegen unter Berücksichtigung einer schubversteifenden Verbundwirkung der PVB-Folien entsprechend eines erweiterten Ansatzes von [3] mit der Methode der Finiten Elemente durchgeführt.

Hinsichtlich der Verbindungstechniken der Glasbauteile steht bei der Gestaltung der Fassade das Ziel im Vordergrund, unter optischen und konstruktiven Gesichtspunkten sowie aus Kostengründen auf Bohrungen im Glas vollständig zu verzichten. Deshalb weisen die horizontalen und vertikalen Glasschwerter einseitig aufgeklebte U-förmige Edelstahlprofile mit angeschweißten Anschlußpunkten auf, über welche die Glasschwerter mit den Fassaden- und Hängeprofilen der Fassadenkonstruktion mittels Bolzen verbunden werden (Bild 9). Für diese Verklebung kommt dabei ein handelsüblicher „Structural Glazing“ Klebstoff auf Silikonbasis mit der Bezeichnung DC 993 [4] der Firma Dow Corning zum Einsatz, der sich durch seine hervorragenden mechanischen Eigenschaften auszeichnet. Allgemein eignen sich Silikone besonders für derartige Anwendungen, da ihre Klebwirkung auf der Ausbildung chemischer Bindungen an den Grenzflächen zu Glas und Stahl beruht, was zu einem überaus günstigen Adhäsionsverhalten führt.

Die Verklebung der Stahlprofile mit den Glasschwertern erfolgt über die gesamte Innenfläche des U-Profiles, wobei die Dicke der Klebefuge (nominell 5 mm) über Schablonen eingestellt wird. Zur Oberflächenvorbereitung des Glaskörpers genügt eine Reinigung mit einem Lösungsmittel, während das walzblank gebeizte Stahlprofil zusätzlich mit einem Primer zu grundieren ist. Die Ausführung der Verklebung im Werk garantiert über die kontrollierten Bedingungen hinaus ein hohes Maß an Paßgenauigkeit und Vorfertigung, so daß an der Baustelle vor Ort nur noch Montagetätigkeiten der vorkonfektionierten Bauteile erfolgen.

4. Tragfähigkeitsuntersuchungen der Klebeverbindung

4.1. Zustimmungsverfahren

Das Tragfähigkeitsvermögen der Glaskonstruktion beruht maßgeblich auf der Leistungsfähigkeit der Klebeverbindung zwischen Stahlprofil und Glasschwert. Bei der erfolgreichen Realisierung einer tragenden Klebeverbindung aus Silikon handelt es sich um eines der bedeutenden neuartigen Konzepte

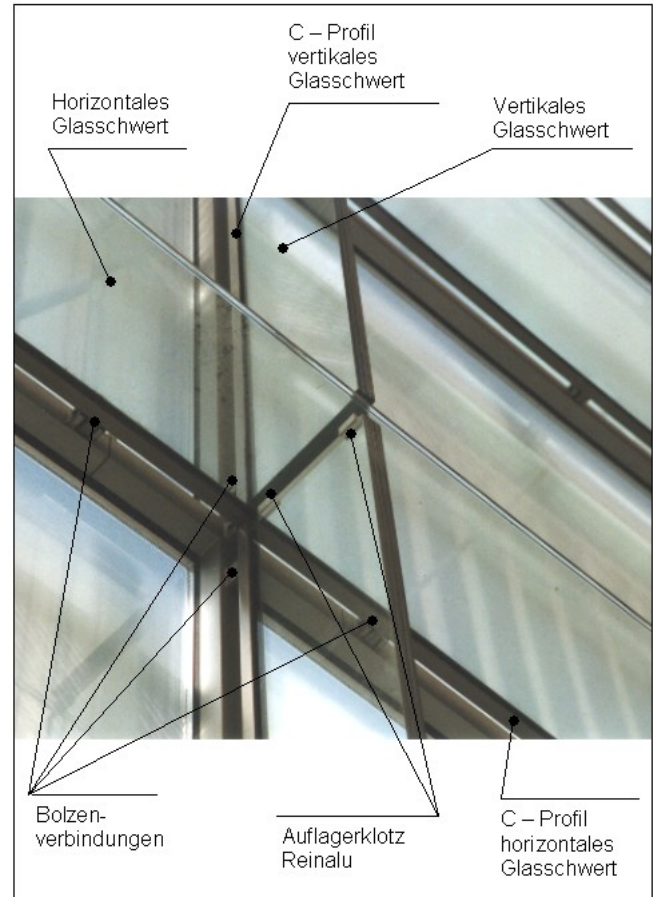


Bild 9. Anschlußpunkte der Glasschwerter
Fig. 9. Connection points of glass beams

auf technischer Seite, die beim Bau der Herz-Jesu-Kirche zur Anwendung gelangt sind.

Da der Glasträger einschließlich Verklebung eine nicht geregelte Bauart darstellt, ist für den Einsatz eines solchen Bauteils eine Zustimmung im Einzelfall durch die Oberste Baubehörde zu erwirken. Verbindungen dieser Art – auch als „Structural Glazing“ bezeichnet – werden von im deutschen Baurecht derzeit geltenden Normen nicht erfaßt.

In diesem Fall erforderte die Zustimmung im Einzelfall Bauteilversuche für die Verklebung, die in Anlehnung an die europäischen Richtlinien ETAG No.2 [5] konzipiert und durchgeführt wurden. Neben dem Institut für Tragwerksbau der Technischen Universität München, das sich mit Tragfähigkeitsversuchen der Glasschwerter befaßt hat, war das Institut für Fenstertechnik i.f.t. in Rosenheim in die experimentelle Untersuchung der Leistungsfähigkeit der Silikonverklebung zwischen Glasschwert und Stahlprofil eingebunden.

4.2. Bauteilversuche zur Silikonverklebung

Bezüglich der Verbindung zwischen Glasschwert und Stahlprofil ist der Versagensmechanismus der Verklebung unter Zugbelastung maßgebend für die Tragfähigkeit der Fassadenkonstruktion. Zusätzlich zu den Regelversuchen nach EOTA hat deshalb Dow Corning in Voruntersuchungen auch Probekörper mit

vorgesehener Verklebungsgeometrie auf Zugtragfähigkeit getestet. Diese Versuchsreihe hat das i.f.t. Rosenheim fortgesetzt und durch Variation der Versuchsbedingungen (Temperaturverhalten, Einfluß von Dauerlasten) ergänzt. Neben einer guten qualitativen Übereinstimmung zwischen den Versuchsreihen von Dow Corning und i.f.t. Rosenheim haben alle Versuchsergebnisse die sehr gute thermische Beständigkeit der Verklebung, die charakteristisch für Silikone ist [6], bestätigt.

Die vom i.f.t. Rosenheim untersuchten Prüfkörper von 50 mm Breite (Bild 10) bestehen primär aus einem Verbundglaskörper mit den Glasdicken 10/15/10. Den Abschluß an den Enden bilden U-förmige Stahlprofile, die mit dem Glaskörper über die zu untersuchenden Silikonverklebungen von 5 mm Dicke verbunden sind. Die Zugbelastung der Prüfmaschine greift an dem auf das Stahlprofil aufgeschweißten Bolzen des eingespannten Probekörpers an.

Betrachtet man das typische Kraft-Weg-Diagramm (Bild 11) eines Zugversuchs bis zum vollständigen Bruch der Probe, so läßt sich das Verhalten der Silikonverklebung phänomenologisch in drei charakteristische Bereiche unterteilen:

- Im ersten Bereich bis zu einem Weg von ungefähr 1.5 mm erkennt man ein mit einer Steigung von bis zu 2.3 kN/mm deutlich steifes Verhalten des Probekörpers. Der progressive Anlaufbereich der Kurve ist vermutlich in der Art der Versuchsdurchführung begründet und wird deshalb nicht direkt mit dem Werkstoffverhalten in Verbindung gebracht.
- Im Bereich von 1.5 mm bis 8 mm erhält man ein Gebiet deutlich niedrigerer Steifigkeit, erkennbar an einem fast linearen Anstieg mit einer Steigung von ungefähr 0.3 kN/mm. Auffallend sind die im Übergangsbereich bei etwa 2 mm Weg auftretenden Unstetigkeiten der Kurve, die sich bei höherer Auflösung als kleine unregelmäßige Einbrüche im Kraft-Weg-Diagramm erweisen.

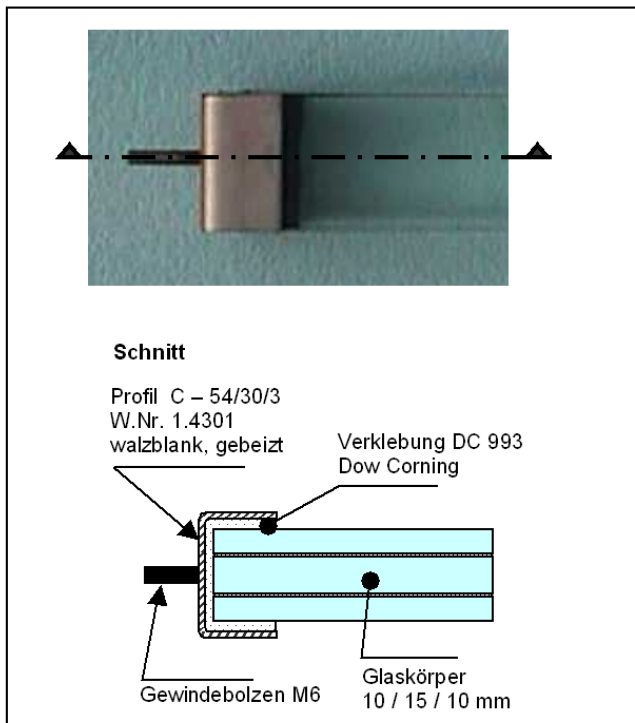


Bild 10. Probekörper für Zugversuch der Verklebung

Fig. 10. Test specimen for tension test of the structural sealant

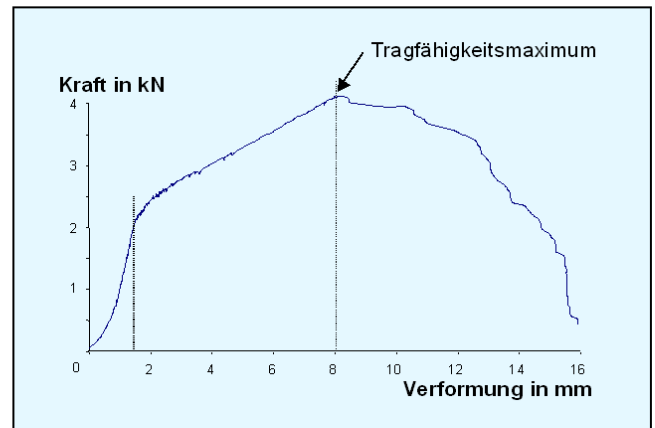


Bild 11. Typisches Ergebnis eines Zugversuchs

Fig. 11. Typical tension test result

- Bei ungefähr 8 mm Weg weist der Probekörper seine maximale Tragkraft in Zugrichtung auf. Danach versagt der Probekörper. Das Bruchbild des Probekörpers weist dabei auf einen Kohäsionsbruch im Silikonmaterial ohne Abschälen oder sonstigem Adhäsionsversagen an den Grenzflächen zu Glas oder Stahl hin. Dieses Versagensbild demonstriert, daß die gewählte Oberflächenvorbehandlung von Glas und Stahl zur Erzielung maximaler Tragfähigkeit optimal ist.

4.3. Diskussion der Verklebungsgeometrie

Aufgrund der Geometrie der Verklebung lassen sich zwei mögliche Lastpfade für den Probekörper unter Zugbelastung identifizieren. Die Silikonverklebung erfährt unter den gegebenen kinematischen Bedingungen (nahezu starres Verhalten von Glaskörper und Stahlprofil) an den Seitenflanken primär eine Schubdehnung, während an der Stirnfläche Zugdehnung dominierend ist. Das Silikonmaterial kann sich dabei an der Stirnfläche durch die fast vollständige Umschließung durch Glas und Stahl nicht frei einschnüren. Unter dem für lineare isotrope Materialgesetze gültigen Ansatz (Appendix A), daß bei Inkompressibilität der Schubmodul ein Drittel des Zugmoduls beträgt, erhält man über die stark vereinfachende Annahme eindimensionaler Spannungszustände ein Steifigkeitsverhältnis von ungefähr 3:1 [73 : 27] zwischen Stirnfläche und Seitenflanken. Dies bedeutet, daß nach dieser Überschlagsrechnung drei Viertel der Zuglast über die Stirnfläche abgetragen werden und ein Viertel über die Seitenflanken.

Eine Besonderheit, die bei einer detaillierteren Analyse zu beachten ist, liegt in dem durch die fast vollständige Inkompressibilität begründeten großen Querkontraktionsvermögen der Silikonmasse. Die Behinderung der Querkontraktion an der Stirnfläche führt über die damit verbundene Steifigkeitserhöhung zu einer deutlichen Beeinflussung des Spannungsfeldes. Um diesen Effekt in geeigneter Weise untersuchen zu können, erfolgt eine genauere kontinuumsmechanische Betrachtung der Verklebung mit Hilfe eines allgemeinen Finite Elemente Programmes [7].

4.4. Finite Elemente Modellierung des Probekörpers

Die drei Komponenten des Probekörpers – Edelstahlprofil, Silikonverklebung und Glaskörper – werden im Finite Elemente Modell des Probekörpers wie folgt abstrahiert (Bild 12):

- Die Diskretisierung des Edelstahlprofils erfolgt mittels konventioneller finiter Volumenelemente. Die Werkstoffbeschreibung von Stahl basiert auf einem durch Elastizitätsmodul und Querkontraktionszahl definierten linear-elastischen Materialgesetz. Das Rechenmodell simuliert die Ziehbewegung der Prüfmaschine dadurch, daß die Knoten des Stahlprofilnetzes am Fußpunkt des Bolzens in Zugrichtung verschoben werden. Der Bolzen wird bei dieser Vorgehensweise als starr betrachtet.

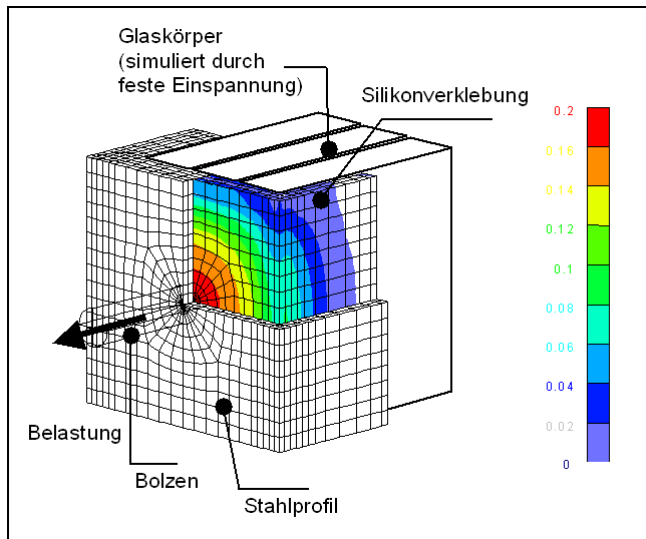


Bild 12. FE-Modell des Probekörpers mit Zugspannungsverteilung der Verklebung

Fig. 12. FE model of test specimen with normal stress distribution in structural sealant

- Für die Diskretisierung der Silikonverklebung gelangen Volumenelemente mit parabolischem Verschiebungsansatz zur Anwendung, die speziell auf die Anwendung hyperelastischer Materialgesetze für Elastomere abgestimmt sind. Diese Elemente zeichnen sich dadurch aus, daß sie aufgrund der getrennten Behandlung der Gestaltänderungs- und Volumenänderungsenergierme ein vorteilhaftes numerisches Verhalten unter fast vollständiger Inkompressibilität aufweisen. Diese Eigenschaft ist von besonderer Bedeutung für Konfigurationen wie der hier vorliegenden Verklebung, bei denen ein nahezu inkompressibles Material fast vollständig von im Verhältnis sehr steifen Bauteilen oder starren Randflächen eingeschlossen ist.
- Der Glaskörper wird aufgrund seiner hohen Steifigkeit als Starrkörper betrachtet. Somit reduziert sich die Beschreibung des eingespannten Glaskörpers auf geometrische Randbedingungen für die entsprechenden Grenzflächen der Silikonverklebung.

4.5. Materialbeschreibung des Silikonklebstoffs

Klassische Ansätze zur Beschreibung inkompressibler hyperelastischer Materialien basieren auf der im Werkstoff gespeicherten elastischen Energie, die für isotrope Materialien über einen Polynomausdruck der ersten und zweiten Invarianten

I_1 , I_2 (Appendix B) des Dehnungstensors angesetzt wird. Bekanntestes Beispiel hierfür ist das Mooney-Rivlin Gesetz, dessen Gültigkeitsbereich je nach Anwendung bei ungefähr 30% bis 50% Dehnung gesehen wird:

$$\text{Dehnungsenergiefunktion Mooney-Rivlin} \\ \varphi = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3)$$

Um auch noch Bereiche höherer Dehnung adäquat abbilden zu können, gelangt hier für die Analyse der Silikonverklebung ein erweitertes Modell mit quadratischem Term zur Anwendung, wobei man die Koeffizienten C_{10} und C_{02} durch Abgleichen mit experimentellen Ergebnissen erhält:

$$\text{Ansatz Dehnungsenergiefunktion} \\ \varphi = C_{10}(I_1 - 3) + C_{02}(I_2 - 3)^2$$

Zur Vervollständigung der Materialbeschreibung wird desweiteren noch ein funktionaler Zusammenhang zwischen hydrostatischem Druck und Volumendehnung benötigt, da Elastomere – wenn auch nur in sehr geringem Maß – kompressibel sind. Ein dem Kompressionsmodul vergleichbarer Materialkoeffizient wurde so gewählt, daß er im Fall kleiner Dehnungen einer Querkontraktionszahl von $\nu = 0.495$ entspricht, siehe auch [8].

4.6. Diskussion der Finite Elemente Ergebnisse des Probekörpers

Abbildung 12 stellt als Ergebnis der Finite Elemente Rechnung die Verteilung der Zugspannungen über der Struktur dar. Genauere Analysen der Spannungsflüsse bestätigen die Dominanz der Stirnfläche hinsichtlich der Mechanismen der Lastübertragung. Eine genauere quantitative Auswertung der Knotenkräfte an Stirnfläche und Seitenflanken führt zu dem Ergebnis, daß nicht nur 75% wie aus der einfachen Abschätzung erhalten, sondern ungefähr 90% der Last über die Stirnfläche abgetragen werden.

Dieses Ergebnis läßt sich durch die behinderte Querkontraktion des Silikonwerkstoffs erklären. Durch die fast vollständige Umschließung der Verklebungsoberfläche wird der Silikonwerkstoff in seinem Bestreben, sich unter Zugbelastung einzuschnüren, massiv behindert. Durch die starke Koppelung von Längs- und Querdehnung reagiert die Silikonverklebung an der Stirnfläche mit erhöhter Steifigkeit in Probenzugrichtung mit der Folge, daß zusätzliche Lastanteile über die Stirnfläche abgetragen werden. Diese Versteifung der Verklebung ist durchaus erwünscht, da auf der einen Seite eine hohe Steifigkeit in Zug- und Druckrichtung zur Funktionalität der Fassade beiträgt, während auf der anderen Seite die geringe Schubsteifigkeit zu einer gewissen Unempfindlichkeit der Verklebung gegenüber Dehnungen in Schwerlängsrichtung aufgrund von Temperaturschwankungen führt.

Es ist zu vermuten, daß aufgrund der hohen Beanspruchung der Stirnfläche das Material hier schon sehr früh bis an die Grenzen seiner Leistungsfähigkeit belastet wird. Die im Versuch über 1.5 mm Weg deutlich abfallende Steifigkeit des Probekörpers sowie die kleinen Unregelmäßigkeiten im Kraftverlauf lassen vermuten, daß bereits bei diesem Belastungsniveau ein partielles Werkstoffversagen innerhalb der Silikonverklebung im Stirnbereich stattfindet. Die Schubspannungen an den Seitenflanken fallen bei diesen Verschiebungen deutlich geringer aus, weshalb bei zunehmender Belastung noch von einem weitgehend intakten Lastpfad über die

Seitenflanken ausgegangen werden kann, bis dann ab 8 mm Weg das Totalversagen eintritt. Diese Hypothese steht auch im Einklang mit den Ergebnissen entsprechender Schubversuche, bei denen sowohl Stirn- und Seitenflächen gleichermaßen auf Schub beansprucht werden und kein ähnlich signifikanter Steifigkeitsabfall ab 1.5 mm Weg wie in Bild 11 aufgetreten ist.

5. Tragfähigkeitsuntersuchungen der Glasschwerter

5.1. Horizontales Glasschwert

Die horizontalen Glasschwerter sind primär zur Aufnahme von Windlasten der Glasfassade vorgesehen. Darüber hinaus beanspruchen Versatzlasten, welche aus der exzentrischen Lagerung der Isolierglaseinheiten und der Konsolwirkung der unterschiedlich langen vertikalen Glasschwerter resultieren, die horizontalen Glasschwerter zusätzlich auf horizontale Biegung.

Zur Übertragung dieser Lasten befinden sich am Stahlprofil des horizontalen Glasschwerts neun Stahllaschen (Außenabmessungen 50x27x20mm), die als Anschlußpunkte für die Bolzenverbindungen zwischen Glasschwert und lastführendem Fassadenprofil dienen. Die Laschen reichen fast über die gesamte Höhe der Stirnfläche des U-förmigen Stahlprofils und sind mit diesem über je eine Schweißnaht oben und unten ungefähr auf Höhe der Profilflansche verbunden. Ein in vertikaler Richtung angeordnetes Langloch für die Bolzenverbindung gewährleistet die ausschließliche Übertragung horizontaler Kräfte.

Für Winddruck und Windsog ergeben sich für die jeweils höchstbelastete Bolzenverbindung Querkräfte in der Größenordnung 1.5 – 1.6 kN, wobei diese Windlasten typischerweise nur kurzzeitig einwirken. Die hingegen als Dauerlasten wirkenden Versatzlasten weisen ein deutlich niedrigeres Niveau von bis zu 0.3 kN in Zugrichtung auf.

Die Untersuchung der Verklebung des horizontalen Glasschwerts lehnt sich an dem in Kapitel 4 vorgestellten Vorgehen beim Probekörper an. Die Modellierung der Verklebung erstreckt sich allerdings nicht über die gesamte Glasschwertlänge, sondern nur über einen Ausschnitt von 300 mm, der den Kräfteinleitungsbereich einer Stahllasche abdeckt. Dabei orientiert sich die Länge des modellierten Ausschnitts an einer anhand von Voruntersuchungen abgeleiteter Abschätzung der mittragenden Breite. Querverschiebungen der Knoten an den dabei entstehenden freigeschnittenen Flächen werden nicht zugelassen, um wirklichkeitsfremde Randeffekte wie ein Einschnüren an den Schnittflächen zu unterdrücken. Die Lasteinleitung im Modell erfolgt unter Annahme starrer Laschen an den Fußpunkten der Schweißnaht auf dem Stahlprofil.

Bild 13 stellt die Zugspannungsverteilung innerhalb der Silikonverklebung des horizontalen Glasschwerts unter kritischem Windsog dar. Die Möglichkeit eines direkten Vergleichs mit Referenzspannungen oder -dehnungen des Silikonmaterials zur

Abschätzung der Tragfähigkeitsreserven bleibt aufgrund fehlender Grenzwerte verwehrt. Deshalb bedient man sich einer Synthese aus experimentellen und numerischen Ergebnissen des Probekörpers, um das dabei erhaltene Spannungsniveau zu beurteilen. Um einen Anhaltspunkt für die Belastung der Glasschwertverklebung zu erhalten, variiert man in einem iterativen Prozess die Zugkraft des FE-Modells des Probekörpers so lange, bis sich die Zugspannungsniveaus an den Stirnflächen von Glasschwert und Probekörperverklebung weitgehend entsprechen. Die dabei erhaltene rechnerische Zugkraft des Probekörpers erlaubt dann durch Vergleich mit der maximal

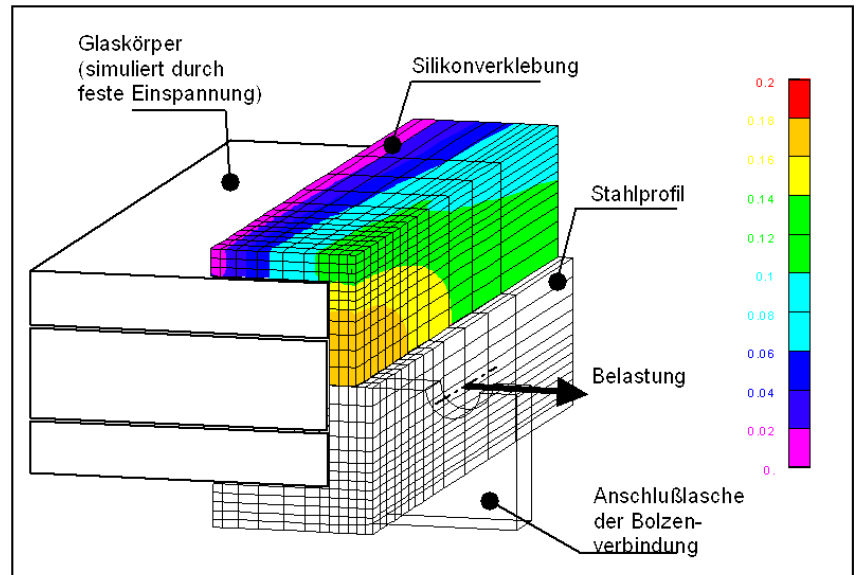


Bild 13. FE-Halbmmodell Bereich Bolzenverbindung des horizontalen Glasschwertes mit Zugspannungsverteilung in der Verklebung

Fig. 13. FE half model of pin joint area of horizontal glass beam with normal stress distribution in structural sealant

tolerierbaren Belastung aus den experimentellen Zugversuchen einen Aufschluß über die Tragfähigkeitsreserven der Verklebung des horizontalen Glasschwerts.

5.2. Vertikales Glasschwert

Die vertikalen Glasschwerter haben die Aufgabe, die auf der Oberkante auf Reinaluminiumklötzen aufliegenden horizontalen Glasschwerter zu unterstützen und die daraus resultierenden Lagerlasten einschließlich deren Eigengewicht in die Hängeprofile abzuleiten.

Dafür weisen die Stahlprofile der vertikalen Glasschwerter jeweils zwei Stahllaschen auf, die ähnlich wie beim horizontalen Schwert als Anschlußpunkte für die Bolzenverbindungen zwischen Glasschwert und Hängeprofil dienen. Im Gegensatz zur Ausführung beim horizontalen Glasschwert sind die Laschen um 90 Grad bezüglich der Profilachse gedreht, um eine horizontale Anordnung der Bolzenachsen im Einbauzustand zu erzielen. Die beidseitig ausgeführten Schweißnähte liegen somit nicht mehr im Bereich der Profilflansche, sondern durch die im Verhältnis zur Laschenlänge kürzeren Breite bedingt weiter in Richtung Stegmitte.

Die vertikale Belastung der oberen Bolzenverbindung ergibt sich dabei aus der Summe von Eigengewichtslast des vertikalen Schwerts – ungefähr 0.6 kN je nach Länge – und von einem Gewichtslastanteil des horizontalen Schwerts von 1.2 kN. Die aus den exzentrischen Schwerpunktlagen der Glasschwerter resultierende Momentenbelastung wird über ein an den beiden Laschen angreifendes Kräftepaar in Horizontalrichtung aufgenommen, wobei das kürzeste Glasschwert hier aufgrund der Hebellängenverhältnisse zu den größten Horizontalkräften mit bis zu 0.3 kN führt. Das Stahlprofil selbst ist am unteren Ende geschlossen ausgeführt, um die Übertragung der Vertikallasten des Glasschwerts in das Profil über eine formschlüssige Klotzung zu bewerkstelligen.

Anhand einer dem horizontalen Glasschwert entsprechenden Vorgehensweise erhält man die Zugspannungsverteilung innerhalb der Silikonverklebung des vertikalen Glasschwerts unter kritischer Zugbelastung, Bild 14. Aufgrund des im Vergleich niedrigeren Lastniveaus fällt das Spannungsniveau für die vertikalen Glasschwerter deutlich geringer aus. In diesem Zusammenhang ist zu erwähnen, daß die zu diesen Spannungen führenden Beanspruchungen Dauerlasten darstellen, weshalb hier Kriterien bezüglich Werkstoffkriechen vorrangig zu beachten sind. Vergleiche mit den Ergebnissen des horizontalen Glasschwerts zeigen, daß bei dieser Konfiguration der Lastpfad von den Schweißnähten in die Profilflanken ungünstiger verläuft, weshalb die schon hoch belastete Stirnfläche im Verhältnis zur eingeleiteten Belastung noch stärker beansprucht wird.

6. Fazit

Anhand einer U-förmigen Verklebung unter Zugbelastung demonstriert dieser Bericht, daß einfache Abschätzungen, die unter der Annahme eindimensionaler Spannungszustände auf Elastizitäts- und Schubmodul sowie den Verklebungsgeometrien beruhen, aufgrund der behinderten Querkontraktion im Stirnflächenbereich die Verhältnisse in der Verklebung quantitativ nur sehr unzureichend beschreiben. Deshalb stellen analytische oder numerische Rechenmethoden, welche über dreidimensionale Ansätze alle Spannungs- und Dehnungskomponenten in der Verklebung erfassen, geeignete Verfahren der Wahl dar.

Aufgrund noch unvollständiger Kenntnisse der Werkstoffgrenzen von Silikon unter komplexer Beanspruchung sind wie im Beispiel der Herz-Jesu-Kirche Versuche zur Ermittlung der Tragfähigkeit bei vorgegebener Verklebungsgeometrie notwendig. Um die konstruktive Ausführung der Glasfassade unter festigkeitstechnischen Gesichtspunkten beurteilen zu können, wird deshalb eine als sichere Last nachzuweisende Beanspruchung der Fassadenverklebung auf eine adäquate Belastung des Probekörpers projiziert und mit dem Tragfähigkeitsmaximum des Probekörpers verglichen. Um das Potential der Silikonverklebung in Zukunft voll ausschöpfen zu können, ist anzustreben, das Wissen über das Materialverhalten des Silikonwerkstoffs vor allem hinsichtlich seiner Festigkeitsgrenzen und zweiter bruchmechanischer Aspekte zu erweitern.

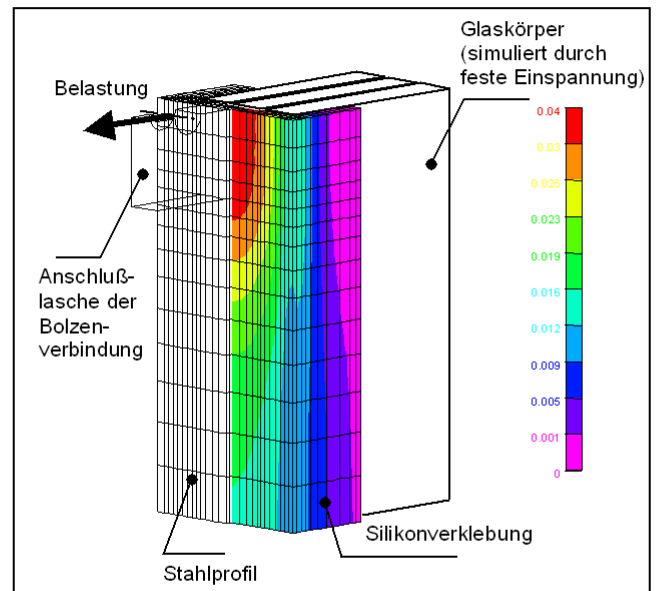


Bild 14. FE-Halbmödelldarstellung Bereich Bolzenverbindung des vertikalen Glasschwerts mit Zugspannungsverteilung in der Verklebung

Fig. 14. FE half model of pin joint area of vertical glass beam with normal stress distribution in structural sealant

Danksagung

Die Autorin bedankt sich beim Maßnahmenträger, dem Erzbischöflichen Ordinariat München, für die Bereitstellung der Versuchsergebnisse sowie bei der Katholischen Pfarrkirchenstiftung Herz Jesu als Bauherren und bei den planenden Architekten M. Allmann, A. Sattler und L. Wappner für die Unterstützung bei der Bearbeitung dieser Veröffentlichung.

Literatur

- [1] Meyer, G., Herwig, O.: Heilige Neubauten. FOCUS 51 (1999), S.88–91.
- [2] Hagl, A.: Das Tragwerk der Herz-Jesu-Kirche aus Stahl und Glas: Bauen mit transparenten Baustoffen. VBI Fortbildungsseminar Bayern, München, März 1999.
- [3] Conslik, P.J.: MSC/NASTRAN Analysis of shear transfer in laminated architectural glass. MSC 1992 World Users' Conference Proceedings, Volume I, Paper No.2, Mai 1992.
- [4] Dow Corning: Technische Information: Dichtungsmasse für den Glasfassadenbau (Structural Glazing): Dow Corning® 993. Produktbeschreibung, 1996.
- [5] EOTA (European Organisation for Technical Approvals) : ETAG No.2 Guideline for European Technical Approval for Structural Sealant Glazing Systems. Brüssel, 1998.
- [6] Habenicht, G.: Kleben: Grundlagen, Technologie, Anwendungen, Springer Berlin, 1997, S. 120–121.
- [7] The McNeal-Schwendler Corporation: MSC/NASTRAN for Windows, User's Guide. Los Angeles, Oktober 1997.
- [8] Wolf, A.T., Descamps, P.: Determination of Poisson's Ratio of Silicone Sealants from Ultrasonic and Tensile Measurements. Performance of Exterior Building Walls, ASTM STP 1422, P.G. Johnson, Ed., American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2002.

Appendix A

Für lineare isotrope Werkstoffe gilt: $G = E / 2(1 + \nu) = E/3$ für $\nu = 0,5$
 mit G Schubmodul, E Elastizitätsmodul, ν Querkontraktionszahl

Appendix B

In den Hauptdehnungsrichtungen gilt: $\lambda_i = l/l_{0i} = 1 + \varepsilon_i$ für $i=1,2,3$,
 mit l_i deformierte Länge, l_{0i} undeformierte Länge, ε_i Dehnung

Damit lauten die Invarianten:

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_1^2 \lambda_3^2$$

Autorin dieses Beitrages:

Dipl. Ing. (FH) Anneliese Hagl, Geschäftsführerin der A. Hagl Ingenieurgesellschaft mbH,
 Pasingerstraße 16, 82166 Gräfelfing