

## MSC/NASTRAN for Windows, innovativer Glasbau und eine Kirche

Nachdruck der gleichlautenden Veröffentlichung im Anwenderbericht MSC News Dezember 2000

### Architektonisches Konzept der Herz Jesu Kirche München

Wer heutzutage das Wort Kirchenneubau hört, denkt unwillkürlich an die Turnhallenarchitektur 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 dramatisch neue Impulse verleihen wird [1,2], strebt – rechtzeitig zur Jahrtausendwende – in diesen Monaten im Münchner Ortsteil Neuhausen an der Lachnerstraße seiner Fertigstellung entgegen.

Der äußere Baukörper des Kirchengebäudes besitzt die zeitlose Form eines Quaders und



Dipl. Ing. Anneliese Hagl  
Geschäftsführerin der  
A. Hagl Ingenieures. mbH,  
München  
Beratende Ingenieurin  
BYIKa Bau

ist nahezu vollständig in Glas ausgeführt, siehe Abbildungen 1 und 2. Der innovative Einsatz von Glas in der Fassade dient einerseits dazu, den Grundgedanken der Architektur, der sich an einem Kristall 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. Das Kirchengebäude steht durch diesen besonderen Einsatz von Licht, so die Aussage des verantwortlichen Architektentrios Allmann Sattler Wappner aus München, in der Tradition alter Kirchenbaumeister, die bis zur Gotik zurückreicht.



**Bild 1** Seitenansicht des Architektur-Modells Herz-Jesu Kirche München

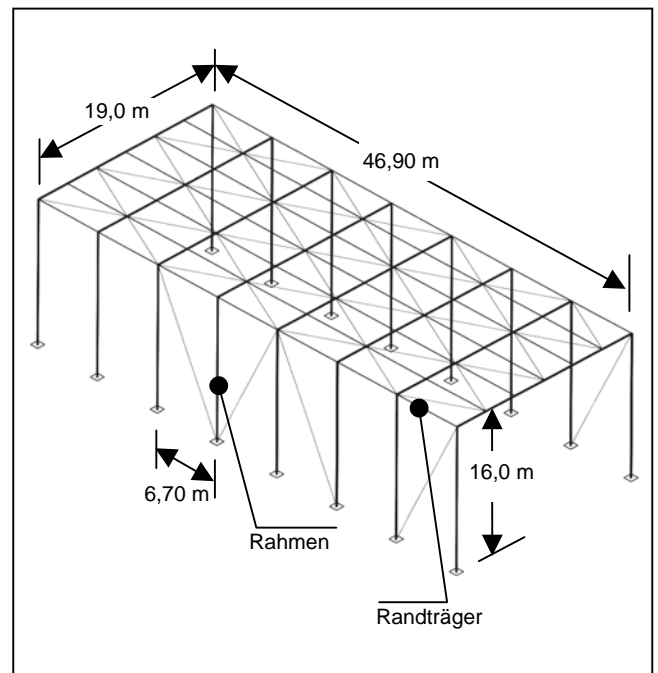


**Bild 2** Seitenansicht der Glasfassade im Bau

Die technischen Grenzen, welche die gotische Baukunst durch maximale Glasgrößen und Verwendung von starken Stützpfählen eingeengt haben, werden bei diesem Gebäude durch die Verwendung neuartiger Bau-techniken überwunden. Auch mit diesem zukunftsweisenden Bauwerk werden die Kirchenbauer – wie zu allen Zeiten – die technischen Möglichkeiten des Machbaren ausloten und verschieben. Als Basis hierzu dienen dabei auch moderne Rechen-verfahren, mit deren Hilfe die Eigenschaften neuartiger Werkstoffe und innovativer Verbindungstechniken gezielt im Sinne optimaler Lösungen kombiniert werden.

Als Beispiel für die Bedeutung von Finite-Element Analysen in einem derart komplexen Zusammenspiel verschiedener Disziplinen der Konstruktions- und Materialwissenschaften stellt dieser Bericht die Behandlung maßgeblicher Klebeverbindungen der Glasfassade – beginnend von genehmigungsrechtlichen Aspekten bis hin zum Nachweis

der Leistungsfähigkeit der Verklebung – mit Hilfe von MSC/NASTRAN for Windows vor.

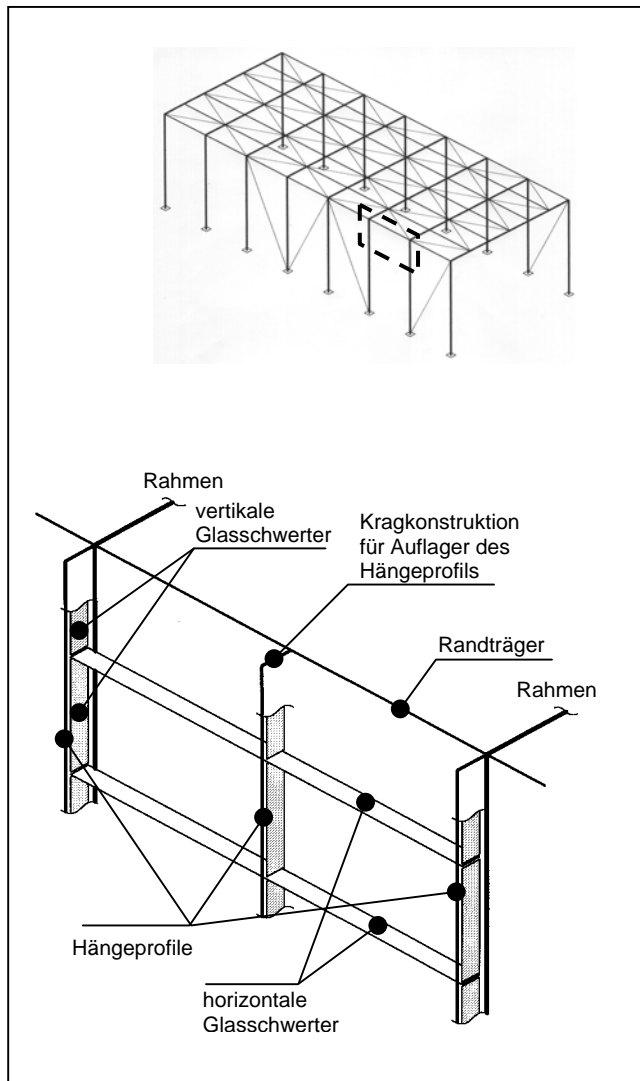


**Bild 3** Stahltragwerk der Herz-Jesu Kirche

### Konstruktive Ausführung der Herz-Jesu Kirche München

Die Tragkonstruktion des Kirchengebäudes basiert auf einem Rahmentragwerk aus Stahl [3], an dessen Außenseite eine allseitige Glasfassade angebracht ist, um den Eindruck eines vollständig aus Glas bestehenden Kubus zu erwecken. Das maßgebliche Gerippe des Rahmentragwerks besteht aus acht gewaltigen biegesteifen Rahmen mit 27 to Einzelgewicht, die jeweils 6.7 m Abstand zueinander aufweisen und über Diagonal-verbände entsprechend Abbildung 3 in Gebäudelängsrichtung ausgesteift sind.

Die Glasfassade ist in hängender Anordnung am Rahmentragwerk angebracht, siehe Abbildung 4. Die besondere Ausbildung der Glaskonstruktion als abgehängte Fassade erlaubt die Trennung der an den Glasscheiben auftretenden Lastgruppen (Gewichtskraft, Windlast) in verschiedene Lastpfade mit dem Ziel, die Glasfassade ohne deutlich sichtbare Stahlbauteile zu realisieren, wie in der Innenansicht der Fassade Abbildung 5 angedeutet ist :



**Bild 4** Ausschnitt der hängenden Glasfassade

- ◆ Die Gewichtslasten der Glasscheiben werden direkt in Hängeprofile eingeleitet, die über die Randträgerelemente mit den Kopfpunkten der Rahmenträger verknüpft sind. Die Glasscheiben bestehen dabei aus Isolierglaselementen mit Abmessungen bis zu 3.35 m Breite, 2.4 m Höhe und 560 kg Gewicht.
- ◆ Horizontal verlaufende Glasträger – hier kurz als horizontale Glasschwerter bezeichnet – nehmen die aufgrund der Größe des Gebäudes beträchtlichen Windlasten der Glasfassade von den Glasscheiben auf und leiten sie direkt in die dahinterliegenden Rahmenträger. Die Windlasten können sich dabei sowohl in Druck- als auch in Soglasten äußern. Die horizontalen Glasschwerter weisen 6.7 m Bauteillänge auf und erstrecken sich damit über zwei Verglasungselemente. Sie gelten

als derzeit längste Glasbauteile in Europa; ein weiteres Indiz für den hohen Grad an technischer Innovativität dieses Kirchenbauwerks.

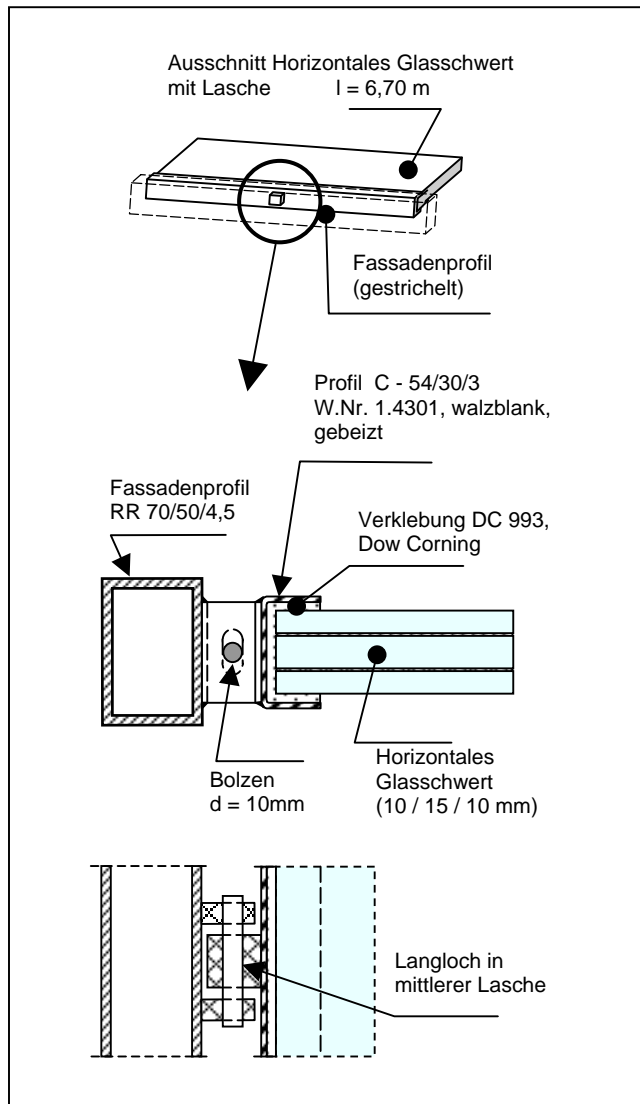


**Bild 5** Innenansicht der Glasfassade Detail

- ◆ Vertikal verlaufende Glasträger – die vertikalen Glasschwerter – fixieren die horizontalen Glasschwerter in ihrer Position und tragen die dabei entstehenden Gewichtslasten in die Hängeprofile ab. Eine unterstützende Wirkung der vertikalen Glasschwerter für die horizontalen Glasschwerter ist notwendig, da diese auf Grund ihrer extremen Länge ihre Eigenlast nicht ohne Zwischenlagerung tragen können.

Um die Glasschwerter mit der Fassadenunterkonstruktion tragfähig verbinden zu können, weisen die Glasschwerter auf der zur Fassade zugewandten Seite aufgeklebte Edelstahlprofile mit Anschlußpunkten zur Lasteinleitung auf. Die Detailzeichnung Abbildung 6 gibt Aufschluß über das Anschlußdetail des horizontalen Glasschwerter, das die horizontal wirkenden Windlasten über Bolzenverbindungen an das mit den Rahmenträgern verbundene Fassadenprofil weitergibt. In der Detailzeichnung Abbildung 7 ist die Aufhängung des vertikalen Glasschwerter an das Hängeprofil dargestellt. Über diese Verbindungen leitet das vertikale Glasschwert die Gewichtslasten des horizontalen Glasschwerter und sein Eigengewicht ab.



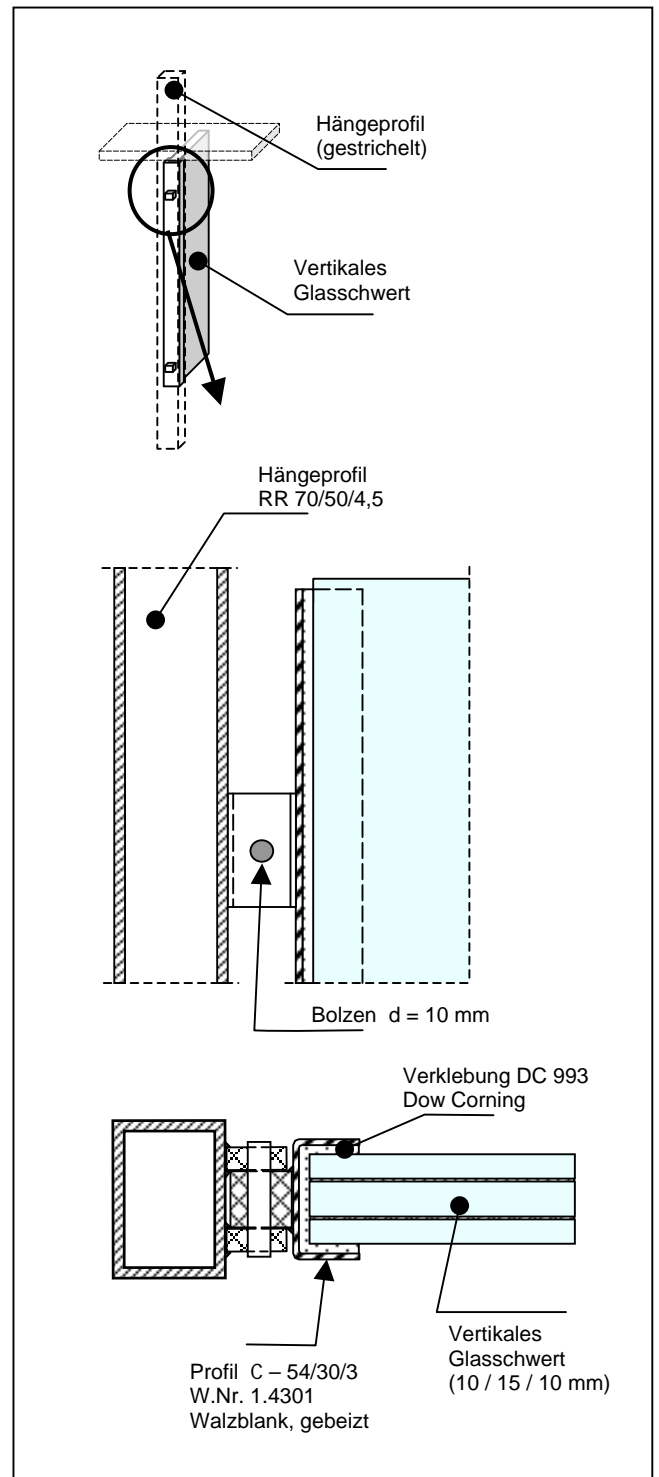


**Bild 6** Anschlußdetail Horizontales Glasschwert

Die Verklebungen der Glasschwerter mit den Anschlußprofilen in diesen Kräfteinleitungszonen stehen im Mittelpunkt der nachfolgenden Untersuchungen.

**Genehmigungsrechtliche Aspekte der Verklebungstechnik**

Die Fähigkeit der Glasfassade in ihrer konstruktiven Gesamtheit, die auftretenden Lasten aufzunehmen und in das Rahmentragwerk abzutragen, beruht unter anderem maßgeblich auf der Leistungsfähigkeit der Klebeverbindung zwischen Stahlprofil und Glasschwert. Der Einsatz dieser Klebeverbindung aus Silikonmasse [4] stellt eines der bedeutenden neuartigen Konzepte auf technischer Seite des Kirchengebäudes dar. Aufgrund der Innovativität in der Anwendung bedarf diese Klebeverbindung eines besonderen Genehmigungsverfahrens, da Verbindungen



**Bild 7** Anschlußdetail Vertikales Glasschwert

dieser Art – im angelsächsischen Sprachgebrauch auch als "Structural Glazing" bezeichnet – von im Baurecht geltenden Normen nicht ausreichend erfaßt werden. Aufgrund der hier angewandten nicht genormten Bauausführung bedarf es einer "Zustimmung im Einzelfall" durch die Oberste Baubehörde, deren Grundlagen im allgemeinen aus einer Kombination von Gutachten und Bauteilversuchen bestehen. Die Zustimmung im Einzelfall hat deshalb

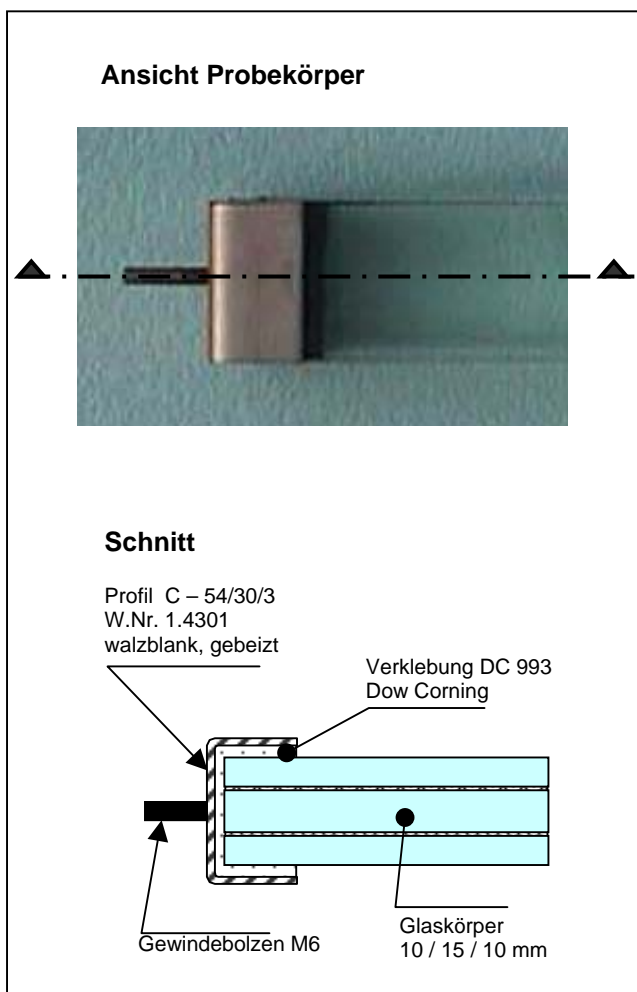
Bauteilversuche für die Verklebung erfordert, die in Anlehnung an die europäischen Richtlinien ETAG No.2 [5] konzipiert und durchgeführt wurden. Neben der Technischen Universität München (Institut für Tragwerksbau), die sich mit Tragfähigkeitsversuchen der Glasschwerter befaßt hat, war insbesondere das Institut für Fenstertechnik (ift) in Rosenheim zuständig für die Untersuchung der Verklebungstechnik zwischen Glasschwerter und Stahlprofil.

### Bauteilversuch für die Verklebung Glasschwert-Stahlprofil

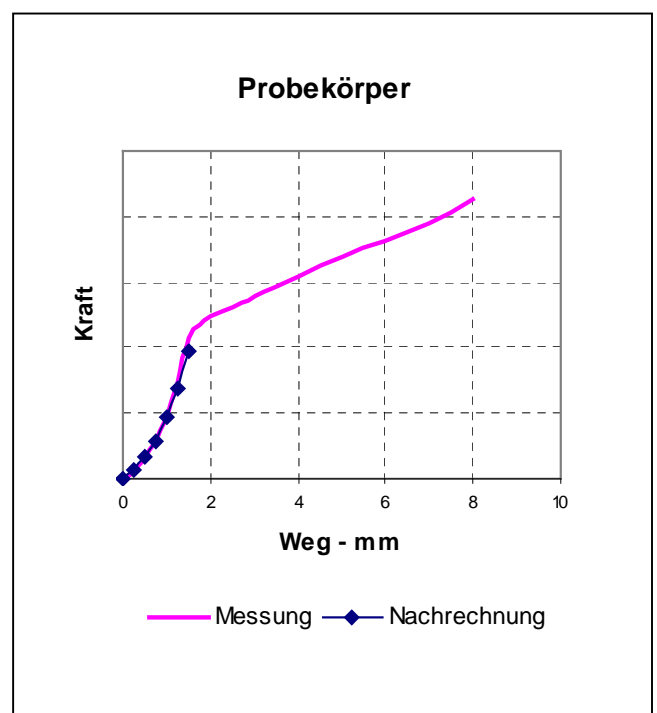
Für die Verbindung zwischen Glasschwert und Stahlprofil ist der Versagensmechanismus unter Zug ausschlaggebend für die Tragfähigkeit des Systems. Deshalb hat das Institut für Fenstertechnik Probekörper von 50 mm Breite, wie in Abbildung 8 dargestellt, bis zum vollständigen Versagen unter Zug belastet, um Rückschlüsse auf die Leistungsfähigkeit der Verbindung zu erlauben. Die Probekörper bestehen dabei aus Verbundglaskörper dreier Scheiben mit Glas-

dicken von 10 mm / 15 mm / 10 mm entsprechend dem Aufbau der Glasschwerter. Den Abschluß an den Enden bilden die Stahlprofile, die auf der einen Seite mit dem Glaskörper über die zu untersuchenden Silikonverklebungen verbunden sind und auf der anderen Seite über Anschweißteile in die Prüfmaschine eingespannt und bis zum Bruch belastet werden. Durch die Ausbildung beider Probekörperenden als Verbindungsstücke mit Verklebung und Profil sind pro Probekörper zwei Versuche durchführbar, wobei die Prüfkörper im mittleren Bereich in der Prüfmaschine geklemmt werden.

Abbildung 9 zeigt das Kraft-Weg-Diagramm eines repräsentativen Zugversuchs bis zum Erreichen der maximalen Zugbelastung. Das Verhalten der Silikonverklebung läßt sich in zwei in ihrer Charakteristik deutlich unterscheidbare Bereiche unterteilen, wobei der erste Bereich bis zu einem Weg von ungefähr 1.5 mm reicht und der zweite Bereich sich dann anschließend bis zum Erreichen der Maximallast erstreckt. Im ersten Bereich erkennt man ein deutlich progressives Verhalten des Probenkörpers, das in nichtlinearen Materialeigenschaften des Silikonwerkstoffs zu suchen ist. Danach erhält man einen fast linearen Anstieg der Belastung mit der Auslenkung, der sich bei höherer Auflösung der Kurve durch Unstetigkeiten in Form von kleinen unregelmäßigen Einbrüchen auszeichnet.



**Bild 8** Probekörper für Zugversuch



**Bild 9** Kraft-Weg-Diagramm unter Zuglast

Die Versuchsergebnisse des Probekörpers dienen nun zweierlei Aufgaben. Einerseits stellt das Kraft-Weg-Diagramm eine Art Indikator für das Belastungsniveau der Silikonverklebung dar, indem man eine als sichere Last nachzuweisende Belastung der Glasschwertverklebungen auf eine adäquate Belastung des Probekörpers projiziert und mit dem Belastungsmaximum des Probekörpers vergleicht. Andererseits bietet das Kraft-Weg-Diagramm durch Nachrechnungen eine Anpassungsmöglichkeit für das Materialgesetz des Silikonwerkstoffs, die allerdings durch die inhomogenen Spannungsverteilungen im Probenkörper eingeschränkt in ihrer Aussagekraft ist.

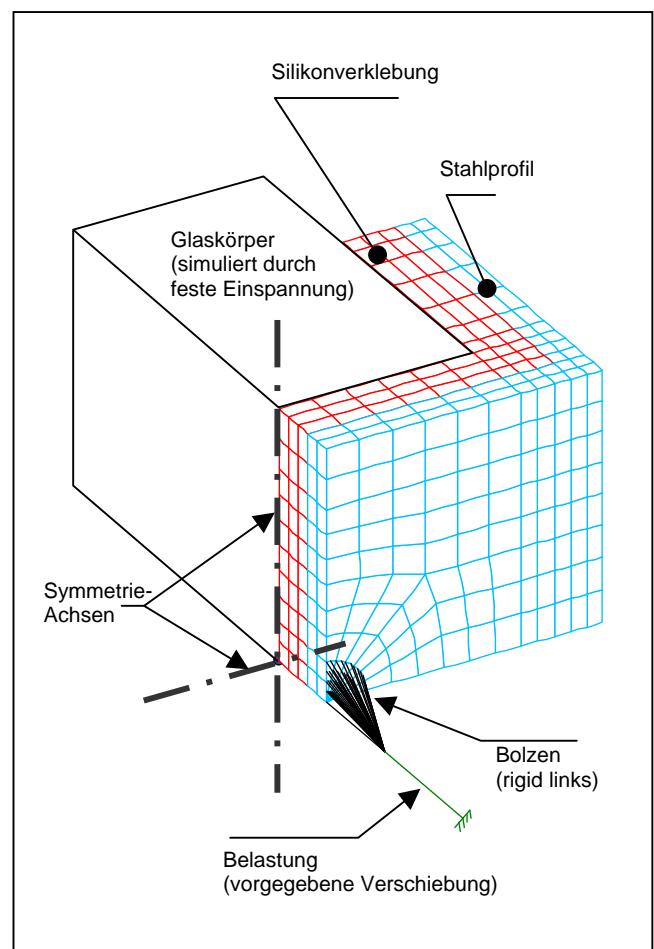
### FE-Analyse des Probekörperverhaltens mit MSC/NASTRAN for Windows

Die Interpretation der Ergebnisse der Zugversuche gestaltet sich dahingehend komplex, da der Probenkörper aufgrund seiner an die Glasfassade angelehnten Geometrie inhomogene Spannungsfelder aufweist und somit keine reinen Materialabhängigkeiten in der Form direkter Spannungs-Dehnungsbeziehungen wie bei klassischen Zug- oder Schubproben gewonnen werden können. Die Silikonverklebung erfährt bei einer Zugbelastung des Probekörpers an den Seitenflanken eine Schubbeanspruchung, während an der Stirnfläche eine Belastung auf Zug dominierend ist. Somit sind zwei unterschiedliche Lastübertragungsmechanismen, nämlich Schub an den Flanken und Zug an der Stirnfläche, maßgeblich für das Gesamtverhalten des Probekörpers.

Darüber hinaus führt das große Querkontraktionsvermögen der Silikonmasse sowie deren freie Ränder und die inhomogene Lasteinleitung zu Störungen des Spannungsfeldes in der Verklebung. Um die verschiedenen Effekte untersuchen zu können, besteht der nächste Schritt nun darin, das Verhalten der Verklebung des Probekörpers mit Hilfe des FE-Programms MSC/NASTRAN for Windows zu analysieren.

Der elastische Teil des FE-Modells, das sich unter Ausnutzung von Symmetriebedingungen auf ein Viertelmodell reduziert, besteht aus den mit Volumenelementen diskretisierten Komponenten Silikonverklebung und

Edelstahlprofil, siehe Abbildung 10. Die Verwendung parabolischer Volumenelemente von MSC/NASTRAN for Windows erlaubt hierbei eine Modellierung, die dem noch unbekanntem Verlauf großer Verschiebungs- und Spannungsgradienten sowie dem Einfluß großer Querkontraktionszahlen auch unter ungünstigen Bedingungen Rechnung trägt. Nachdem die Ergebnisse erster linearer FE-Analysen das erstellte FE-Modell bezüglich seiner Anwendbarkeit bestätigt haben, führt der dann vorgenommene Wechsel der Materialdefinition der Silikonverklebung von linearisotropen zu hyperelastischem Material automatisch zur Verwendung spezieller Volumenelemente innerhalb von MSC/NASTRAN for Windows.



**Bild 10** FE-Modell des Probekörpers

Diese Elemente zeichnen sich dadurch aus, daß sie aufgrund von getrennter Behandlung der Gestaltänderungs- und Volumenänderungsenergieterme ein vorteilhaftes numerisches Verhalten unter fast vollständiger Inkompressibilität aufweisen. Bei dem Glaskörper, dessen elastische Werkstoffeigenschaften vergleichbar mit

Aluminium sind [6], sowie dem an das Profil aufgeschossene Bolzen kann unter Beachtung der vorliegenden Geometrie- und Steifigkeitsverhältnissen von einem nahezu starren Verhalten ausgegangen werden. Deshalb wird die Geometrie dieser Komponenten über die Wahl entsprechender Randbedingungen berücksichtigt. Unterdrückte Verschiebungsfreiheitsgrade an den Innenseiten der Silikonverklebung beschreiben die Rückhaltewirkung des damit als starr abstrahierten Glaskörpers. Die Fußpunkte des Bolzens auf dem Edelstahlprofil sind über "rigid link"-Definitionen starr miteinander verknüpft und mit einer vorgeschriebenen Verschiebung in Probenlängsrichtung beaufschlagt.

Da für die Bestimmung der Koeffizienten für das hyperelastische Materialgesetz keine weiteren Versuchsdaten für den verwendeten Silikonwerkstoffs vorliegen, verbleibt nur die Vorgehensweise einer Nachrechnung der Zugversuche. Dabei ist zu beachten, daß damit Struktureigenschaften über eine Integration der inhomogenen Spannungsverteilungen im Probekörper und nicht Materialeigenschaften über weitgehend konstante Spannungs- und Dehnungszustände wie bei klassischen Probengeometrien kalibriert werden. Um im Grenzfall kleiner Belastungen ein ähnliches Verhalten wie bei linearem Materialverhalten (definiert über den Elastizitätsmodul  $E$  und der Querkontraktionszahl  $\nu$ ) zu erhalten, geben die folgenden für sehr kleine Dehnungen gültigen Beziehungen erste Anhaltspunkte für die Wahl der Koeffizienten  $A_{10}$ ,  $A_{01}$  und  $D_1$  des hyperelastischen Materialgesetzes in MSC/NASTRAN for Windows :

$$A_{10} + A_{01} = \frac{G}{2}, \quad \text{mit Schubmodul}$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

$$D_1 = \frac{K}{2}, \quad \text{mit Kompressionsmodul}$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$$

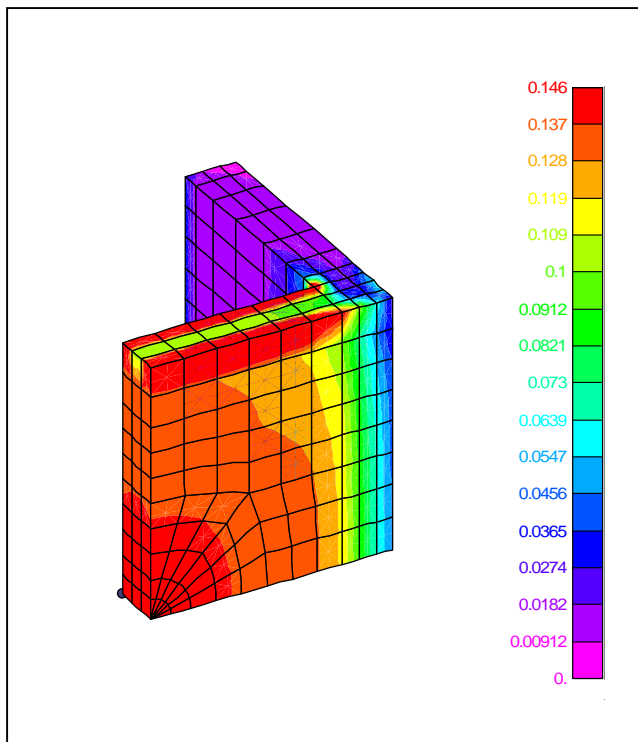
Da die FE-Analyse des Probekörpers mit diesen Konstanten ein degressives Kraft-Weg-Verhalten zeigt, erfolgt die Anpassung an das progressive Verhalten des Probekörpers über die geeignete Wahl eines weiteren Koeffizienten  $A_{20}$ .

Mit dem Ansatz  $A_{01} = 0$  definiert sich das Materialgesetz der Silikonmasse somit lediglich über die drei Koeffizienten  $A_{10}$ ,  $A_{20}$  und  $D_1$ . Wie in Abbildung 9 zu erkennen ist, ergibt sich damit eine hinreichende Genauigkeit zur Beschreibung des Probenverhaltens bis ungefähr 1.5 mm Weg.

Die über 1.5 mm Weg hinaus deutlich abfallende Steifigkeit des Probekörpers läßt vermuten, daß hier bereits ein partielles Werkstoffversagen innerhalb der Silikonverklebung stattfindet. Dieses besondere Verhalten wird beim Aufstellen des Materialgesetzes für die Silikonverklebung nicht berücksichtigt, da auf der einen Seite die klassischen hyperelastischen Materialgesetze nicht zur Beschreibung von Werkstoffschädigungen ausgelegt sind und auf der anderen Seite das für die Glasschwerter abzudeckende Lastniveau nicht dermaßen hohe Belastungen umfaßt, wie die Ergebnisse der FE-Analysen zeigen werden.

Abbildung 11 stellt als Ergebnis der FE-Rechnung die Verteilung der maximalen Hauptspannungen über der Struktur dar. Genauere Analysen der Spannungsflüsse führen auf für den außenstehenden Betrachter zunächst überraschende Ergebnisse hinsichtlich der Mechanismen der Kraftübertragung. Der Hauptübertragungsmechanismus erfolgt trotz des niederen Elastizitätsmoduls der Silikonverklebung nicht über Schub an den Flanken des Glaskörpers, sondern über Zug an der Stirnfläche, weshalb sich die weiteren Analysen auf das Niveau der Zugspannungen im Stirnflächenbereich konzentrieren.

Dieser Mechanismus steht auch im Einklang mit der hohen Querkontraktion des Silikonwerkstoffs, der sich ähnlich wie typische Elastomere verhält. Durch die fast vollständige Umschließung der Verklebungsoberfläche durch Glaskörper und Stahlprofil wird der Silikonwerkstoff in seinem Bestreben, sich unter Zugbelastung einzuschnüren, stark behindert. Durch die starke Koppelung von Längsdehnung und Querkontraktion reagiert die Silikonverklebung daraufhin mit großer Steifigkeit in Probenzugrichtung. Da die Lastübertragung durch Schub und Zug als parallel geschaltete Steifigkeiten bzw. Federn betrachtet werden können, kann man mit dieser Analogiebetrachtung und der Annahme



**Bild 11** Verteilung der maximalen Hauptspannungen

einer gegenüber der "Schubfeder" sehr steifen "Zugfeder" das Ergebnis der FE-Analyse dahingehend bestätigen, daß der wesentliche Anteil der Last durch Zug an der Stirnfläche übertragen wird.

Vor dem Hintergrund dieser Ergebnisse läßt sich auch die folgende Interpretationsmöglichkeit für das besondere Verhalten des Probenkörpers hinsichtlich seiner Kraft-Weg-Charakteristik anführen: Es ist zu vermuten, daß aufgrund der hohen Steifigkeit an der Stirnfläche das Material hier schon sehr früh bis an die Grenzen seiner Leistungsfähigkeit belastet wird und bei einem Weg von mehr als 1.5 mm Versagensmechanismen entstehen, die keine wesentlich höheren Zugspannungen über diesen Lastpfad mehr erlauben. Bei weiter zunehmendem Weg tritt dann eine Lastumlagerung dahingehend auf, daß das Material an den Seitenflächen, das aufgrund der bis jetzt erfahrenen geringeren Materialbelastungen in seiner Tragfähigkeit noch nicht beeinträchtigt ist, zunehmend die Lastübertragung über Schub bewerkstelligt, bis dann ab 8 mm Weg das Totalversagen durch Kohäsionsbruch eintritt.

## Nachrechnung der Verklebung des horizontalen Glasschwerts

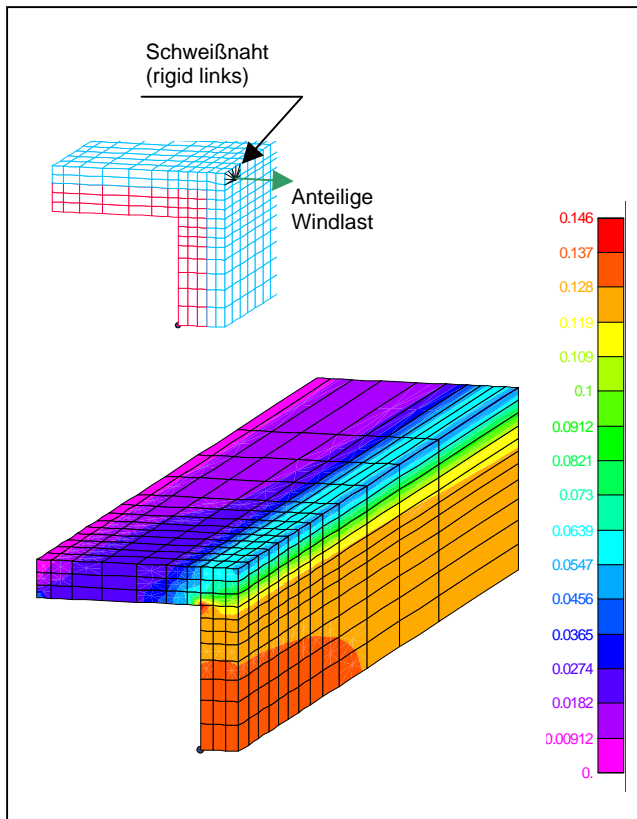
Da die horizontalen Glasschwerte zur Aufnahme von Windlasten vorgesehen sind, bildet der Windsog den kritischen Lastfall für die Verklebung des Stahlprofils mit diesem Bauteil. Für die Übertragung der Windlasten befinden sich acht Stahllaschen an den Profilen verteilt über die gesamte Länge des horizontalen Glasschwerts, die als Anschlußpunkte der Bolzenverbindungen zwischen Glasschwert und windlastführendem Fassadenprofil dienen. Diese Stahllaschen mit einer Breite von jeweils 25 mm sind massiv ausgeführt und weisen damit eine hohe Steifigkeit auf. Die Stahllaschen reichen fast über die gesamte Höhe der Stirnfläche und sind mit je einer Schweißnaht oben und unten mit dem Stahlprofil verbunden.

Um die FE-Analyse der Bauteilversuche auf die Verhältnisse in der Verklebung des horizontalen Glasschwerts zu übertragen, erfolgt als nächster Schritt die Erstellung eines dem modellierten Probekörper entsprechenden Netzes, um die Verklebung des horizontalen Glasschwerts mit dem Stahlprofil unter realistischen Annahmen zu analysieren. Wie bei der Vorgehensweise beim Probekörper bieten sich auch hier parabolische Volumenelemente zur Modellierung von Silikonmasse und Stahlprofil an. Um das FE-Modell hinsichtlich seiner Größe in einem sinnvollen Rahmen zu halten, orientiert sich die Länge des als Ausschnitt aus dem Glasschwert modellierten Viertels an einer anhand von Vorversuchen abgeleiteten Abschätzung der mittragenden Breite im Bereich der kraftübertragenden Bolzenverbindungen. Diese Vorgehensweise führt zu einem vom Spannungsniveau her konservativen Ansatz, d. h. die errechneten Spannungen liegen aufgrund dieser Approximation etwas höher.

Die Netzfeinheit des FE-Modells nimmt in Glasschwertlängsrichtung mit zunehmender Entfernung von der Lasche ab, da große Gradienten in der FE-Lösung aufgrund der Krafteinleitung über die Bolzenverbindungen hauptsächlich in der Nähe der Laschen auftreten und dort eine höhere Elementdichte fordern. Die Lasteintragung in das Stahlprofil über die Laschen erfolgt im Modell über Starrkörperbedingungen ("rigid links"), welche die Schweißnaht zwischen der als starr



betrachteten Lasche und dem Stahlprofil simulieren und mit dem entsprechenden Anteil der zu berücksichtigenden Windlasten beaufschlagt werden.



**Bild 12** Horizontales Glasschwert, maximale Hauptspannungen

Abbildung 12 zeigt die Verteilung der maximalen Hauptspannungen der Silikonmasse im Modell der Verklebung des horizontalen Glasschwerts unter Windsog. Um das dabei erhaltene Spannungsniveau zu beurteilen, bedient man sich unter Verwendung des gemessenen Kraft-Weg-Diagramms und der FE-Analyse des Probekörpers der folgenden Vorgehensweise: Der Probekörper wird mit MSC/NASTRAN for Windows rechnerisch soweit belastet, bis er ein ähnliches Spannungsniveau der maximalen Hauptspannungen aufweist wie die Verklebung des horizontalen Glasschwerts aus Abbildung 12. Das Verhältnis der dabei notwendigen Zugkraft zur maximal tolerierbaren Belastung des Probekörpers ergibt dann im Analogieschluß einen Anhaltspunkt für die Tragfähigkeitsreserven der Verklebung des horizontalen Glasschwerts. Legt man für die Spannungsverteilung des Prüfkörpers ähnliche Werte wie in Abbildung 11 zugrunde, so ergibt sich für die Verklebung des horizontalen

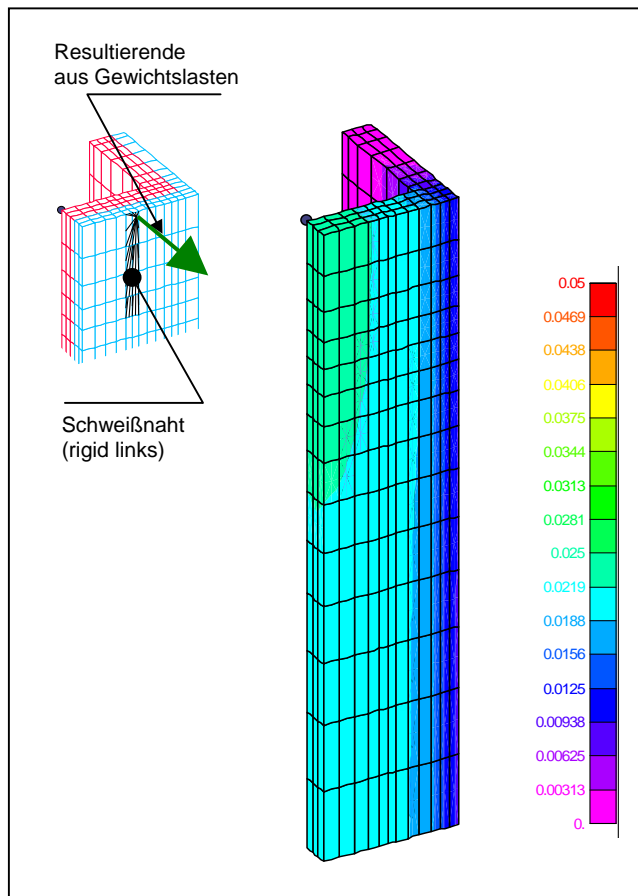
Glasschwerts eine mehr als ausreichende Sicherheit.

### Nachrechnung der Verklebung des vertikalen Glasschwerts

Das vertikale Glasschwert, welches die Aufgabe hat, die Gewichtslasten des horizontalen Glasschwerts und das Eigengewicht an die Hängprofile zu übertragen, unterscheidet sich vom horizontalen Glasschwert neben der Belastung sowohl in seinen Abmessungen als auch in der Ausgestaltung der Laschen. Während beim horizontalen Glasschwert die Lasche durch die waagerechte Anordnung der Bolzenverbindung fast die gesamte Stirnfläche des Edelstahlprofils erfaßt, führt die Anordnung der Bolzenverbindung bei den vertikalen Glasschwertern aufgrund der nun geänderten geometrischen Bedingungen lediglich zu einer teilweisen Überdeckung der Profilstirnfläche im Laschenbereich.

Aufgrund der dadurch eingeschränkten Übertragbarkeit der Ergebnisse des horizontalen Glasschwerts auf die Verhältnisse am vertikalen Glasschwert ergibt sich die Notwendigkeit, das vertikale Glasschwert einer gesonderten FE-Analyse zuzuführen. Der Netzaufbau entspricht dabei im wesentlichen demjenigen des horizontalen Glasschwerts. Änderungen ergeben sich hauptsächlich in der Berücksichtigung der geänderten Anordnung der Schweißnaht und in einem den auftretenden Gewichtslasten angepassten Lastniveau.

In Abbildung 13 findet man die Verteilung der maximalen Hauptspannungen für den modellierten Ausschnitt der Verklebung des vertikalen Glasschwerts. Im Vergleich zum horizontalen Glasschwert fällt das deutlich tiefer liegende Spannungsniveau in der Verklebung des vertikalen Glasschwerts auf, woraus sich schlußfolgern läßt, daß die Verklebung des vertikalen Glasschwerts im Verhältnis deutlich niedriger beansprucht ist.



**Bild 13** Vertikales Glasschwert, maximale Hauptspannungen

Bei der Beurteilung der Tragfähigkeit des vertikalen Glasschwerts sind allerdings weitere Aspekte zu berücksichtigen, deren ausführliche Diskussion den Rahmen dieses Berichts übersteigen und deshalb hier nur kurz angedeutet werden. So stellen die Gewichtslasten, die auf die Verklebung der vertikalen Glasschwerte einwirken, Dauerlasten dar im Gegensatz zu kurzzeitigem Windsog, der die Verklebung der horizontalen Glasschwerte beansprucht. Unter lang andauernder Beanspruchung sind Materialien wie die eingesetzte Silikonmasse unter dem auftretenden Lastniveau hinsichtlich ihres Kriechvermögens zu beurteilen. Desweiteren ergeben sich für diese Fassadenkonstruktion unter Berücksichtigung möglicher redundanter Lastpfade unterschiedliche Sicherheitsphilosophien für die Verklebungen der vertikalen und horizontalen Glasschwerte.

### Fazit

Innovative Bauweisen im Bauingenieurwesen, die sich durch moderne Werkstoffe und fortschrittliche Verbindungstechniken auszeichnen, erfordern in zunehmendem Maße

Rechenverfahren, welche die Vielfalt der möglichen Anwendungen in all ihren Gestaltungsformen von der Auslegungs- und Berechnungsseite her auffangen können und damit für den Ingenieur beherrschbar und realisierbar machen. Die Anforderungen, die der Anwender über rein numerische Aspekte hinaus an diese Rechenverfahren stellt, lassen sich maßgeblich durch hohe Flexibilität in der Anwendung bei dennoch einfacher Bedienbarkeit beschreiben.

Dieser Bericht demonstriert, wie das FE-System MSC/NASTRAN for Windows derartigen Anforderungen im Bereich tragenden Glases als einem Beispiel für fortschrittliche und zukunftsgerichtete Bauweisen in diesem Sinn entspricht. Hierbei spielt auch der Gesichtspunkt eine tragende Rolle, daß jedes Gebäude mit diesen Größenverhältnissen seinen eigenen Prototypen darstellt. Die klassische Verwendung eines Prototyps zum Austesten neuer Entwicklungen, wie aus dem Maschinenbauwesen her bekannt, ist im Bauingenieurwesen aus naheliegenden Gründen nicht anwendbar. Deshalb spielen bei neuartigen Bauweisen Bauteilversuche und deren Übertragbarkeit auf die Großausführung eine bedeutende Rolle, wie hier anhand des Genehmigungsverfahrens "Zustimmung im Einzelfall" erläutert wurde.

Die hier aufgezeigte Vorgehensweise, anhand von Bauteilversuchen das komplexe Verhalten von Prüfkörpern zur Bestimmung signifikanter Material- und Struktureigenschaften zu analysieren und dann rechnerisch auf die Großausführung zu übertragen, bietet sich geradezu als Paradebeispiel für einen sinnvollen Einsatz von MSC/NASTRAN for Windows im Bauingenieurwesen an. Über die hier vorgestellte Analyse der Verklebung der Glasschwerte mit den Stahlprofilen hinaus hat sich die Anwendung von MSC/NASTRAN auch bei anderen Themen des tragenden Glasbaus bewährt, so zum Beispiel bei der Untersuchung des Verhaltens von Sicherheitsverbundglasscheiben unter besonderer Berücksichtigung der schubweichen Zwischenfolien [7] sowie bei im Hause durchgeführten Analysen punktgehaltener Glasscheiben, die aufgrund des spröden Versagensmusters von Glas bei Zug besondere Aufmerksamkeit im Einspannbereich erfordern.

## Literatur

- [1] **Michael Grill**  
"Das Licht ist das bestimmende Element",  
Interview mit Amandus Sattler, Lokalteil München, Süddeutsche Zeitung, 22.06.1998
- [2] **Gudrun Meyer, Oliver Herwig**  
"Heilige Neubauten", S.88ff, FOCUS 51/1999
- [3] **Anneliese Hagl**  
"Das Tragwerk der Herz-Jesu Kirche aus Stahl und Glas"  
Bauen mit transparenten Baustoffen, VBI Fortbildungsseminar Bayern  
München, März 1999
- [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, Juli 1998
- [6] **Anneliese Hagl**  
"Tragendes Glas ?!"  
Fortbildungsseminar für Tragwerksplaner, Bayerische Bauakademie  
Feuchtwangen, November 2000
- [7] **Peter J. Conlisk**  
"MSC/NASTRAN Analysis of Shear Transfer in Laminated Architectural Glass"  
The MSC 1992 World Users' Conference Proceedings, Volume I, Paper No.2  
May, 1992

Architekten: Allmann, Sattler, Wappner, München

Bauherr: Katholische Kirchenstiftung Herz-Jesu, vertreten durch das Erzbischöfliche Ordinariat  
München