



Untersuchungen über Stahl-Glasverklebungen für Glas-Seilfassaden

if-group

Masterthesis

von

Dipl.-Ing. (FH) Sascha Kessler

2007/08



**Untersuchungen
über
Stahl-Glasverklebungen
für Glas-Seilfassaden**

Masterthesis

Eingereicht an der
Hochschule Konstanz im
Fachbereich Bauingenieurwesen

Erstellt von
Dipl.-Ing. (FH) Sascha Kessler

Matrikel-Nr.: 280592
Konstruktiver Ingenieurbau

Betreuer: Hr. Dinort
Hr. Ihde
Fr. Breil

Betreuender Professor: Prof. Dr.-Ing. Francke

Zeitraum: Wintersemester 2007/08

Firma: IF-group

Konstanz, 15. Februar 2008



Sperrvermerk

Die vorliegende Masterthesis mit dem Titel *Untersuchungen Stahl-Glasverklebungen für Glas-Seilfassaden* enthält vertrauliche Daten der Firma *IF-group*.

Sie ist nur den Erst- und Zweitgutachtern sowie dem Prüfungsausschuss-Vorsitzenden des Fachbereiches Bauingenieurwesen zugänglich zu machen. Veröffentlichungen und Vervielfältigungen der Masterthesis – auch nur auszugsweise – sind grundsätzlich untersagt. Ausnahmen bedürfen der schriftlichen Genehmigung der Firma *IF-group*.

Firmenstempel und Unterschrift

if-group



Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. W. Franke für die Betreuung meiner Abschlussarbeit bedanken. Danken möchte ich außerdem: Frau Breil, Herrn Dinort und Herrn Ihde als Ansprechpartner des Hauses *IF-group*, für die erbrachten Ideen und Anregungen.

Ebenfalls Danken möchte ich Frau Dipl.-Ing. (FH) Anneliese Hagl, für das aufschlussreiche Gespräch und den schriftlichen Materialien zu Beginn meiner Arbeit.

Mein Dank gilt auch der Firma *IF-group*, für die Möglichkeit Einblicke in die Betriebsabläufe zu erlangen.

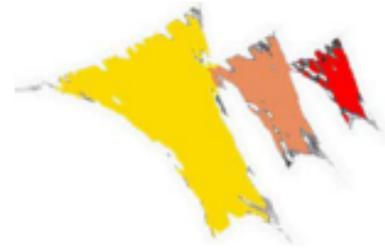
if-group

Firma:

IF-group

Essrich + Dürr + Dinort
Engineers and Architects

Am Dachsberg 3
D – 78479 Reichenau-Waldsiedlung



Die Fa. IF-group ist einer der führenden europäischen Ingenieurbüros in den Bereichen:

Membran-
konstruktionen



Stadion-
dächer



Pneumatik-
konstruktionen



Seilnetz-
konstruktionen



Seil-
Glasfassaden



Glas-Stahl-
konstruktionen



Design und Planung einer Seil-Glasfassade zählt zu einer der Schwerpunkten im Hause von IF-group.

Einer der Besonderheiten dieser Bauart ist mit Sicherheit, die starke Verformbarkeit einer solchen Fassade.

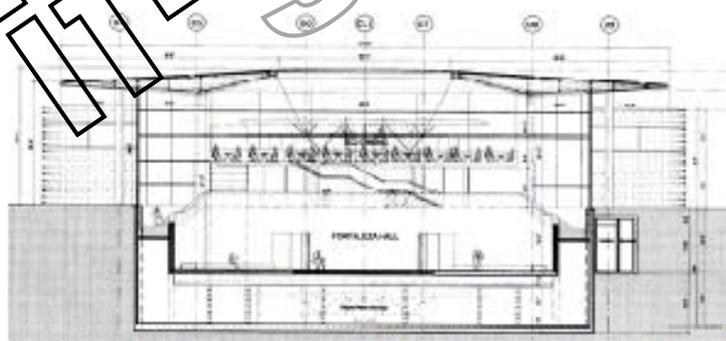
Wird ein Gebäude z.B. durch Wind belastet, so ist es für den Besucher ein einmaliges Erlebnis, dieser Fassade bei ihren Bewegungen zusehen zu können.

Natürlich funktioniert ein solches Fassadensystem nur, wenn der Rest des Gebäudes die aussteifende Funktion übernehmen kann.



Dieses Problem soll das nachfolgende Projekt aufzeigen:

Project Honor SC Johnson Racine, Wisconsin



Vorgaben waren unter anderem:

- minimale Stahlkonstruktion
- große gekrümmte Glasscheiben
- keine externe und zusätzliche Elemente

Um ein solches Projekt mit einer so leichten Konstruktion gegen Wind oder Erdbeben einsturz sicher ausführen zu können, muss auch die Fassade eine tragende Funktion übernehmen. Zusätzlich sollte die Außenhülle des Gebäudes aus einer kaum sichtbaren Stahlkonstruktion bestehen.

Eine gute Möglichkeit eine Fassade, mit einem filigranen Erscheinungsbild zu gestalten, besteht durch die Bauart: „Structural Glazing“.

Mit „Structural Glazing“ oder „Structural Sealant Glazing“ bezeichnete Fassaden sind geklebte Ganzglasfassaden, bei der die Konstruktion unsichtbar hinter der Glasfassade liegt. Die Verglasung wird rückseitig mit der Metallstruktur der Fassadenkonstruktion verklebt. Bei den meisten Ganzglasfassaden mit diesen Verklebungen, handelt es sich um Pfosten-Riegelkonstruktionen. Bei dieser starren Unterkonstruktion wird die Verklebung nur schwach beansprucht.

Bei einer Seil-Glasfassade mit einer beweglichen Unterkonstruktion, die auch noch horizontale Verschiebungen aufnehmen soll, bedarf es einer genauen Untersuchung einer solchen Verklebung.



Themenwahl:

Untersuchungen über Stahl-Glasverklebungen für Seil-Glasfassaden

Ziele dieser Masterthesis:

1. Literaturrecherche / Internetrecherche bereits vorhandener Publikationen
2. Klebstoffe im Glasverband
3. Überlegungen zur Lagerung der verklebten Glasscheiben
4. Überlegungen zu einfacher Modellierung einer Fassade (gerade und gekrümmte Scheiben)
5. Untersuchung zu Ausfallszenarien der Glasscheiben
6. Zusammenfassung der Masterthesis
7. Zusammenstellung der Dateien auf einer CD

Inhaltsverzeichnis

Thema	Seite
1	3
1.1 Fassadenbeklebung	3
1.2 Stuttgarter Schale	4
1.3 Herz-Jesu-Kirche München	5
1.3.1 Aufbau der Herz-Jesu-Kirche	6
1.3.2 Verbindungstechnik	7
1.3.3 Bauteilversuche zur Silikonverklebung	8
1.3.4 Diskussion der Verklebungsgeometrie	8
1.4 Structural glazing	9
1.4.1 Detaillösungen von Linienlagerungen verschiedener Hersteller	10
1.4.2 Neue Glas-Metall-Verbindungen	13
1.5 Klebeunterschiede zwischen dem Bauwesen und Automobilbau	15
2	16
2.1 Übersicht relevanter Klebstoffe	16
2.2 Alterungsverhalten	17
2.3 Haftmechanismen	19
2.4 Festigkeit einer Klebung	20
2.5 Oberflächenbeschaffenheit	21
2.6 Einfluss der Klebschichtdicke	21
2.7 Kontakt zu Herstellern von Klebmaterialien (Dow Corning, Sika)	21
3	22
3.1 Ausarbeitung einfacher Lagerungsarten	22
3.2 Herstellungsprozess von Linienlagerungen	23
3.2.1 Anforderungen	23
3.2.2 Herstellungsablauf der Verklebung	24
4	25
4.1 Modellierung Seil – Glasfassade ohne Silikonverklebung	25
4.1.1 Ziele dieses Modells	25
4.1.2 Aufbau des Modells	25
4.1.3 Ermittlung Seilkraft	26
4.1.4 Knoten T-Profil und Seil	27
4.1.5 Lastfälle	29
4.1.6 Lastfall-Gruppen	29
4.1.7 Ergebnisse LG1	30
4.1.8 Ergebnisse LG2	31
4.1.9 Ergebnisse LG3	32
4.2 Modellierung Seil – Glasfassade mit Silikonverklebung als Diagonale	33
4.2.1 Ziel dieses Modells	33
4.2.2 Aufbau dieses Modells	33
4.2.3 Ermittlung des Ersatzstabes für die Silikonfuge	34
4.2.4 Knoten T-Profil und Silikon	37
4.2.5 Lastfälle/ LF-Gruppen	39
4.2.6 Ergebnisse LG1	40
4.2.7 Ergebnisse LG2	41
4.2.8 Ergebnisse LG3	42
4.3 Modellierung einer Fassade mit Scheibenelementen	43
4.3.1 Ziel dieses Modells	43
4.3.2 Aufbau dieses Modells	43
4.3.3 Ermittlung der Federn (Silikon)	45
4.3.4 Knoten Scheibe, Silikon und T-Profil	46
4.3.5 Lastfälle / LF-Gruppen	47
4.3.6 Ergebnisse LG1	48
4.3.7 Ergebnisse LG2	49
4.3.8 Ergebnisse LG3	50

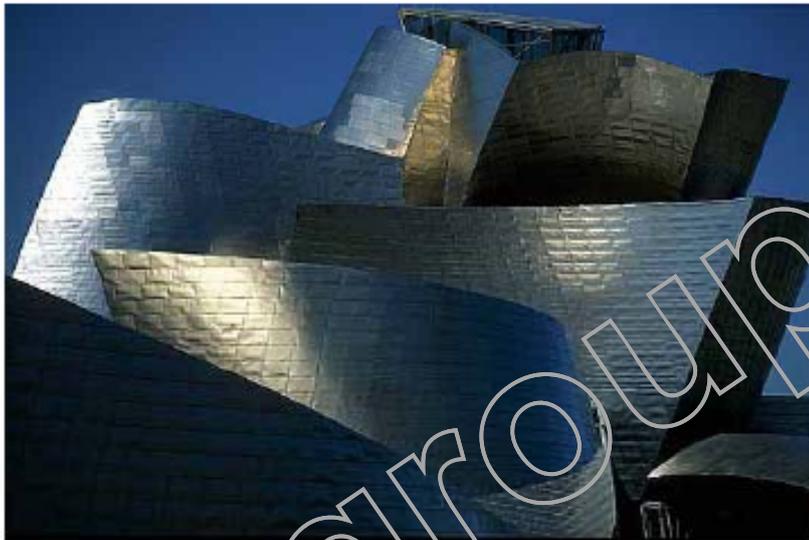


4.4	Zusammenfassung der bisherigen Ergebnisse	51
4.4.1	Erklärungen	51
4.4.2	Korrektur	52
4.5	Ergebnisse im Vergleich	55
4.6	Überprüfung der Modellaufbauten	56
4.6.1	Beschreibung der Ergebnisse	57
4.6.2	Auswertung	58
4.7	Spannungen im Silikon und in der Glasscheibe	60
4.7.1	Auswahl der zu bemessende Glasscheibe	61
4.7.2	Ergebnisse mit FE-Programm	62
4.7.3	Ergebnisse Stabwerksprogramm	65
5	Gerade Fassade, Zweiseitige Verklebung	68
5.1	Modellierung einer Fassade mit Scheibenelementen	68
5.2	Bewertung der Ergebnisse	71
6	Runden Fassade	72
6.1	Modellierung Seil – Glasfassade ohne Silikonverklebung	72
6.1.1	Ziel dieses Modells	72
6.1.2	Aufbau des Modells	72
6.1.3	Lastfälle	74
6.1.4	Lastfall-Gruppen	74
6.1.5	Ergebnisse LG1	75
6.1.6	Ergebnisse LG2	76
6.1.7	Ergebnisse LG3	76
6.2	Modellierung Seil – Glasfassade mit reduzierten Gitteraufbau	77
6.2.1	Ziel dieses Modells	77
6.2.2	Aufbau dieses Modells	77
6.2.3	Lastfälle/ LF-Gruppen	81
6.2.4	Lastfall-Gruppen	81
6.2.5	Ergebnisse LG1	82
6.2.6	Ergebnisse LG2	82
6.2.7	Ergebnisse LG3	83
6.3	Modellierung einer Fassade mit Scheibenelementen	84
6.3.1	Ziel dieses Modells	84
6.3.2	Aufbau dieses Modells	84
6.3.3	Lastfälle / LF-Gruppen	84
6.3.4	Ergebnisse LG1	85
6.3.5	Ergebnisse LG2	86
6.3.6	Ergebnisse LG3	86
6.4	Überprüfung der Modellaufbauten	87
6.4.1	Auswertung	87
6.4.2	Spannungen im Silikon und in der Glasscheibe	90
6.4.3	Auswahl der zu bemessende Glasscheibe	91
6.4.4	Ergebnisse mit FE-Programm	92
6.4.5	Ergebnisse Stabwerksprogramm	95
7	Untersuchung zu Ausfallszenarien der Glasscheiben	98
7.1	Untersuchung zum Ausfall einzelner Scheiben bzw. mehrerer Scheiben	98
7.2	Gerade Fassade	99
7.2.1	Verschiebungen des Modells ohne Silikonverklebung	99
7.2.2	Verschiebungen des Modells ohne Ausfall	100
7.2.3	Verschiebungen des Modells mit sechs Scheiben Ausfall	101
7.2.4	Verschiebungen des Modells mit geklebten Scheibe als aussteifende Verbände	102
7.3	Gebogene Fassade	103
7.3.1	Verschiebungen des Modells ohne Silikonverklebung	103
7.3.2	Verschiebungen des Modells ohne Ausfall	104
7.3.3	Verschiebungen des Modells mit zwei Scheiben Ausfall	106
7.3.4	Verschiebungen des Modells mit geklebten Scheibe als aussteifende Verbände	107
8	Zusammenfassung	109
9	Eidesstattliche Erklärung	110

1 Literaturrecherche / Internetrecherche bereits vorhandener Publikationen

1.1 *Fassadenbeklebung*

Eine neue Anwendung für elastische Silikonverklebungen eröffnete sich 1997 im Fassadenbau, durch die Fassadenverklebung des weltbekannten Guggenheimmuseums in Bilbao (Spanien). Hier wurde mit zweikomponentigem Silikon verklebte Titanblechtafeln verwendet.



1.2 Stuttgarter Schale

Eine linienförmige Verklebung ermöglicht ein materialgerechtes Konstruieren von Glasscheiben, ohne das lokale Spannungsspitzen durch Punkthalterungen im sprödbrechenden Glas entstehen. Zu herkömmlichen linienförmigen Verbindungen durch eine Pressleiste, stellt eine linienförmige geklebte Verbindung durch den einfachen Aufbau eine Alternative dar.

Begonnen hat diese Entwicklung, mit der Structural Sealant Glazing (SSG) Fassade – einer tragenden Fassade, die mit Silikonklebstoff abgedichtet wurde. Diese SSG-Verklebungen dürfen in Deutschland nur kurzzeitig wirkende Lasten wie Wind abtragen, das Eigengewicht der Scheibe muss dabei stets durch zumeist verdeckte, mechanische Halterungen aufgenommen werden.

Derzeit stehen Verbindungen mit höherfesten Klebstoffen (z.B. Acrylate und Epoxidharze) im Mittelpunkt der Forschung. Diese führten bereits zu vielversprechenden Prototypen.

So wurde am Institut für Leichtbau, Entwerfen und Konstruieren (ILEK) an der Universität Stuttgart die „Stuttgarter Schale“, aus sphärisch gekrümmten VSG-Scheiben, mittels Stumpfverklebungen mit Epoxidharz realisiert. Dabei wird auf jegliches metallisches Verbindungssystem verzichtet.

Die stumpf verklebten Glasscheiben dieses Schalentragwerks ermöglichen eine werkstoffgerechte Lastabtragung.



1.3 Herz-Jesu-Kirche München

Zusammenfassung des Berichtes von Dipl.-Ing. (FH) Anneliese Hagl

Dieser Bericht zeigt am Beispiel der Herz-Jesu-Kirche München, wie sich eine gläserne Fassade, ohne sichtbare Stahlbauteile 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.

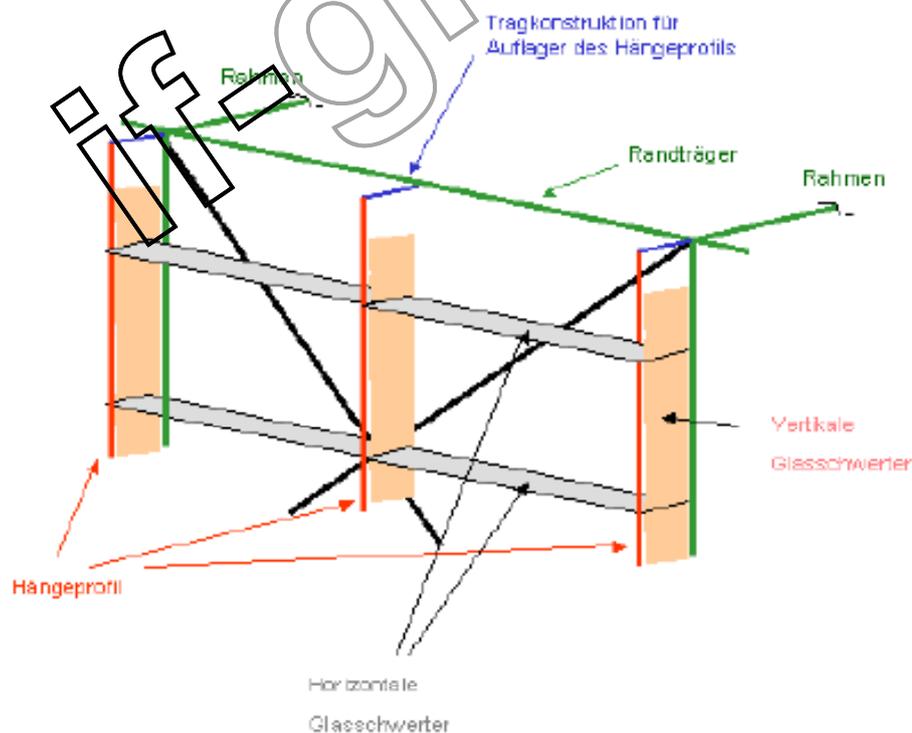
1.3.1 Aufbau der Herz-Jesu-Kirche

Die primäre Tragkonstruktion des Kirchengebäudes besteht aus zurückgesetzten biegesteife Stahlrahmen. Dadurch entsteht der Eindruck eines fast vollständig aus Glas bestehenden Kubus. In Gebäudelängsrichtung werden zur Aussteifung Verbände eingesetzt.



Glasfassade

Das architektonische Ziel bei diesem Gebäude war es, eine Glasfassade ohne deutlich sichtbare Stahlbauteile zu realisieren. Dafür bietet sich eine hängende Konstruktion für die Glasfassade an, bei der das Fassaden – eigengewicht maßgeblich zur Stabilisierung des Tragwerks beiträgt.



1.3.2 Verbindungstechnik

Hinsichtlich der Verbindungstechnik der Glasbauteile steht bei der Gestaltung der Fassade unter Beachtung optischer und konstruktiver 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 mittels Bolzen mit den Fassaden- und Hängeprofilen der Konstruktion verbunden werden.



Für diese Verklebung kommt dabei ein handelsüblicher „Structural Glazing“ Klebstoff auf Silikonbasis mit der Bezeichnung DC 993 der Firma „Dow Corning“ zum Einsatz, der sich durch seine hervorragenden mechanischen Eigenschaften auszeichnet.

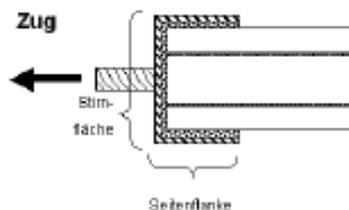
Allgemein eignen sich Silikone besonders für derartige Anwendungen, da ihre Klebewirkung auf der Ausbildung chemischer Bindungen an den Grenzflächen zu Glas und Stahl beruht, was zu einem überaus günstigen Adhäsionsverhalten führt.

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 Lösungsmittel, während das walzbank gebeizte Stahlprofil zusätzlich mit einem Primer zu reinigen 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.

1.3.3 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 (European Organisation of Technical Approval) hat der Hersteller „Dow Corning“ Voruntersuchungen durchgeführt. Diese Versuchsreihe hat das i.f.t. Rosenheim fortgesetzt und durch Variationen der Versuchsbedingungen (Temperaturverhalten, Einfluss von Dauerlasten) ergänzt. Neben einer guten qualitativen Übereinstimmung zwischen den Versuchsreihen haben alle Versuchsergebnisse die sehr gute thermische Beständigkeit der Verklebung, die charakteristisch für Silikon ist, bestätigt.

1.3.4 Diskussion der Verklebungsgeometrie



Durch das nahezu starre Verhalten von Glaskörper und Stahlprofil lassen sich zwei mögliche Lastpfade erschließen. Bei den beiden Seitenflanken wird die Kraft über Schub und bei der Stirnfläche über Zug abgetragen.

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 des Schubmoduls, ein Drittel des Zugmoduls beträgt, erhält man über die stark vereinfachte Annahme, ein eindimensionaler Spannungszustand, ein Steifigkeitsverhältnis von ungefähr 3:1 [73:27] zwischen Stirnfläche und den beiden Seitenflanken.

Eine Besonderheit, die bei einer detaillierten 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, wurde eine genaue Betrachtung der Verklebung, mit Hilfe eines allgemeinen Finite Elemente Programms durchgeführt.

Die genaue quantitative Auswertung der Knotenkräfte an Stirnfläche und Seitenflanken führte zu dem Ergebnis, dass nicht nur 75%, wie aus der einfachen Abschätzung erhalten, sondern ungefähr 90%, der Last über die Stirnfläche abgetragen werden.

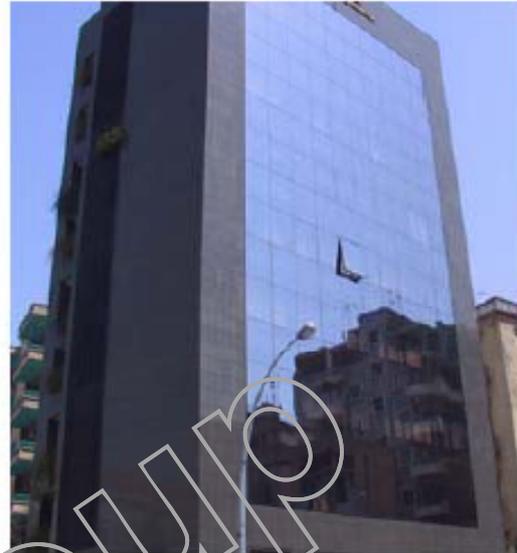
Dieses Ergebnis lässt sich durch die behinderte Querkontraktion des Silikonwerkstoffs erklären. Durch die fast vollständige Umschließung der Verklebungsoberfläche wird das Silikon in seinem Bestreben, sich unter Zugbelastung einzuschnüren, massiv behindert. Durch die starke Kopplung von Längs- und Querdehnung reagiert die Silikonverklebung an der Stirnfläche mit erhöhter Steifigkeit in Probenzugrichtung mit der Folge, dass zusätzliche Lastteile 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, aufgrund von Temperaturschwanken, die geringe Schubsteifigkeit zu einer gewissen Unempfindlichkeit der Verklebung gegenüber Dehnungen in Schwertlängsrichtung führt.

1.4 Structural glazing

Structural Glazing ist eine Verglasungstechnik mittels Verklebung. Sie kommt aus den USA und hat auch in Europa Einzug gehalten. Für Planer bedeutet dies eine Erweiterung der Gestaltungsfreiheit bei vorgehängten Fassaden.

In der konsequentesten Ausführung als allseitiges Structural Glazing, bietet sich dem Betrachter von außen, das Bild einer homogenen, gebäudeumhüllenden Glasfläche, da bei dieser Bauart keine außenliegenden Befestigungs- oder Sicherungselemente vorhanden sind.



Anwendung

Die Bezeichnung "Structural Glazing" (SG) steht für eine Montagetechnik im Fassadenbau, bei welcher Glas ausschließlich über eine Verklebung mit Silikon-Klebstoffen auf der tragenden Konstruktion (eloxiertes Aluminium oder Edelstahl) dauerhaft befestigt wird. Statische Lasten auf der Außenfassade wie zum Beispiel Windlasten, werden dabei über die strukturelle Verklebung auf die Unterkonstruktion übertragen.

In Deutschland müssen die Glaselemente jedoch ab einer Einbauhöhe von acht Metern über dem Boden, zusätzlich mechanisch gegen Sog gesichert werden. Das rein gläserne Fassadenbild, frei von Verankerungselementen, welches das rechts stehende Bild des Solarzentrums in Freiburg zeigt, ist daher nur bei entsprechend niedrigen Gebäuden möglich.

