

„Bauen Sie ein Glasregal!“ – Klebtechnologie und eine Kirche

Anneliese Hagl, A. Hagl Ingenieurgesellschaft mbH, Bodenseestraße 217, 81243

München, www.a-hagl-ingenieure.de

Die Herz-Jesu Kirche in München, geweiht im Herbst 2000, zeigt beispielhaft, wie die anspruchsvolle Aufgabe einer gläsernen Fassade (Bild 1) nahezu ohne sichtbare Stahlbauteile mit Hilfe der Klebtechnologie verwirklicht wurde [1]. Aus optischen Gründen sollte auf Bohrungen im Glas verzichtet werden. Daher wurden die horizontalen und vertikalen Glasschwerter mit einseitig aufgeklebten Edelstahl-U-Profilen versehen, die angeschweißte Anschlusspunkte aufweisen (Bild 2). So ergab sich der gewünschte optische Eindruck eines „Glasregals“. Für diese Verklebung kam der zugelassene handelsübliche Silikonklebstoff DC 993 [2] der Firma Dow Corning zum Einsatz. Silikonklebstoffe gehören zu der Klasse der Elastomere mit relativ niedrigem Elastizitätsmodul. Die Verklebung lässt sich damit als weiche Verklebung mit relativ großer Verklebungsdicke (ca. 5 mm entsprechend den Herstellerempfehlungen) typisieren.



Bild 1: Ausschnitt Glasfassade der Herz-Jesu Kirche

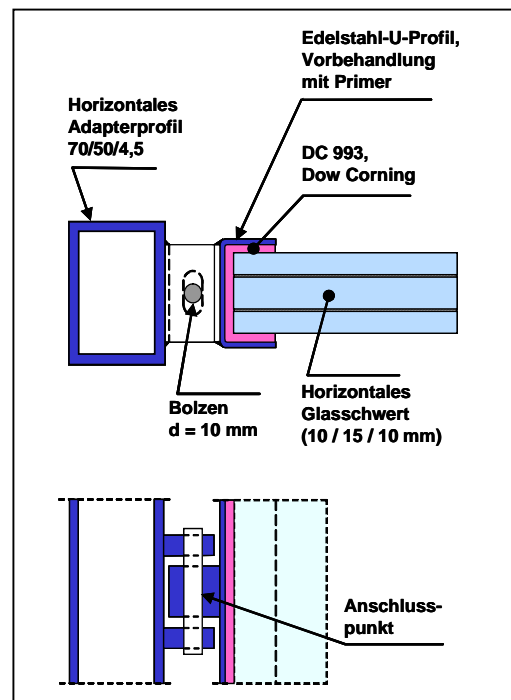


Bild 2: Detail U-förmige Verklebung horizontales Glasschwert

Bei der hier verwirklichten tragenden U-förmigen Silikon-Klebverbindung – auch unter dem Begriff “Structural Silicone Glazing” bekannt – handelt es sich um eines der bis heute bedeutendsten neuartigen Konzepte auf klebtechnischer Seite. Derartige Konstruktionen sind im deutschen Baurecht durch geltende Normen nicht erfasst. Sie stellen eine nicht geregelte Bauart dar, weshalb eine Zustimmung im Einzelfall durch die Oberste Baubehörde zu erwirken war. Im

Fall der Herz-Jesu Kirche erforderte die Zustimmung im Einzelfall neben Bauteilversuchen für die Glasschwerter auch diverse Versuche für die Verklebung, die in Anlehnung an die europäische Richtlinie ETAG 002 [3] durchgeführt wurden. Eine direkte Anwendung der ETAG 002 war aufgrund des eingeschränkten Geltungsbereichs der Richtlinie nicht möglich, da insbesondere dreiseitige Verklebungen von der Richtlinie ausdrücklich ausgeschlossen sind. Allerdings erlaubt die Richtlinie ausdrücklich alternative Rechenverfahren, die auf Simulationsversuchen oder Forschungsergebnissen basieren.

Bild 3 zeigt typische Belastungsszenarien für die U-förmige Verklebung [4], dargestellt als Längsschub, Querschub und Zug bzw. Druckbelastung. Kritisch für die Verklebung ist hierbei insbesondere die Zugbelastung, da hier große Beanspruchungen ohne die Möglichkeit des Lastabtrags über Formschluss auftreten. Hierbei wird die Stirnfläche der Verklebung durch eine Zugbelastung dominiert, die aufgrund des Einschließens der Stirnflächenverklebung durch Glaskörper, Profil und Verklebung der Flanken fast vollständig querkontraktionsbehindert ist. Die Seitenflächen werden hierbei lediglich auf Schub beansprucht. Die Querkontraktionsbehinderung führt zusammen mit der nahezu perfekten Inkompressibilität des Silikonklebstoffs zu einer dramatischen Versteifung des Stirnflächenbereichs [5].

Abstrahiert man die U-förmige Verklebung als eine Parallelschaltung von Zugfedern, wobei eine sehr steife Feder den Stirnflächenbereich und eine eher weiche Feder den Seitenflankenbereich darstellt, so erkennt man, dass die steife Feder bei gleicher Verschiebung aufgrund ihrer hohen Steifigkeit die Zugbelastung auf die Stirnfläche konzentriert. Formal erkennt man dies durch Ableitung eines „axialen“ E-Moduls (E_{ASS}), der über eine vollständige Querkontraktionsbehinderung definiert wird und der für Querkontraktionszahlen nahe 0.5 um einen Faktor größer als 30 als der klassische E-Modul ist. In der Praxis tritt eine vollständige Querkontraktionsbehinderung allerdings nicht ein und es lässt sich formal ein entsprechend abgemilderter „Struktur“-Elastizitätsmodul (E_{struct}) definieren, der von der Verklebungsgeometrie abhängig ist und somit keinen reinen Materialparameter mehr darstellt.

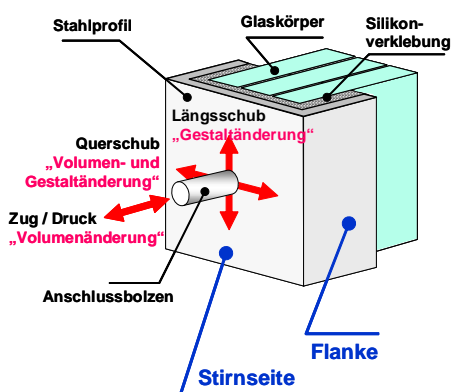


Bild 3: Relevante Belastungsmodi U-förmiger Verklebungen

Betrachtet man das Versagensverhalten U-förmiger Verklebungen [6], so erkennt man ein frühzeitiges Versagen der Stirnfläche, das beim Punkt EB in Bild 4, gekennzeichnet durch einen

deutlichen Steifigkeitsabfall, beginnt. In der Folge wird die Zugbelastung von der Stirnfläche zunehmend auf die Seitenflanken verlagert, bis die Stirnfläche total versagt; in der Abbildung dargestellt durch einen deutlichen Lastabfall bei zunehmender Verschiebung. Danach trägt die U-förmige Verklebung maßgeblich nur noch über Schub in den Seitenflanken, erkennbar an der im Vergleich geringeren Steigung der Kraft-Weg-Kurve im Bereich von 10mm bis 15mm Verschiebung, bis endlich das Totalversagen durch Überlastung der Seitenflanken eintritt. Da für eine Auslegung die Klebverbindung bei maximaler Gebrauchslast intakt bleiben soll, ist der Punkt EB von besonderer Bedeutung für die Ermittlung der Tragfähigkeit.

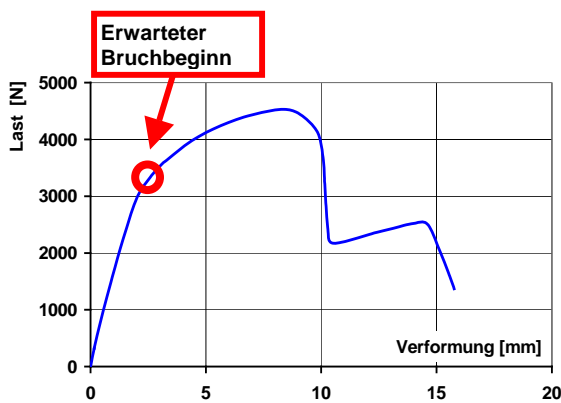


Bild 4: Stufenweises Versagen einer U-förmigen Verklebung

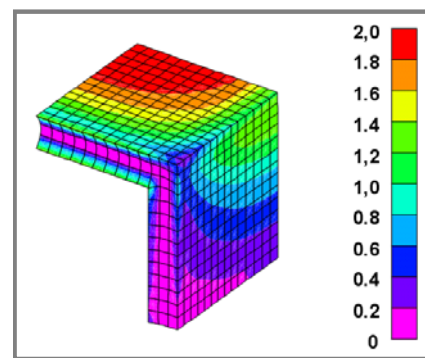


Bild 5: Maximale Hauptspannungen beim erwarteten (= beginnenden) Bruch

Beaufschlagt man ein entsprechendes FE-Modell der Verklebung mit den im Punkt EB gemessenen Lasten, so erhält man entsprechend Bild 5 eine Verteilung der maximalen Hauptspannungen. Ein maximaler Hauptspannungswert von ungefähr 2 N/mm^2 wurde auch bei diversen Punkthaltern in Verbindung mit dem Bruchbeginn ermittelt [4]. Somit wird dieses Kriterium hier für weitergehende Untersuchungen mit anderen Verklebungsgeometrien für die Ermittlung der Tragfähigkeit von Verklebungen herangezogen.

Numerische Untersuchungen mit verschiedenen Verklebungslängen zeigen, dass Randeffekte einen deutlichen Einfluss auf die vorhergesagte Tragfähigkeit der Verklebung haben. Ein optimales Übertragungsverhalten der Verklebung wird für den ebenen Dehnungszustand festgestellt. Der ebene Dehnungszustand ist gekennzeichnet durch eine unterdrückte Einschnürung an den Rändern (keine Verschiebungsmöglichkeiten in Verklebungslängsrichtung), allerdings lässt sich ein derartiger Zustand nicht ohne weiteres in der Praxis realisieren. Aufbauend auf dem ebenen Dehnungszustand und dem damit verbundenen Tragvermögen der Verklebung lässt sich eine aktive Verklebungslänge definieren, die eine Vergleichslänge der Verklebung unter der Annahme derselben Tragfähigkeit wie beim ebenen Dehnungszustand angibt. Dieser Ansatz entspricht dem in der Tragwerksplanung bekannten

Konzept der „mitragenden Breite“. Bild 6 zeigt hierzu die aktive Verklebungslänge [7] für verschiedene Krafteinleitungen.

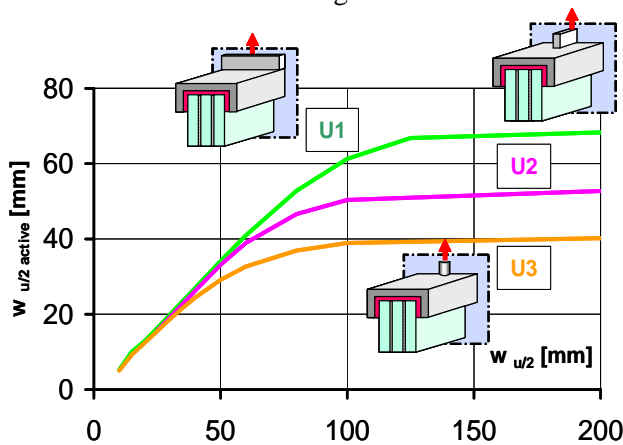


Bild 6: Aktive Länge für verschiedene Krafteinleitungen

Für punktförmige (konzentrierte) Lastenleitungen konvergiert die aktive Verklebungslänge für große Verklebungslängen gegen einen Grenzwert, der von verschiedenen Faktoren wie Querschnittsgeometrie, Materialien, Krafteinleitungen etc. abhängig ist. Mit diesem Ansatz lässt sich die Berechnung einer U-förmigen Verklebung zerlegen in eine zweidimensionale Analyse der Verklebungsgeometrie unter Bedingungen des ebenen Dehnungszustands sowie in eindimensionale Abklingeffekte über die Verklebungslänge, beschrieben durch die aktive Verklebungslänge. Damit stellt sich unmittelbar die Frage nach Gesetzmäßigkeiten zur Abschätzung der aktiven Länge in Abhängigkeit von geometrischen sowie Materialdaten. Weitere zukünftige Forschungsaktivitäten beziehen sich darüber hinaus auf die Verfeinerung des Bruchkriteriums sowie auf eine mögliche experimentelle Absicherung des Bruchverhaltens bei größeren Verklebungslängen.

Literatur:

- [1] Hagl A., Synthese aus Glas und Stahl: Die Herz-Jesu Kirche, München, Stahlbau Heft 7/2002
- [2] Dow Corning: Technische Information: Dichtungsmasse für den Glasfassadenbau (Structural Glazing): Dow Corning® 993. Produktbeschreibung, 1996.
- [3] EOTA (European Organisation for Technical Approvals) : ETAG No.2 Guideline for European Technical Approval for Structural Sealant Glazing Systems. Brüssel, 1998.
- [4] Hagl A., Punktuell Kleben mit Silikon, Stahlbau Heft 11/2008,
- [5] Hagl A., Kleben im bauaufsichtlichen Bereich: Die Herz-Jesu Kirche, München, Adhäsion Heft 12/2008
- [6] Fachhochschule München, FB 02, Abschlussbericht Forschungsvorhaben „Geklebte Verbindungen im Konstruktiven Glasbau“, BMBF-Nr.: 1755 X04, 2007
- [7] Hagl A., Beyond ETAG 002: U-type Bonding Geometries for Structural Glazing, Steel Construction, Vol. 1/2009