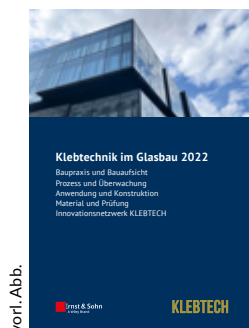


Bernhard Weller, Felix Nicklisch, Silke Tasche (Hrsg.)

Klebtechnik im Glasbau 2022

- renommierte Autor:innen erläutern in 15 Beiträgen aktuelle Fragestellungen und Beispiele der Klebtechnik
- Aspekte aus Forschung und Praxis der Entwicklung und Materialkunde, der Planung sowie der Ausführung werden dargestellt

Das Kleben wird seit Langem im Konstruktiven Glasbau und Fassadenbau angewendet. Dieses Buch behandelt aktuelle Themen, wie Bemessung, Oberflächenanalyse, Werkstoffverhalten und Verarbeitung, Qualitätssicherung. Es zeigt sich: das Innovationspotential ist noch nicht ausgeschöpft.



vorf. Abb.

10 / 2022 • ca. 216 Seiten •
ca. 134 Abbildungen

Softcover

ISBN 978-3-433-03391-3 € 24,90*

Bereits vorbestellbar.

BESTELLEN

+49 (0) 30 470 31-236
marketing@ernst-und-sohn.de
www.ernst-und-sohn.de/3391

ÜBER DAS BUCH

Im Bauwesen werden seit Jahrzehnten geklebte Materialverbunde ohne mechanische Verbindungsmittel im Glas- und Fassadenbau verwendet. In diesem Buch erläutern renommierte Autoren in 15 Beiträgen aktuelle Fragestellungen und Beispiele der Klebtechnik im konstruktiven Glasbau. Dabei werden Aspekte aus Forschung und Praxis der Entwicklung und Materialkunde, der Planung sowie der Ausführung dargestellt: Qualitätssicherung und Prozessentwicklung, innovative Bauprojekte, nachhaltiges Kleben als wichtige Aufgabe des gegenwärtigen und zukünftigen Bauens. Die Beiträge zeigen eindrucksvoll, wie weit das Kleben im Glasbau entwickelt ist.

Dieses Buch erscheint zu einem Fachsymposium, das die Leistungsfähigkeit der Klebtechnik im Glasbau einem weiten Kreis von Architekten und Ingenieuren vermittelt. Das Netzwerk KLEBTECH, eine Kooperation zwischen mittelständischen Unternehmen und zwei Universitäten, sieht in der Klebtechnik den Schlüssel zu Innovationen im Glas- und Fassadenbau.

BESTELLUNG

Anzahl	ISBN /	Titel	Preis
	978-3-433-03391-3	Klebtechnik im Glasbau 2022	ca. € 24,90*

Bitte richten Sie Ihre Bestellung an:
Tel. +49 (0) 30 47031-236
Fax +49 (0) 30 47031-240
marketing@ernst-und-sohn.de

Privat	Geschäftlich	
Firma, Abteilung	UST-ID Nr.	
Name, Vorname	Telefon	Fax
Straße, Nr.		
PLZ/Ort/Land	E-Mail	
Datum/Unterschrift		

www.ernst-und-sohn.de/3391

Vorwort

Das Kleben als Verbindungstechnologie, insbesondere das qualitätssichere und schadens-tolerante Kleben von Glas im Bauwesen, ist seit 2018 das Kernthema des BMWK-geför- derten Netzwerks KLEBTECH, einer Kooperation zwischen 15 mittelständischen Unter- nehmen und zwei Universitäten. Im Rahmen dieser Zusammenarbeit wird das strukturelle Kleben von Glas im Bauwesen durch anwendungsorientierte Forschung vorangetrieben.

Das vorliegende Fachbuch wird im Rahmen des zweiten KLEBTECH Symposiums vor- gestellt und über das Netzwerk hinaus einem großen Fachpublikum zugänglich gemacht. Zehn Beiträge berichten über das Spannungsfeld der Netzwerkarbeit hinaus über die er- folgreiche Umsetzung von Klebungen an Bauprojekten, das Kleben aus Sicht der Bau- aufsicht, über geeignete Materialien und deren Prüfung sowie prozesstechnische Aspekte.

Einführend werden strukturell einlamierte Metallverbinder und bauaufsichtliche Anfor- derungen an Glasklebungen erläutert. Schädigungseffekte an polymeren Klebstoffen so- wie deren Zustandsmonitoring mittels faseroptischer Sensoren werden in weiteren Bei- trägen thematisiert. Flüssigkeitsbeanspruchte Halterungssysteme und die Entwicklung des Klebprozesses zum Unterwasserkleben zeigen die Leistungsfähigkeit des Klebens.

Hybride punktuelle Klebungen, geklebte Tragwerke sowie deren experimentelle Prüfung und Bewertung veranschaulichen die aktuelle Forschungsarbeit in diesem Fachgebiet. Darüber hinaus wird der Pfad der baupraktischen Umsetzung von tragenden Silikonfugen erläutert. Der Leitfaden »Tragende Silikonklebstoffe im Konstruktiven Glasbau« des Fachverbandes Konstruktiver Glasbau e.V. gibt abschließend praktische Hilfestellung.

Den Autoren sei für die vielfältigen und mit hohem Engagement erstellten Fachbeiträge herzlich gedankt. Ein großer Dank gilt Frau Franka Stürmer, Herrn Francisco Velasco sowie Frau Sylvia Rechlin im Verlag Ernst & Sohn für die fruchtbare Zusammenarbeit. Ein besonderer Dank gilt auch Frau Dr. Almuth Berthold, die seitens des Projektträgers VDI/VDE-IT die Netzwerkpartner bei der Umsetzung neuer Ideen immer bestens berät.

Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller
Dr.-Ing. Felix Nicklisch
Dr.-Ing. Silke Tasche

Dresden, September 2022

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

Vorwort V

Zum Potential unterschiedlicher Methoden beim Einlaminieren struktureller Metallverbinder 1

Thiemo Fildhuth, Matthias Oppe

Schädigungseffekte in weichen Polymeren für Glasstrukturverbindungen 27

Eric Euchler, Ricardo Bernhardt, Konrad Schneider, Sven Wießner, Markus Stommel

Zustandsmonitoring struktureller Silikonklebungen mit faseroptischen Sensoren 41

Nicolas Wachter, Martin Ganß, Tommaso Baudone, Mascha Baitinger, Martien Teich, Torsten Thiel

Untersuchung des Prozesses zum Unterwasserkleben von Halterungssystemen 63

Linda Fröck, Nikolai Glück, Wilko Flügge

Redundante Punkthalterssysteme im Konstruktiven Glasbau durch hybride Verklebung 77

Dominik Offereins, Geralt Siebert

Lastabtragende Klebungen für aussteifende Verglasungen mit Absturzsicherung 89

Johannes Giese-Hinz, Felix Nicklisch, Mascha Baitinger, Jasmin Reichert, Bernhard Weller

Experimentelle Untersuchungen zur Erfassung von Kavitäten hyperelastischer Silikonklebstoffe 109

Benjamin Schaaf, Markus Feldmann, Lukas Lamm, Tim Brepols, Stefanie Reese, Robert Seewald, Alexander Schiebahn, Uwe Reisgen

Isolierglasrandverbund auf beschichteten und digital bedruckten Glasoberflächen 123

Jan Wunsch, Jost Wittwer, Alexander Rumpf, Bernhard Weller

Ermittlung der mechanischen Eigenschaften eines Silikondichtstoffs 139

Sigurd Sitte

Der Weg zur erfolgreichen baupraktischen Umsetzung von tragenden Silikonklebfugen in Deutschland 159

Mascha Baitinger, Nicolas Wachter, Martien Teich

Anhang: Merkblatt FKG 01/2021 – Tragende Silikonklebstoffe im Konstruktiven Glasbau 175

Autoren 211

Schlagwörter 213

Keywords 215

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 Fügestelle 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 Fügelösung, 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 einlamiert 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.

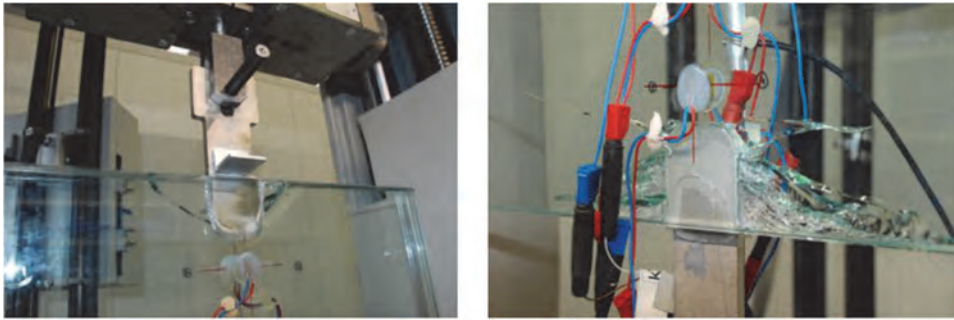


Bild 1 Beispiele für einlamierte, taschenartige Fittingverbindungen: a) Auszugsversuche an der Hochschule Luzern (© HSLU, CC Gebäudehülle)

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)

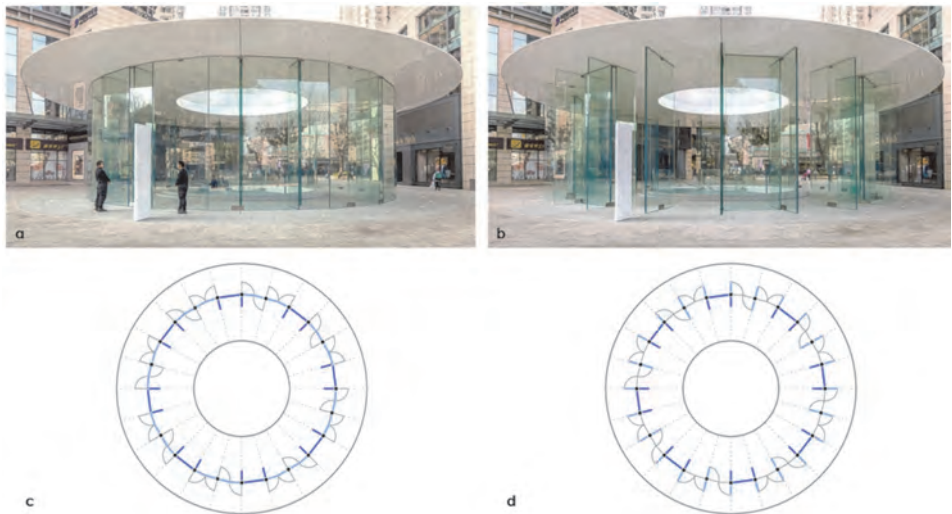


Bild 3 Flagshipstore mit geschlossenen (a und c) sowie geöffneten Türen (b und d) (© Fassadenbauer)

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)

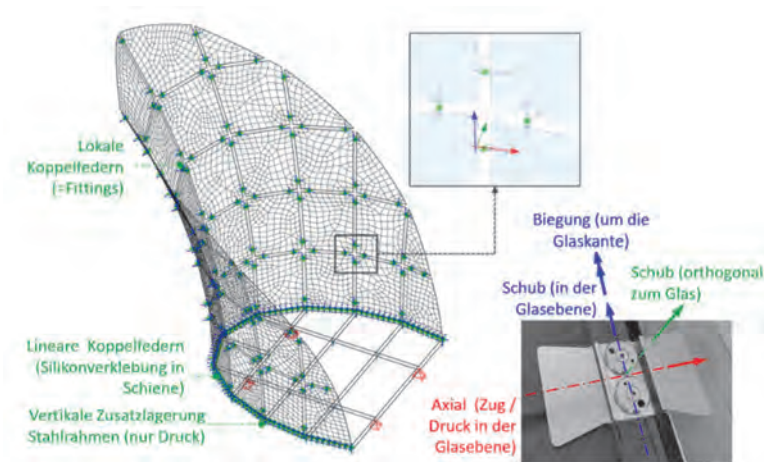


Bild 5 FE-Modell mit Koppelfedern als Verbindungen (© knippershelbig GmbH)

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).

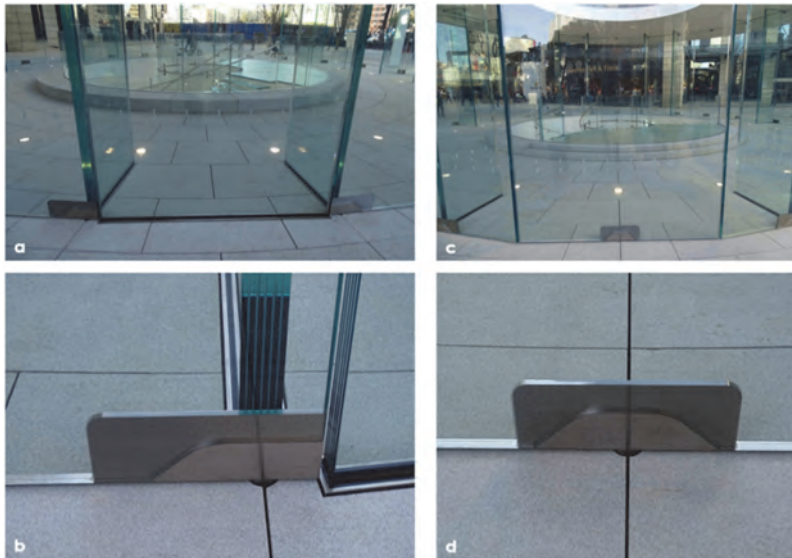


Bild 6 Schwingtüren a) und Drehtüren c) aus Glas mit zugehörigen einlamierten Fittings b) und d)
(© Fassadenbauer)

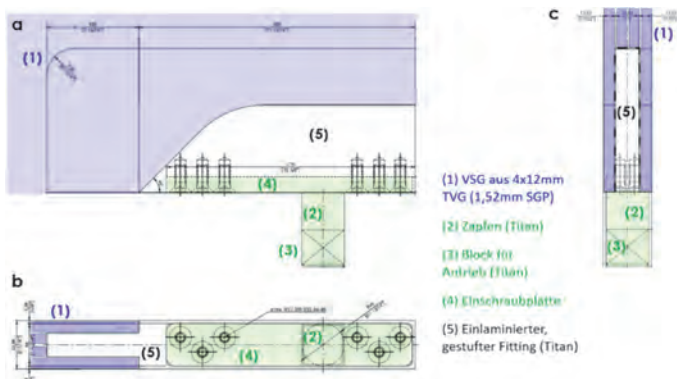


Bild 7 Aufbau eines laminierten Schwingtür-Titanfittings: a) Ansicht; b) und c) Schnitte
(© knippershelbig GmbH)

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 Volumelementen 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).

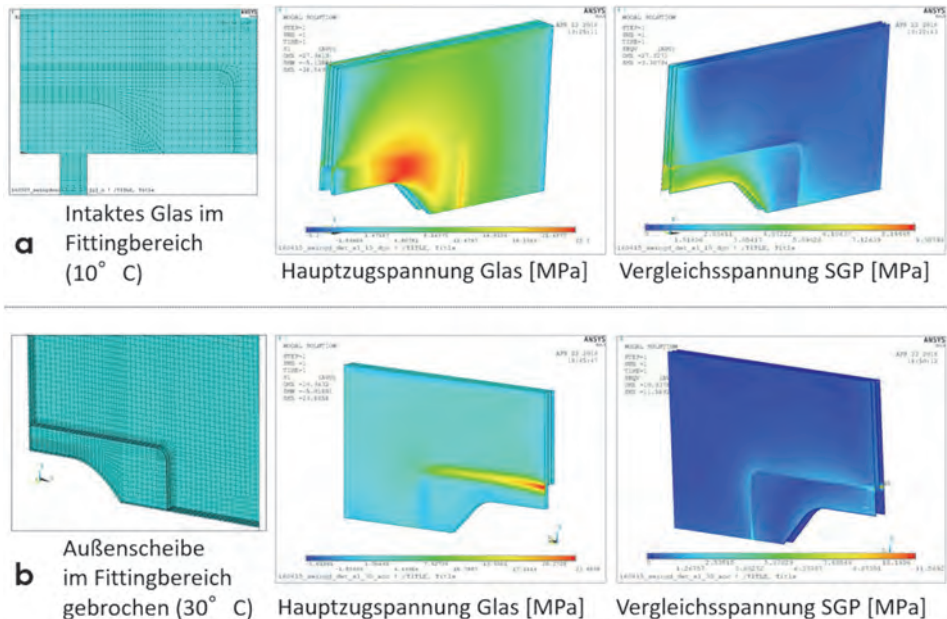


Bild 8 FE-Analysen eines Schwingtür-Fittings mit Vernetzung und Plot der Hauptzugspannung der Glasschichten sowie der Interlayer-Vergleichsspannungen; a) Intaktes Glas bei 10 °C; b) Ausfall einer Außenglasschicht bei 30 °C (© knippershelbig GmbH)

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 Erdbebeneinwirkung 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.

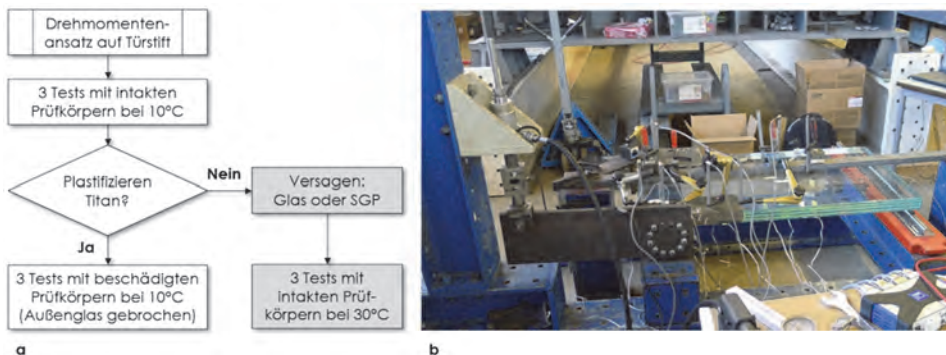


Bild 9 a) Testablauf, b) Testaufbau mit dem Hebelarm zur Aufbringung des Torquemoments auf die kreisförmige Antriebsscheibe am Fittingzapfen (© knippershelbig GmbH)

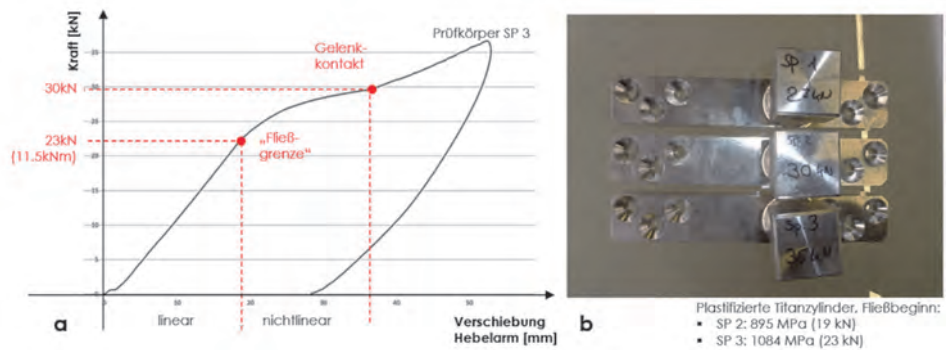


Bild 10 a) Verschiebungs-Kraftdiagramm des Prüfkörpers SP3 mit ausgeprägtem nichtlinearem Bereich aufgrund Fließen-Plastifizieren; b) Plastifizierte Zapfen der Fittings (© knippershelbig GmbH und Hochschule München)

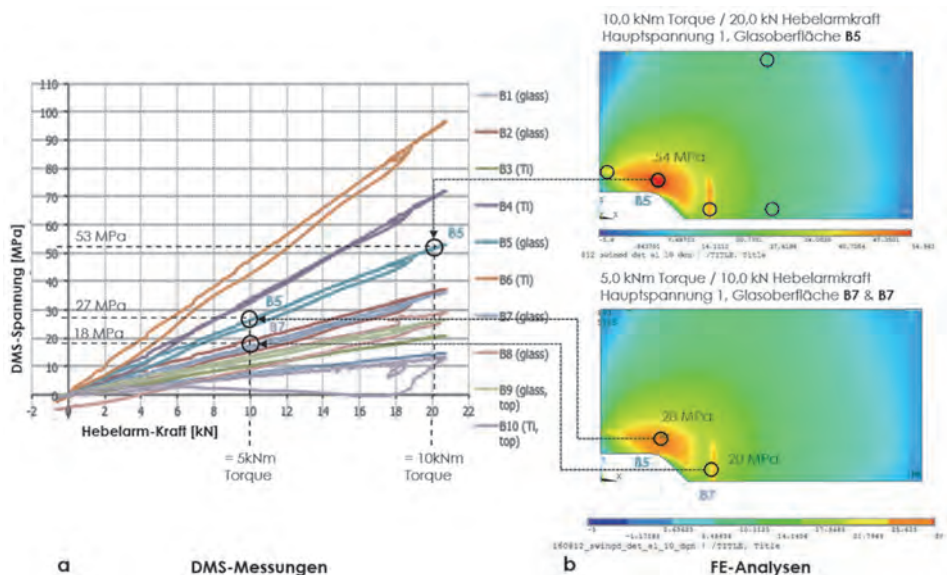


Bild 11 a) Hebelarmkraft-Spannungsdiagramm der DMS-Messpunkte im Vergleich zu b) den korrespondierenden FE-Analysen am Fitting (© knippershelbig GmbH und Hochschule München)

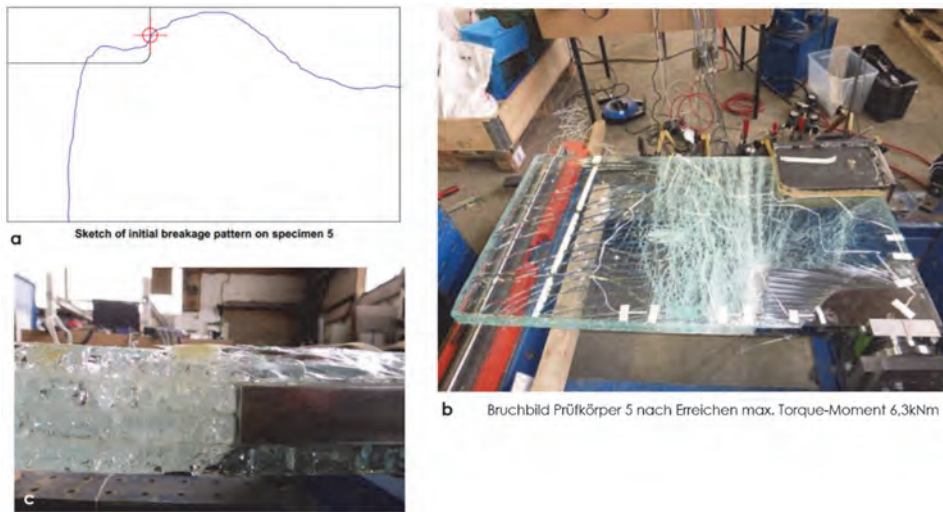


Bild 12 a) Schema des initialen Bruchbildes Prüfkörper 5 nach Anschlagen (roter Punkt); b) und c) Bruchbild der Tür nach vollständigem Brechen aller Glasschichten (© Hochschule München)

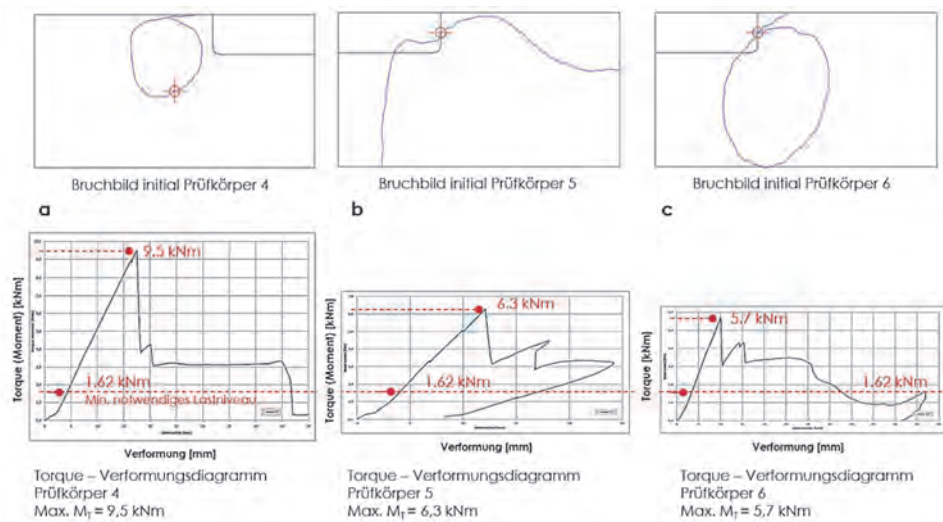


Bild 13 a) bis c) Initiale Bruchbilder der drei Prüfkörper nach dem Anschlagen und zugehörige Torque-Verformungsdiagramme (Verformungsmessung am Hebelarm) (© Hochschule München & knippershelbig GmbH)