

Die Herz-Jesu Kirche – ein wegweisendes Beispiel für Structural Glazing

Anneliese Hagl

Zilch + Müller Ingenieure GmbH, München

Zusammenfassung: Am Beispiel der Herz-Jesu-Kirche München kann aufgezeigt werden, wie durch eine gelungene Synthese von Glas und Stahl mit Hilfe einer tragenden Verklebung eine anspruchsvolle Konstruktion einer gläsernen Fassade nahezu ohne sichtbare Stahlbauteile erfolgreich verwirklicht werden kann. Die hierbei realisierte tragende Verklebung von Glasbauteilen und U-förmigen Edelstahlprofilen weist über Deutschland hinaus wegweisend innovativen Charakter auf. Der Nachweis der Tragfähigkeit dieser Verklebung stand im Mittelpunkt aufwendiger experimenteller und theoretischer Untersuchungen, wobei die Anwendung eines allgemeinen Finite Elemente Verfahrens einen tieferen Einblick in die Beanspruchung einer derartigen Silikonverklebung erlaubt und zu einem vertieften physikalischen Verständnis führt. Künftige Dimensionierungen von Klebfugen sind auf Basis der hierbei gewonnenen Erkenntnisse zu Werkstoff und Verklebungsgeometrie einfacher geworden und erlauben deshalb weitergehende innovative Lösungen für tragende Glasfassaden.

1 EINLEITUNG

Glas ist wie kein anderer Baustoff „spannend“; Es ist mystisch, kaum sichtbar und doch stark. Es ist wohl diese Faszination, die Architekten und Ingenieure inspiriert, Glas auch als tragendem Baustoff einzusetzen. So entstehen herausragende Bauwerke, wie die Herz-Jesu Kirche in München. Errichtet im Jahr 2000 stellt die Fassadenkonstruktion bis Heute eine herausragende Konstruktion – als wegweisende Structural Glazing Anwendung – dar, bei der die bereits bekannte Technik des Klebens mit Silikon neu gedacht wurde.

2 KONSTRUKTION

2.1 Stahlskelett der Kirche

Die Kirche wirkt von außen zunächst wie ein Glaskubus, siehe Abbildung 1.

Die tragende Struktur wird durch eine Stahlkonstruktion aus acht eingespannten Portalrahmen mit einem Abstand von 6,72 m gebildet, siehe Abbildung 2.



Abbildung 1: Ansicht von außen

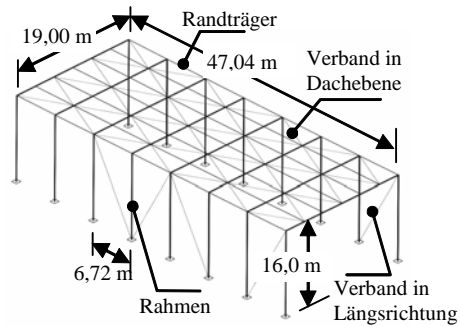


Abbildung 2: Tragwerk der Kirche

2.2 Fassadenkonstruktion

Auf die Rahmen trägt die freitragende Fassadenkonstruktion die Windlasten ab, siehe Abbildung 3. Erst vom Gebäudeinneren erkennt man die Konstruktion der Fassade als von der Stahl-Primärkonstruktion abgehängtes Tragsystem mit horizontalen und vertikalen Glasschwertern, siehe Abbildungen 3 und 4.

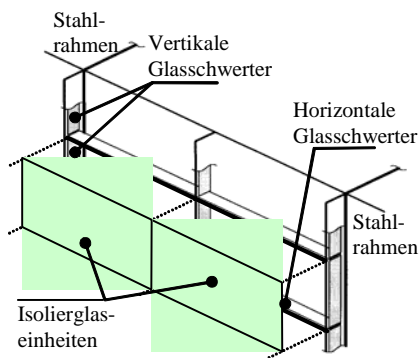


Abbildung 3: Tragsystem der Fassade



Abbildung 4: Tragwerk der Kirche

2.3 Verbindungstechnik

Beim Bauen mit Glas kommt der Ausführung der Anschlusspunkte zwischen Glasteilen und weiteren Traggliedern eine bedeutende Rolle zu. Zum einen ist der Werkstoff Glas spröde, weshalb Lastübertragungspunkte zwängungsfrei auszubilden sind. Zum anderen ist gerade wegen der Transparenz des Werkstoffs jeder Anschluss sichtbar und von

ästhetischer Bedeutung. Eine innovative und gleichsam ästhetische Lösungsmöglichkeit bietet sich mit der Klebtechnik an, vergleiche Abbildung 5.

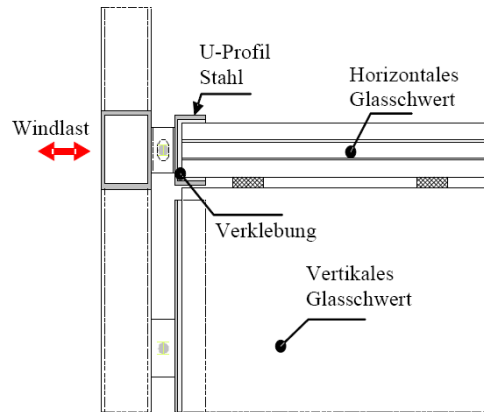


Abbildung 5: Anschluss der Glasschwerter über aufgeklebtes Stahlprofil

3 WIRKUNGSWEISE DER KLEBVERBINDUNG

3.1 Baurechtliche Aspekte, Genehmigungsverfahren

Bei tragenden Glasbauteilen, hier den horizontalen Glasschwertern aus 3 x ESG und den vertikalen Glasschwertern aus 3 x Float aus Verbundsicherheitsglas handelt es sich um eine nicht geregelte Bauart, nämlich die eines Trägers. Außerdem ist die Bauart des Klebens nicht bauaufsichtlich geregelt, weshalb im vorliegenden Fall eine Zustimmung im Einzelfall erforderlich war. Für die hier vorgestellte Fassadenkonstruktion mit der absolute Neuland betreten wurde, beliefen sich die gesamten Kosten für die drei erforderlichen Zustimmungen, die Prüfstücke, alle Gutachterkosten und der Fremdüberwachung gesamt auf ca. 125 Tsd. €- das sind ca. 2% der Kosten der Fassade von ca. 8,0 Mio. €

Für die Anwendung der Klebtechnologie mit Silikonen ist die ETAG 002 [1] heranzuziehen. Nach ETAG 002 wird die Fugengeometrie einer Verklebung mit einem rechteckiger Querschnitt vorgegeben. Außerdem sollen diese Klebfugen eine Mindestdicke von 6 mm und höchstens 50 mm aufweisen. Als ideales Verhältnis zwischen Fugenbreite und Fugentiefe wird ein Verhältnis von 2:1 vorgegeben. Im Gegensatz zu dieser Einschränkung als Standardanwendung, kann nach Anhang 2 der ETAG 002 ein anderes Rechenverfahren angewandt werden, wenn es auf Simulationsversuchen oder Forschungsergebnissen basiert.

3.2 Versuche für die Zustimmung im Einzelfall

Die Versuche für die Beurteilung der U-förmigen Verklebung wurde an Abschnitten der Verklebung durchgeführt, wobei aus einer längeren Verklebung Abschnitte von 50 mm

herausgeschnitten und mit einem Bolzen versehen wurden um die Prüflast aufzubringen, vergleiche Abbildung 6.

Für die gealterten Prüfkörper (künstliche Alterung mit 500 und 1000 Stunden) ergab sich der 5% Fraktilwert mit: $R_{u,5} = 3493 \text{ N}$. Dies wurde auf 1 m Verklebungslänge hochgerechnet und durch den Sicherheitsbeiwert nach ETAG 002 geteilt, woraus sich eine aufnehmbare (=zulässige) Belastung von 11,6 kN/m ergab.

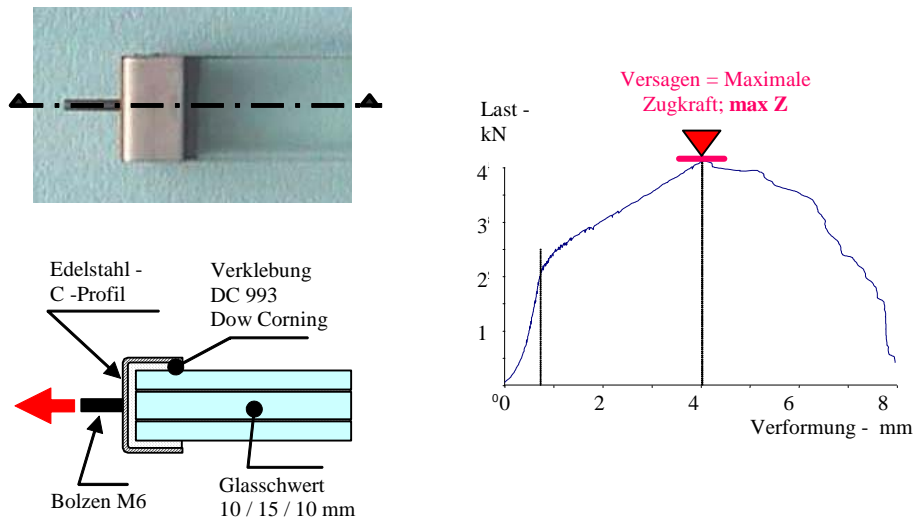


Abbildung 6: Prüfkörper und Versuchsergebnisse

3.3 Bemessung der Verklebung

Die Bemessung erfolgte über die Annahme, dass pro Befestigungspunkt ca. 30 cm der Verklebungslänge mitwirken.

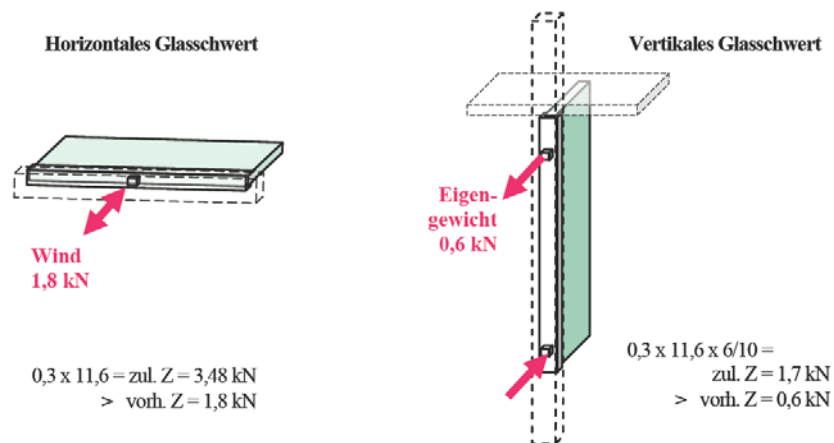


Abbildung 7: Belastung Anschlusspunkte und Bemessung

Für die vertikalen Glasschwerter, welche als Konsolen für das Eigengewicht der horizontalen Glasschwerter wirken, musste laut Prüfbericht ein erhöhter Sicherheitsbeiwert von 10 angesetzt werden, da es sich hierbei um eine Dauerlast handelt, siehe Abbildung 7.

4 BEMESSUNG HEUTE

4.1 Wirkungsweise einer U-förmigen Verklebung

Im Nachgang zu der ausgeführten Konstruktion wurde über vertiefte Untersuchungen an U-förmigen Verklebungen das Versagenszenario genauer analysiert [2], [3]. Eine erste Basis der weiterführenden Berechnungen waren Forschungsaktivitäten der Arbeitsgruppe Verkleben des Fachverband Konstruktiver Glasbau unter Leitung der Verfasserin, sowie später eigene Werkstoffversuche. An diesen systematischen Werkstoffproben konnten die Materialparameter des hyperelastischen Werkstoffs ermittelt werden. Spätere Versuche an U-förmigen Verklebungen zeigten ein den ursprünglichen Versuchen im Zusammenhang mit der Herz-Jesu Kirche ähnliches Verhalten, siehe Abbildung 8.

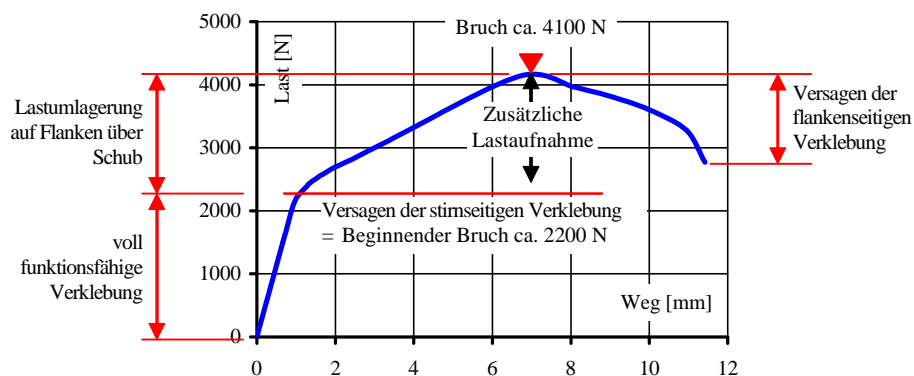


Abbildung 8: Belastung Anschlusspunkte horizontales und vertikales Glasschwert

Ausgehend von den Ergebnissen von Versuchen an U-förmigen Verklebungen konnte festgestellt werden, dass ein Versagen innerhalb der Verklebung bereits deutlich unterhalb der maximalen Bruchlast eintritt.

Aufgrund der U-förmigen Geometrie dieser Verklebung sind unter Zugbelastung zwei Lastpfade aktiv [4]. So ergibt sich an den Seitenflanken primär eine Schubspannung, während an der Stirnfläche eine Zugspannung dominiert. Wegen der unterschiedlichen Steifigkeiten von stirn- und flankenseitiger Verklebung wird, je nach Geometrie des Anschlusses, ca. 89% der Zuglast durch die Stirnseite übernommen. Eine Vielzahl von durchgeführten Versuchsauswertungen und begleitender FEM-Berechnungen bestätigt dies.

4.2 Einfluss der Lasteinleitung auf Spannungen

Mit Hilfe von FEM-Berechnungen kann auch gezeigt werden, dass die Spannungsverteilung innerhalb einer Verklebung ausschlaggebend durch die lokale Lasteinleitungsgeometrie bestimmt wird. Ausgehend von Versuchen und Nachrechnungen verschiedenster Verklebungsgeometrien konnte für den hier betrachteten Silikonklebstoff die Bruchspannung mit ca. $2,0 \text{ N/mm}^2$ ermittelt werden.

In Abbildung 9 werden zwei Grenzfälle der Lasteinleitung betrachtet. Die geometrisch beste Lasteinleitung ist in Abbildung 9 links dargestellt, wo die Lasteinleitung über die Flanken linienförmig erfolgt. Als Extremfall kann die punktförmige Lasteinleitung an der Stirnseite gesehen werden, wo die örtlichen Spannungen innerhalb der Verklebung ihr Maximum in einem begrenzten Bereich erreichen, was zu einer geringeren Tragfähigkeit einer solchen Verklebung führt, siehe Abbildung 9 rechts.

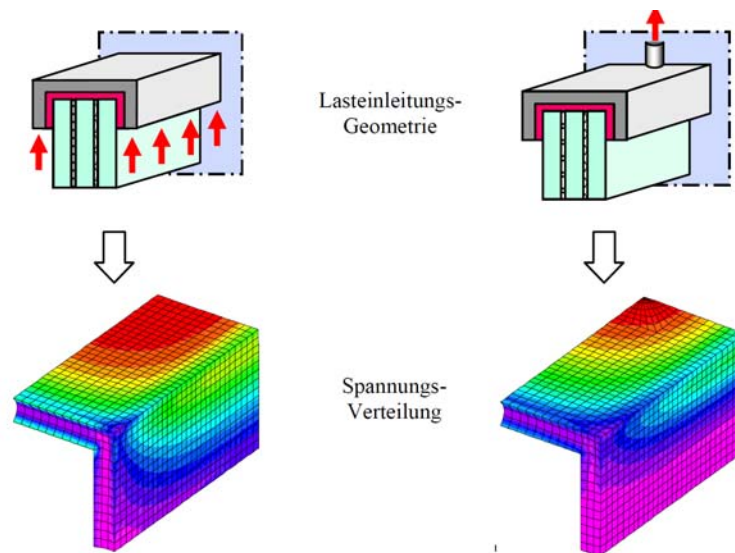


Abbildung 9: Spannungen in der Verklebung bei unterschiedlicher Lasteinleitung

Durch freie Ränder der Verklebung, ergeben sich Randeffekte, wie auch in Abbildung 9 erkennbar. Diese verringern die Tragfähigkeit, da die Randbereiche durch die größere Nachgiebigkeit weniger zur Lastabtragung beitragen.

Wie oben gezeigt wurde, erfolgte die Versuchsdurchführung für das Zustimmungungsverfahren im Jahr 2000 an einem Prüfkörper mit aufgeschweißtem Gewindestift. Damit ergab sich die maximale Last aus den Versuchen zu gering im Vergleich zu der tatsächlich ausgeführten Verklebung mit einer quer zum Profil aufgeschweißten Lasche. Wegen der Versuchsdurchführung an Prüfkörpern mit einer Länge von 50 mm, die sich an die ETAG 002 anlehnte, konnte die Tragfähigkeit einer Verklebung in der Mitte einer längeren Verklebung, bei der das seitliche Einschnüren des Werkstoffs unterbunden ist, nur unzureichend abgebildet werden.

So sind in den Ergebnissen der damaligen Versuche neben einer unzutreffenden Anschlussgeometrie auch Randeffekte enthalten, wodurch die versuchstechnisch ermittelte maximale Bruchlast zu gering bewertet wurde. Allerdings ist auch der Ansatz der ermittelten maximalen Bruchlast als Basis für die Bemessung in Frage zu stellen, da das Versagen innerhalb der Verklebung bereits deutlich unterhalb der maximalen Last auftritt.

4.3 Neue Möglichkeit: Bemessung über Typisierung

Auf der Basis einer Vielzahl von Versuchen am Werkstoff selbst konnten Werkstoffparameter für weitergehende Untersuchungen ermittelt werden. Durch Versuche an unterschiedlichen Verklebungsgeometrien war es möglich, relevante Bruchspannungen für den untersuchten Klebstoff zu ermitteln. Eine Vielzahl von FEM-Berechnungen ermöglichte ergänzend dazu die Erarbeitung von typisierten Bemessungsgrafiken für verschiedene Verklebungsgeometrien und Lasteinleitungstypen. [5].

Beispielhaft soll hier der Bemessungsprozess mittels der typisierten Bemessungsgrafiken aufgezeigt werden. Als Beispiel dienen die Anschlüsse wie sie entlang des horizontalen Glasschwerts vorliegen. Der gewählte Anschlusstyp U1a, siehe Abbildung 10, ist dabei gekennzeichnet durch die Behinderung der Einschnümmöglichkeit an den Werkstoffkanten der Anschlussbereiche untereinander sowie der Anschlussgeometrie mit einer senkrecht zum U-Profil aufgeschweißten Anschlusslasche.

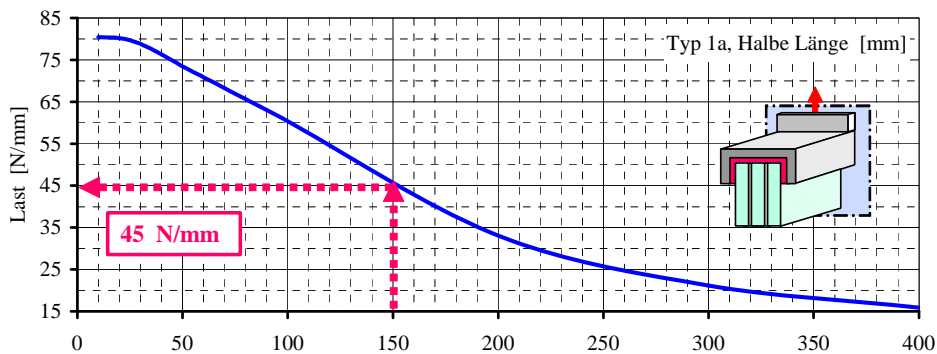


Abbildung 10: Bemessungsgrafik für Typ U1a, horizontales Schwert

Für die Kurzzeitbelastung aus Wind ergibt sich die Bruchlast zu: $2 \times 150 \times 45 = 13.500 \text{ N}$
 Beim Ansatz der in ETAG 002 vorgesehenen Sicherheitsniveaus ergibt sich die zulässige Belastbarkeit mit:
 $13,5 \text{ kN} / 6 = 2,25 \text{ kN}$
 Damit kann pro Anschlusspunkt die einwirkende Last von 1,8 kN sicher aufgenommen werden.

5 AUSBLICK

Die technische Regel ETAG 002, die für die Bemessung tragender Verklebungen heranzuziehen ist, beschränkt die Anwendung ausschließlich auf linienförmige Verklebungen. Komplexere Verklebungen, wie die hier vorgestellte U-förmige Verklebung, sind von diesem Nachweiskonzept zunächst ausgeschlossen. Dennoch erlaubt die ETAG 002 Nachweisverfahren, die auf Versuchen und Forschung basieren.

Bereits heute sind allgemeine Bemessungen von Verklebungsgeometrien auf der Basis eines abgestimmten Verfahrens von Versuchen und Berechnungen möglich. Ein solches Bemessungs-Procedere wurde bei der Challenging Glass Conference 5 in Gent [6] vorgestellt.

LITERATUR

- [1] EOTA
ETAG 002 – Guideline for European Technical Approval for Structural Sealant Glazing Systems (SSGS), Part 1 Supported and unsupported systems
2001
- [2] Hagl, A.
Bemessung von strukturellen Silikonklebungen
Stahlbau, Ernst & Sohn
76. Jahrgang, Heft. 8 (2007), S. 569-581
- [3] Hagl, A.
Understanding Complex Adhesive Behaviour: Case Study U-type Bonding Geometry
In: IOS Press BV, Netherlands
Challenging Glass Conference, Delft
Delft University of Technology, 2008, S. 227-240
- [4] Hagl, A.
Beyond ETAG 002: U-type Bonding Geometries for Structural Glazing
Steel Konstruktion, Ernst & Sohn
Vol. 1, Issue 1 (2009), Seiten 50-57
- [5] Hagl, A.
Wie können linienförmige Verklebungen einfach bemessen werden?
Seminar Kleben im Konstruktiven Glasbau, Glasfachschule Hadamar
2008
- [6] Hagl, A.
Development and test logics for structural Silicone bonding design and sizing
Glass Structures & Engineering
Special Issue: Challenging Glass Conference 5, Ghent
Volume 1, Issue 1, 2016, Springer, S. 131-149