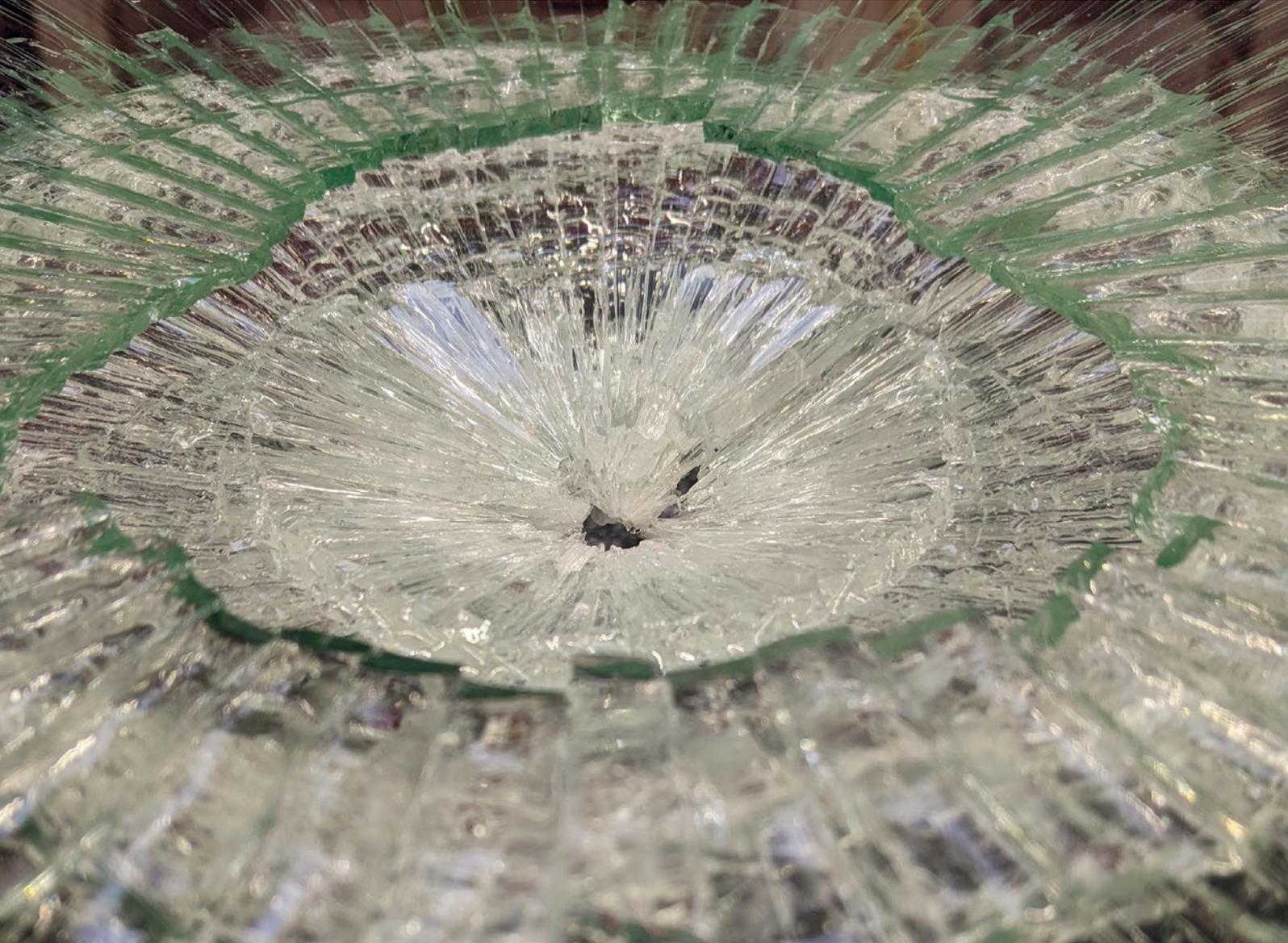


**Sonderbeilage
der „Stahlbau“**

Ausgabe 1
März 2025, S. 41–47

Sonderdruck

Glasbau & Fassade



Gewichtsreduzierung von VSG durch Dünnglas bei gleichbleibender Stoßfestigkeit

Steffen Bornemann, M. Abdus Salam, Elena Fleckenstein, Michael Engelmann

Gewichtsreduzierung von VSG durch Dünnglas bei gleichbleibender Stoßfestigkeit

Die Minimierung des Einsatzes von Ressourcen ist ein zentrales Ziel der UN-Nachhaltigkeitsagenda. Im Bausektor bietet die Verwendung von dünneren Gläsern und die damit verbundene Gewichtseinsparung eine Möglichkeit, dieses Ziel im Sinne des Leichtbaus zu unterstützen. Dabei stellen die hohen Sicherheitsanforderungen der Bauindustrie Herausforderungen an die Entwicklung von Verbundsicherheitsgläsern (VSG), v. a. hinsichtlich der Stoßsicherheit, Splitterbindung und Resttragfähigkeit. Aufgrund des reduzierten Glasanteils bei Verwendung dünnerer Gläser nimmt die Beanspruchung der Zwischenschicht zu, sodass ihre Relevanz am Lastabtrag steigt. Ziel der hier vorgestellten Versuche war es daher, herauszufinden, wie die Gewichtsreduzierung möglich ist, ohne die Stoßfestigkeit zu verringern. Hierfür wurde der Einfluss von Glasdicke, -art sowie von einlagigen Zwischenschichten aus Ethylvinylacetat-Copolymer (EVA) und mehrlagigen Zwischenschichten aus EVA und modifiziertem Polyester (MPE) auf die Stoßsicherheit anhand des Kugelfallversuchs gemäß DIN EN 14449 bzw. DIN 52338 untersucht. Nach der Beschreibung des Versuchsaufbaus und der Methode wird der Einfluss der Konstruktionsparameter auf das Bruchbild und die Fallhöhe thematisiert. Es zeigt sich, dass der Einsatz mehrlagiger Zwischenschichten eine signifikante Verbesserung der Stoßsicherheit und damit eine Reduktion der Glasdicke bei gleichbleibender Fallhöhe ermöglicht, was einen wichtigen Beitrag zur Ressourcenschonung leistet.

Stichworte EVA; Verbundsicherheitsglas; Kugelfallversuch; Stoßsicherheit; Gewichtseinsparung; Dünnglas

Reducing the weight of laminated safety glass by using thin glass while preserving impact resistance

Minimizing the use of resources is a central goal of the UN sustainability agenda. In the construction sectors, the use of thinner glass and the associated weight savings offers an opportunity to support this goal in terms of lightweight constructions. The high safety requirements of the construction industry pose challenges for the development of laminated safety glass (LSG), especially with regard to impact resistance, shatter resistance and residual load-bearing capacity. Due to the reduced glass content of thinner glass, the stress on the interlayer increases, leading to an increased importance of the interlayer in load transfer. The aim of the tests presented here was to find out how the weight can be reduced without reducing the impact resistance. Therefore, the influence of glass thickness, glass type and single-layer interlayers made of ethylene vinyl acetate copolymer (EVA) and multi-layer interlayers with additional modified polyester (MPE) film on the impact resistance of laminated safety glass was analyzed using the ball drop test acc. to DIN EN 14449 or DIN 52338. After a description of the test setup and methodology, the influence of the parameters on the fracture pattern and the drop height is investigated. It is shown that the use of multi-layer interlayers enables a significant improvement in impact resistance which allows for a reduction of the glass thickness while maintaining the same drop height. It therefore makes an important contribution to conserving resources.

Keywords EVA; laminated safety glass; ball drop test; impact resistance; weight reduction; thin glass

1 Einleitung und Motivation

Verbundsicherheitsgläser (VSG) bestehen aus mindestens zwei Glasscheiben, die durch eine polymere Zwischenschicht verbunden sind. Als Zwischenschicht werden häufig Folien, wie z. B. Polyvinylbuthyral (PVB), Ethylvinylacetat-Copolymer (EVA) oder Ionomere, verwendet. Die Zwischenschicht ist in der Verglasung unterschiedlichen Belastungen ausgesetzt (Bild 1). Im intak-

ten Zustand sorgt die Zwischenschicht für den Schubverbund der Scheiben, wobei die Größe des Schubverbunds maßgeblich von der Steifigkeit der Zwischenschicht abhängig ist.

Im Falle eines Glasbruchs der unteren Glasscheibe ist eine ausreichende Haftung zwischen den Glasbruchstücken und der Zwischenschicht erforderlich, um eine Gefährdung durch herabfallende Bruchstücke zu vermeiden.



Bild 1 Belastung der Zwischenschicht bei unterschiedlichen Lastfällen (Quelle: Institut für Baukonstruktion)
Load on the interlayer for different load cases

Zudem hält die Zwischenschicht die Bruchstücke zusammen, wodurch auch bei vollständigem Glasbruch eine Übertragung von Druckkräften über die Bruchstücke möglich ist. Die Zwischenschicht wird in diesem Lastfall v. a. auf Zug belastet. Bei stoßartigen Belastungen absorbiert die Zwischenschicht einen Teil der Stoßenergie durch Verformung [1].

Soll nun unter dem Aspekt der Gewichtseinsparung die Glasdicke reduziert werden, erhöht sich der Anteil der Zwischenschicht an der Gesamtdicke des VSG. Dadurch übernimmt die Zwischenschicht einen größeren Anteil des Lastabtrags. Um die gleiche Leistungsfähigkeit der Produkte, insbesondere im gebrochenen Zustand, zu erreichen, müssen die Eigenschaften der Zwischenschicht angepasst werden.

Die Untersuchung des Verhaltens bei stoßartigen Einwirkungen kann durch experimentelle Versuche oder numerische Berechnung erfolgen. Obwohl numerische Simulationsansätze [2, 3] theoretisch möglich sind, sind diese in der Praxis oft mit hohem Aufwand verbunden. Zudem bieten sie noch keine ausreichend präzise Abbildung der realen Versuchsergebnisse, weil das Verhalten im Versagensfall von einer Vielzahl von Parametern (einwirkende Bruchenergie, Steifigkeit der Zwischenschicht [1], Haftung zwischen Glas und Zwischenschicht [4]) abhängig ist.

Deshalb sind experimentelle Untersuchungen weiterhin die bevorzugte Methode. Zu den geregelten experimentellen Untersuchungen von stoßartigen Einwirkungen bei VSG zählen Pendelschlagversuche nach DIN EN 12600 [5] und Kugelfallversuche. Für diesen Beitrag wurden Kugelfallversuche nach DIN EN 14449 [6] durchgeführt, die das Verhalten von VSG bei hartem Stoß abbilden.

Der Fokus dieser Untersuchung liegt auf der Gewichtseinsparung von VSG durch die Verwendung von Dünnglas bei gleichbleibender Stoßfestigkeit. Dies soll durch Verwendung angepasster Verbundfolien erreicht werden. Hierfür wurden Prüfkörper unterschiedlicher Glasdicke und -art sowie einlagige Zwischenschichten aus EVA bzw. mehrlagige Zwischenschichten aus EVA in Kombination mit einer Folie aus modifiziertem Polyester

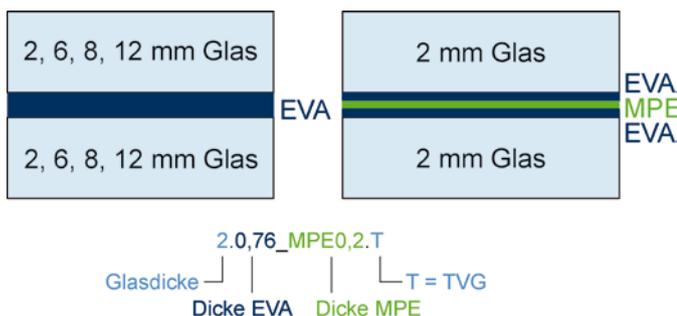


Bild 2 Aufbau der Prüfkörper mit ein- und mehrlagiger Zwischenschicht sowie Bezeichnung der Prüfkörper (Quelle: Institut für Baukonstruktion)
Structure of the test specimens with single and multi-layer interlayer as well as labelling of test specimens

(MPE) untersucht. Im Anschluss an den Versuch erfolgte eine fotografische Dokumentation des Prüfkörpers.

2 Experimentelle Untersuchung

2.1 Prüfkörper

Die Prüfkörper bestanden aus Verbundglas mit den nach Norm geforderten Abmessungen 500 mm × 500 mm. Untersucht wurde Floatglas in vier Glasdicken (2, 6, 8, 12 mm). Für 6 mm dickes Glas wurde zusätzlich teilvorgespanntes Glas (TVG) betrachtet. Für alle Glasdicken wurden Verbundgläser mit Zwischenschichten aus kommerziell erhältlicher EVA-Folie (evguard-Laminierfolie – 0,76 mm, 1,52 mm) hergestellt (Bild 2, linke Seite). Für 2 mm dickes Glas wurden zusätzlich mehrlagige Zwischenschichten aus zwei äußeren Lagen EVA und einer dazwischenliegenden Folie aus modifiziertem Polyester (MPE) untersucht (Bild 2, rechte Seite). Die verwendete, kommerziell erhältliche MPE-Folie besteht aus einem amorphen, transparenten thermoplastischen Polymer. Durch den Laminationsprozess verbinden sich die drei Lagen adhäsiv miteinander.

Ein Prüfkörper aus 2 × 2 mm TVG mit einer mehrlagigen Folie aus 0,38 mm EVA + 0,2 mm MPE + 0,38 mm EVA hat bspw. die Prüfkörperbezeichnung 2,0,76 mm_MPE0,2.T. Eine Übersicht über alle Prüfreiheiten kann Tab. 1 entnommen werden.

Die Lamination erfolgt in zwei Temperaturschritten in einem Vakuum laminator vom Typ Icolam mit einer Bodenheizplatte. Zunächst werden die Verbundgläser auf eine Temperatur oberhalb der Schmelztemperatur erwärmt, um ein gleichmäßiges Schmelzen der Zwischenschicht zu gewährleisten. Anschließend wird die Temperatur auf 140 °C erhöht, wobei sich die Peroxide zersetzen und die chemische Vernetzungsreaktion auslösen, die die mechanischen Eigenschaften des Materials beein-

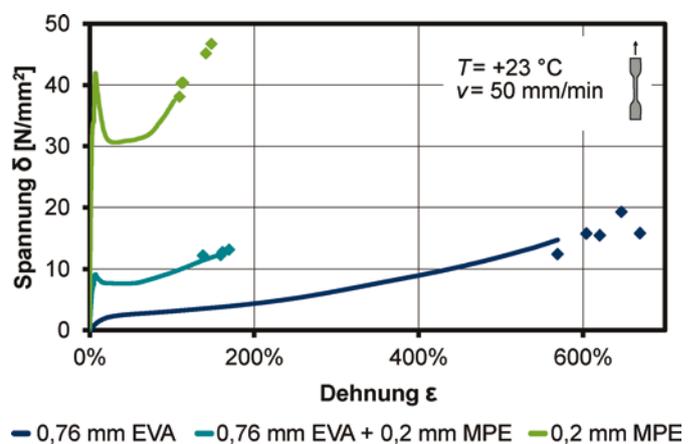


Bild 3 Spannungs-Dehnungs-Diagramm der verwendeten Verbundfolienmaterialien EVA, MPE sowie der mehrlagigen Zwischenschicht; dargestellt sind jeweils eine repräsentative Kurve sowie die Festigkeiten und Bruchdehnungen der einzelnen Prüfkörper (Quelle: Institut für Baukonstruktion)
Stress-strain diagram of the used interlayer materials EVA, MPE and multi-layer interlayer; a representative curve is shown as well as the strength and elongation at break of the individual test specimens

Tab. 1 Übersicht über die Prüfreiheiten und maximale Fallhöhe
Overview of test series and maximum drop height

Prüfkörper- beschriftung	Glasdicke	Glasart	EVA- Folie [mm]	MPE- Folie [mm]	Maximale Fallhöhe h_{\max} [m]	Anzahl PK h_{\max}
2.0,38	2×2mm	Float	0,38		1	4
2.0,76			0,76		2	6
2.1,52			1,52		6	3
2.0,4_MPE0,2			2 × 0,2	0,2	6	3
2.0,76_MPE0,2			2 × 0,38	0,2	8	6
2.0,76_MPE0,4			2 × 0,38	0,4	12	6
2.1,52_MPE0,2			2 × 0,76	0,2	12	6
6.0,76	2×6mm	Float	0,76		6	7
6.1,52			1,52		12	6
6.0,76.T		TVG	0,76		9	4
6.1,52.T			1,52		12	2*
8.0,76	2×8mm	Float	0,76		7	6
8.1,52			1,52		12	1*
12.0,76	2×12mm	Float	0,76		12	5

* Da bereits Prüfreiheiten mit einem dünneren Aufbau diese Fallhöhe erreicht haben, wurden nur wenige Prüfkörper geprüft

flusst [7]. Die Schmelz- und Vernetzungszeiten sind von der Glasdicke abhängig; je dicker der Aufbau des Laminats, desto länger die Haltezeit, um eine ausreichende Durchwärmung und Vernetzung zu gewährleisten.

Um das Verhalten der Materialien, insbesondere der mehrlagigen Zwischenschicht, zu bewerten, wurden einachsige Zugversuche gemäß DIN EN ISO 527-1 [8] durchgeführt. Eine genaue Beschreibung der Versuchsdurchführung, detaillierte Ergebnisse sowie weitere Untersuchungen der Materialien und des Verbundverhaltens werden in [9] erläutert.

Bild 3 zeigt das Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Zugversuche. Dargestellt ist eine repräsentative Kurve von vernetzter EVA-Folie (0,76 mm, dunkelblau), MPE-Folie (0,2 mm, grün) sowie einer mehrlagigen Zwischenschicht aus EVA und MPE (türkis). Die mehrlagige Folie besteht aus drei Lagen 0,38 mm EVA + 0,2 mm MPE + 0,38 mm EVA.

Die EVA-Folie zeigt einen langsamen Spannungsanstieg und eine hohe Bruchdehnung >600 %. Die MPE-Folie wie auch die mehrlagige Zwischenschicht haben eine deutliche Streckgrenze und je nach Folienaufbau eine Bruchdehnung im Bereich von 140 % bis 180 %. Im Vergleich zur reinen EVA-Folie ($16,26 \pm 1,22 \text{ N/mm}^2$) hat die MPE-Folie einen 100-fach höheren E-Modul von $1612,53 \pm 45,44 \text{ N/mm}^2$. Dadurch erhöht sich die Steifigkeit der mehrlagigen Verbundfolie deutlich, weshalb bei gleichen Belastungen geringere Verformungen auftreten. Versuche sind erforderlich, um festzustellen, ob die mehrlagige Zwischenschicht die Stoßfestigkeit und Restfestigkeit insbesondere bei dünnerem Glas erhöhen kann.

2.2 Methode

Um die Stoßfestigkeit zu ermitteln, wurden Kugelfallversuche gemäß DIN EN 14449 Anhang C.2 [6] durchgeführt. Die Verbundglasscheiben liegen hierbei auf einem Stahlrahmen mit Elastomerstreifen und werden durch einen 7 kg schweren aufgelegten Rahmen gehalten. Eine Stahlkugel (1,03 kg) wird aus einer festgelegten Höhe mittig auf die Glasscheibe fallen gelassen (Bild 4). Die Versuche werden bei Raumtemperatur ($23 \pm 1^\circ \text{C}$) durchgeführt, nachdem die Proben 24 h vorher in einem Klimaraum bei 23°C gelagert wurden. Der Test gilt als bestanden, wenn die Kugel die Scheibe nach dem Auftreffen nicht durchdringt. DIN EN 14449 [6] fordert keine Bestimmung der Masse der herabfallenden Bruchstücke. Die Bewertung der Gefährdung durch Glassplitter erfolgte daher rein optisch. Für zukünftige Versuche werden das Wiegen der Bruchstücke und die Bestimmung der maximalen Abmessungen der Bruchstücke empfohlen.

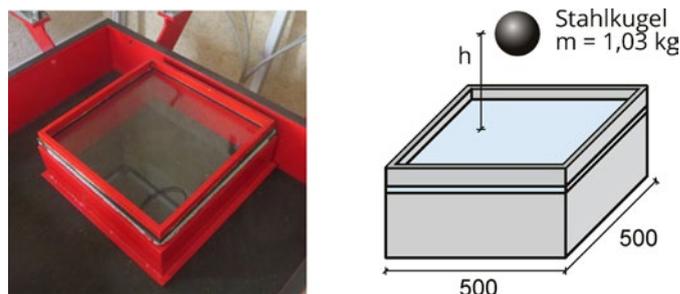


Bild 4 Versuchsaufbau und Abmessungen des Kugelfallversuchs (Quelle: Institut für Baukonstruktion)
Test setup and dimensions of the ball drop test

Als ein Beispiel für die praktische Bedeutung des Kugelfalltests sei auf die frühere Bauregelliste A Teil 1 [10] verwiesen, wo für einen Aufbau von 2×3 mm mit PVB eine Fallhöhe (Abwurfhöhe) von 4m gefordert wurde. Auch wenn diese nicht mehr gültig ist, orientieren sich Hersteller in werkeigenen Produktionskontrollen noch an dieser Fallhöhe. Das Ziel dieser Untersuchung war es, die maximal mögliche Fallhöhe für Verbundglas unterschiedlicher Dicke zu ermitteln, um die Gewichtseinsparung bei gleicher Stoßfestigkeit zu bestimmen. Daher wurde ein abweichender Ansatz mit variierender Fallhöhe gewählt. Wenn ein Prüfkörper nicht versagt, wird der nächste mit größerer Fallhöhe getestet, wobei nur ganze Meter geprüft werden. Die Höhe der Kugelfallanlage beträgt 12m. Die maximale Fallhöhe ist die Höhe, bei der bei keinem Prüfkörper der Prüfreihe Versagen auftrat. Nach DIN 52338 [11] werden mindestens fünf Prüfkörper bei gleicher Höhe geprüft. Bei einigen Prüfreiheiten war dies aufgrund der begrenzten Prüfkörperanzahl nicht möglich. Die Zahl der Prüfkörper, die bei maximaler Fallhöhe geprüft wurden, ist in Tab. 1 angegeben.

2.3 Ergebnisse

Eine Übersicht über alle Prüfreiheiten sowie die erreichte Fallhöhe können Tab. 1 entnommen werden.

2.3.1 Einfluss der Glas- und Zwischenschichtdicke

Zur Untersuchung des Einflusses der Glasdicke wurden Prüfkörper mit 2×2, 2×6, 2×8 und 2×12 mm verwendet. Zusätzlich wurden zwei Zwischenschichtdicken 0,76 mm und 1,52 mm betrachtet. Der Aufbau 2.0,76 erreichte eine maximale Fallhöhe von 2m, der Aufbau 6.0,76 eine Fallhöhe von 6m. Die maximale Kugelfallhöhe ist, wie erwartet, deutlich von der Glasdicke abhängig. Die Erhöhung der Foliendicke von 0,76 mm auf 1,52 mm führte bei einem Aufbau mit 2×2 mm und 2×6 mm zu einer Ver-

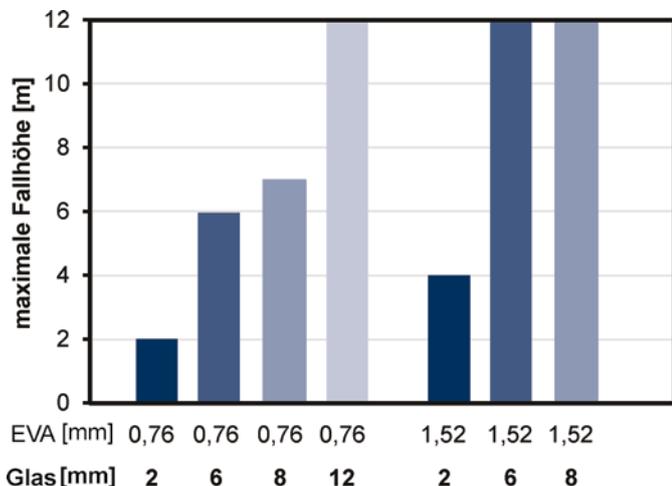


Bild 5 Maximale Fallhöhe für Prüfkörper mit unterschiedlichen Glasdicken und Zwischenschichtdicken (Quelle: Institut für Baukonstruktion)
Maximum drop height for specimens with different glass and interlayer thicknesses

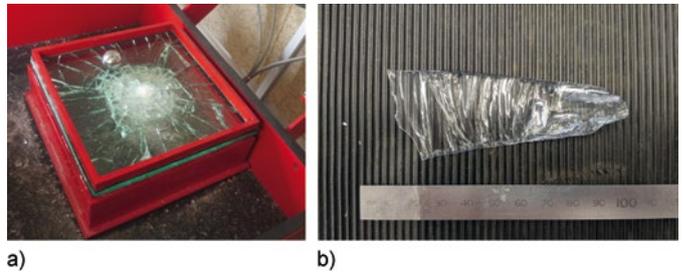


Bild 6 a) Bruchbild eines Prüfkörpers mit dem Aufbau 12,0,76 bei einer Fallhöhe von 12m, b) Bruchstück mit einer Länge von ca. 9cm aus der unteren Glasscheibe dieses Prüfkörpers (Quelle: Institut für Baukonstruktion)
a) Fracture pattern of a test specimen 12,0,76 glass after a drop height of 12m, b) fragment with a length of approx. 9cm, detached from the lower pane of this test specimen

dopplung der Fallhöhe (Bild 5). Dies belegt die Funktion der Zwischenschicht.

Dickere Gläser und Zwischenschichten erreichen eine Fallhöhe von 12m. Allerdings können sich auf der stoßabgewandten Seite bis zu 9cm große, spitze Glasbruchstücke herauslösen, wobei Glasbruch innerhalb der Glasscheibendicke und nicht durch Delamination zur Zwischenschicht entsteht (Bild 6). Diese Bruchstücke stellen ein Sicherheitsrisiko dar.

2.3.2 Einfluss der Glasart und Zwischenschichtdicke

Um den Einfluss unterschiedlicher Glasarten auf die maximale Fallhöhe und das Bruchbild zu untersuchen, wurden für den Aufbau von 2×6 mm Scheiben aus Floatglas und TVG untersucht (Bild 7). Für eine Zwischenschichtdicke von 0,76 mm EVA-Folie beträgt die maximale Fallhöhe für die Prüfkörper aus Floatglas 6m, der gleiche Aufbau mit TVG erreicht 9m. Die Fallhöhe wird somit, wie aufgrund der höheren Glasfestigkeit erwartet, durch

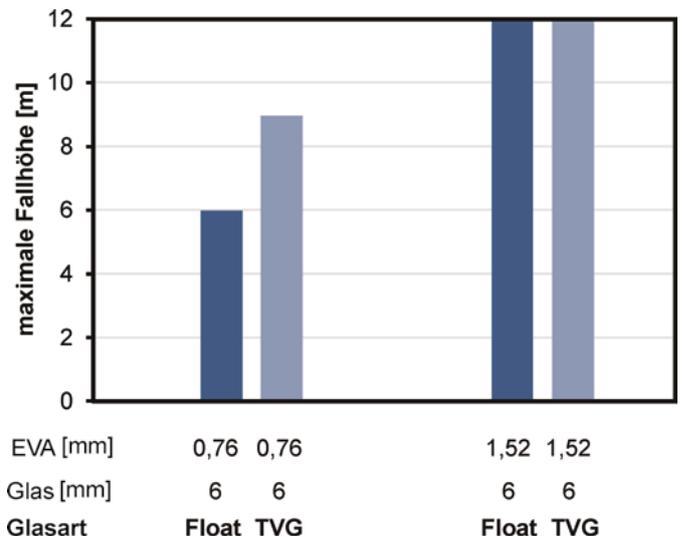


Bild 7 Maximale Fallhöhe für Prüfkörper aus 2×6 mm Scheiben aus Floatglas und TVG und unterschiedlichen Zwischenschichtdicken (Quelle: Institut für Baukonstruktion)
Maximum drop height for test specimens made of 2×6 mm panes of float glass and TVG and different interlayer thicknesses

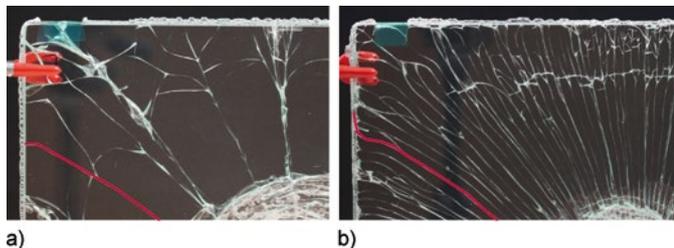


Bild 8 Bruchbild von a) Floatglas (Aufbau 6.0,76, Fallhöhe = 6 m) im Vergleich zu b) TVG (Aufbau 6.0,76, Fallhöhe = 8 m) (Quelle: Institut für Baukonstruktion)
Fracture pattern 6.0,76 of a) float glass (drop height = 6 m) and b) toughened glass (drop height = 8 m)

die Verwendung von TVG verbessert. Bei einer Foliendicke von 1,52 mm erreichen beide Aufbauten 12 m.

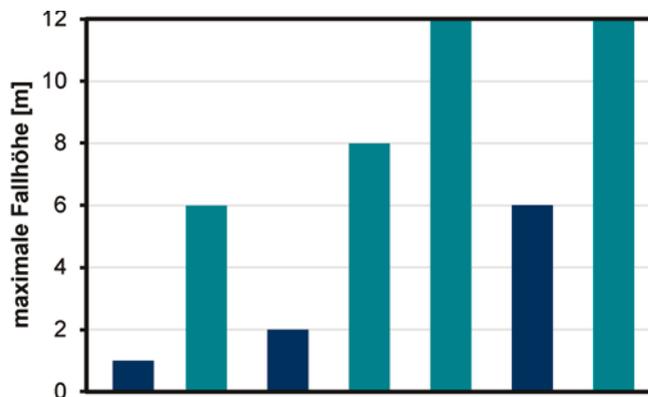
Die Bruchbilder zeigen für die jeweilige Glasart typische Muster. Bei TVG (Bild 8b) entstehen im Vergleich zu Floatglasscheiben (Bild 8a) schmale, lang gestreckte Bruchstücke. An den Rändern ändert der Riss TVG-typisch die Richtung und läuft parallel zur Glaskante aus.

Im Auftreffbereich treten Ausmuschelungen im Glas und nicht wie erwartet Delamination zwischen Glas und Zwischenschicht auf. Dieses Phänomen ist in geringerem Ausmaß auch bei dickeren Floatglasscheiben sichtbar (Bild 9).

Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass in Bezug auf die Stoßfestigkeit eine Verdopplung der Zwischenschichtdicke der Verwendung von TVG vorzuziehen ist. Durch die Erhöhung der Zwischenschicht werden ein größerer Einfluss auf die Fallhöhe und ein sichereres Bruchbild erreicht.



Bild 9 Versagen innerhalb der oberen Glasscheibe eines TVG (Aufbau 6.0,76.T, Fallhöhe = 8 m) (Quelle: Institut für Baukonstruktion)
Failure within the upper TVG pane 6.0,76.T (drop height = 8 m)



EVA [mm]	0,38	0,40	0,76	0,76	0,76	1,52	1,52
MPE[mm]	-	0,20	-	0,20	0,40	-	0,20
Glas [mm]	2	2	2	2	2	2	2

Bild 10 Maximale Fallhöhe für Prüfkörper aus 2x2mm Floatglas und unterschiedlichen Zwischenschichten (Quelle: Institut für Baukonstruktion)
Maximum drop height for test specimens made of 2x2mm float glass and different interlayers

2.3.3 Einfluss der mehrlagigen Zwischenschicht

Der Einfluss mehrlagiger Zwischenschichten wurde an Prüfkörpern aus 2x2 mm Glas mit EVA- sowie mehrlagigen EVA-MPE-Schichten untersucht (Bild 10). Eine größere Zwischenschichtdicke erhöht die maximale Fallhöhe. Der Aufbau 2.0,38 erreicht 1 m, der Aufbau 2.1,52 hingegen 6 m.

Die Fallhöhe von 6 m wird auch mit einem Aufbau 2.0,4_MPE0,2 (Gesamtfoliendicke = 0,6 mm) erreicht. Ein Aufbau 2.0,76 mit vergleichbarer Zwischenschichtdicke erreicht lediglich eine Fallhöhe von 2 m. Die Integration der MPE-Folie ermöglicht eine deutliche Steigerung der Fallhöhe, ohne die Gesamtfoliendicke zu erhöhen.

Bei allen Versuchen bricht sowohl die obere als auch die untere Glasscheibe überwiegend mit einem ringförmigen Rissmuster. Bei größeren Fallhöhen lösen sich aufgrund der höheren Aufprallenergie kleine Bruchstücke (<1 cm) durch Ausmuschelungen ab. Sichtbare Delaminationen zwischen EVA und Glas sind nicht vorhanden.

Aufbauten 2.076 nur mit EVA versagen bei geringen Fallhöhen aufgrund des Reißens der Folie (Bild 11). Dagegen ermöglicht der Aufbau 2.076_MPE0,2 mit einer mehrlagigen Zwischenschicht deutlich größere Fallhöhen. Dies deutet darauf hin, dass die im Zugversuch gemessene geringere Bruchdehnung im Vergleich zu reinem EVA nicht das ausschlaggebende Versagenskriterium ist.

Die Versuche mit der mehrlagigen Zwischenschicht wurden bisher nur bei Raumtemperatur durchgeführt. In der Fassade kommt es jedoch zu Temperaturunterschieden von -20°C und 80°C. Versuche an Standardfolien (PVB, SGP) zeigen eine deutliche Temperaturabhängigkeit bei Stoßversuchen. Niedrige Temperaturen führen zum Ver-

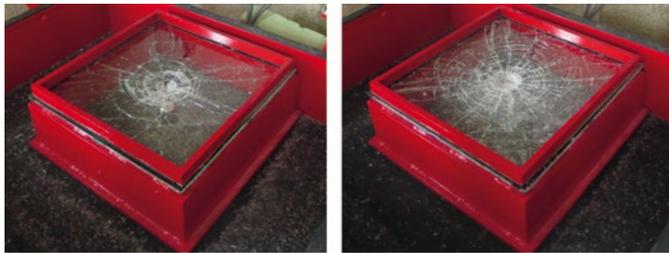


Bild 11 Bruchbild von 2×2 mm Glas: a) nicht bestandener Versuch mit EVA-Folie (Aufbau 2,0,76, Fallhöhe = 3 m), b) bestandener Versuch mit mehrlagiger Zwischenschicht (Aufbau 2,0,76_MPE0,2, Fallhöhe = 8 m) (Quelle: Institut für Baukonstruktion)
Fracture pattern of 2×2 mm glass: a) failed test with EVA interlayer 2,0,76 (drop height = 3 m), b) passed test with multi-layer interlayer 2,0,76_MPE0,2 (drop height = 8 m)

steifen der Folie und damit zu sprödem Versagen. Bei hohen Temperaturen sinkt die Festigkeit, wodurch die Zwischenschicht reißt [12]. Die Glasübergangstemperatur von MPE liegt bei $>100^{\circ}\text{C}$ und damit außerhalb des im Bauwesen relevanten Temperaturbereichs [9], wodurch eine geringere Temperaturabhängigkeit in den Kugelfallversuchen erwartet wird. Zur Überprüfung dieser Annahme sollten weitere Versuche bei variierten Temperaturen durchgeführt werden.

3 Diskussion Gewichtseinsparung

Unterschiedliche Faktoren beeinflussen die maximale Fallhöhe und sind Stellschrauben für eine Gewichtseinsparung. Zur Berechnung der Gewichtseinsparung wird eine Glasgewicht von $2,5\text{ kg/m}^2$ pro mm Glasdicke angesetzt. Für die EVA-Folie wird eine Dichte von $0,95\text{ g/cm}^3$ [13] und für die MPE-Folie von $1,2\text{ g/cm}^3$ [14] angenommen.

Im Aufbau 12,0,76 ist eine Fallhöhe bis 12 m möglich, wobei das Bruchbild kritisch ist. Teilweise lösen sich große Glasbruchstücke von der unteren Scheibe. Die Verwendung von TVG führt zu einer Verbesserung der maximalen Fallhöhe, allerdings zeigt das Bruchbild eine verringerte Reststeifigkeit, weshalb Aufbauten mit TVG nicht weiter berücksichtigt wurden.

Einen größeren Einfluss auf die Fallhöhe hat die Verdopplung der Dicke der EVA-Verbundfolie von 0,76 mm

Literatur

- [1] Zhang, X. et al. (2020) *Impact response of laminated glass with varying interlayer materials*. International Journal of Impact Engineering 139, 103505. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2020.103505>
- [2] Hála, P.; Zemanová, A.; Zeman, J.; Šejnoha, M. (2023) *Numerical study on failure of laminated glass subjected to low-velocity impact*. Glass Struct Eng 8, pp. 99–117. <https://doi.org/10.1007/s40940-022-00210-z>
- [3] Zhang, X.; Hao, H.; Ma, G. (2015) *Dynamic material model of annealed soda-lime glass*. International Journal of Impact Engineering 77, pp. 108–119. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2014.11.016>
- [4] Schneider, J.; Kuntsche, J.; Schula, S.; Schneider, F.; Wörner, J.-D. (2016) *Glasbau: Grundlagen, Berechnung, Konstruktion*. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer.
- [5] DIN EN 12600:2003-04 (2003) *Glas im Bauwesen – Pendelschlagversuch – Verfahren für die Stoßprüfung und Klassifizierung von Flachglas* (EN 12600:2002). Berlin: Beuth. Ausgabe April 2003.

auf 1,52 mm. Der Aufbau 6,1,52 (7,7 kg) erreicht die gleiche Fallhöhe wie der Aufbau 12,0,76 (15,2 kg). Dies entspricht einer Gewichtseinsparung von 48,2 % bei gleichzeitig sichererem Bruchbild mit kleineren Bruchstücken.

Bei einer 2 × 2 mm Verbundglasscheibe werden mit einer Zwischenschicht aus EVA-Verbundfolie im Vergleich zu dickeren Scheiben nur geringe Fallhöhen erreicht. Deshalb wurde hier zusätzlich der Einfluss mehrlagiger Zwischenschichten mit einer steiferen MPE-Folie untersucht. Mit dem Aufbau 2,0,76_MPE0,4 (2,8 kg) wird die gleiche Fallhöhe (12 m) erreicht wie mit dem Aufbau 6,1,52 (7,9 kg). Die Gewichtseinsparung beträgt 64,4 %.

4 Zusammenfassung

Dieser Beitrag diskutiert den Einfluss unterschiedlicher Verbundglasaufbauten auf den Widerstand gegenüber stoßartigen Einwirkungen. Das Ziel der Untersuchungen war die Ermittlung von Möglichkeiten zur Reduzierung des Gewichts von VSG bei gleichbleibender Stoßfestigkeit. Hierfür wurden Kugelfallversuche (DIN EN 14449 [6]) durchgeführt und die maximale Fallhöhe sowie das Bruchbild aufgenommen. Dabei wurden unterschiedliche Glasdicken, -arten sowie ein- und mehrlagige Zwischenschichten aus EVA mit einer steifen MPE-Folie untersucht. Vor allem die Integration steiferer MPE-Folien führt zu einer signifikanten Steigerung der maximalen Fallhöhe. Eine Verringerung des Scheibengewichts von bis zu 64,4 % ist möglich, ohne die Dicke der Zwischenschicht zu erhöhen. Der Vergleich zeigt deutlich die Relevanz der Verbundfolie bei stoßartigen Einwirkungen. Ein weiterer Vorteil der dünnen Scheiben sind die kleineren Glasbruchstücke, die sich an der unteren Glasscheibe ablösen.

Um weiter Gewicht einzusparen, ist der Einsatz von chemisch vorgespanntem Glas (CVG) mit hoher Festigkeit und Dicken unterhalb 2 mm interessant. Besonders asymmetrische Glasaufbauten aus dünnem CVG und dickerer Floatglasscheibe eröffnen neue Potenziale für Anwendungen, die eine höhere Steifigkeit und Stoßsicherheit erfordern. Im Automobilbau wurden mit solchen asymmetrischen Aufbauten bereits vielversprechende Ergebnisse erzielt [15].

- [6] DIN EN 14449:2017-12 (2017) *Glas im Bauwesen – Verbundglas und Verbund-Sicherheitsglas – Produktnorm* (prEN 14449:2017). Entwurf. Berlin: Beuth. Ausgabe Dezember 2017.
- [7] Bornemann, S.; Thavayogarah, N.; Riedel, K. (2021) *Untersuchung zur Vernetzung von EVA-basierter Verbundfolien und daraus resultierender Eigenschaften*. ce/papers 4, H. 5, Special Issue: Glasbau 2021, S. 379–392. <https://doi.org/10.1002/cepa.1620>
- [8] DIN EN ISO 527-1:2019-12 (2019) *Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften – Teil 1: Allgemeine Grundsätze* (ISO 527-1:2019). Berlin: Beuth. Ausgabe Dezember 2019.
- [9] Fleckenstein, E.; Bornemann, S.; Salam, M. A.; Weiß, J.; Engelmann, M. (2024) *Influence of a multilayer interlayer with a stiff core on the performance of laminated glass*. Glass Struct Eng 9, No. 2, pp. 251–264. <https://doi.org/10.1007/s40940-024-00262-3>
- [10] Deutsches Institut für Bautechnik (2015) *Bauregelliste A, Bauregelliste B und Liste C*. Berlin: DIBt.
- [11] DIN 52338:2016-10 (2016) *Prüfverfahren für Flachglas im Bauwesen – Kugelfallversuch für Verbundglas*. Berlin: Beuth. Ausgabe Oktober 2016.
- [12] Zhang, X. et al. (2019) *Temperature effects on the low velocity impact response of laminated glass with different types of interlayer materials*. International Journal of Impact Engineering 124, pp. 9–22. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2018.09.004>
- [13] Folienwerk Wolfen (2024) *Technical data sheet evguard® colorless transparent*.
- [14] Folienwerk Wolfen (2020) *Technical data sheet evguard® MPE*.
- [15] Leonhard, T.; Cleary, T.; Moore, M.; Seyler, S.; Fisher, W. K. (2015) *Novel Lightweight Laminate Concept with Ultrathin Chemically Strengthened Glass for Automotive Windshields*. SAE Int. J. Passeng. Cars – Mech. Syst. 8, No. 1, pp. 95–103. <https://doi.org/10.4271/2015-01-1376>

Autor:innen

Dr. Steffen Bornemann
steffen.bornemann@folienwerk-wolfen.de
Folienwerk Wolfen GmbH
Guardianstraße 4
06766 Bitterfeld-Wolfen

M. Abdus Salam
abdus.salam@folienwerk-wolfen.de
Folienwerk Wolfen GmbH
Guardianstraße 4
06766 Bitterfeld-Wolfen

Dipl.-Ing. Elena Fleckenstein (Korrespondenzautor:in)
elena.fleckenstein@tu-dresden.de
Technische Universität Dresden
Institut für Baukonstruktion
August-Bebel-Straße 30
01219 Dresden

Prof. Dr.-Ing. Michael Engelmann
michael.engelmann@tu-dresden.de
Technische Universität Dresden
Institut für Baukonstruktion
August-Bebel-Straße 30
01219 Dresden

Zitieren Sie diesen Beitrag

Bornemann, S.; Salam, M. A.; Fleckenstein, E.; Engelmann, M. (2025) *Gewichtsreduzierung von VSG durch Dünnglas bei gleichbleibender Stoßfestigkeit*. Stahlbau 94, Sonderheft Glasbau & Fassade, Ausgabe 1, S. 41–47. <https://doi.org/10.1002/stab.202400081>