

Hochschule Luzern – Technik & Architektur

Bachelorthesen der Studienrichtung Gebäudehülle 2023



Kontakt: ccghib@hslu.ch,
www.hslu.ch/ccghib

Foto: Priska Ketterer

Sieben Studierende der Studienrichtung Gebäudehülle an der Hochschule Luzern – Technik & Architektur haben in diesem Frühjahrssemester ihr Studium mit der Bachelorthesis erfolgreich abgeschlossen. Die ausserordentlich vielfältigen Themen der Thesen umfassen

- den Vergleich und die Evaluierung von Software für die Lebenszyklusanalyse im Fassadenbau;
- die Messung und Beurteilung des Wärmedurchganges durch neuartige Pilz-Dämmplatten;
- numerische Studien zur Klotzung lastabtragender Verbundgläser;
- numerische Parameterstudien an einer modularen Glasschale;
- die Untersuchung des Einflusses der Klebegeometrie auf Silikonverbindungen im Glasbau;
- die versuchsgestützte Prüfung der Durchbruch-sicherheit von Verbundsicherheitsglas
- sowie Analysen und Simulationen zur Durchbruch-sicherheit von Verbundsicherheitsglas.

Die Mehrzahl der Arbeiten ist zusammen mit Partnern aus der Wirtschaft durchgeführt worden. Alle Arbeiten haben sowohl praktisch wie auch in der Lehre verwertbare Ergebnisse erzielt. Eine Übersicht über die Ergebnisse der Bachelorthesen geben die am Ende dieses Beitrags abgedruckten Poster der Studierenden. Florian Budde hat dabei für seine Thesis

«Analysen zur Durchbruch-sicherheit von VSG – auf Basis von Versuchsergebnissen und numerischen Betrachtungen» den von der Schweizerischen Zentrale Fenster und Fassaden SZFF/CSFF gestifteten Preis für die beste Abschlussarbeit in der Studienrichtung Gebäudehülle erhalten.

Da es in der Schweiz momentan keine genauen Regelungen für den Nachweis der Durchbruch-sicherheit horizontaler Verglasungen gibt, haben die beiden Studierenden Florian Budde und Dominic Achermann in Zusammenarbeit mit dem SIGAB (Schweizerisches Institut für Glas am Bau) und der SUVA (Schweizerische Unfallversicherungsanstalt) Versuche an branchenüblichen Glasformaten aus Verbundsicherheitsglas durchgeführt, um deren Verhalten unter stossartigen Belastungen zu untersuchen. Das Ziel dabei war, aus den Ergebnissen der Versuchsreihe eine Grundlage für eine zukünftige Regelung der Durchbruch-sicherheit zu schaffen. Die Tests sind parallel mit einem Doppelreifen-Stosskörper und einem Glaskugelsack für verschiedene Fallhöhen durchgeführt worden. Um die Wahl eines Prüfverfahrens zu unterstützen, haben die Stossversuche und die numerischen Untersuchungen auf den Vergleich der Glasreaktion auf den Impakt mit Doppelreifen und Glaskugelsack fokussiert. Die Arbeit von Florian Budde überzeugt dabei durch eine ausgedehnte internationale Literaturrecherche, durch die methodische und detaillierte Vorgehensweise und die vergleichende Nutzung unterschiedlicher Finite-Element-Software bis hin zu physikalisch genauen Stosskörpermodellen in LS-DYNA. Die Vergleiche der Versuche mit den numerischen Modellen zeigen, dass das Verhalten der Prüfkörper durch FE-Analysen abgeschätzt werden kann. Eine allgemein gültige Korrelation bei Spannungen und Bruchverhalten ist zwischen den beiden Typen von Stosskörpern für beliebige Glasformate bislang nicht ableitbar. Impaktversuche mit Kugelsack oder Doppelreifen sind daher weiterhin als ausgesprochen unterschiedliche Verfahren anzusehen.

Florian Budde hat mit seiner hervorragenden Abschlussarbeit wichtige Grundlagen für die Vorgehensweise bei der Auslegung von durchbruch-sicheren Verglasungen gelegt. Seine wissenschaftliche Vorgehensweise bei den Untersuchungen, gekoppelt mit zahlreichen Untersuchungen zu Randbedingungen, Sensitivitätsanalysen und zur Messtechnik weit über die ursprüngliche Aufgabenstellung hinaus haben dazu geführt, dass Florian Budde im Herbst 2023 ein Masterstudium an der HSLU im Bereich des konstruktiven Glasbaus beginnt.

Mehr Informationen über die an der Hochschule Luzern – Technik & Architektur angebotene Vertiefungsrichtung Gebäudehülle finden Sie unter www.hslu.ch/bauingenieurwesen. Die Poster aller Bachelorarbeiten der letzten 4 Jahre finden Sie auf dem Blog: <https://blog.hslu.ch/gebaeudehuelle/>.

Prüfung der Durchbruchesicherheit von VSG

Methodik und Durchführung von Stossprüfungen an Verbundsicherheitsglas typischer Abmessungen

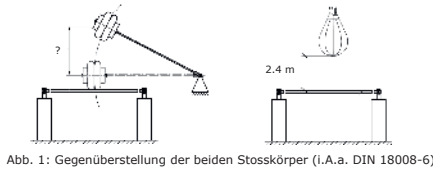


Abb. 1: Gegenüberstellung der beiden Stosskörper (i.A.a. DIN 18008-6)

Pos.	Typ [mm]	Format [mm]	Anzahl VK
4	VSG Float 8 / 0.76 / 8	600 x 2000	1
5	VSG Float 8 / 0.76 / 8	900 x 1500	3
6	VSG Float 8 / 0.76 / 8	900 x 2000	2
7	VSG Float 8 / 0.76 / 8	900 x 3000	2
8	VSG Float 8 / 0.76 / 8	1200 x 1200	6
9	VSG Float 8 / 0.76 / 8	1200 x 3000	2
12	VSG Float 8 / 0.76 / 8	1200 x 3000	2
Stückzahl total			17

Abb. 2: Verwendete Versuchskörper

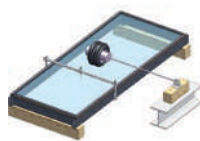


Abb. 3: Versuchsaufbau mit dem Doppelreifen als Stosskörper

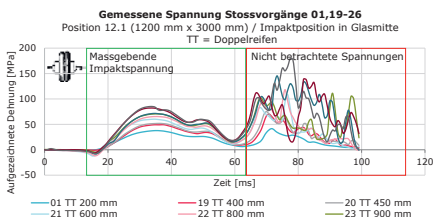


Abb. 4: Gemessene Spannung bei Versuch mit dem Doppelreifen

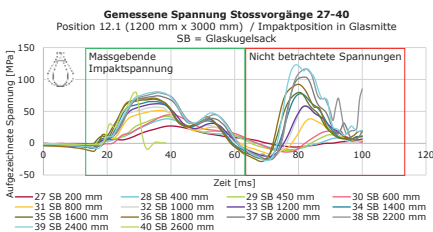


Abb. 5: Gemessene Spannung bei Versuch mit dem Glaskugelsack

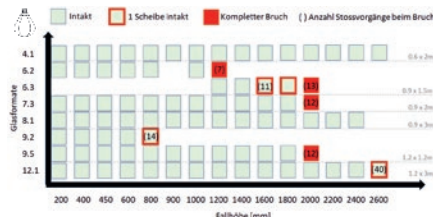


Abb. 6: Bruchzeitpunkt beim Aufprall des Glaskugelsacks

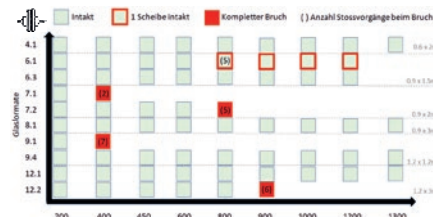


Abb. 9: Bruchzeitpunkt beim Aufprall des Doppelreifens

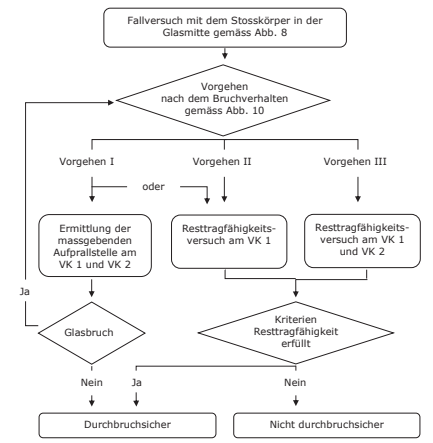


Abb. 7: Möglicher Versuchsablauf zur Prüfung der Durchbruchesicherheit

Bezeichnung	Gewicht	Fallhöhe	Norm
Sphärokonischer Glaskugelsack (SB)	50 kg	2400 mm Anforderungen von 1200 Joule gemäss: (SUVA, 2022) / (SN EN 14963, 2006)	SN EN 596
Doppelreifen (TT)	50 kg	Die Fallhöhe kann nicht durch den Vergleich der beiden Stosskörper ermittelt werden. Diese ist mittels anderen geeigneten Kriterien festzulegen oder durch erweiterte Versuche zu ermitteln.	EOTA TR 001
			SN EN 12600

Abb. 8: Stosskörper zur Prüfung der Durchbruchesicherheit

Fall	Vorgehen	Bruchverhalten Versuchskörper (VK 1 und VK 2)	Vorgehen Resttragfähigkeit	Ermittlung der massgebenden Aufprallposition
A	I	VK 1 = Kein Bruch VK 2 = Kein Bruch	Es wird empfohlen, den Versuchskörper mit Schleifpapier an der Gegenseite der Aufprallstelle vorzuschleifen und durch einen erneuten Stossversuch zu brechen. Folgend kann ein Resttragfähigkeitsversuch durchgeführt werden.	Falls kein Resttragfähigkeitsversuch durchgeführt wird, ist die massgebende Aufprallposition durch weitere Stossversuche am VK 1 und VK 2 im schraffierten Bereich der Abb. 11 in Anlehnung an die DIN 18008-6 zu ermitteln.
B	II	VK 1 = Intaktabbleiben mindestens einer Scheibe oder VK 2 = Kein Bruch oder Intaktabbleiben mindestens einer Scheibe	Der Resttragfähigkeitsversuch ist am VK 1 unmittelbar nach dem Stossversuch beim Intaktabbleiben mindestens einer Scheibe durchzuführen.	Fakultativ
C		VK 1 = Bruch aller Scheiben oder VK 2 = Kein Bruch	Der Resttragfähigkeitsversuch ist am VK 1 unmittelbar nach dem Stossversuch beim Bruch aller Scheiben durchzuführen.	Fakultativ
D	III	VK 1 = Bruch aller Scheiben oder VK 2 = Intaktabbleiben einer Scheibe	Der Resttragfähigkeitsversuch ist am VK 2 unmittelbar nach dem Stossversuch beim Bruch aller Scheiben (VK 1) und beim Intaktabbleiben mindestens einer Scheibe (VK 2) durchzuführen.	Fakultativ
E		VK 1 = Bruch aller Scheiben oder VK 2 = Bruch aller Scheiben	Der Resttragfähigkeitsversuch ist am VK 1 und VK 2 unmittelbar nach dem Stossversuch beim Bruch aller Scheiben durchzuführen.	-

Abb. 10: Vorgehen nach dem Bruchverhalten

Problemstellung

Viele der horizontal verbauten Verglasungen müssen für Wartungs- und Reinigungsarbeiten betreten werden. Damit auch im Falle eines Sturzes der auf dem Glas arbeitenden Person das Durchbrechen verhindert wird, müssen diese betretbaren Gläser gewisse Anforderungen an die Durchbruchesicherheit erfüllen. Im neuen SIA-Merkblatt 2057 sind keine spezifischen Regelungen für die Ermittlung und den Nachweis der Durchbruchesicherheit einer betretbaren Verglasung gegeben, was zu zahlreichen Fragestellungen aus der Praxis bei der Bemessung solcher Glasbauteile führt. Es besteht die Notwendigkeit einer schweizerischen Regelung für die Ermittlung der Durchbruchesicherheit.

Lösungskonzept

Der Nachweis der Durchbruchesicherheit von betretbaren Oberlichtern und Dachelementen wird von der SUVA in Bezug auf die Bauarbeitenverordnung (2021) mittels Fallversuchs eines sphärokonischen Glaskugelsacks (50 kg)

aus der Höhe von 2.4 Metern festgelegt. Dieses Vorgehen könnte auch auf die Prüfung von Glas übertragen werden (Abb. 1). Alternativ könnte für die Prüfung stossartiger Belastungen der für Glas übliche Pendelschlagversuch mit dem Doppelreifen für die Prüfung der Durchbruchesicherheit verwendet werden. Ob die beiden Verfahren auf ihre Auswirkung auf die Spannung korrelieren und welche möglichen Unterschiede im Bruchverhalten bestehen, soll durch Versuche an einer Reihe von Verbundsicherheitsgläser typischer Abmessungen geprüft werden (Abb. 2,3). Die Spannungen werden dabei auf der Glasunterseite mit DMS erfasst, wobei nur die Spannungen zum Zeitpunkt des Impakts betrachtet werden (Abb. 4,5).

Ergebnisse

Die Ergebnisse zeigen, dass kein allgemein anwendbares Korrelationsverhalten für die Fallhöhen der beiden Stosskörper festgestellt werden kann. Jedoch wird die These bestätigt, dass beim Doppelreifen verglichen mit dem sphärokonischen

Glaskugelsack bei identischer Fallhöhe die grösseren Spannungen auftreten. Die maximale Bruchspannung beim Aufprall vor dem Bruch variiert stark. Die schwächste Verglasung bricht bei 31 Mpa, während die Widerstandsfähigste bei 107 MPa nicht beschädigt wird (Abb. 6,9). Für eine bessere Abschätzung wird der Einfluss der variablen Einflussfaktoren in Bezug auf die maximale Spannung und den Glasbruch untersucht. Mit den erhaltenen Erkenntnissen wird ein Versuchsprotokoll erarbeitet, welches in späteren Versuchen zum Erstellen einer Übersicht durchbruchesicherer Gläser zur Anwendung kommen kann (Abb. 7,8,10).

Dominic Achermann

Betreuer:
Dr.-Ing. Thimo Fildhuth

Experte:
Ives Schüpfer

Industriepartner:
SIGAB

Einfluss der Klebegeometrie auf Silikonversiegelungen

Einfluss unterschiedlicher Klebeabmessungen auf Steifigkeit und Bruchkraft



Abbildung 1: Versuchsaufbau

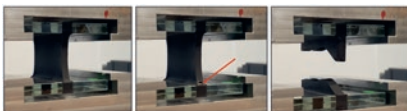


Abbildung 2: Zugversuch A/R = 0.375

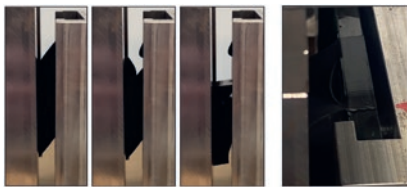


Abbildung 3: Scherversuch A/R = 0.5 & 1.875

Materialkennwerte Kleber 1 / H-Prüfkörper					
Versuchsreihe	A	B	D	E	
Aspect Ratio [e/h]	1.0	3.0	1.0	1.875	
Dehnung $\epsilon_{0.05}$ bei Zugspannung $\sigma_{0.05} = 0.5$ MPa [%]	21.97	12.57	25.36	17.30	
Dehnung $\epsilon_{0.05}$ bei Schubspannung $\tau_{0.05} = 0.5$ MPa [%]	94.06	94.51	96.06	99.07	

Tabelle 1: Vergleich Dehnungen (Kleber 1)

Materialkennwerte Kleber 2 / H-Prüfkörper					
Versuchsreihe	G	H	J	K	
Aspect Ratio [e/h]	1.0	3.0	1.0	1.875	
Dehnung $\epsilon_{0.05}$ bei Zugspannung $\sigma_{0.05} = 0.5$ MPa [%]	7.87	4.99	8.76	6.95	
Dehnung $\epsilon_{0.05}$ bei Schubspannung $\tau_{0.05} = 0.5$ MPa [%]	41.29	43.90	44.63	45.84	

Tabelle 2: Vergleich Dehnungen (Kleber 2)

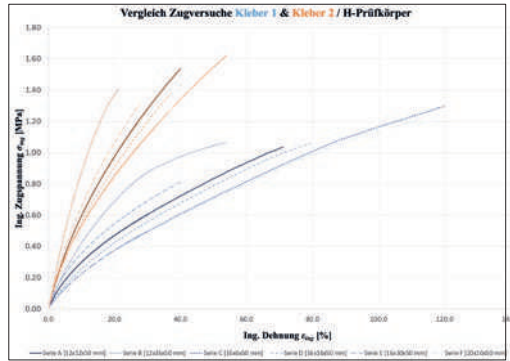


Diagramm 1: Vergleich Zugversuche

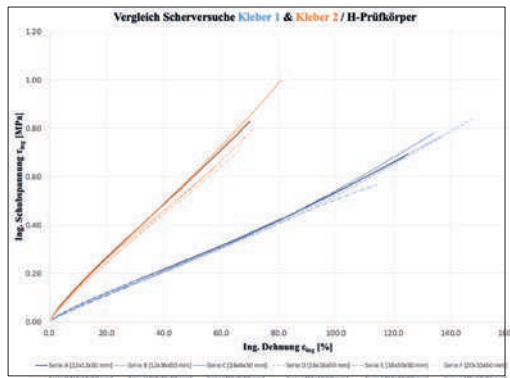


Diagramm 2: Vergleich Scherversuche

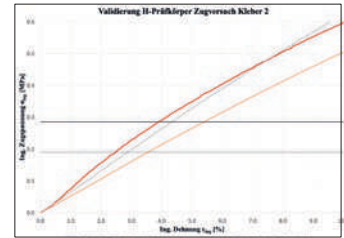


Diagramm 3: Validierung FE-Modell

	Übersicht Zugversuche	Übersicht Scherversuche
Versuchsreihe A & G [12x12x50 mm]		
Versuchsreihe B & H [12x36x50 mm]		
Versuchsreihe C & I [16x6x50 mm]		
Versuchsreihe D & J [16x16x50 mm]		
Versuchsreihe E & K [16x36x50 mm]		
Versuchsreihe F & L [20x16x50 mm]		

Tabelle 3: Übersicht FE-Modelle Kleber 1

Problemstellung

Isolierverglasungen sind seit mehr als 40 Jahren ein wichtiger Bestandteil einer Fassade. Sie übernehmen nicht nur die thermische Isolierung eines Gebäudes, sondern verbessern auch den Komfort und das Wohlbefinden im Innenraum.

Die Bemessung der Stegüberdeckung (Randverbund) wird durch die Leitlinie für die europäische Zulassung für geklebte Glaskonstruktionen (ETAG-002) geregelt. Dafür werden Produktprüfungen an H-Prüfkörpern mit einer Abmessung von 12x12x50 mm durchgeführt. Die Vernachlässigung von geometrischen Abmessungen sowie die Bemessung mit vereinfachten Gleichungen führen zu konservativen Sicherheitsfaktoren.

Durch die zunehmend grösseren Scheibenzwischenräume entspricht das Breite-zu-Dicke-Verhältnis (A/R) nicht mehr der Charakterisierung der normierten Prüfkörper. Die Steifigkeit erhöht sich durch die zunehmende Breite der Verklebung und die damit verbundenen Spannungszustände in der Klebegeometrie verändern sich hin zu einem hydrostatisch geprägten Zustand.

Lösungskonzept

Durch Zug- und Scherversuche an H-Prüfkörpern wird der Einfluss unterschiedlicher Klebeabmessungen auf Steifigkeit, Bruchkraft und Materialkennwerte (E-Modul, G-Modul und Designspannungen) untersucht. Dabei werden sechs unterschiedliche Abmessungen (Tabelle 3) aus zwei verschiedenen Klebstoffen, die für die Sekundärabdichtung der Scheibenzwischenräumen verwendet werden, untersucht (Abbildungen 1 bis 3).

Die Herstellung der Prüfkörper und der Ablauf der Versuche wird in Anlehnung an die ETAG-002 durchgeführt. Abmessungen der Verklebung bis A/R = 1:3 liegen ausserhalb des typischen Bereiches, finden aber immer häufiger Verwendung in der Bau-praxis.

Um begleitende FE-Simulationen mit hyperelastischen Materialmodellen zum praktischen Einsatz herzuleiten, werden uniaxiale Zugversuche an Schulterstäben durchgeführt. Die FE-Modelle werden anhand der experimentell ermittelten Versuchsdaten aus den Schulterstäben und aus den H-Prüfkörpern kalibriert (Diagramm 3). Darüber hinaus werden die Anwendungsmöglichkeiten und ihre Grenzen vorgestellt.

Ergebnisse

Die Ergebnisse für erhöhte Aspect Ratios zeigen (Diagramm 1 & 2), dass die Spannungen mit dem ETAG-Ansatz deutlich unterschätzt werden bzw. auf der unsicheren Seite liegen und die Klebebreite einen massgebenden Einfluss auf die Steifigkeit hat. Die Tabellen 1 & 2 zeigen den Steifigkeitsunterschied in Abhängigkeit von der vorhandenen Dehnung bei 0.5 MPa Zug- und Schubspannungen.

Eine sinnvolle Bemessung mit einer numerischen FEM-Simulation kann nur durch die Herleitung eines kalibrierten Materialgesetzes erfolgreich durchgeführt werden. (Tabelle 3)

Manuel Affolter

Betreuer:
Dr.-Ing. Thiemo Fildhuth

Experte:
Ives Schüpfer

Analysen zur Durchbruchsischerheit von VSG

auf Basis von Versuchsergebnissen und numerischen Betrachtungen

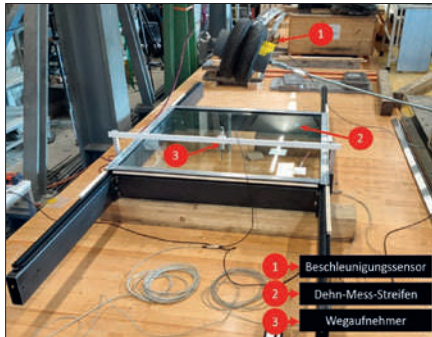


Abb. 1 Prüfeinrichtung & Bezeichnung der Messinstrumente

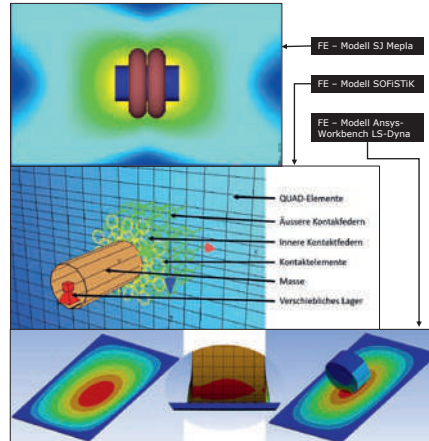


Abb. 3 FE-Modelle (SJ Mepla (oben), SOFiSTiK (Mitte) und LS-Dyna (unten))

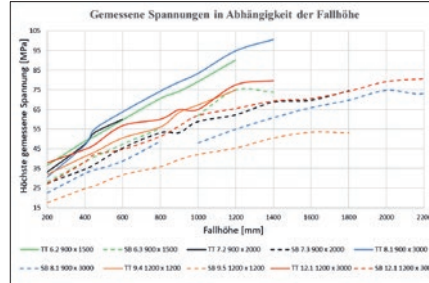


Abb. 4 Spannungen (DMS-Versuche) Doppelreifen (TT) – Glaskugelsack (SB)

Position	6	7	8	9	12
Dimension (m)	0.9 x 1.5	0.9 x 2.0	0.9 x 3.0	1.2 x 1.2	1.2 x 3.0

Abb. 5 Glasformate in den Tabellen (Abb.4 & Abb.8)

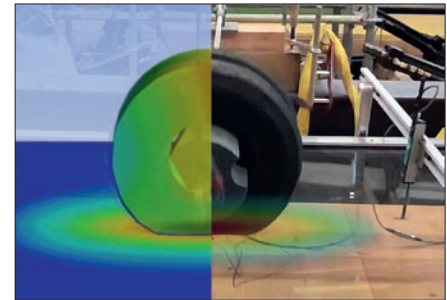


Abb. 6 Verformung beim Aufprall Versuch & FE-Modell

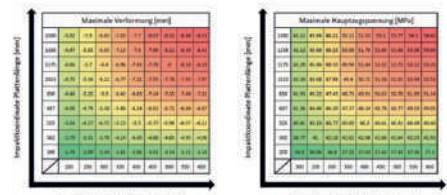


Abb. 7 FE Spannung & Verformung bei unterschiedlicher Aufprallstelle

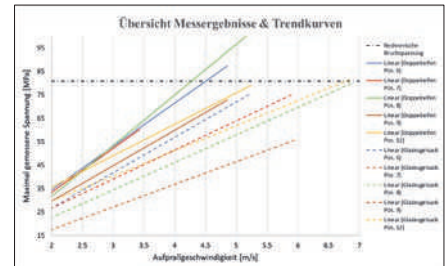


Abb. 8 Trendkurven Spannung in Abhängigkeit der Aufprallgeschwindigkeit

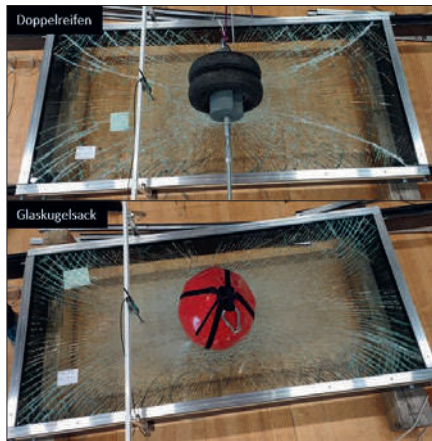


Abb. 2 Stosskörper (Doppelreifen & Glaskugelsack)

Problemstellung

In der modernen Architektur werden Glasbauteile häufig im Dachbereich verbaut. Da diese für Reinigungs- oder Wartungsarbeiten betreten werden können, müssen gewisse Sicherheitsanforderungen erfüllt werden. Zum aktuellen Zeitpunkt gibt es für die Durchbruchsischerheit kein einheitliches Bemessungskonzept. Die Durchbruchsischerheit ist nach SIA 2057 in der Schweiz projektspezifisch zu berücksichtigen. Zudem werden in verschiedenen Regelwerken (z.B DIN 18008-4/6, EN 12600, CWCT TN 67) unterschiedliche Stosskörper (Doppelreifen & Glaskugelsack) (Abb.2) verwendet.

Lösungskonzept

In Zusammenarbeit mit der SIGAB wird an branchenüblichen Glasformaten (Abb.5) untersucht, wie sich diese unter Stossbelastungen verhalten. Dabei steht im Zentrum, ein Prüfverfahren zu fixieren und die normativen Lücken zu schliessen. Dafür werden verschiedene Regelwerke miteinander verglichen und es wird eine einheitliche Nomenklatur festgelegt.

Mit den definierten Kriterien werden danach praktische Versuche an den Prüfkörpern durchgeführt (Abb.1). Parallel zu den Versuchen werden numerische FE-Modelle erstellt (Abb.3). Bei der Auswertung werden die Modelle mit den Versuchsergebnissen verglichen (Abb.6). Die Spannungen werden mit DMS an der Glasunterseite erfasst. Für ein passendes Prüfverfahren, welches auch den Vorgaben der SUVA entspricht, wird die Korrelation zwischen den Stosskörpern untersucht.

Ergebnisse

Mit dem verwendeten Prüfsetting lassen sich die Auswirkungen auf die Glasbauteile unter einer Stosseinwirkung gut erfassen. Die Messdaten zeigen, dass der Doppelreifen (TT) beim Stossvorgang eine höhere Spannung am Glasbauteil verursacht als der Glaskugelsack (SB) (Abb.4). Mit der vorgängigen FE-Analyse kann die massgebende Aufprallstelle auf dem Glasbauteil ermittelt werden (Abb.7). Der Vergleich zeigt, dass die FEA die aus dem Stossvorgang resultierenden Spannungen

überschätzen. Durch eine Sensitivitätsanalyse kann der Einfluss der Eingabeparameter auf die Ergebnisse der FE-Modelle ermittelt werden. Eine allgemeingültige Korrelation zwischen den beiden Stosskörpern kann anhand der Ergebnisse nicht bestimmt werden. Dies ist ersichtlich durch die unterschiedlichen Steigungen der Trendkurven (Abb.8). Die Ergebnisse liefern einen Eindruck über das Verhalten und die Sicherheit der Glasbauteile. Sie bilden eine Grundlage für eine Weiterarbeit oder künftige Bemessungsgrundlage.

Florian Budde

Betreuer:
Dr.- Ing. Thiemo Fildhuth

Experte:
Ives Schüpfer

Industriepartner:
SIGAB (Schweizer Institut für Glas am Bau)

Ökobilanzierungs-Software für den Fassadenbau

Vergleich und Bewertung von Software Tools

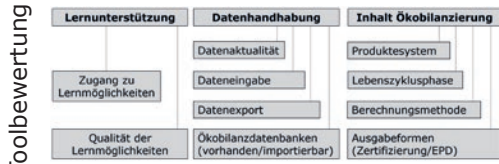


Abb. 1 Bewertungskategorien mit Kriterien



Abb. 2 und 3 Bewertung Datenhandhabung und Inhalt Ökobilanzierung

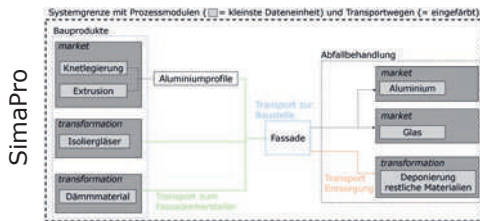
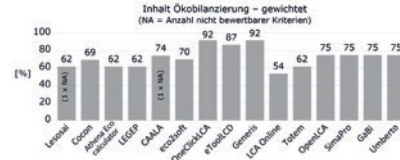


Abb. 4 und 5 Systemgrenzen in beiden Tools

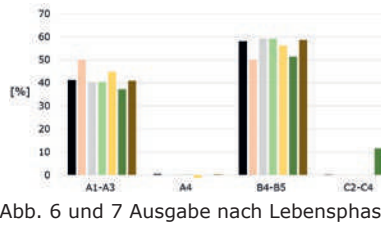
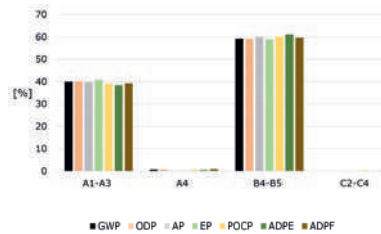


Abb. 6 und 7 Ausgabe nach Lebensphase

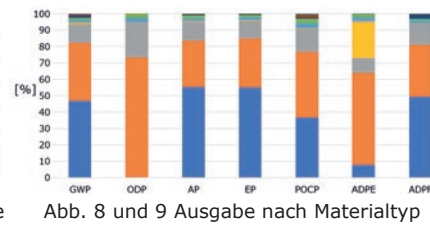
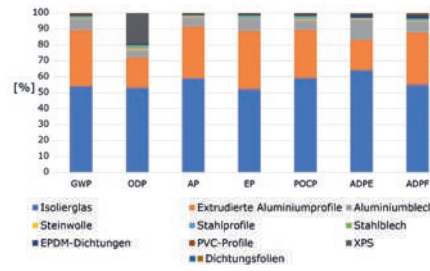


Abb. 8 und 9 Ausgabe nach Materialtyp

Problemstellung

Tools zur Ökobilanzierung werden im Bauwesen vor allem von spezialisierten Anwender*innen eingesetzt. Es ist unklar, welche Tools sich für den Fassadenbau eignen könnten. Daher soll eine Auswahl an geeigneten Tools bestimmt und bewertet werden. Im Kontext der in der Schweiz gängigen Praxis der Ökobilanzierung stellen sich dabei folgende Fragen: Wie werden Ökobilanzierungen im Schweizer Bauwesen eingesetzt? Wie können Ökobilanzergebnisse aus den Tools von einem Fassadenhersteller in diesem Umfeld am besten genutzt werden?

Lösungsansatz

Durch Interviews mit Expert*innen aus dem Feld wird eine Wissensbasis erarbeitet. Es wird eine Auswahl bewertbarer Tools definiert. Aus der Literatur werden Kriterien erfasst und zu einer Bewertungsmatrix verdichtet. Als übergeordneten Bewertungskategorien werden *Lernunterstützung*, *Datenhandhabung* und *Inhalt Ökobilanzierung* gewählt (Abb. 1-3). Mit zwei der bewerteten Tools wird dann eine Pfosten-Riegel-Fassade bilanziert (Plangrundlagen zur Verfügung

gestellt von Sottas AG). Die Funktionsweise beider Tools bezüglich Aspekten wie der Systemgrenze (Abb. 4 und 5), der Datenmodellierung und der Datengrundlage werden verglichen. Abschliessend werden die Ergebnisse aus dem Toolvergleich auf die zuvor erarbeitete Wissensbasis bezogen.

Ergebnisse

Aufgrund der Bewertungsergebnisse werden die Tools *SimaPro* (SimaPro Faculty-Lizenz) und *OneClickLCA* (OneClickLCA-Student-Lizenz) für die Bilanzierung der Fassade ausgewählt. Die Untersuchung zeigt Unterschiede vor allem im Zusammenhang mit den in den Tools hinterlegten Datengrundlagen bzw. Datenbanken.

Die verwendeten Lizenzen beinhalten nicht den vollen Funktionsumfang. Daher ist für die Tools nicht dieselbe Wirkungsabschätzungsmethode verfügbar. Ausgabewerte dürfen also nicht direkt verglichen werden. Die Modellierung des Lebenszyklus und die Ausgabe der Wirkungskategorien nach Lebensphase (Abb. 6 und 7) oder materialweise (Abb. 8 und 9) gestalten sich bei One-

ClickLCA einfacher als bei SimaPro. Allerdings sind die Strukturierungsmöglichkeiten der Daten in OneClickLCA deutlich beschränkter als in SimaPro.

Für den Einsatz der Tools im Umfeld Schweiz zeigt sich folgende Problematik: In der Ausführungsphase besteht nur noch geringer Spielraum, eine Fassade ökologisch zu optimieren. Eine mögliche Lösung wäre, mit standardisierten Produktesystemen zu arbeiten, um durch schnelle und zeitnahe Abschätzungen herstellereigene Entscheidungen für frühe Planungsphasen anbieten zu können. Die Tools können jedoch das Sammeln und Erzeugen spezifischer Daten zur Produktion und Lieferkette nicht ersetzen. Dies muss nach wie vor vom Fassadenhersteller selbst angegangen werden.

Martin Müller

Betreuerin:
Prof. Dr. Susanne Gosztonyi

Experte:
Stefan Eggimann

Wärmedurchgang durch Pilzdämmplatten

Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit der Pilzdämmplatten und Vergleich mit einer Holzfaserdämmplatte

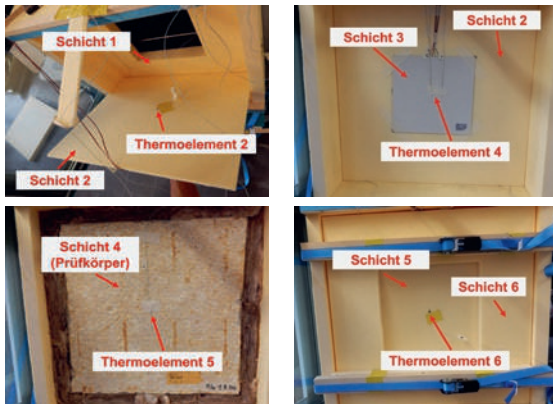


Abb. 1: Teilarbeitsschritte des Einbaus des Prüfkörpers

Eigenschaften	Pilzdämmplatte Pilz 1.B.176	Pilzdämmplatte Pilz 2.FS.173	Pilzdämmplatte Pilz 3.F.147	Pilzdämmplatte Pilz 4.FG.124	Vergleichsprodukt Gutex 5.HF.140
Höhe x Breite [mm]	ca. 519 x 512	ca. 510 x 511	ca. 496 x 498	ca. 508 x 511	ca. 510 x 510
Dicke d [mm]	ca. 65	ca. 59	ca. 57	ca. 54	60
Rohdichte [kg/m³]	ca. 176	ca. 173	ca. 147	ca. 124	140
Grundsubstrat/ Grundwerkstoff	Buchenspäne, Stroh (B)	Fichtenspäne, Stroh (FS)	Fichtenspäne (F)	Fichtenspäne, Weizenspelzen (FG)	Holzfaser (HF)
Massabweichung der Dicke u _d [mm]	± 2,5	± 2,5	± 2,5	± 2,5	± 1
Berechnete Ergebnisse und Messabweichungen u					
R [(m²·K)/W]	1,22	1,21	1,14	1,23	1,35
u _R [(m²·K)/W]	0,008	0,137	0,107	0,120	0,129
λ [W/(m·K)]	0,0534	0,0487	0,050	0,0438	0,0443
u _λ [W/(m·K)]	0,0021	0,0059	0,0052	0,0047	0,0043

Tab. 1: Eigenschaften Prüfobjekte und berechnete Ergebnisse

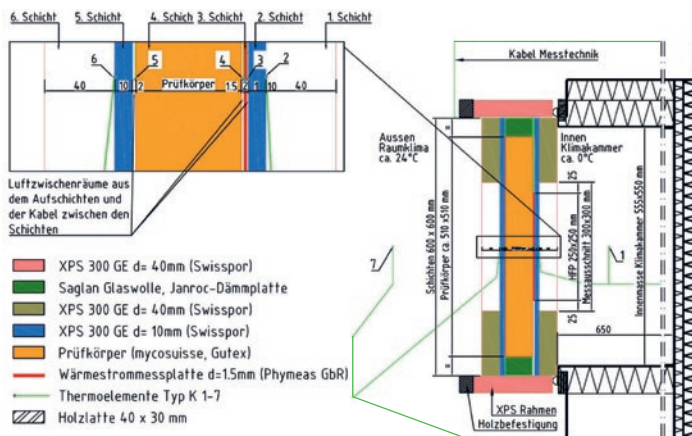


Abb. 2: Prüfstand in Anlehnung an die Norm SN EN 12667:2001

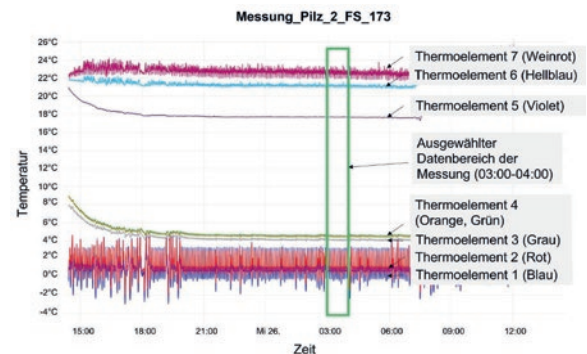


Abb. 3: Messdaten der Thermoelemente

Problemstellung

Biobasierte Werkstoffe erhielten in den letzten Jahren eine erhöhte Aufmerksamkeit, da sie einen markanten Beitrag zur Nachhaltigkeit des Bausektors, unter anderem auch im Bereich der Wärmedämmung, beitragen können. Das junge Unternehmen Mycosuisse hat die Idee, eine Pilzdämmplatte zu produzieren, die als Wärmedämmung in verschiedenen Bereichen eingesetzt werden kann.

Ziel dieser Bachelorarbeit war die Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit von unterschiedlichen Pilzdämmplatten sowie die Beantwortung der Frage, ob sie mit anderen nachwachsenden Dämmstoffen vergleichbar sind und wie sie eingesetzt werden können.

Vorgehensweise

Eine Recherche gibt vorerst einen Einblick in die Dämmstoffe, welche auf biobasierten Werkstoffen aufbauen und in der Baubranche in Platten- oder Mattenform verwendet werden. Ein anschliessend identifizierter Dämmstoff wurde durch Messung des Wärmedurchgangs mit den

Pilzdämmplatten verglichen. Die Wahl fiel auf eine Holzfaserdämmplatte (Produkthersteller: Gutex), da Holz der gemeinsame Grundwerkstoff von beiden Plattentypen ist (Tab. 1), obwohl die Dämmplatte mit fossilem PUR-Harz produziert wird. In einem nächsten Schritt wurde ein Prüfstand entwickelt der in Anlehnung an die Norm SN EN 12667:2001 aufgebaut ist (Abb. 2). Der Prüfstand wurde nach der Planung aufgebaut (Abb. 1,2), um die Dämmplatten (Tab. 1) wärmetechnisch zu untersuchen.

Ergebnisse

Die Ergebnisse der Messungen zeigen, dass die Pilzdämmplatten mit ihrer gemessenen Wärmeleitfähigkeit λ zwischen 0,044 bis 0,053 W/(m·K) liegen und somit etwas weniger effizient sind als die Referenzdämmplatte mit einer Wärmeleitfähigkeit λ von 0,04 W/(m·K) (Tab. 1). Eine weitere Verfeinerung der Substratbestandteile Fichte, Stroh und Weizenspelzen könnte ein vielversprechender Ansatz sein, um die Dämmplatte zu verbessern und so eine effizientere Dämmplatte zu

produzieren. Mit diesen drei Substratbestandteilen wird vermutet, eine gute Kombination aus Wärmeleitfähigkeit, Rohdichte und spezifischer Wärmekapazität zu erreichen. Durch ihre flexible Formgebungsmöglichkeiten können die Pilzdämmplatten in Wärmedämmverbundsystemen oder in hinterlüfteten Dämmsystemen Anwendung finden. Die Pilzdämmplatten haben aus nachhaltiger Sicht einen enormen Vorteil, da sie im Gegensatz zu der Holzfaserdämmplatte, die eine sehr ähnliche Wärmeleitfähigkeit besitzt, ohne fossile Bestandteile auskommen.

Ronny Wettmer

Betreuerin:
Prof. Dr. Susanne Gosztonyi

Experte:
Stefan Eggmann

Industriepartner:
Patrick Mürner, Mycosuisse

Parameterstudien an einer modularen Glasschale

Zur Analyse der Sensitivität und Redundanz

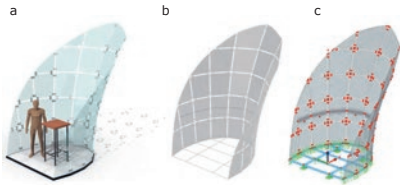


Bild 1: a: Rendering der gebauten Glasschalen b: Fertiges Parameternmodell c: Fertiges Berechnungsmodell

Nachweis	Zustand	Auswirkung Max. Hauptzugspannung / Verformung	Bemessungswert Zulässige Spannung / Verformung	Ausnutzung
Spannungsnachweis	GZT	27.8N/mm ²	43.75N/mm ²	0.635
Verformungsnachweis	GZG	8.8mm	41mm	0.215
Verformungsnachweis	GZG	8.8mm	16mm	0.543
Verformungsnachweis	GZG	7.7	7.88	0.977

Federart	Achse	Beschreibung	Wert	Einheit
Translation	X	Zug in plane	27'341.4	kN/m
Translation	Y	Scheren in plane	11'152.6	kN/m
Translation	Z	Scheren out of plane	152.9	kN/m
Rotation	Y	Biegung um die Glaskante	0.04	kNm/rad

Tabelle 1: Resultate der Nachweise für die Glasschale
Tabelle 2: Durch Tests bestimmte Steifigkeiten

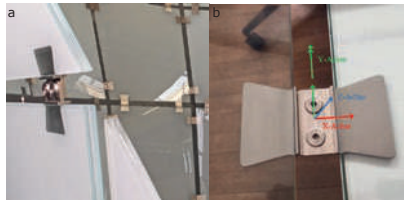


Bild 2: a: In der Schale verbauter Fitting b: Wirkungsachsen der Steifigkeiten (Quelle Bild a: Fildhuth et al., 2022; Quelle Bild b: Fildhuth, 2020; siehe Literaturverzeichnis der These, Seite 63)

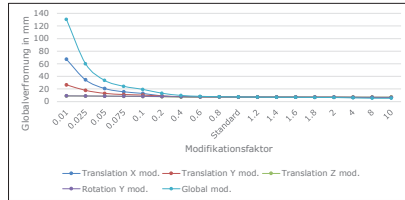


Diagramm 1: Vergleich der Verformungen aufgrund der modifizierten Federsteifigkeiten

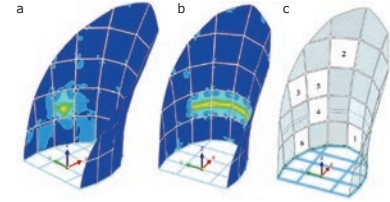


Bild 5: Bestimmen der Position der ausfallenden Scheiben mit Hilfe der Hauptzugspannungen a: Scheibe mit den grössten Spannungen b: Interessanter Lastfall für die Redundanzstudie c: Bei Redundanz-studie ausfallende Scheiben

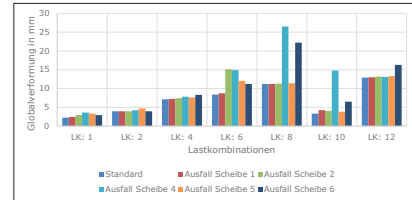


Diagramm 4: Vergleich der Verformungen aufgrund der ausgefallenen Scheiben

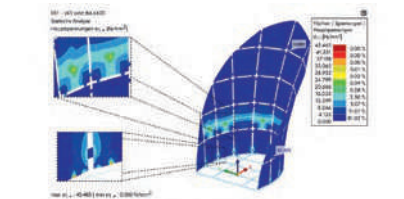


Bild 3: Umhüllende der Hauptzugspannungen in N/mm² im GZT, vergrössert: Spannungsspitze beim Auflager und Punkt der Spannung für den Nachweis

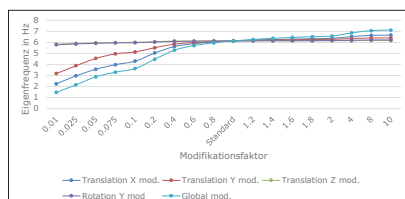


Diagramm 2: Vergleich der Eigenfrequenzen aufgrund der modifizierten Federsteifigkeiten

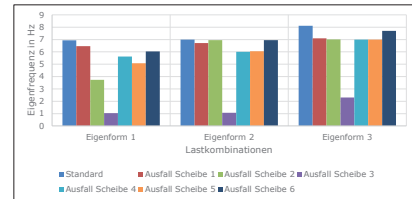


Diagramm 5: Vergleich der Eigenfrequenzen aufgrund der ausgefallenen Scheiben

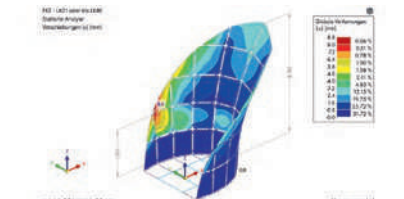


Bild 4: Umhüllende der Verformungen im GZG in mm

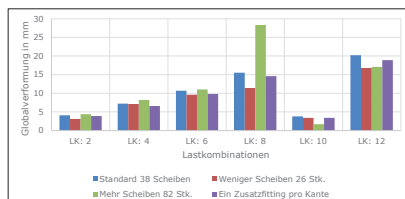


Diagramm 3: Vergleich der Verformungen aufgrund der modifizierten Fitting- und Scheibenanzahl



Bild 6: Alternative Lastpfade, dargestellt anhand der Hauptzugspannung aufgrund der ausgefallenen Scheiben unter Eigenlast

Problemstellung

Durch die Weiterentwicklung der Technologien im Glasbau wird das Verlangen nach transparenteren Fassaden immer grösser. Mit dem Wunsch nach Transparenz steigt auch das Interesse an neuen, kaum sichtbaren Verbindungen zwischen den einzelnen Scheiben.

Die untersuchte Glasschale ist ein Messexponat, welches eine solche neue Verbindung präsentieren soll (Bilder 1 und 2). Aufgrund des engen Zeitplans bei der Planung konnten bis zur Fertigstellung weder Tests an den Fittings noch eine Untersuchung des Einflusses der Steifigkeit der Verbindungen (in die Zwischenschicht einlamierte Fittings) auf das Tragwerk durchgeführt werden. In der Zwischenzeit wurden Tests an den Fittings für Zug, Schub und Biegung an der HSLU durchgeführt. Ziel dieser Arbeit ist es nun, die Resultate dieser Tests in ein parametrisches FE-Modell einzuarbeiten und hiermit die strukturelle Analyse der Glasschale zu aktualisieren.

Weiter wird mit einer Parameter- und Redundanzstudie das Verhalten der Schale abhängig von der Verbindungssteifigkeit untersucht.

Lösungskonzept

Zu Beginn wird ein parametrisches Modell der Schale (Rhino/Grasshopper) erstellt (Bild 1). Danach werden aus den Testresultaten die effektiven Translationssteifigkeiten in Richtung der X-, Y- und Z-Achsen, sowie die Rotationssteifigkeit um die Y-Achse der Fittings ermittelt und in das Modell eingearbeitet (Bild 2, Tab. 2). Für das Standardmodell (Bild 1) werden danach die Nachweise der VSG Scheiben der umgesetzten Schale nach DIN 18008 geführt.

Bei der Parameterstudie werden der Einfluss der Steifigkeiten, der Position der Fittings, der Breite der Fugen zwischen den Scheiben sowie der Anzahl der Fittings und Scheiben untersucht. Für die abschliessende Redundanzstudie wird der Ausfall von einzelnen Scheiben simuliert und überprüft, ob die Schale in der Lage ist, alternative Lastpfade auszubilden (Bilder 5 und 6).

Fazit

Bei der Analyse der Standardschale mit den Fittingsteifigkeiten gemäss den Testergebnissen werden alle Nachweise erfüllt (Tab. 1, Bilder 3 und 4). Die Parameterstudie zeigt, dass die Fittings bereits eine sehr optimierte Konstruktion darstellen. Von allen Parametern hat die Steifigkeit in X-Richtung den grössten Einfluss (Diagr. 1 und 2). Weiter hat sich gezeigt, dass die Glasschale auch mit den weiteren Modifikationen immer noch funktioniert (Diagr. 3). Die durchgeführte Redundanzstudie bestätigt die guten Ergebnisse der Parameterstudie. Die Glasschale ist stets in der Lage, die aufgetragenen Lasten durch alternative Lastpfade abzuleiten und sich so wieder zu stabilisieren (Diagr. 4 und 5, Bild 6)

Christoph Martin Bütikofer

Betreuer:
Dr. Thiemo Fildhuth

Experte:
Ives Schüpfer

Klotzung lastabtragender Verbundgläser

Numerische Untersuchung der Lasteinleitung und Klötze für Multi-Layer VSG

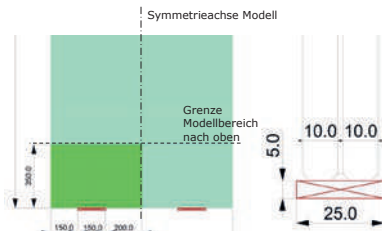


Bild 1: Ansicht und Querschnitt des Basismodells

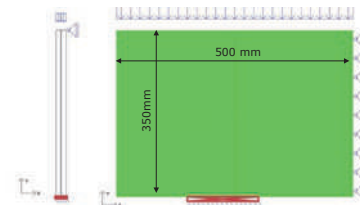


Bild 2: Randbedingungen des Basismodells

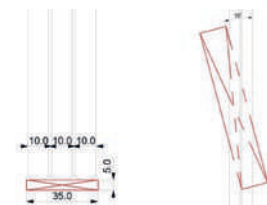


Bild 3: Skizzen Aufbau 3x10mm und Klotzverschiebung

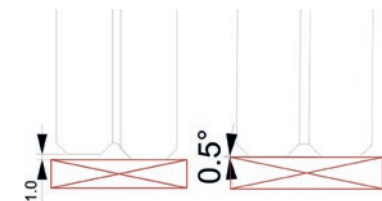


Bild 4: Skizzen Glasversatz und Glaskippung

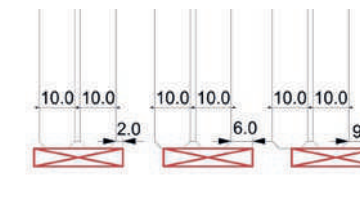


Bild 5: Skizze Variation der Klotzposition

Material Parameter				
Name	Material	E-Modul [N/mm ²]	Querkontraktionszahl	Materialgrenzen [N/mm ²]
Glasscheiben	Kalk-Alttron-Silicatglas	70.000	0,22	70 / 430
Interlayer	SentryGlas®	300	0,465	34 / 5
Klotz	PP	1.400	0,4	22
Klotz	PODI-C	3.600	0,35	65
Klotz	Half-Hit	1.700	0,35	2 / 65
Unterkonstruktion	Stahl	200.000	0,3	235

Geometrische Parameter			
Name	Minerlänge	Breite	Spezielles
Glas	350 mm	500 mm	10 mm
Interlayer	350 mm	500 mm	1,52 mm
Klotz	150 mm	25 mm	5 mm
Unterkonstruktion	150 mm	25 mm	1 mm

Bild 6: Material und geometrische Parametermatrix

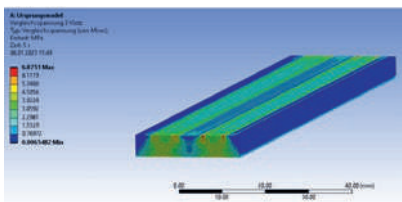


Bild 7: Vergleichsspannung [MPa] im Klotz beim Basismodell



Bild 8: Maximale Vergleichsspannung im Klotz im Basismodell

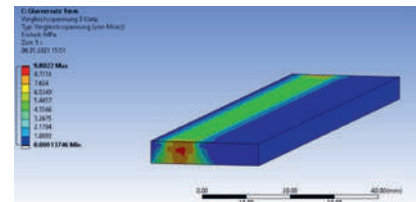


Bild 9: Vergleichsspannung [MPa] im Klotz beim Glasversatz

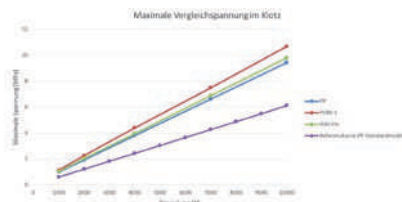


Bild 10: Maximale Vergleichsspannung im Klotz beim Glasversatz

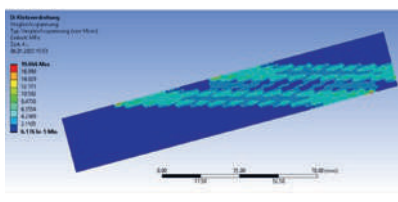


Bild 11: Vergleichsspannung [MPa] des Klotzes bei einer Klotzverdrehung. Ansicht von oben

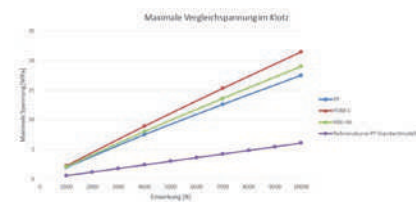


Bild 12: Maximale Vergleichsspannung im Klotz bei einem verdrehten Klotz

Problemstellung

Bei strukturellen Ganzglaskonstruktionen übernehmen die Klotzungen der tragenden und aussteifenden Glasbauteile eine lastabtragende Rolle und erhalten dementsprechend hohe, konzentrierte Einwirkungen. Für die Klötze kommen unterschiedliche Materialien zur Anwendung. Bisher ist die Frage, ob dies zu Spannungskonzentrationen im Glas und Klotz führen kann, nur wenig behandelt worden. Im Rahmen dieser Arbeit werden daher Lasteinleitung und Beanspruchung verschiedener Glasaufbauten und deren Klötzen untersucht. Im Vordergrund steht ein tragender VSG-Aufbau, dessen Kräfte über die Klötze in die Unterkonstruktion geleitet werden. Um die Auswirkungen des Lasttransfers zwischen Klotz und Glas und von Imperfektionen zu untersuchen, müssen geeignete Parameter und Imperfektionen definiert und in einem Finite Elemente Methode (FEM) Programm modelliert werden.

Lösungskonzept

Die FEM Modelle müssen verwertbare Ergebnisse liefern, während sie so klein wie möglich gehalten werden, damit die Rechenzeit der Modelle eine Parameterstudie zulassen. Zusätzlich müssen die Änderungen so gewählt werden, dass Tendenzen und Abhängigkeiten zwischen den Modellen und den variierenden Parametern ersichtlich bleiben. Zusätzlich soll überprüft werden ob typische Handrechnungen als Näherung für eine Klotzbemessung ausreichen.

Als Grundlage der Parameterstudie wird ein Basismodell erstellt. Im Bild 1 ist der Aufbau des VSG mit einem Interlayer aus SentryGlas® ersichtlich. Die Randbedingungen des Modells sind in Bild 2 ersichtlich. Bild 3, 4 und 5 zeigen die weiteren geometrischen Modelle, deren Geometrie und Randbedingungen sich an das Basismodell beziehen. Die Ergebnisse werden über eine Laststeigerung von 1-10 kN untersucht. Die linear-elastischen Materialmodelle sind in Bild 6 ersichtlich.

In Bild 7 ist die Vergleichsspannung des Klotzes beim Basismodell, im Bild 9 diejenige des Klotzversatzes ersichtlich.

Fazit

Der Klotzversatz wird durch die Verformung nicht geschlossen und leitet die Kräfte nur durch eine Glasscheibe ab. Dies erzeugt höhere Spannungen. Bei einer Laststeigerung dieser Modelle (Bild 8 und 10) wird ersichtlich, dass die Spannungen linear steigen. Zusätzlich bedeutet ein höheres E-Modul des Klotzmaterials tendenziell eine höhere Spitzenspannung im Klotz sowie im Glas. Eine Imperfektion des Modells erhöht die Spannungen im Klotz und sollte montagetchnisch / durch Mörtel verhindert oder mit einer Sicherheit kompensiert werden.

Adrian Frey

Betreuer:
Dr. Thiemo Fildhuth

Experte:
Ives Schüpfer