

Verbundsicherheitsglas im gebrochenen Zustand

Frank Wellershoff, Marcus Illguth

Professur für Fassadensysteme und Gebäudehüllen, HafenCity Universität Hamburg

Zusammenfassung: Die Resttragfähigkeit von gebrochenen Verbundglasscheiben wird derzeit noch durch aufwendige Bauteilversuche nachgewiesen. Numerische Materialmodelle müssen die rheologischen Eigenschaften der Verbundfolie, die Bruchstruktur der Glasscheiben und die lokalen Delaminationen der Verbundfolie an den Glasbruchstücken erfassen.

1 Anlass

Die Tragfähigkeit von Glasanwendungen wird durch einen Spannungsnachweis geführt. Hierbei werden die maximalen Oberflächenzugspannungen infolge der planmäßigen Belastungen betrachtet. Aufgrund des fehlenden plastischen Materialvermögens führen auch sehr kleine unplanmäßige Belastungen (z.B. Steinschlag) zu lokalen Spannungsspitzen und zum Bruch der gesamten Scheibe. Um größere Konsequenzen dieser Schadensfälle auszuschließen ist es bei vielen Anwendungen nötig ein Verbundglas auszuführen.

Das Nachbruchverhalten dieser Glasanwendungen kann bislang nur durch aufwendige Resttragfähigkeitsversuche im 1:1 Maßstab nachgewiesen werden. Seit Jahren wird bestrebt Alternativen zu diesen Großbauteilversuchen zu schaffen. Für Absturzsichernde Verglasungen werden in der DIN 18008-4, Anhang B, Tabelle B.1 „Linienförmig gelagerte Verglasungen mit nachgewiesener Stoßsicherheit“ aufgeführt [1]. Für Überkopferverglasungen ist die Auswahl an Anwendungen, die keine Bauteilversuche erfordern, vergleichsweise gering.

Viele Überkopferanwendungen bedürfen aufgrund des Spannungsnachweises für planmäßige Belastungen einen Glasaufbau mit VSG aus ESG (Einscheibensicherheitsglas). Ein numerisches Modell, mit dem die Resttragfähigkeit von Verbundglasscheiben aus ESG nachgewiesen werden kann, könnte aufwendige Bauteilversuche im Originalmaßstab ersetzen.

2 Stand der Forschung

2.1 Haftung und Delamination der Zwischenschicht

Die Haftung und das Delaminationsverhalten von Verbundfolien sind wichtige Kenngrößen bei der Beschreibung des Tragverhaltens von VSG.

Am Markt sind Verbundfolien mit unterschiedlichen Haftgraden aber sonst gleichen mechanischen Eigenschaften erhältlich. Die Variation des Haftgrades bestimmt, wie sich die Folie vom Rand der Glasbruchstücke löst. Der Haftgrad hat somit einen entscheidenden Einfluss auf die Steifigkeit und Verformungsfähigkeit der gebrochenen Verbundglaseinheit bis zum Reißen der Folie.

Die Quantifizierung des Delaminationsverhaltens ist derzeit noch Gegenstand der Forschung. Von Franz [2] wurden Versuchsmethoden entwickelt, in denen die Energiefreisetzungsrate bestimmt wird, als ein Indikator des Delaminationsverhaltens. In den sog. TCT-Tests (Trough Cracked Tensile-Test) wird ein deckungsgleicher Riss in beiden Glasscheiben initiiert und einachsigt zugbelastet (Abb. 1).

In Abhängigkeit des Haftgrades wird mit fortschreitender Belastung eine Delaminationsfront beobachtet und eine Energiefreisetzungsrate bestimmt.

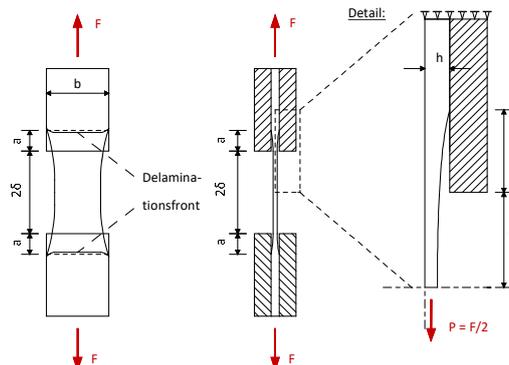


Abbildung 1: Systemzeichnung TCT-Tests und Energiefreisetzungsrate [4]

Für eine numerische Simulation des Verbundes zwischen Folie und Glas wird die Energiefreisetzungsrate z.B. für die Modellierung mittels Kohäsivzonenmodellen benötigt.

Die Qualität der Simulation von gebrochenem Verbundglas als Laminat hängt neben dem Materialmodell für die Folie (hyper-viskoelastisch) von der Genauigkeit der Abbildung des Verbundes ab. In [2] wird angegeben, dass durch die Vereinfachungen und die bei den Versuchen verwendete Messtechnik Ungenauigkeiten entstehen. Es werden weitere Untersuchungen benötigt, um präzisere Parameter für das Delaminationsverhalten zu bestimmen.

2.2 Effektive Biegesteifigkeit von gebrochenen VSG/ESG

Das Tragverhalten von gebrochenem VSG aus ESG ist durch ein anfängliches Biegetragverhalten gekennzeichnet, welches, abgesehen von Randeinspannungen oder lokalen Lastenleitungen mit lokal großen Krümmungen, mit zunehmender Verformung in ein Membrantragverhalten übergeht.

Das anfängliche Biegetragverhalten entsteht durch den Kontakt der Glasbruchstücke in der Druckzone des Querschnitts und einer zugehörigen Zugkraft in der Verbundfolie. Die Ableitung einer Biegesteifigkeit aus dieser Modellvorstellung heraus wurde in Galuppi et al. vorgestellt [3].

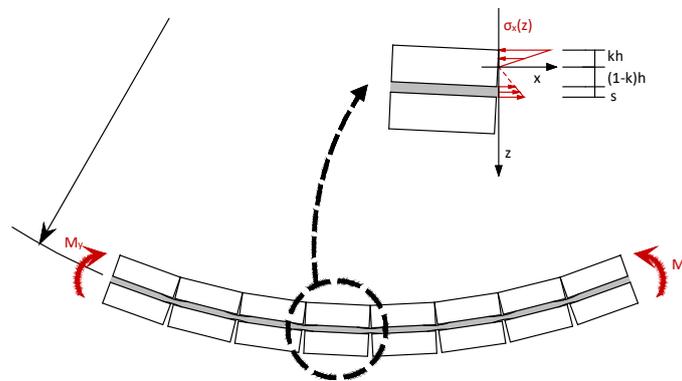


Abbildung 2: Spannungsverteilung im Modell der effektiven Biegesteifigkeit [3]

3 Bulge Tests

3.1 Versuchsaufbau

Die Versuchskörper, Verbundglasscheiben aus 2x4 mm ESG mit den Maßen 400 x 400 mm, werden beidseitig ringgelagert und durch seitliches Anschlagen in beiden Glasschichten gebrochen (siehe Abb. 3).

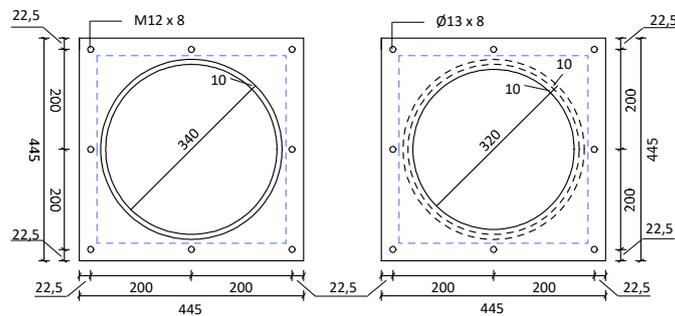


Abbildung 3: Glaslagerung im Bulge Test [4]

Unterseitig wird ein Luftdruck aufgebracht, so dass sich die gebrochene Verbundglaseinheit aufwölbt. Die Druckrate [Pa/s] sowie die Probentemperatur kann variiert werden (siehe Abb. 4).

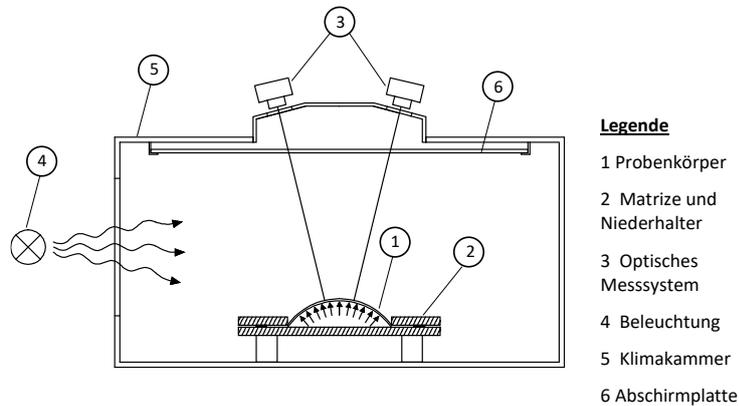
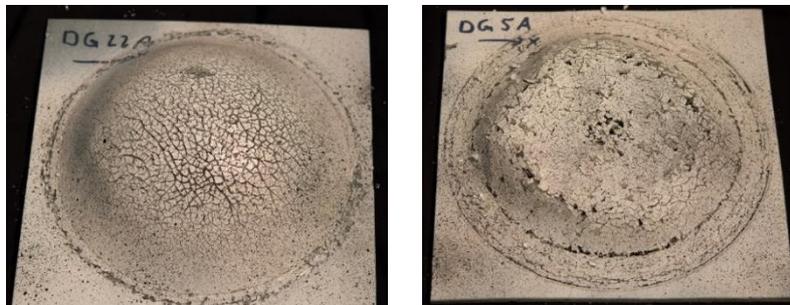


Abbildung 4: Bulge- Test im Klimakammeraufbau [5]

3.2 Bruchbilder

Die Bruchbilder zeigen die für ESG typischen Bruchstückgrößen und ein hinreichend feines stochastisches Muster zur Bestimmung der Dehnungen mittels Grauwertkorrelation (System GOM Aramis).



(a) 500 Pa/s; 20°C

(b) 500 Pa/s; 60°C

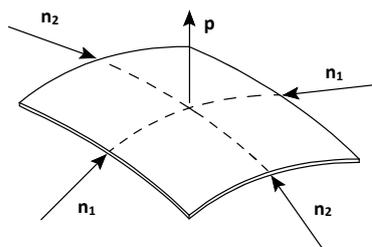
Abbildung 5: Bruchbilder Saflex® Structural (DG41) [5]

3.3 Tragwirkungsmodell

Mit dem vereinfachten Tragwirkungsmodell soll untersucht werden, in wie weit sich das Tragverhalten des gebrochenen Verbundglases aus ESG mit möglichst einfachen Modellansätzen beschreiben lässt. Grundsätzlich kommen die Membrantragwirkung und die Biegetragwirkung vor.

3.3.1 Membranspannungen

Mit Hilfe der erweiterten Kesselformel wird eine Membranspannung bestimmt, die vom Kugelradius, der Belastung sowie der veränderlichen Dicke der Zwischenschicht abhängt (Abb. 6).



Erweiterte Kesselformel:

$$p = \frac{n_1}{r_1} + \frac{n_2}{r_2} = \frac{2n}{r}$$

Membranspannung:

$$\sigma = \frac{r \cdot p}{2 \cdot t}$$

Dehnung in Dickenrichtung:

$$\varepsilon_3 \approx -\varepsilon_1 - \varepsilon_2$$

Veränderliche Schalendicke:

$$t = t_0 \cdot e^{(\varepsilon_3)}$$

Abbildung 6: Berechnung der Membranspannung mit der erweiterten Kesselformel [5]

Unter kleinen Mittenerformungen bzw. großen Kugelradien befinden sich die Versuchskörper im Bruchzustand IIIa, in dem die Glasbruchstücke auf der Druckseite noch in Kontakt stehen und die Biegetragwirkung überwiegt (Abb. 7). Die Kesselformel kann in diesem Zustand noch nicht angewandt werden.

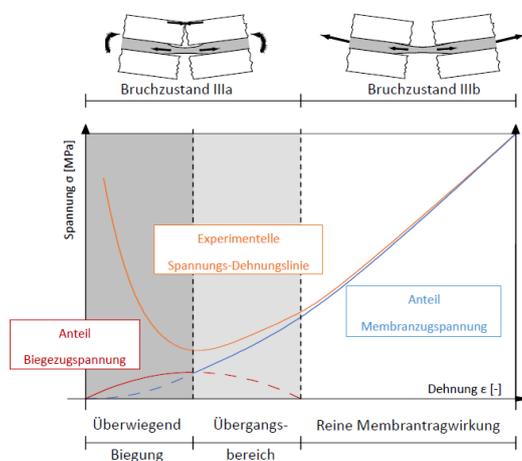


Abbildung 7: Beziehung zwischen Bruchzustand und Tragwirkungsmodell [5]

3.3.2 Anfangsbiegesteifigkeit

Der Übergang vom Bruchzustand IIIa zum Bruchzustand IIIb kann durch ein geometrisches Modell prognostiziert werden, in dem Biegeradius R , Bogenlänge b und Verbundglasdicke t in Beziehung stehen (Abb. 8). Hierin wird davon ausgegangen, dass die Bruchstücke auf der Druckseite immer an der äußersten Kante in Kontakt stehen müssen. Ist dies der Fall kann

die Dehnung auf der Probenoberseite in Abhängigkeit des Krümmungsradius und der Probendicke ausgedrückt werden.

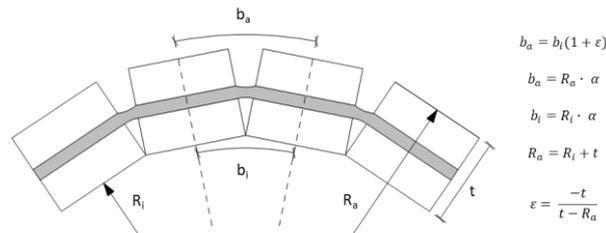


Abbildung 8: Geometrisches Modell zur Prognose des Übergangs in den Bruchzustand IIIb [5]

3.4 Versuchsergebnisse

Wertet man die Versuchsergebnisse unter der Annahme einer Ersatzmembran mit verschmierten Eigenschaften aus, erhält man die in Abb. 9 dargestellten Membranspannungen. Diese werden erst ab einer Dehnung von 0,05 dargestellt, da bei kleineren Dehnungen noch die Anfangsbiegesteifigkeit überwiegt.

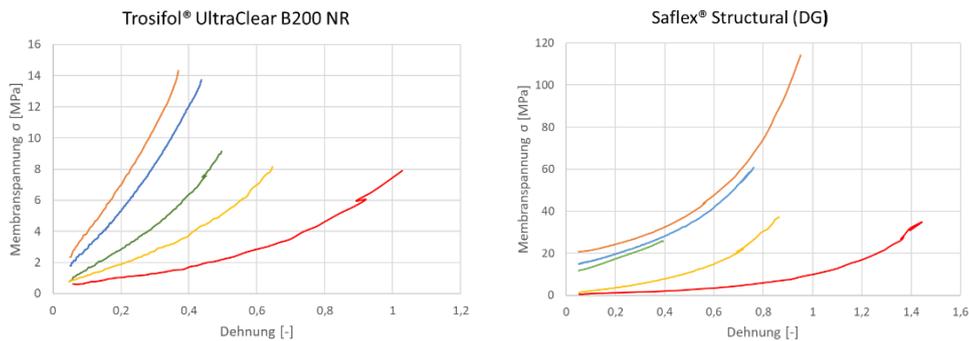
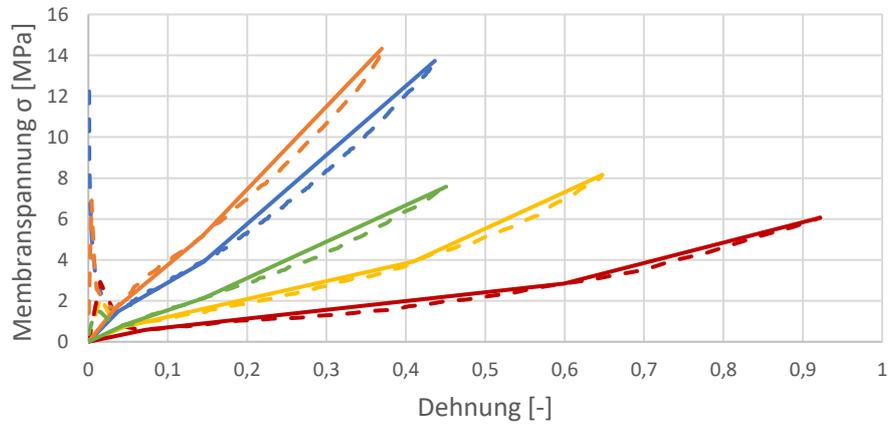


Abbildung 9: Dehnung-Membranspannung (Mittelwerte aller Versuche bei gleicher Temperatur-Druckrate [5])

4 Numerische Abbildung

4.1 Tangentenmoduln

Die in den Bulge-Tests ermittelten biaxialen Spannungs-Dehnungslinien werden zunächst in einem vereinfachten numerischen Modell durch eine multilineare Funktion angenähert. Dabei wird das Materialverhalten durch Angabe von Tangentenmoduln ET_i sowie der Querdehnzahl ν beschrieben. Die so ermittelten Materialparameter sind dadurch ausschließlich für die jeweilige Konfiguration aus Art, Dicke und Haftgrad der Zwischenschicht sowie für die jeweilige Temperatur und Dehnrate gültig:

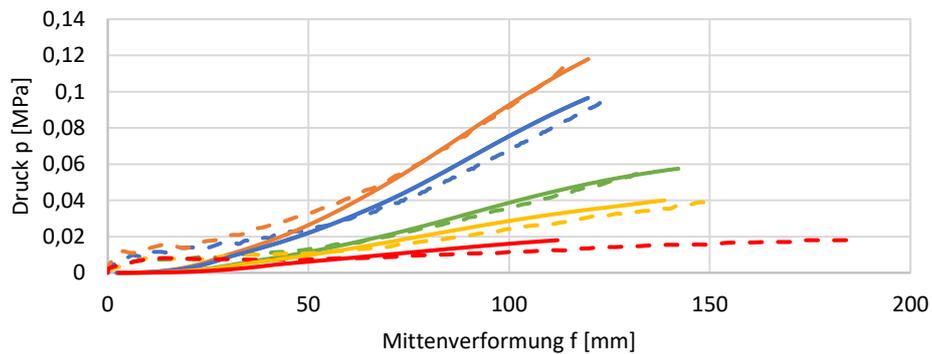


Konfiguration	500 Pa/s-20°C	5.000 Pa/s-20°C	50 Pa/s-20°C	500 Pa/s-40°C	500 Pa/s-60°C
Experiment					
Numerisch					

Abbildung 10: Trosifol® UltraClear B 200 NR: Annäherung der biaxialen Spannungs-Dehnungskurven durch eine multilineare Spannungs-Dehnungsfunktion; gestrichelte Kurven = tatsächlicher Verlauf; durchgezogene Kurven = multilineare Annäherung [6]

4.2 Druck-Verformungskurven

Der Vergleich zwischen den experimentellen und den numerischen Beziehungen zwischen Druck und Mittenverformung zeigt über weite Strecken eine gute Übereinstimmung (Abb. 11). Die Abweichungen im Anfangsbereich sind auf die dort wirksame Biegetragwirkung zurückzuführen.



Konfiguration	500 Pa/s-20°C	5.000 Pa/s-20°C	50 Pa/s-20°C	500 Pa/s-40°C	500 Pa/s-60°C
Experiment					
Numerisch					

Abbildung 11: Trosifol® UltraClear B 200 NR: Druck-Verformungsbeziehungen aus dem Experiment (gestrichelte Linien) sowie aus der numerischen Simulation (durchgezogene Linien) [6]

Danksagung

Wir danken dem Fachverband Konstruktiver Glasbau e.V. für die finanzielle Förderung und den Firmen Interpane Glasgesellschaft mbH sowie Kuraray Europe GmbH für die Bereitstellung der Versuchskörper.

Literatur

- [1] DIN 18004-4:2013-07: Glas im Bauwesen – Bemessungs- und Konstruktionsregeln – Teil 4: Zusatzanforderungen an absturzsichernde Verglasungen
- [2] Franz, J.: Untersuchungen zur Resttragfähigkeit von gebrochenen Verglasungen, Dissertation TU Darmstadt, 2015
- [3] Galuppi, L.,; Royer-Carfagni, G.: The post-breakage response of laminated heat-treated glass under in plane and out of plane loading, Composites Part B 147, S. 227-239, 2018
- [4] Wellershoff, F.; Illguth, M.: Tragverhalten gebrochener Verbundglasscheiben, Glasbau 2020, TU Dresden
- [5] Wellershoff, F.; Illguth, M.; Van der Horst, T.: Verbundglas Bulge Tests, Fachverband Konstruktiver Glasbau, Versuchsbericht HafenCity Universität Hamburg, 2020
- [6] Van der Horst, T.: Analyse und Nachbruchverhalten von Verbundglas mit Bulge – Tests, Masterthesis, HafenCity Universität Hamburg, 2020