

Zum Potential unterschiedlicher Methoden beim Einlaminieren struktureller Metallverbinder

Thiemo Fildhuth^{1,2}, Matthias Oppe¹

1 knippershelbig GmbH, Tübinger Str. 12–16, 70178 Stuttgart, Deutschland;
t.fildhuth@knippershelbig.com; m.oppe@knippershelbig.com

2 Hochschule Luzern, Technik & Architektur, Institut für Bauingenieurwesen, Technikumstrasse 21,
CH 6048 Horw, Schweiz; thiemo.fildhuth@hslu.ch

Abstract

In Verbundglas mittels Interlayer einlamierte, strukturelle Metallverbinder (Fittings) stellen aufgrund ihrer mechanischen und gestalterischen Eigenschaften eine geeignete Fügemethode für lastabtragende Glaskonstruktionen dar. Dabei sind die Vorteile des Klebens für den Lasteintrag in das Glas und die Duktilität des Fittings unter dem Aspekt der Sicherheit nutzbar. Die Fittings werden entweder in taschenartige Aussparungen im Glas oder in den dünnen Raum zwischen zwei Glasscheiben einlamiert. Anhand zweier ausgeführter Projekte, eines Flagshipstores und einer Glasschale, wird das Tragverhalten der unterschiedlichen Konstruktionsweisen beispielhaft anhand numerischer Analysen, Variantenstudien sowie mittels Bauteilversuchen untersucht.

On the potential of various methods of laminating structural glass fittings. Owing to their mechanical and design properties, metallic fittings bonded into laminated glass via the interlayer represent a suitable structural joining method for load bearing glass constructions. The advantages of adhesive bonding for a homogeneous load transfer to the glass and the ductility of the fittings can be exploited with respect to the safety concept. Fittings can either be laminated into pocket-like cutouts in the center glass layer or into the thin interstice between two glass panes. The examples of two completed projects, a flagship store and a modular glass shell, are presented to investigate the load bearing behavior of these different fitting methods by means of numerical analyses, variant studies and component tests.

Schlagwörter: einlamierte Fittings, tragendes Glas, Ionomer, strukturelles PVB, Glasschale

Keywords: laminated fittings, structural glass, ionomer interlayer, structural PVB, glass shell

1 Einleitung

1.1 Strukturelle Glasverbindungen mit laminierten metallischen Verbindern

Lastabtragende Verbindungen zwischen Glaselementen im strukturellen Glasbau stellen eine der prinzipiellen Herausforderungen bei der ästhetisch anspruchsvollen Umsetzung von Ganzglaskonstruktionen dar. Dies ist umso mehr der Fall, wenn neben Druckkräften

in der Ebene des Glases auch Zugkräfte und/oder Biegung aufzunehmen sind. Die Anordnung und Ausrichtung der Fügung ist für die dort auftretenden Beanspruchungen entscheidend [1, 2, 3]. In Schalen mit überwiegender Membranbeanspruchung wie auch in momentenbeanspruchten Glasstrukturen stellt die Fügung auch immer eine Diskontinuität/Störung der Durchgängigkeit der Glasfläche mit einem Steifigkeitssprung dar. Ferner müssen strukturelle Glasverbindungen den Sicherheitskonzepten der Glaskonstruktion genügen, zum Beispiel durch duktilen Verhalten.

Abgesehen von klassischen, hoch belastbaren Scher-Lochleibungsverbindungen mit Glasbohrungen und Bolzen [4], sind taschenartig in Glasaussparungen einlamierte Verbinder aus Titan oder Chrom-Nickel-Stahl eine mittlerweile vielfach verwendete Lösung (Bild 1a), wie zahlreiche Anwendungen für hochwertige Stores (Bild 1b) und andere Projekte zeigen, [5–10]. Für diese Art der strukturellen Fügung sind meist aber Verbundgläser mit mindestens drei, oft aber sogar vier bis fünf Schichten erforderlich, was oft auch der Verformungsbegrenzung bei Ganzglaskonstruktionen geschuldet sein kann. Delamination durch Zwang, sprödes Interlayerverhalten bei Kälte oder sonstige Umwelteinflüsse stellen ein Risiko für solche Verbindungen dar. Punktförmig auf die innere Glasoberfläche geklebte oder laminierte Punkthalter sind eine weitere mehrfach untersuchte, aber kaum realisierte Verbindungsform [11, 12]. Lineare Fügungen durch direkte Klebung der Kanten [13] oder durch Eckverklebung linearer Verbindungsprofile [14] stellen eine interessante Fügemöglichkeit für Schalen dar, die jedoch im ersten Fall nicht mehr zum Austausch von Gläsern lösbar sind. Lineare Kanten-Flächenverklebungen mit strukturellem Silikon finden sich in aktuellen Lösungen häufiger. Kantenverklebte lokale Verbindungen mit Metallbauteilen [15, 16] sind eine weitere Fügungslösung, sie können jedoch meist nur begrenzte Kräfte aufgrund der geringen Klebefläche aufnehmen. Spezielle geklebte Verbinder für Türen, Ecken und Glaselementverbindungen sind in [17] publiziert und wurden umgesetzt. Eine weitere Entwicklung für die Übertragung hoher Kräfte stellen komplexe, linear in mehrere Interlayerschichten von Multilayer-VSG einlamierte Metall-Kantenverbinder dar [18, 19]. Auch gefaltete, flächige/lineare Lochbleche, die in die Zwischenschicht von Verbundglas einlaminiert werden, wurden vielfach untersucht [20, 21, 22] und teilweise umgesetzt [23]. Weitere Fügemöglichkeiten sind mit Ionomer-Interlayer [24], Gießharz [25] oder strukturellem PVB [26, 27, 28] in die dünne Zwischenschicht laminierte Blechstreifen. Eine für eine modulare Schale realisierte Anwendung, die im Rahmen des vorliegenden Beitrags behandelt wird, wird in [29–33] behandelt.

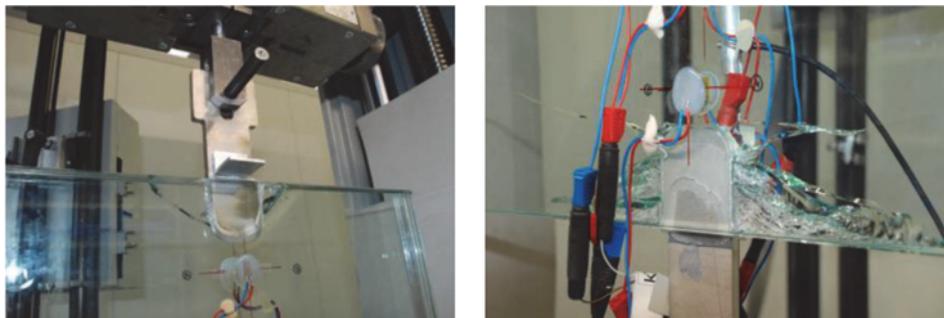


Bild 1 Beispiele für einlamierte, taschenartige Fittingverbindungen: a) Auszugsversuche an der Hochschule Luzern (© HSLU, CC Gebäudehülle)

1.2 Beispielprojekte

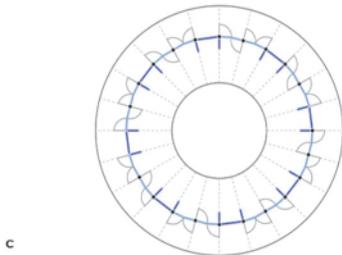
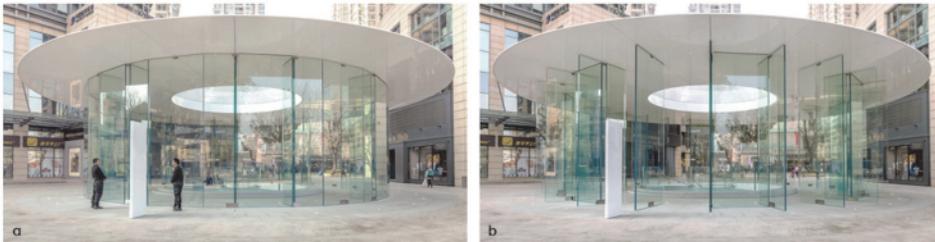
Anhand zweier Projekte, einem Flagshipstore und einer modularen Glasschale, sollen beispielhaft einlamierte Fittings in Glasaussparungen (Taschen) sowie in die Zwischenschicht einlamierte Fittings behandelt werden.

1.2.1 Flagshipstore

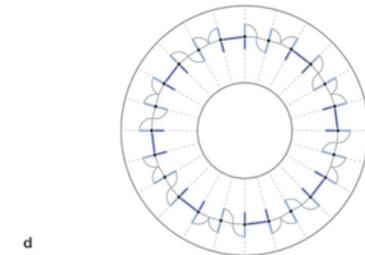
Der Eingangspavillon für ein darunterliegendes Geschäft in einer ostasiatischen Großstadt besteht aus einem diskusförmigen Dach aus carbonfaserverstärktem Kunststoff (Durchmesser 20,9 m) mit einem mittigen Acrylglas-Oberlicht ($d = 8$ m), welches von acht U-förmigen tragenden Glasstützen von 5,4 m Höhe getragen wird (Bild 2). Jede dieser Stützen setzt sich aus zwei radial angeordneten Glasschwertern (6×12 mm ESG mit SGP) und einer Tangentialscheibe (5×12 mm ESG mit SGP) zusammen. Radialschwerter und Tangentialscheiben sind an den Kanten nicht miteinander verbunden. Der Abtrag vertikaler Lasten erfolgt nur durch die radialen Glasschwerter. Die horizontalen Lasten werden sowohl durch die Glasschwerter als auch die Tangentialscheiben aufgenommen. Zwischen den U-Stützen befinden sich insgesamt acht Dreh- sowie 16 Schwingtüren mit einer maximalen Größe von $2 \times 5,4$ m (Bild 2). Um eine maximale Transparenz zu erreichen, sind die Anschlüsse der Glastüren mit in gestuften, taschenartigen Glasaussparungen einlamierten Fittings ausgeführt worden, siehe Abschnitt 2.1.



Bild 2 Flagshipstore, Gesamtansicht mit offenen Türen (© Fassadenbauer)



c



d

Bild 3 Flagshipstore mit geschlossenen (a und c) sowie geöffneten Türen (b und d)
(© Fassadenbauer)

1.2.2 Modulare Glasschale

Die aus 38 einzelnen, bis zu 0,9 x 0,9 m großen Elementen aus Verbundsicherheitsglas (2 x 8 mm TVG mit strukturellem PVB) zusammengesetzte, doppelt gekrümmte Schale ist als Demonstrator für Innenraumanwendungen wie Messeauftritte entwickelt worden (Bild 4), siehe auch [31, 32]. Geometrisch handelt es sich um eine Streck-Trans-Fläche (gestreckte Translationsfläche), so dass die Gauss-negative Fläche aus planen Modulen zusammengesetzt werden kann. Ziel der Konstruktion war die Entwicklung eines in die Zwischenschicht einlaminieren, strukturellen Verbindungselementes, welches zur Erfüllung der statischen und geometrischen Anforderungen geeignet ist und die Leistungsfähigkeit strukturellen PVBs als Alternative zu Ionomer-Interlayern hervorhebt. Darüber hinaus wurde der Interlayer aus architektonischen Gründen gemischt aus Standard-PVB und strukturellem PVB geschichtet, um zu zeigen, dass auch Farbgebung und/oder Transluzenz erreichbar sind. An jeder Fügekante werden zwei einlaminierete Fittingpaare zur lastabtragenden Verbindung benutzt. Neben drei Translationskräften kann auch eine gewisse Biegung um die Kante des Glases aufgenommen werden. Im globalen FE-Modell der modularen Schale wurden die Fittings vereinfachend durch jeweils vier Federn (Bild 5) simuliert. So konnten die auf die Fittings wirkenden Kräfte und Momente ermittelt und für die Bemessung herangezogen werden. Für den dünnen, einlaminieren Teil des Fittings wird ein schwalbenschwanzförmiges Blech aus nichtrostendem Stahl verwendet, siehe Abschnitt 2.2.



Bild 4 Detailausschnitt und Gesamtansicht der Glasschale (© knippershelbig GmbH)

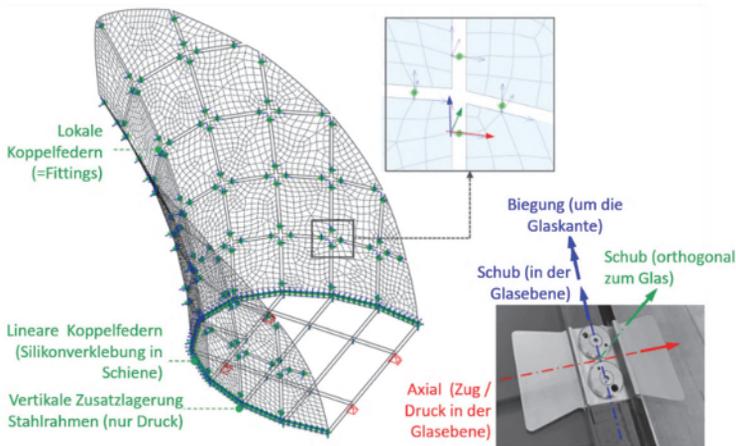


Bild 5 FE-Modell mit Koppelfedern als Verbindungen (© knippershelbig GmbH)

2 Entwicklung und Nachweis der laminierten Verbindungen

2.1 Türverbinder beim Flagshipstore

2.1.1 Konzept und Konstruktion

Während die tragenden Glasbauteile der U-förmigen Glasstützen über Scher-Lochleibungsverbindungen strukturell mit Dach und Boden verbunden sind, besitzen die Ganzglastüren jeweils zwei einlamierte, gestufte Titanfittings, einen kleineren zur Aufnahme horizontaler Lasten oben sowie einen größeren unten, der sowohl Horizontal- als auch Vertikallasten aufnimmt und unter dem Boden mit dem motorisierten Antrieb der Tür verbunden ist. Der Fitting für Schwingtüren ist seitlich-exzentrisch, jener für Drehtüren mittig angeordnet (Bild 6). Maßgeblich für die Bemessung ist der seitliche Schwingtürfitting (Bild 6a und Bild 6b). Der Kraftübertrag zwischen Motor und Tür erfolgt nur über einen Zapfen je Tür, welcher mit dem einlamierten Teil des Fittings verbunden ist. Alle auf die Tür wirkenden Kräfte im rotierenden oder festgestellten Zustand müssen von der Fittingverbindung und dem Motor aufgenommen werden können. Der Fitting wird in eine taschenartige Aussparung der beiden inneren Gläser mit 1,52 mm SentryGlas® (SGP) einlamiert und überträgt Kräfte über den Schubverbund mit den äußeren TVG-Scheiben (Bild 7). Da der Zapfendurchmesser der Türblattdicke entspricht, wurde der Fitting gestuft ausgeführt, wodurch ein Teil des Titans direkt außen liegt. Da im Falle maximaler Erdbebenlasten Glas und SGP am Fitting überbeansprucht würden, wurde der Titanzapfen so dimensioniert, dass er für solche seltenen Beanspruchungen ein plastisches Rotationsgelenk ausbildet und so Glasversagen verhindert. Um in einem solchen Fall den Zapfen austauschen zu können, wird der Zapfen über eine Einschraubplatte mit Senkkopfschrauben in den Fitting eingeschraubt (Bild 7a und Bild 7b).

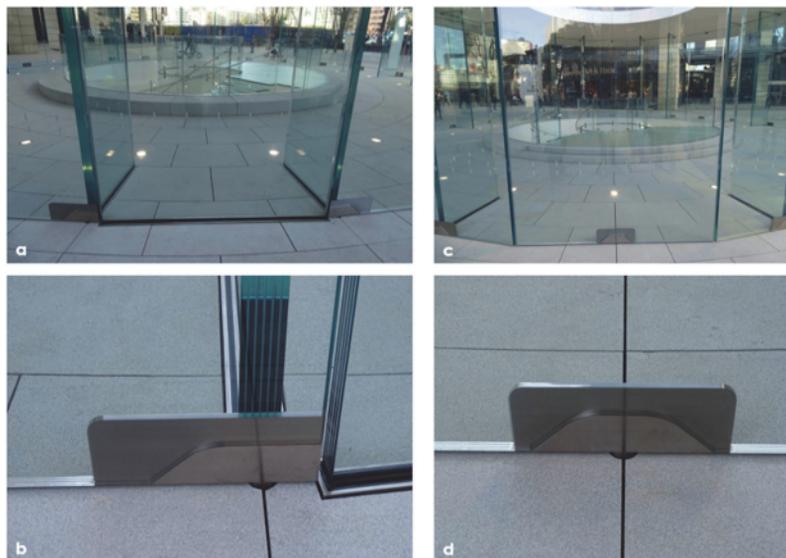


Bild 6 Schwingtüren a) und Drehtüren c) aus Glas mit zugehörigen einlaminierten Fittings b) und d) (© Fassadenbauer)

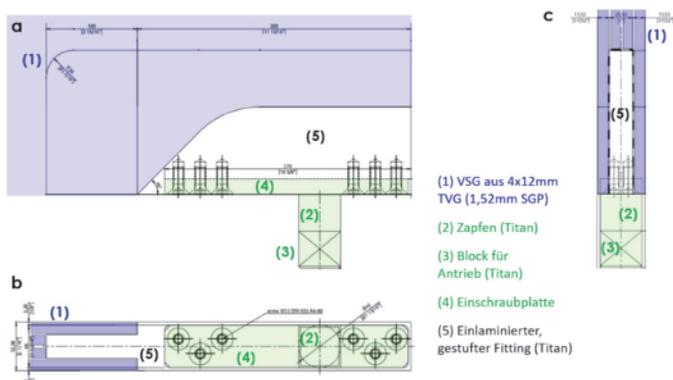


Bild 7 Aufbau eines laminierten Schwingtür-Titanfittings: a) Ansicht; b) und c) Schnitte (© knippershelbig GmbH)

2.1.2 Numerische Analyse der Verbindungen

Jede Tür wurde zunächst als Gesamt-FE-Modell in der Software ANSYS Mechanical APDL simuliert; die Analyse der Fittingzone erforderte zudem über ein detailliertes Submodell. Die Analysen erfolgten geometrisch nichtlinear. Alle Teile der Türen und Fittings wurden mit Volumenelementen vernetzt. Für SGP und Titan wurden nichtlineare Materialgesetze angewendet, wobei für das SGP zwei Temperaturszenarien (10 °C und 30 °C)

untersucht wurden. Neben dem intakten Zustand (Bild 8a) wurden der Ausfall einer Außenscheibe (Bild 8b) und Delamination bis 15 mm tief vom Rand aus simuliert. Die maximalen Spannungen im Glas und im SGP herrschten im Bereich der Überlappung der beiden Außenscheiben mit einlaminierter Fitting und an den Übergängen zum vollen Vierfach-Glaslaminat (Bild 8).

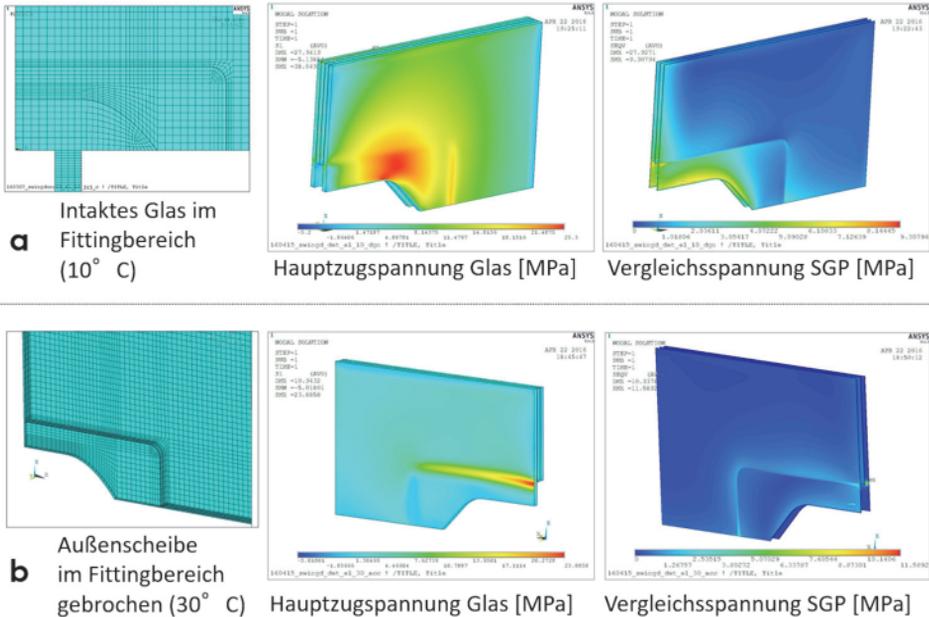


Bild 8 FE-Analysen eines Schwingtür-Fittings mit Vernetzung und Plot der Hauptzugspannung der Glasschichten sowie der Interlayer-Vergleichsspannungen; a) Intaktes Glas bei 10 °C; b) Ausfall einer Außenglasschicht bei 30 °C (© knippershelbig GmbH)

2.1.3 Versuche

Zusätzlich zur FE-Analyse wurden sechs Bauteilversuche an einem Türausschnitt mit Fitting in Originalgröße vorgenommen. Die Prüfkörper wurden mit jeweils zehn aufgeklebten Dehnmessstreifen (DMS) und sechs Verformungs-Wegaufnehmern ausgestattet. Die Kräfte wurden über einen 500 mm langen Hebelarm auf die horizontal liegende, statisch bestimmt gelagerte Tür (Bild 9b) als Drehmoment (Torque) über den Fittingzapfen (Bild 7) eingetragen und die Tür wurde damit wie durch eine Wind- oder Erdbeweinwirkung beansprucht. Als maximaler Torque aus den GZT-Kombinationen wurden 5,7 kNm rechnerisch ermittelt. Bei den drei Prüfkörpern begann die plastische Verformung der Zapfen bei intaktem Glas zwischen 9,5 kNm und 11,5 kNm (Bild 10), so dass vereinfachend eine Sicherheit von 1,7 bis 2,0 gegenüber der GZT-Maximalbeanspruchung gegeben ist (ohne Statistik). Weder Glas noch SGP versagten bei einem Lastniveau

bis weit über 15 kNm, da zuvor plangemäß der Zapfen ins Fließen kam. Dies kann somit als Bestätigung des duktilen Sicherheitskonzeptes gewertet werden.

Insgesamt zeigte sich eine gute Übereinstimmung zwischen den Messergebnissen der Dehnmessstreifen (DMS) an der Glas- und Titanoberfläche aus den Versuchen und den FE-Analysen, siehe Bild 11. Im Bereich der Hebelarmkraft bis 20 kN (10 kNm Torque) zeigt sich im Versuch ein linear-elastisches Spannungs-Dehnungsverhalten an der Glasoberfläche (Bild 11).

Neben den Versuchen an intakten Prüfkörpern bei 10 °C wurden drei Prüfkörper mit angeschlagener Außenscheibe (Bild 12 und Bild 13) als außergewöhnliche Beanspruchung getestet. Alle drei angeschlagenen Außengläser zeigen voneinander abweichende initiale Rissbilder (Bild 13a bis Bild 13c). Die Last wurde so lange erhöht, bis alle Gläser gebrochen waren (Bild 12). Selbst in diesem Fall lösen sich die Fittings und Glas nicht voneinander und zeigen durchgängig eine Resttragfähigkeit. Es zeigt sich aber auch eine starke Abhängigkeit der Beanspruchbarkeit der beschädigten Prüfkörper vom initialen Rissbild: Der maximale Torque lag rissbildabhängig zwischen 5,7 und 9,5 kNm. In allen drei Prüfungen ergab sich damit eine hohe Sicherheit gegenüber dem maximalen Torque aus der Berechnung von 1,6 kNm.

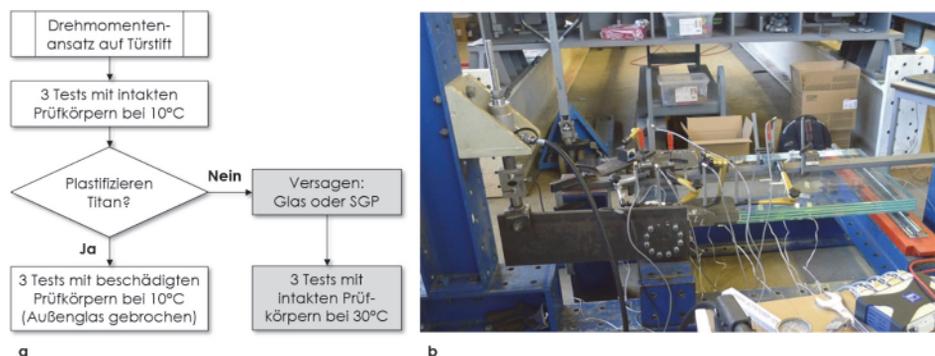


Bild 9 a) Testablauf, b) Testaufbau mit dem Hebelarm zur Aufbringung des Drehmoments auf die kreisförmige Antriebsscheibe am Fittingzapfen (© knippershelbig GmbH)

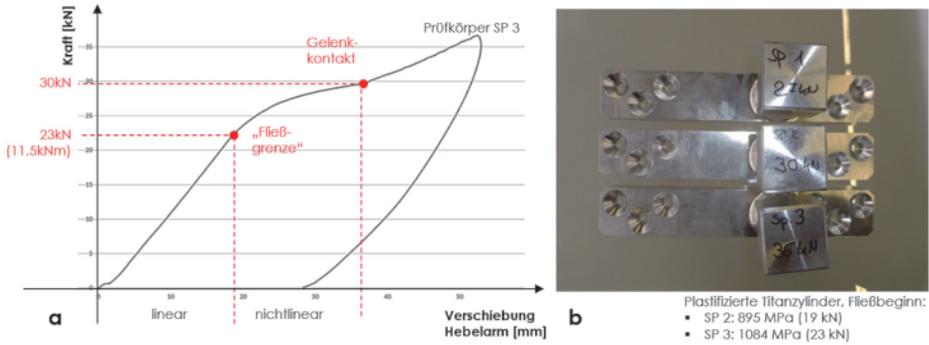


Bild 10 a) Verschiebungs-Kraftdiagramm des Prüfkörpers SP3 mit ausgeprägtem nichtlinearem Bereich aufgrund Fließen-Plastifizieren; b) Plastifizierte Zapfen der Fittings (© knippershelbig GmbH und Hochschule München)

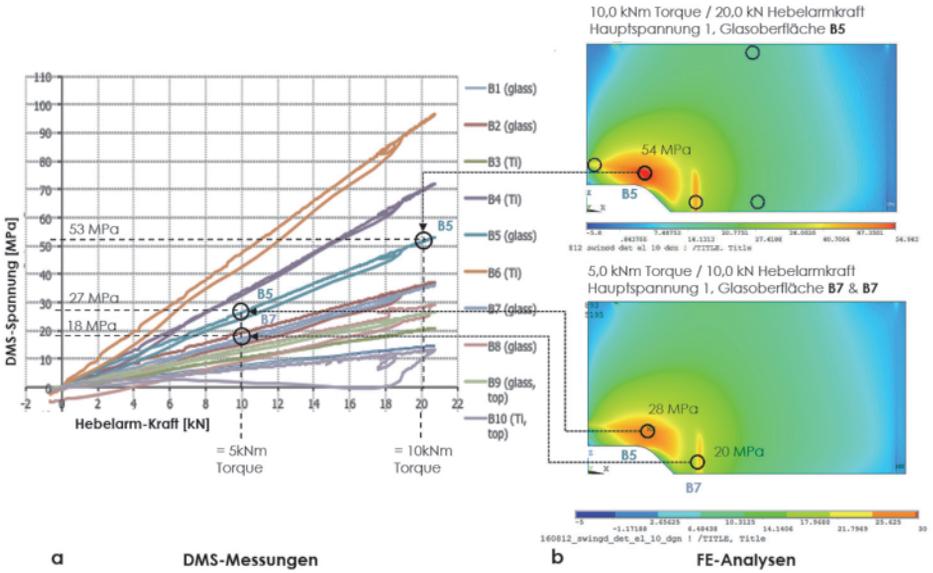


Bild 11 a) Hebelarmkraft-Spannungsdiagramm der DMS-Messpunkte im Vergleich zu b) den korrespondierenden FE-Analysen am Fitting (© knippershelbig GmbH und Hochschule München)

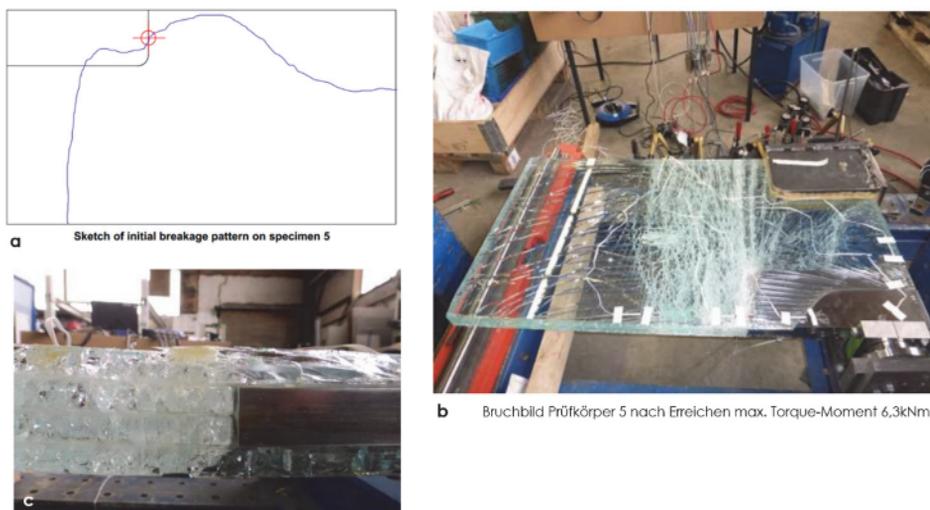


Bild 12 a) Schema des initialen Bruchbildes Prüfkörper 5 nach Anschlägen (roter Punkt); b) und c) Bruchbild der Tür nach vollständigem Brechen aller Glasschichten (© Hochschule München)

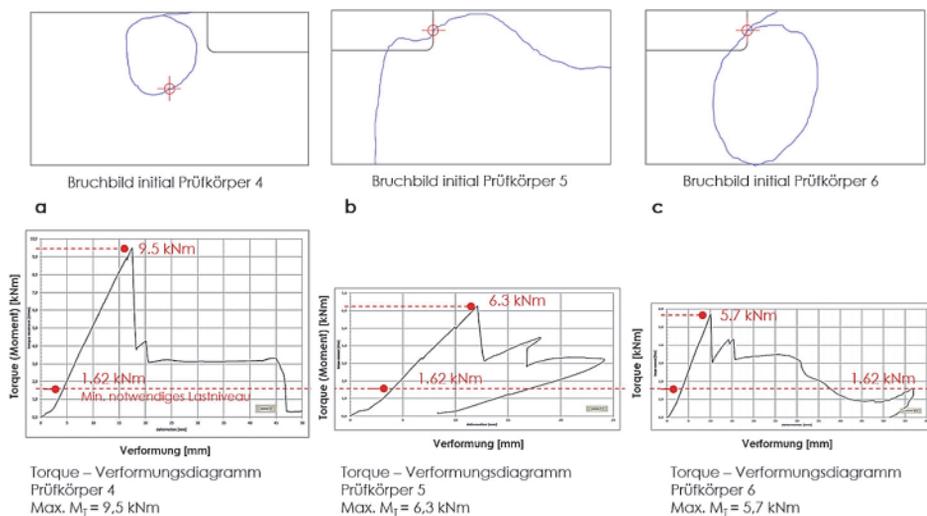


Bild 13 a) bis c) Initiale Bruchbilder der drei Prüfkörper nach dem Anschlägen und zugehörige Torque-Verformungsdiagramme (Verformungsmessung am Hebelarm) (© Hochschule München & knippershelbig GmbH)

2.2 Modulverbindungen bei der Glasschale

2.2.1 Konzept und Konstruktion

Die hier verwendeten Fittings aus Chrom-Nickel-Stahl 1.4301 erfordern keine Aussparungen im Glas, da sie über ein 1,5 mm dickes Blech in die Zwischenschicht einlaminiert sind. Der 3 mm dicke Interlayer wird dazu aus vier Schichten zu 0,76 mm zusammengesetzt. Die äußeren beiden, glasseitigen Schichten (Pos. #02 und #03) bestehen aus transparentem, strukturellem PVB (Saflex® Structural, DG41), da sie für den lastabtragenden Schubverbund zwischen Glas und Fittingblech nötig sind. Die beiden inneren Schichten können aus strukturellem oder kompatibelem Standard-PVB (im Projekt transluzentes Vanceva® Arctic Snow, RB41) bestehen, was gestalterische Freiheiten ermöglicht. Die Positionierung der Fittings erfolgt über passende Aussparungen in den inneren PVB-Schichten. Das einlamierte Blech (Bild 14) überträgt die drei Translationskomponenten angreifender Kräfte. Die nötige Biegesteifigkeit um die Glaskante wird mittels des T-förmigen äußeren Teils des Fittings erreicht. Der Flansch des „T“ stützt sich dabei gegen die Glaskante ab und ist mittels 1,52 mm strukturellem PVB DG41 an diese geklebt. Alternativ wäre auch eine Mörtel- oder Kunststofffüllung, die nur Druck überträgt, möglich. In diesem Fall würde Biegung über ein Kräftepaar aus Druck zwischen einer Flanschseite und Glaskante sowie Zug im Fittingblech übertragen. Der Winkel zweier verbundener Gläser wird über den fixen Winkel des Stegs des „T“ zum Glas eingestellt (Bild 14c). Die Kraftübertragung zwischen zwei überlappenden Stegen erfolgt über ein Schraubenpaar (Bild 14a). Zur Toleranzaufnahme wird ein Fitting mit übergroßen Löchern ausgestattet (Bild 14d). Das Sicherheitskonzept sieht ein duktilen Verhalten a) durch Plastifizieren des Fittings unter Biegung am T-Stück sowie erhöhte Verformungen in der Folie zwischen Blech und Glas beim Beginn der Delamination vor, wodurch auch eine Lastumlagerung auf andere Lastpfade in der Schale erzielt wird.

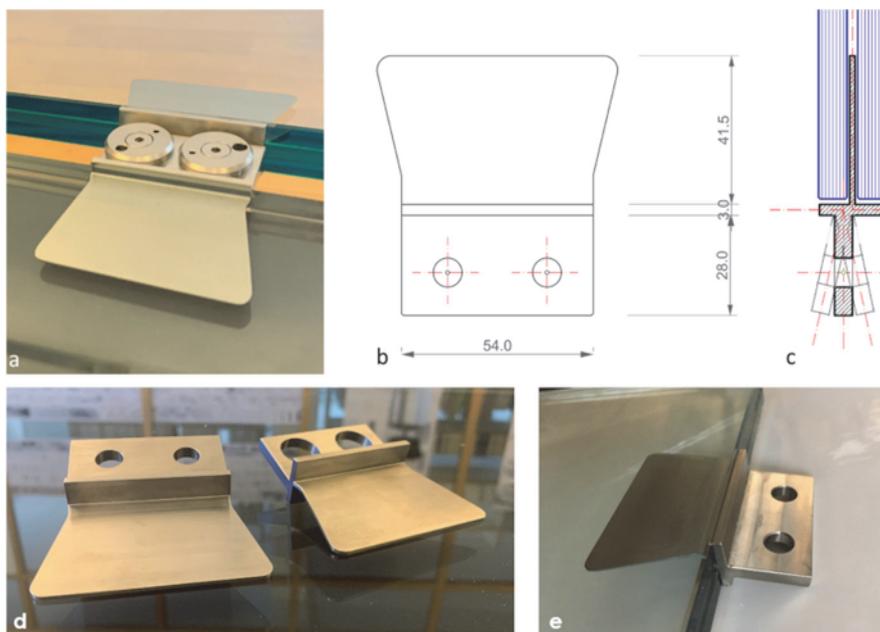


Bild 14 Aufbau und Einsatz des Schwalbenschwanzfittings (© knippershelbig GmbH)

2.2.2 Numerische Analyse der Verbindungen

Numerische Analysen der Fittings und Parameter-Einflusstudien wurden unter anderem im Rahmen von Studienarbeiten an der Hochschule Luzern [29, 30] durchgeführt. Dabei wurde der ausgeführte Fitting verschiedenen Zwangsverschiebungen (1 mm) in der Ebene (Schub parallel zur Glaskante, Zug orthogonal zu Glaskante, siehe Bild 15) beziehungsweise erzwungener Biegung um die Glaskante ausgesetzt. Das nichtlineare, hyperelastische Materialmodell des Interlayers wurde zuvor über einen Curve Fit basierend auf Herstellerdaten [33, 34] und veröffentlichten Angaben zu einem einlaminieren Blechstreifen aus [26] implementiert [30]. Es zeigt sich, dass mit zunehmender Lasteinwirkungsdauer aus axialem Zug ein steigender Lastanteil (>70 %) über das einlaminieren Blech übertragen wird (Bild 15), während der Anteil der Kraft im Kantenlaminat sinkt. Die ausmittige Position des T-Stegs führt dabei stets zu einem geringen Biegeanteil im Fitting und leichten Kraftunterschieden in den beiden Kantenverklebungen.

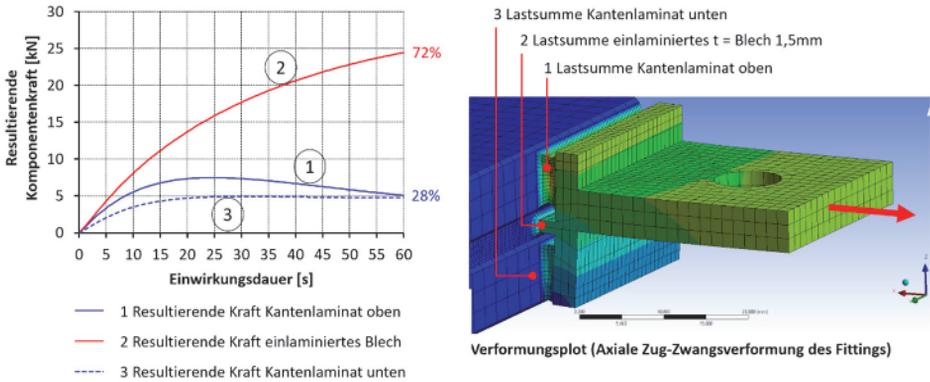


Bild 15 Verteilung der Zuglasten auf das einlamierte Blech und die Kantenlaminat (© P. Joos)

An der Eintrittsstelle des Fittings in das VSG treten beim Lastfall **axialen Zuges** erhöhte Spannungen im Glas auf; maximale Hauptzugspannungen im Glas werden im Diskontinuitätsbereich am Fittingende 40 mm tief im Laminat erreicht (Bild 16, Stelle 1). Die Schubspannungen im PVB sind am Fittinganfang und -ende (0 mm und 40 mm Pfadposition) leicht erhöht, bleiben aber ansonsten erwartungsgemäß konstant über die Fittinglänge. Die erste Hauptspannung im PVB hingegen entwickelt sich linear über die Fittinglänge und zeigt deutliche Maxima an der Eintrittsstelle des Fittings in das VSG (0 mm) und direkt an dessen Ende (40 mm) (Bild 16). **Biegung** des Fittings um die Glaskante erzeugt Spannungsmaxima im PVB und im Glas in Nähe der Glaskante (Bild 17, Diagramm 1 und Diagramm 2). Das einlamierte Blech (Bild 17, Diagramm 3) erfährt sehr hohe Vergleichsspannungen an der Eintrittsstelle in das VSG, die auf den ersten 15 mm rasch abklingen. Dies ist ein Hinweis auf das gewünschte Fließ- beziehungsweise Plastifizierungsvermögen des Metallfittings, vergleiche Abschnitt 2.2.3.

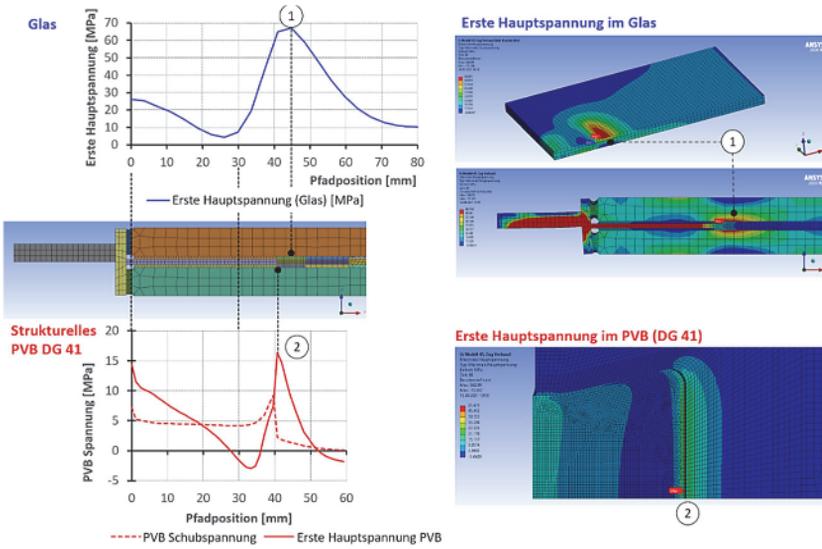


Bild 16 Spannungsverteilung (axialer Zug) in Glas und PVB über die Fittinglänge (© P. Joos)

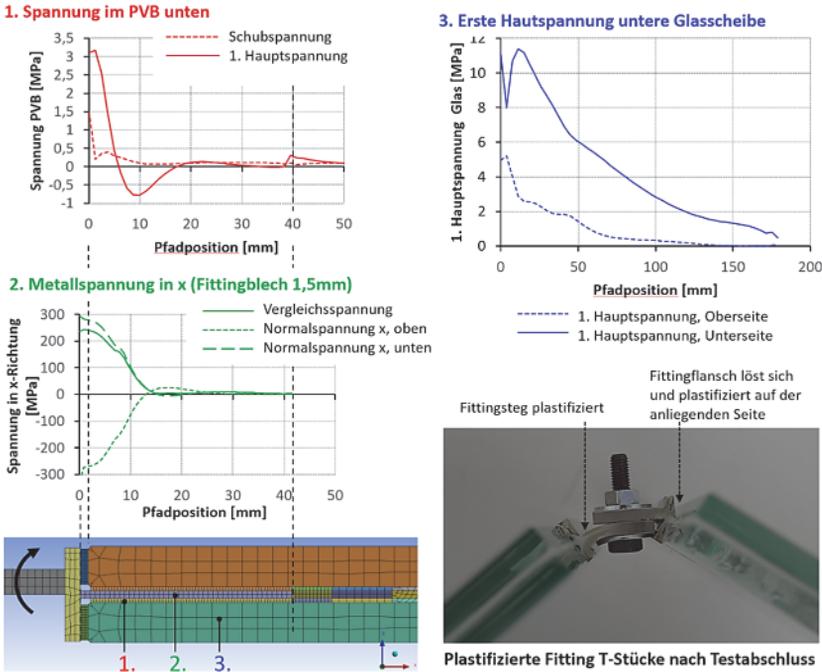


Bild 17 Verteilung der Spannungen aus Biegung über die Länge des Fittingblechs (© P. Joos)

2.2.3 Versuche

An Prüfkörpern verschiedenen Aufbaus der Interlayerschichtung wurden Kurzzeit- und Langzeitversuche zur Charakterisierung des Lastabtragsverhaltens der Fittingverbindung vorgenommen (Tabelle 1). Für den axialen Zugversuch wurde ein Fitting weggesteuert quer zur Kante gezogen (Bild 18a); der Biegeversuch erfolgte über einen modifizierten Vierpunktbiegeaufbau analog zur EN 1288-3 (Bild 18b).

Tabelle 1 Versuchsübersicht

Versuchstyp	Aufbau Interlayer		
	Typ „1“ DG41 und RB41 geschichtet	Typ „2“ Nur strukturelles PVB DG41	Typ „3“ Nur Standard - PVB RB41
Zug axial „Z“ (in der Ebene)	6 Prüfkörper	3 Prüfkörper	3 Prüfkörper
	1 x Resttragfähigkeit	1 x Resttragfähigkeit	1 x Resttragfähigkeit
Biegung „B“	4 Prüfkörper	1 Prüfkörper	1 Prüfkörper
Schub „S“ (kantenparallel)	-	-	-
Kriechen, axialer Zug „ZK“	5 Prüfkörper	-	-
Kriechen, Biegung „BK“	3 Prüfkörper	-	-

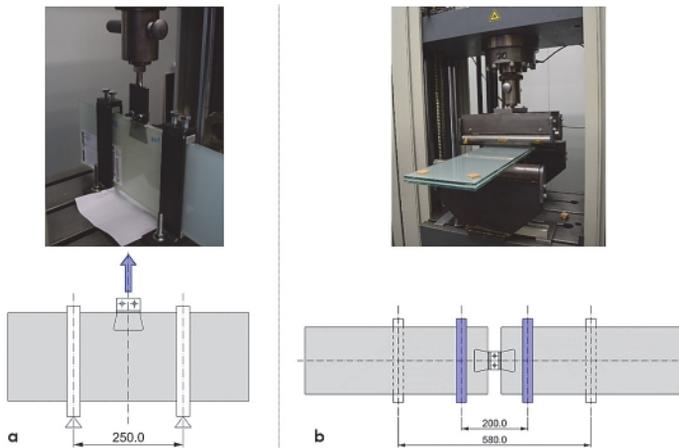


Bild 18 Versuchsaufbauten: a) Zwangsverschiebung axialer Zug; b) Vierpunktbiegung (© T. Wüest, Hochschule Luzern HSLU)

Aus technischen und zeitlichen Gründen mussten die Prüfkörper aus Floatglas hergestellt werden, während bei der Glasschale TVG verwendet wird. Im axialen Zugversuch versagten überraschend nahezu alle Prüfkörper des Typs 1 mit geschichtetem Interlayer aus DG41 und RB41 durch Glasbruch bei Kräften von ca. 32–40 kN (Bild 19, blaue Kurven), wobei der Prüfkörper nicht auseinanderfiel. Es ist anzunehmen, dass dies aufgrund von Spannungsspitzen am Ende des Fittings im Glas, verursacht durch den Steifigkeitssprung in den unterschiedlichen geschichteten Interlayertypen, ausgelöst wurde. Dies bedarf noch näherer Untersuchung. Bei Verwendung von TVG oder ESG wäre kein Glasbruch aufgetreten. Prüfkörper des Typs 2 mit rein strukturellem PVB DG41 hingegen versagten auf Delamination (Bild 19, rote Kurven und Bild 22b) bei Zugkräften von bis zu 41 kN. Alle Prüfkörper zeigten ein gutes Resttragfähigkeitsverhalten bei Wiederbelastung nach dem ersten Bruch (Bild 20) und konnten im Fall von Typ 2 Kräfte bis 5,3 kN aufnehmen, ehe der Fitting vollends delaminierte und sich stark verschob (Bild 22c). Auch in den Biegeversuchen zeigte sich eine hohe Duktilität der Prüfkörper, die typenunabhängig ein ähnliches Last-Verformungsverhalten aufwiesen (Bild 21). Nach einem elastischen Anfangsverhalten zeigt sich ein nichtlinearer Bereich, in welchem sich sowohl ein Teil des Flansches des Fittings von der Glaskante löst als auch das T-Stück eine plastisches Rotationsgelenk ausbildet. Bei einer Vertikalverformung von ca. 60 mm stößt dann ein Fittingteil an die Schraubenköpfe und es bildet sich ein erneuter Anstieg der Kurve mit weiterem Plastifizieren des T-Stücks der Fittings aus (Bild 21, Pfeil), bis das Glas bei 100 mm bis 140 mm Verformung lokal bricht. Auch hier bleibt die Verbindung trotz Glasbruch bestehen (Bild 22e und Bild 22f).

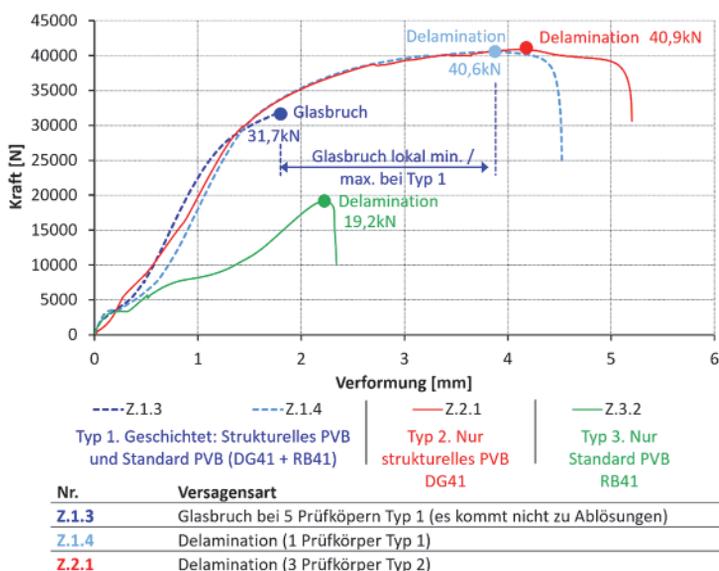


Bild 19 Auszugsweise, typische Ergebnisse aus axialen Zugversuchen (© T. Fildhuth und T. Wüest, Hochschule Luzern HSLU)

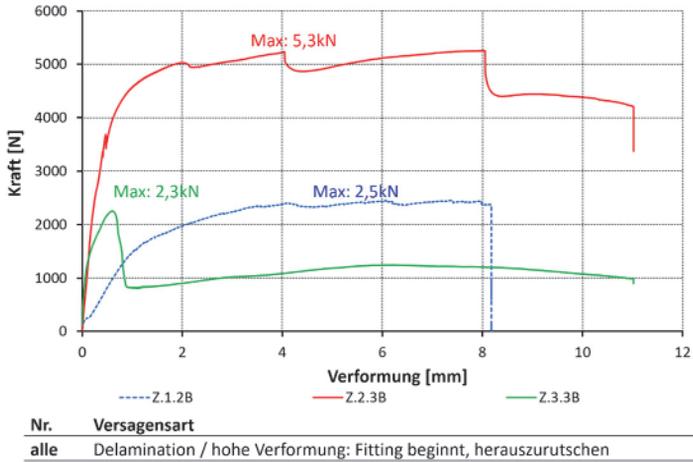


Bild 20 Ergebnisse Resttragfähigkeitsversuche (axialer Zug) (© T. Fildhuth und T. Wüest, Hochschule Luzern HSLU)

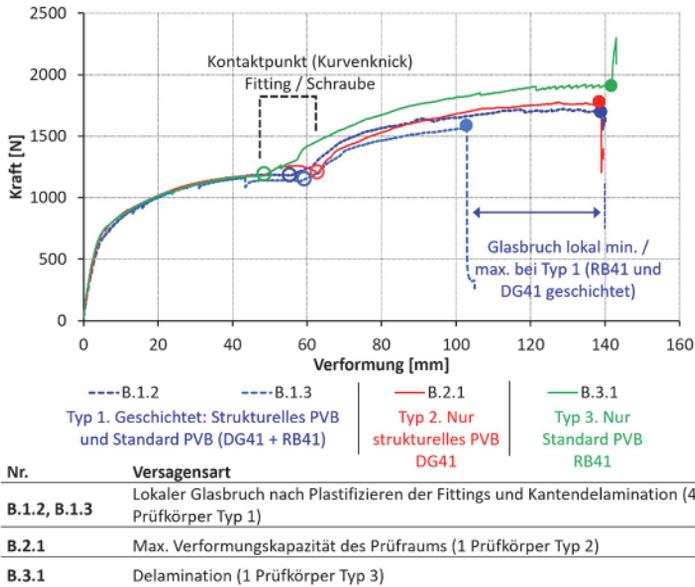


Bild 21 Auszugsweise, typische Ergebnisse aus Vierpunktbiegeversuchen (© T. Fildhuth und T. Wüest, Hochschule Luzern HSLU)

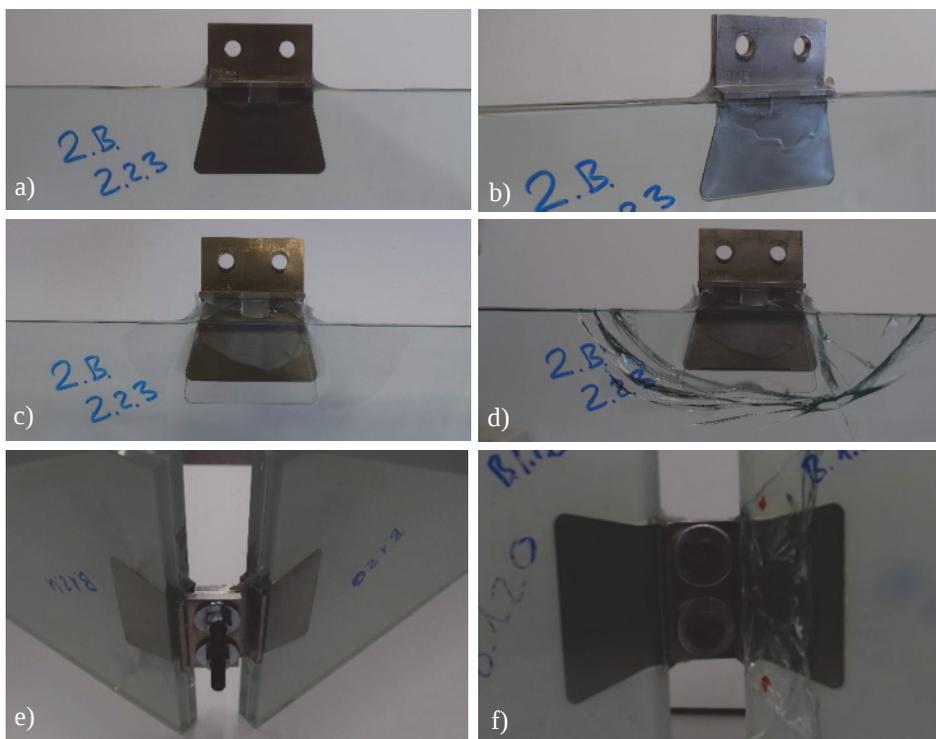


Bild 22 Prüfkörper Typ 2 (nur strukturelles PVB) nach Versuchen; a) Prüfkörper vor Zugversuch; b) Teildelamination nach Zugversuch; c) Delamination und Auszug im Resttragfähigkeitsversuch; d) Glasbruch 1,5 Stunden nach Entlastung; e) Plastische Maximalverformung nach Biegeversuch; f) Glasbruch bei extremer Verformung nach Biegeversuch (© T. Wüest, Hochschule Luzern HSLU)

3 Zusammenfassung und Ausblick

3.1 Zusammenfassung

Im Rahmen zweier unterschiedlicher Projekte, einer modularen Glasschale und eines gläsernen Flagshipstore mit Ganzglastüren, sind einlamierte metallische Fittings zum Einsatz gekommen.

Im Fall der Glastüren handelt es sich um gefräste, zweiteilige gestufte Titanfittings, die mittels Ionomer-Interlayer in eine 25 mm breite taschenartige Aussparung im 4-fach VSG der drehbaren Glastür einlamiert sind. Die Schubverbundfläche beträgt etwa 600 cm² und ermöglichte in Tests und FE-Analysen den Ansatz eines Drehmomentes von 11,5 kNm (elastisch), was einer resultierenden Kraft von ca. 14,4 kN auf die Mitte der Drehtür entspricht. Das maximale auftretende Moment im GZT ist 5,7 kNm, so dass eine hohe Sicherheit gegeben ist. Momente aus dem maßgeblichen Erdbebenfall überschreiten

unter Umständen die zulässigen Spannungen des TVG und des Interlayers, was durch duktilen Verhalten in Form einer plastischen Rotation des auswechselbaren Fittinganschlusses erreicht wird. Auch nach einem ungünstigen Bruch einer äußeren Glasscheibe können noch Momente über 5 kNm aufgenommen werden und selbst bei vollständig gebrochenem VSG durch alle Schichten besteht eine Resttragfähigkeit der Tür mit den Fittings. Die Verwendung eines dicken, taschenartigen Fittings war bei diesen Glastüren durch die Drehmomentenbelastung um die Fittingachse und den nötigen Durchmesser des Türzapfens am Fitting zwingend.

Im Falle der modularen Glasschale steht die Aufnahme von Membrankräften (Druck, Zug, Schub in der Schalenfläche) im Vordergrund. Eine gewisse Biegesteifigkeit ist dennoch zur Aufnahme von Momenten aus der Diskontinuität (Steifigkeitssprung) an der Fuge, aus asymmetrischen Einwirkungen und zur Erzielung der korrekten Geometrie bei der Montage der Glasmodule erforderlich. Als Lösung bietet sich hier die Verwendung von Fittings aus Chrom-Nickel-Stahl (oder Titan) mit schwalbenschwanzförmigen, dünnen in die Zwischenschicht einlaminieren Blechen zum Membrankrafteintrag über Schubverbund an. Als Interlayer ist im Projekt das strukturelle PVB Saflex® Structural (DG41) verwendet worden. Die laminierte Verbundfläche beträgt nur 48 cm² je Fitting. Zusätzlich wird der Fitting zur Erreichung der Biegesteifigkeit um die Glaskante an die beiden Glasstirnseiten mittels DG41 angeklebt (ca. 8,6 cm² Zusatzklebefläche an der Kante). Axiale Zugkräfte im Fitting können elastisch bis 20 kN aufgenommen werden, bei 40 kN Kurzzeitlast wird Delamination beobachtet. Vorsicht ist bei der Verwendung unterschiedlicher, schichtweiser Interlayer geboten, um Steifigkeitssprünge und Glasbruch zu vermeiden. Auch Biegemomente sind gut aufnehmbar (elastischer Bereich bis ca. 600 N im Vierpunkt-Biegeversuch, d. h. 0,08 kNm). Ein duktilen Verhalten der Verbindung für Biegung und Zug lässt sich durch die Auslegung des Fittings und durch das Delaminationsverhalten passend einstellen. Nach Glasbruch oder partieller Delamination des Fittings bleibt eine Resttragfähigkeit von bis zu 5 kN (Zug) bestehen.

Beide Lösungen sind somit an die individuellen Beanspruchungen und Funktionen angepasst und zeigen die Möglichkeit der Ausbildung hochbelasteter struktureller Glasanschlüsse mit duktilen Verhalten und hoher Resttragfähigkeit nach Glasbruch. In beiden Fällen kann die durchgängige Optik der homogenen Glasoberfläche beibehalten werden, da die Fittings in das Glas einlaminieren sind. Ein Vorteil des in die Zwischenschicht einlaminieren Fittingtyps ist die Möglichkeit, nur 2-fach VSG verwenden zu können, sofern das verformungsbedingt möglich ist. Der Vergleich beider Lösungen unterstreicht die Tatsache, dass strukturelle Glasverbindungen fast immer eine fallabhängige, individuelle Lösung darstellen und sorgfältig unter Berücksichtigung aller nichtlinearen Materialeigenschaften zu entwickeln sind.

3.2 Ausblick

In der Zwischenschicht einlamierte Verbindungen sind attraktive Lösungen für strukturelle Glasverbindungen, da sie hohe Festigkeiten, Duktilität im Rahmen des Sicherheitskonzeptes und ein zurückhaltendes, ästhetisch ansprechende Erscheinungsbild ermöglichen. Die Duktilität wird durch die Materialkombination aus Lamination (Kleben) und Metallbauteil mit den Mitteln plastischer Reserven, Lastumlagerung/alternative Lastpfade, Amortisierung durch Fließen und Plastifizieren erreicht und kann meist zielgerichtet eingestellt werden. In die Zwischenschicht einlamierte Fittings sind aufgrund hoher aufnehmbarer Kräfte bei geringem Materialeinsatz interessant; vor allem ermöglichen sie die Verwendung von verhältnismäßig dünnem Verbund sicherheitsglas mit nur zwei Glasschichten. Eine Herausforderung stellt der homogene Übergang des dünnen Bleches für die Lamination in den deutlich dickeren Außenteil des Fittingelements dar, der besonders empfindlich ist und alle Kräfte übertragen muss, die auftreten. Bei der Glasschale ist daher der Fitting aus einem Stück gefräst worden. Eine wirtschaftlichere Variante sollte eher aus zwei Teilen zusammengesetzt werden – dem dünnen Fittingblech zur Lamination und dem dickeren Verbinderteil. Weiterer Entwicklungsbedarf besteht bei der Einstellbarkeit des Winkels des Fittings, um unterschiedliche Winkel der Gläser zueinander mit geringem Aufwand zu ermöglichen. Außenanwendungen/Einwirkung von Umwelteinflüssen, Dauerhaftigkeit und Risiken aus Delamination erfordern noch weitere Studien. Lineare Metallfittings an Kanten mit geringer Laminationstiefe sind ein interessantes Feld für weitere Entwicklungen und Analysen. Im aktuellen Glasbau stehen die steifen, lokalen Fittingverbindungen in Konkurrenz zu reinen strukturellen Silikonverklebungen entlang durchgängiger Kanten.

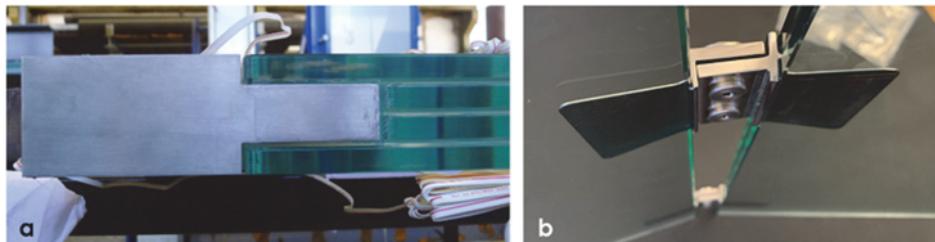


Bild 23 Vergleichsansicht der beiden Fittingtypen; a) stufenförmig einlamiertes Fitting in vierfach-VSG; b) Fitting mit Lamination der Zwischenschicht, zweifach-VSG (© knippershelbig GmbH)

4 Projektbeteiligte

Am Projekt waren folgende Unternehmen und Büros beteiligt:

Tabelle 2 Projektbeteiligte Glasschale

Funktion	Unternehmen
Bauherr / Auftraggeber	Eastman Chemical BV
Konzeption, Entwurf	knippershelbig GmbH Stuttgart KHIC / imagine computation GmbH Frankfurt a. M.
Interlayermaterial	Eastman Chemical BV Solutia Deutschland GmbH
Tragwerksplanung Ausführung fassadenbauseitig und Versuchsplanung	knippershelbig GmbH Stuttgart
Glaselemente, Lamination	Thiele Glas GmbH
Herstellung Prüfkörper	Yachtglass GmbH & Co. KG
Metallbau, Fittings, Installation	Kurt Hüttinger GmbH & Co. KG
Versuchskonzept, -durchführung und Auswertung	HSLU Hochschule Luzern, Technik & Architektur, CC Gebäudehülle
Studienarbeiten	Pascal Joos & Antoine Yersin, Hochschule Luzern, CC Gebäudehülle

5 Literatur

- [1] Bagger, A. (2010) *Plate Shell Structures of Glass – Studies leading to guidelines for structural design* [Dissertation]. DTU Civ. Eng., Lyngby / Danmark.
- [2] Fildhuth, T.; Lippert, S. et al. (2012) *Design and Joint Pattern Optimisation of Glass Shells* in: Conference proceedings IASS 2012, Seoul.
- [3] Fildhuth, T.; Knippers, J. (2012) *Layout Strategies and Optimisation of Joint Patterns in Full Glass Shells* in: Bos, Louer, Nijssse, Veer [Eds.] *Challenging Glass 3 – Conference on Architectural and Structural Applications of Glass*, TU Delft.
- [4] Baitinger, M. (2009) *Zur Bemessung von SL-belasteten Anschlüssen im konstruktiven Glasbau* [Dissertation]. Technische Hochschule Aachen (now RWTH Aachen) Aachen

- [5] Bedon, C.; Santarsiero, M. (2018) *Laminated glass beams with thick embedded connections – Numerical analysis of full-scale specimens during cracking regime*. *Composite Structures* 195, S. 208–324. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.04.083>
- [6] O’Callaghan, J.; Bostick, C. (2012) *The Apple glass cube: version 2.0* in: *Challenging glass 3*. Pp. 57–67. IOS Press, Delft.
- [7] Torres, J.; Guitart, N.; Teixidor, C. (2017) *Glass fins with embedded titanium inserts for the facades of the new medical School of Montpellier* in: *Glass Structures and Engineering*.
- [8] Santarsiero, M.; Moupagitsoglou, K. (2018) *Energy-based Approach for Dissipative Structural Glass System in Seismic Regions* in: Louter, Bos, Belis, Veer, Nijssse [Eds.] *Challenging Glass 6 – Conference*. Delft University of Technology. <https://doi.org/10.7480/cgc.6.2200>
- [9] Bajtek, J.; Netušil, M.; Eliášová, M. (2020) *Experimental Analysis of Laminated Embedded Steel Insert in Load Bearing Connections* in: Louter, Bos, Belis, Veer, Nijssse [Eds.] *Challenging Glass 7 Conference Proceedings*, Ghent. <https://doi.org/10.7480/cgc.7.4476>
- [10] Behling, S.; Fuchs, A.; Peters, S. (2009) *Transparente Experimente – Projekte aus Forschung und Entwicklung*. Detail 7/8 2009. S. 762.
- [11] Kothe, C.; Kothe, M.; Wunsch, J.; Weller, B. (2016) *Adhäsive Verbindungen für punktuelle Befestigungssysteme in Fassaden und Glastragwerken* in: *Stahlbau*, Vol. 85, Issue S1, S. 361–371, Berlin. <https://doi.org/10.1002/stab.201690173>
- [12] Bedon, C.; Santarsiero, M. (2018) *Transparency in structural glass systems via mechanical, adhesive and laminated point connections –Existing research and developments*. *Adv. Eng. Mater.*, Vol 20, issue 5. <https://doi.org/10.1002/adem.201700815>
- [13] Blandini, L. (2005) *Structural Use of Adhesives in Glass Shells* [Dissertation]. D93 at the ILEK, University of Stuttgart.
- [14] Veer, F.; Wurm, J.; Hobbelman, G. (2003) *The Design, Construction and Validation of a Structural Glass Dome* in: *GPD Glass Processing Days Conference Proceedings*, Tampere.
- [15] Ioannidou-Kati, A.; Santarsiero, M.; Louter, C. (2018) *Edge-laminated Transparent Structural Silicone Adhesive (TSSA) Steel-to-Glass Connections* in: *Challenging Glass 6 Conf. Proc.*, Delft (2018). <https://doi.org/10.7480/cgc.6.2159>
- [16] Schulz, I.; Drass, M.; Teich, M.; Schneider, J. (2021) *Planungsschritte zur Umsetzung eines Ganzglas pavillons nach dem Faltwerkprinzip* Weller, B.; Tasche, S. [Hrsg.] *Glasbau 2021*. Berlin: Ernst & Sohn. S. 307–318.

- [17] Kassnel-Henneberg, B. (2017) *Verbindungen aus Glas* in: Weller, B.; Tasche, S. [Hrsg.] *Glasbau 2017*. Berlin: Ernst & Sohn GmbH. S. 466.
- [18] Marinitsch, S. (2015) *Stabilitätsprobleme bei Faltwerken aus Glas* [Dissertation]. E206 – Institut für Hochbau und Technologie, TU Wien.
- [19] Marinitsch, S.; Schranz, C.; Teich, M. (2016) *Folded plate structures made of glass laminates: a proposal for the structural assessment* in: *Glass Structures & Engineering*. pp. 451–460. <https://doi.org/10.1007/S40940-015-0002-1>
- [20] Carvalho, P. L.; Cruz, P. (2012) *Connecting trough reinforcement – Experimental Analysis of a Glass Connection using Perforated Steel Plates* in: *Challenging Glass 3*.
- [21] Carvalho, P. L.; Cruz, P.; Veer, F. (2014) *Connecting through the reinforcement – design, testing, and construction of a folded reinforced glass structure* in: *Journal of Façade, Design and Engineering 2*. S. 109–122
- [22] Feirabend, S. (2010) *Steigerung der Resttragfähigkeit von Verbundsicherheitsglas mittels Bewehrung in der Zwischenschicht* [Dissertation]. Universität Stuttgart.
- [23] Willareth, P.; Meyer, D. (2013) *Oberlicht neu gefaltet*. Aus: TEC 21, Heft 7–8: Zürich: Hallenbad City Zürich, Band 139. <http://doi.org/10.5169/seals-323675>
- [24] Puller, K. (2012). *Untersuchung des Tragverhaltens von in die Zwischenschicht von Verbundglas integrierten Lasteinleitungselementen* [Dissertation]. ILEK, Universität Stuttgart.
- [25] Volakos, E.; Davis C.; Teich, M.; Lenk P.; Overend, M. (2020) *Structural performance of a novel liquid-laminated embedded connection for glass* in: *Glass Structures and Engineering*. S. 487–510. <https://doi.org/10.1007/s40940-021-00162-w>
- [26] Louter, C. (2019) *Metal-to-glass bond strength of structural PVB* in: *Glass Performance Days 2019*. Tampere. pp. 49–55.
- [27] Santarsiero, M. (2015) *Laminated connections for structural glass applications*. [PhD thesis n° 6828]. Ecole Polytechnique Federale de Lausanne.
- [28] Santarsiero, M.; Louter, C.; Nussbaumer, A. (2017) *Laminated connections for structural glass components: a full-scale experimental study* in: *Glass Structures and Engineering 2*. Springer. Pp. 79–101.
- [29] Yersin, Antoine (2020) *Einlamierte, tragende Glasverbindungen in VSG – Numerische Untersuchungen zur Anwendung unter Einsatz von strukturellem PVB* [Bachelor thesis]. University of applied Sciences and Arts Lucerne / Horw.
- [30] Joos, Pascal (2021) *Verhalten struktureller laminiertes Glasverbinder. Untersuchung von strukturellem PVB unterschiedlicher Schichtung für einlamierte Fittings* [Bachelor thesis], University of applied Sciences and Arts, Lucerne/Horw.

-
- [31] Schieber, R.; Fildhuth, T.; Haller, M.; Stevels, W. (2021) *Building a frameless glass structure with structural PVB interlayers and stainless steel fittings* in: *Proceedings to Engineered Transparency*. Berlin: Ernst & Sohn. Pp. 163–181.
- [32] Stevels, W.; Fildhuth, T.; Wüest, T. et al. (2022) *Design Base for a Frameless Glass Structure Using Structural PVB Interlayers and Stainless-Steel Fittings* in: Louter, Bos, Belis, Veer, Nijse [Eds.] *Challenging Glass Conference Proceedings Vol. 8*. Ghent.
- [33] Schuster, M.; Thiele, K.; Schneider, J. (2021) *Investigations on the viscoelastic material behaviour and linearity limits of PVB* in: *Proceedings to Engineered Transparency*. Berlin: Ernst & Sohn. Pp. 207–223.
- [34] Stevels, W.; D’Haene, P. (2020) *Determination and verification of PVB inter-layer modulus properties* in: *Online proceedings to Challenging Glass 7*. Ghent.

