

BBSR-
Online-Publikation
79/2024

Vakuum-Isolierglas mit Sicherheitsanforderungen

von

Prof. Dr. Thorsten Weimar
Christian Hammer
Henrik Reißaus
Christoph Hahn

Vakuum-Isolierglas mit Sicherheitsanforderungen

Entwicklung von Vakuum-Isolierglas mit passiven und aktiven
Sicherheitsanforderungen

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wohnen, Stadtentwicklung
und Bauwesen

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

ZUKUNFT BAU
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.

Aktenzeichen: 10.08.18.7-21.14

Projektlaufzeit: 07.2021 bis 08.2023

IMPRESSUM

Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)
Deichmanns Aue 31–37
53179 Bonn

Fachbetreuer

Dr.-Ing. Michael Brüggemann, Brüggemann Kisseler Ingenieure
im Auftrag des BBSR, Referat WB 3 „Forschung und Innovation im Bauwesen“
zb@bbr.bund.de

Autoren

Universität Siegen, Lehrstuhl für Tragkonstruktion
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thorsten Weimar (Projektleitung)
Christian Hammer, M. Eng.
Henrik Reißaus, M. Sc.
tragkonstruktion@architektur.uni-siegen.de

SiLATEC Sicherheits- und Laminatglastechnik GmbH
Dipl.-Ing. (FH) Christoph Hahn
office@silatec.de

Redaktion

Universität Siegen, Lehrstuhl für Tragkonstruktion

Stand

August 2023

Gestaltung

Universität Siegen, Lehrstuhl für Tragkonstruktion

Bildnachweis

Titelbild: Henrik Reißaus

Alle weiteren Bilder sind Fotos und Zeichnungen der Autoren. Zeichnungen in Anlehnung an Bilder aus anderen Quellen werden in der Bildbeschreibung entsprechend gekennzeichnet.

Vervielfältigung

Alle Rechte vorbehalten

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

Zitierweise

Weimar, Thorsten; Hammer, Christian; Reißaus, Henrik; Hahn, Christoph, 2024: Vakuum-Isolierglas mit Sicherheitsanforderungen: Entwicklung von Vakuum-Isolierglas mit passiven und aktiven Sicherheitsanforderungen. BBSR-Online-Publikation 79/2024, Bonn.

Inhalt

| | |
|---|----|
| Kurzfassung | 3 |
| Abstract | 5 |
| 1 Einleitung | 7 |
| 2 Anwendungen und Anforderungen | 10 |
| 2.1 Anwendungen und Einsatzgebiete | 10 |
| 2.2 Anforderungen und Beanspruchungen | 11 |
| 3 Materialauswahl | 14 |
| 3.1 Vakuum-Isolierglas | 14 |
| 3.2 Dünnglas und Polycarbonat | 15 |
| 3.3 Zwischenschichten | 17 |
| 4 Querschnittsaufbau und Verbundwirkung | 18 |
| 4.1 Versuchsplanung und Querschnittsaufbau | 18 |
| 4.2 Herstellung von Prüfkörpern | 20 |
| 4.2.1 Prüfkörper aus Zwischenschichtmaterial | 20 |
| 4.2.2 Prüfkörper aus Glas-Kunststoffverbund | 21 |
| 4.2.2 Prüfkörper aus Vakuum-Isolierglas-Kunststoffverbund | 22 |
| 4.3 Untersuchung des Zwischenschichtmaterials und der Verbundwirkung | 23 |
| 4.3.1 Zugversuch | 23 |
| 4.3.2 Dynamisch-mechanisch-thermische Analyse | 34 |
| 4.3.3 Untersuchung zum Haftverbund | 40 |
| 4.3.4 Untersuchung der Beständigkeit | 50 |
| 5 Querschnittsaufbau für Trag- und Resttragverhalten sowie Zusatzanforderungen | 52 |
| 5.1 Querschnittsaufbau | 52 |
| 5.3 Untersuchung der Zusatzanforderungen | 61 |
| 5.3.1 Pendelschlagversuch | 61 |
| 5.3.2 Untersuchung der Angriffshemmung | 77 |
| 5.3.3 Messung des Luftschalldämmmaßes | 81 |
| 5.3.4 Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten | 84 |
| 5.3.5 Messung der spektralen Kenngrößen | 86 |
| 5.4 Untersuchung des Tragverhaltens | 88 |

| | | |
|-----|---|-----|
| 5.5 | Untersuchung des Resttragverhaltens | 94 |
| 6 | Herstellungsverfahren | 103 |
| 6.1 | Definition der Prozessparameter | 103 |
| 6.2 | Entwicklung der Prozesskette | 104 |
| 6.3 | Entwicklung eines Rezyklierungsverfahrens | 105 |
| 7 | Prototyp | 108 |
| 7.1 | Planung und Konstruktion | 108 |
| 7.2 | Berechnung und Bemessung | 108 |
| 7.3 | Herstellung und Präsentation | 110 |
| 8 | Zusammenfassung | 111 |
| 9 | Literatur | 113 |
| 9.1 | Fachbücher und Fachaufsätze | 113 |
| 9.2 | Normen, Richtlinien und Verordnungen | 114 |
| 9.3 | Datenblätter | 117 |
| 9.4 | Internet | 117 |

Kurzfassung

Glas ist einer der wichtigsten Baustoffe in der Gestaltung moderner Bauwerke. Die hohe Transparenz und die damit assoziierte Leichtigkeit begründen diese Entwicklung. Neben der Belichtung und dem Raumabschluss erfüllen Verglasungen heute zahlreiche weitere Aufgaben. Nationale und internationale Klimaschutzziele erfordern insbesondere im Bauwesen eine deutliche Einsparung von Energie, die einen hohen Wärmeschutz voraussetzt. Bei Verglasungen wachsen durch das gesteigerte Sicherheitsbedürfnis der Gebäudenutzer die Anforderungen an die passive und aktive Sicherheit sowie den Schallschutz. Die Kombination von hochwärmedämmendem Vakuum-Isolierglas mit leistungsfähigen Zwischenschichten und schlagzähem Polycarbonat führt zu neuartigen Verbundgläsern, die höchsten Anforderungen entsprechen.

Grundlage der Entwicklung von Vakuum-Isolierglas mit passiven und aktiven Sicherheitsanforderungen bildet die Charakterisierung von Anforderungen und Anwendungsmöglichkeiten. Auf Basis der ermittelten Einwirkungen erfolgt die Auswahl der einzelnen Materialkomponenten unter Berücksichtigung wirtschaftlicher und technischer Randbedingungen sowie die Entwicklung von zwei Varianten für den Querschnitt. Variante 1 besteht aus zwei äußeren Dünnglastafeln und einem mittig angeordneten Vakuum-Isolierglas als Halbzeug. Zwischen diesen Schichten sind Polycarbonatplatten mit Zwischenschichten aus dem thermoplastischen Polyurethan PU1 mit einer Nenndicke von 2 mm angeordnet. Die ebenfalls symmetrische Variante 2 verzichtet auf Polycarbonatplatten, indem die Schlagzähigkeit durch Zwischenschichten mit einer Nenndicke von 6 mm aus dem steiferen thermoplastischen Polyurethan PU2 erreicht wird. Die Materialeigenschaften des spröden und harten Dünnglases sowie des Vakuum-Isolierglases ergänzen sich mit der Schlagzähigkeit des Polycarbonats beziehungsweise der steiferen Zwischenschicht zu einem leistungsfähigen Verbundsicherheitsglas mit hohen Anforderungen an die passive und die aktive Sicherheit sowie den Wärme- und den Schallschutz.

Nach der Vordimensionierung durch die Simulation mit numerischer Berechnung schließen sich Versuche zur Bestimmung physikalischer, mechanischer und optischer Eigenschaften an. Mit dem Kugelfallversuch wird ein günstiger Haftverbund zwischen den einzelnen Schichten beider Varianten nachgewiesen. Im Versuch liegt bei keinem der Prüfkörper ein Splitterabgang vor. Im Pendelschlagversuch erfolgt die Untersuchung des Bruchverhaltens zum weiteren Nachweis der mechanischen Beständigkeit als Eigenschaft von Verbundsicherheitsglas. Beide Varianten werden bis zur höchsten Fallhöhe von 1.200 mm vom Stoßkörper nicht durchschlagen und es fallen keine Splittermengen an, die Personen gefährden könnten.

In der Fassade eines Gebäudes ist das Vakuum-Isolierglas mit passiven und aktiven Sicherheitsanforderungen permanent der Witterung sowie klimatischen Einflüssen ausgesetzt. Im Versuch erfolgt daher die Untersuchung der Prüfkörper bei hoher Temperatur, in der Feuchte und unter Bestrahlung. Im Ergebnis weisen die Prüfkörper keine Blasen, Delaminationen oder Trübungen auf. Die Transmission im sichtbaren Spektralbereich ist vor und nach der Prüfung unter Bestrahlung sehr hoch sowie der erforderliche Schutz des Polycarbonats vor ultravioletter Strahlung durch die Zwischenschicht aus Polyurethan gegeben. Die Resttragfähigkeit beider Varianten wird mit geeigneten Prüfkörpern untersucht und ist unter den definierten Lasten über 24 h unter nur geringer Verformungen gegeben.

Vakuum-Isolierglas weist mit einem Wärmedurchgangskoeffizienten von $0,7 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ bereits sehr günstige Wärmedämmeigenschaften auf, die durch die Ergänzung um das Polycarbonat und die Zwischenschichten geringfügig verbessert werden. Eine Erhöhung des bewerteten Schalldämmmaßes R_w um etwa 10 dB erfolgt durch die Erweiterung des Vakuum-Isolierglases zu Variante 1. Eine Erhöhung des Schallpegels um etwa 10 dB wird vom menschlichen Gehör etwa als eine Verdopplung der Lautstärke wahrgenommen. Variante 2 erhöht das bewertete Schalldämmmaß des Vakuum-Isolierglases von 35 dB auf etwa 40 dB.

Der Nachweis der Anforderungen an die aktive Sicherheit der Verglasung erfolgt durch die Prüfung mit der Axt. Der Widerstand gegen manuellen Angriff wird bei dem Versuch durch die Einwirkung einer mechanisch geführten Axt normgerecht nachgebildet. Beide Varianten bestehen die Prüfung mit der Axt mit einer Gesamtschlaganzahl von über 72 Schlägen und erreichen damit die höchste Widerstandsklasse P8B gegen manuellen Angriff.

Insgesamt zeigen die Forschungsergebnisse das Potential von Vakuum-Isolierglas mit passiven und aktiven Sicherheitsanforderungen. Die Ergänzung des Vakuum-Isolierglases als Halbzeug um weitere Schichten wirkt sich günstig auf den Wärmeschutz, den Schallschutz und die Sicherheit aus. Bei vergleichbarem Wärmeschutz liegt die Nennstärke des Aufbaus bis zu 50 % unter der von angriffhemmenden Dreischeiben-Isoliergläsern und beeinflusst die Dimensionierung von Rahmenkonstruktionen durch das bis zu 25 % niedrigere Eigengewicht positiv. Zusätzlich wird bei höchsten Anforderungen an die Einbruchsicherheit auch der Schallschutz der Verglasung erhöht.

Abstract

Glass is one of the most important building materials in the design of modern buildings, because of its transparency and the lightness associated with it. In addition to providing light and closing off rooms, glazing today fulfils numerous other tasks. National and international climate change objectives require significant energy savings, particularly in the construction industry, which requires a high level of thermal insulation. In the case of glazing, the requirements for passive and active safety and sound insulation are growing due to the increased safety needs of building users. The combination of highly thermally insulating vacuum insulating glass with high-performance interlayers and impact-resistant polycarbonate results in new types of laminated glass that meet the highest requirements.

The basis for development of vacuum insulating glass with passive and active safety requirements is the characterisation of requirements and possible applications. The individual material components are selected on the basis of the determined effects, taking into account economic and technical boundary conditions, and two construction variants are developed. Variant 1 consists of two outer thin glass sheets and a vacuum insulating glass in the centre as a semi-finished product. Polycarbonate sheets with intermediate layers of the thermoplastic polyurethane PU1 with a nominal thickness of 2 mm are arranged between these layers. The likewise symmetrical variant 2 dispenses with polycarbonate sheets by achieving the impact resistance through 6 mm thick interlayers of the rigid material PU2. The material properties of the brittle and hard thin glass and the vacuum insulating glass complement each other with the impact resistance of polycarbonate and the rigid interlayer material to form a high-performance laminated safety glass with high requirements for passive and active safety as well as thermal and sound insulation.

After pre-dimensioning using numerical simulation, tests are carried out to determine the physical, mechanical and optical properties. The steel ball drop test demonstrates a favourable adhesive bond between the layers of both construction variants. In the test, none of the test specimens exhibited splintering. The fracture behaviour is examined in the pendulum impact test to demonstrate the mechanical resistance as a property of laminated safety glass. Both variants will not be penetrated by the impact body up to the highest fall height of 1,200 mm and there will be no amounts of splinters that could endanger people.

In the façade of a building, the vacuum insulating glass with passive and active safety requirements is permanently exposed to the weather and climatic influences. In the test, these effects are simulated by test-

ing the specimens at high temperatures, in damp conditions and under irradiation. As a result, the test specimens show no bubbles, delamination or clouding. Transmission in the visible spectral range is very high before as well as after testing and the polycarbonate is protected from ultraviolet radiation by the interlayer. The residual load-bearing capacity of both superstructure variants is analysed by suitable test specimen. Both construction variants withstand the load for 24 h and show little deformation.

With a heat transfer coefficient of $0.7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, vacuum insulating glass already has favourable thermal insulation properties, which are slightly improved by the addition of polycarbonate and the interlayer material. The weighted sound reduction index R_w is increased by around 10 dB by adding the vacuum insulating glass to variant 1. An increase in the sound level of around 10 dB is perceived by the human ear as a doubling of the volume. Variant 2 increases the assessed sound reduction index of the vacuum insulating glass from 35 dB to around 40 dB.

Proof of requirements for active safety of the glazing is provided by testing with an axe. The manual break-in test is simulated in accordance with the standard by the effect of a mechanically guided axe. Both body variants pass the test with the axe with a total number of blows of over 72 and achieve the highest resistance class P8B against manual attack.

Overall, the research results emphasise the potential of vacuum insulating glass with passive and active safety requirements. The addition of further layers to the vacuum insulating glass as a semi-finished product has a favourable effect on thermal insulation, sound insulation and safety. With comparable thermal insulation, the thickness of the structure is up to 50 % less than that of comparable triple-pane insulating glass and has a positive influence on the dimensioning of frames and substructures due to up to 25 % lower dead load. In addition, the sound insulation of the glazing is increased to meet the highest requirements for burglar resistance.

1 Einleitung

Mit der Änderung des Klimaschutzgesetzes von 2021 verschärft die Bundesregierung die Anforderungen an den Klimaschutz, insbesondere durch die Begrenzung von Treibhausgasemissionen. Bis 2045 soll in Deutschland eine Treibhausgasneutralität erreicht werden und die Emissionen bis 2030 bereits um 65 % im Vergleich zu 1990 sinken.¹ Nach der Energiewirtschaft, der Industrie und dem Verkehr verursacht der Gebäudesektor durch private Haushalte und Gebäude von Gewerbe, Handel und Dienstleistungen neben der Landwirtschaft mit etwa 15% am Gesamtaufkommen den drittgrößten Anteil am Kohlenstoffdioxid ausstoß in Deutschland.² Emissionen resultieren insbesondere aus der Beheizung von Gebäuden. Neben der Installation effizienter Gebäudetechnik ist die Reduzierung von Wärmeverlusten eine entscheidende Maßnahme zur Einsparung von Treibhausgasen. Die gesetzlichen Rahmenbedingungen zur Energieeinsparung bildet das Gebäudeenergiegesetz (GEG) ab, das Mindestanforderungen zur Ausführung der Gebäudehülle formuliert. Neben opaken Bauteilen der Gebäudefassade sind insbesondere Verglasungen wichtige Bauteile, die bei der Planung eines energieeffizienten Gebäudes berücksichtigt werden müssen. Gleichzeitig wachsen in Deutschland aufgrund der weltpolitischen Lage und der persönlichen Sicherheitsbedürfnisse von Bewohnern die Anforderungen an die Sicherheit von Bauteilen. Für den Schutz vor Einbrüchen in Bauwerke sind insbesondere sichere Verglasungen von entscheidender Bedeutung. Das spröde Materialverhalten von Glas ermöglicht allerdings bereits die Einwirkung von einem harten Gegenstand ohne weitere Werkzeuge die Zerstörung von Verglasungen.

Durchbruchhemmende Verglasungen erschweren den Einbruch, indem über einen längeren Zeitraum massive Gewalteinwirkung mit einer Axt erforderlich ist, um eine Öffnung zu schaffen. Die verwendeten Glasverbunde weisen allerdings nur geringe wärmedämmende Eigenschaften auf. Zur deutlichen Reduzierung der Wärmeverluste ist die Kombination mit Zwei- oder Dreischeiben-Isoliergläsern nötig. Die große Gesamtdicke dieser wärmedämmenden und durchbruchhemmenden Verglasungen führt zu einem hohen Gesamtgewicht, das entsprechend dimensionierte Rahmen und Beschläge erfordert und deren Verschleiß erhöht. Die Reduzierung der Gesamtdicke einer Verglasung bei gleichzeitiger Erhöhung von Schall- und Wärmeschutz unter Verwendung von Vakuum-Isolierglas stellt den Kern des Forschungsprojekts dar.

¹ Vergleiche Bundesregierung 2023.

² Vergleiche Umweltbundesamt 2023.

Das Ziel ist daher die Entwicklung von Vakuum-Isoliergläsern mit passiven und aktiven Sicherheitsanforderungen, um die aktuellen Anforderungen an den Wärmeschutz³ sowie an die Sicherheit als Sicherheitssonderverglasung⁴ oder Verbundsicherheitsglas⁵ zu erfüllen. Dazu ist das Vakuum-Isolierglas⁶ (VIG) entsprechend zu ergänzen, um eine Absturzsicherung⁷ als passive Sicherheit oder eine Angriffshemmung als aktive Sicherheit zu gewährleisten. Da Vakuum-Isolierglas ein sprödes Bruchverhalten⁸ aufweist und deshalb keine Resttragfähigkeit⁹ besitzt, sind zusätzliche Materialien zu verwenden, die neben einer Duktilität für das Bauteil auch eine Splitterbindung gewährleisten. Das Forschungsprojekt verfolgt daher den Ansatz, das Vakuum-Isolierglas als Halbzeug mit zusätzlichen Schichten zu einem Mehrschichtsystem weiterzuentwickeln, um die zusätzlichen Anforderungen an die aktive und die passive Sicherheit zu gewährleisten.

Vakuum-Isolierglas ist eine weitere Variante von Verglasungen mit hohem Wärmeschutz zu dem üblicherweise verwendeten Mehrscheiben-Isolierglas (MIG). Im Vergleich zum Dreischeiben- oder Vierscheiben-Isolierglas besitzt ein typisches Vakuum-Isolierglas zwei Glastafeln mit einer Nennstärke ab 4 mm. Der evakuierte Scheibenzwischenraum weist eine Breite von 0,1 mm auf, sodass sich eine Gesamtdicke von weniger als 8 mm ergibt. Neben dem dünnen Verglasungsaufbau ist auch das Flächengewicht deutlich reduziert.

Der Verbund von sprödem Flachglas¹⁰ mit duktilen, polymeren Werkstoffen, wie beispielsweise Polycarbonat¹¹ (PC), Polyvinylbutyral¹² (PVB), Ethylvinylacetat¹³ (EVA) oder thermoplastisches Polyurethan¹⁴ (TPU) erfolgt weitgehend mit üblichen Laminationsverfahren im Warmverbund mit dem Autoklavverfahren¹⁵ und dem Plattenverfahren oder im Kaltverbund mit dem Gießverfahren. Im Warmverbund wird die Lamination mehrerer Schichten nach dem Entlüften der Zwischenräume durch das gleichzeitige Wirken von Druck und Wärme hergestellt. Sowohl die Einwirkung von äußerem Druck als auch von Wärme können allerdings zu Schäden am Vakuum-Isolierglas führen. Durch

³ Vergleiche GEG 2022.

⁴ Vergleiche DIN EN 356.

⁵ Vergleiche DIN EN 14449.

⁶ Vergleiche Schneider 2016.

⁷ Vergleiche DIN 18008.

⁸ Vergleiche Rösler 2008.

⁹ Vergleiche DIN 18008-1 und 2.

¹⁰ Vergleiche DIN EN 571-1 und 2.

¹¹ Vergleiche DIN EN ISO 11963.

¹² Vergleiche Trosifol® 2017.

¹³ Vergleiche Pujol 2016.

¹⁴ Vergleiche Huntsman 2017.

¹⁵ Vergleiche Musgraves 2019.

die Evakuierung lastet ein atmosphärischer Druck in Höhe von ungefähr 1.020 hPa auf beiden Glastafeln, die durch Abstandhalter einen Spalt mit der Breite von weniger als 1 mm bilden. Zusätzlicher äußerer Druck könnte ein Glasbruch durch Spannungskonzentration um die Abstandhalter initiieren. Die Einwirkung durch Prozesswärme¹⁶ zum Aufschmelzen thermoplastischer Zwischenschichten im Temperaturbereich von +120 °C bis +150 °C bedeutet außerdem das Erweichen der Abstandhalter, falls diese aus Kunststoff bestehen, sowie die Verringerung des Zwischenraums bis zum Kontakt der Innenseiten der Glastafeln und die Beschädigung des Randverbunds. Die hermetische Versiegelung gegen das Eindringen von Gasen in den evakuierten Zwischenraum, der maßgeblich für die Leistungsfähigkeit des Vakuum-Isolierglases erforderlich ist, kann mit den üblichen Verbundverfahren nicht gewährleistet werden.

Da die genannten Verfahren zur Produktion von Verbundsicherheitsglas nicht anwendbar sind, erfolgt der Verbund im Kaltverbund mit dem Gießverfahren, das eine schadensfreie Lamination von Vakuum-Isolierglas zu einem Verbundsicherheitsglas ermöglicht. Das flüssige Material der Zwischenschicht aus einem thermoplastischen Polyurethan (TPU) wird zwischen das Vakuum-Isolierglas und zusätzliche Schichten aus Flachglas oder Polycarbonat gefüllt. Nach dem Aushärten sind die Schichten untereinander mit einem ausreichenden Haftverbund transparent und optisch fehlerfrei laminiert. Grundsätzlich sind zwei Varianten der Schichtung von Vakuum-Isolierglas mit weiteren Materialien zu untersuchen. Der Querschnitt von Variante 1 setzt sich aus dem Vakuum-Isolierglas sowie weiteren Schichten aus Dünnglas und Polycarbonat sowie einer polymeren Zwischenschicht mit niedriger Steifigkeit zusammen. Variante 2 beinhaltet das Vakuum-Isolierglas mit weiteren Schichten aus Dünnglas und einer polymeren Zwischenschicht mit höherer Steifigkeit.

Mit der Definition von Anwendungsgebieten ergeben sich die Anforderungen an das Verbundsicherheitsglas in Kapitel 2. Der Auswahl von Materialien in Kapitel 3 schließt sich die Festlegung von Mindestquerschnitten für die Verglasungsaufbauten in Kapitel 4 an, die zunächst in Versuchen zur Verbundwirkung untersucht werden. Kapitel 5 beinhaltet den Querschnittsaufbau für die Zusatzanforderungen sowie die Untersuchungen zum Trag- und Resttragverhalten. In Kapitel 6 ist die Weiterentwicklung des Herstellungsverfahrens vorgesehen, aus dem die Prozessparameter für die Herstellung des Prototyps in Kapitel 7 hervorgehen.

¹⁶ Vergleiche Musgraves 2019.

2 Anwendungen und Anforderungen

2.1 Anwendungen und Einsatzgebiete

Im Rahmen des Forschungsprojekts wird ein neuartiges Vakuum-Isolierglas entwickelt, das neben den aktuellen Vorgaben an den Wärmeschutz auch die hohen Anforderungen an die Angriffshemmung erfüllt. Aufgrund der steigenden Bedarfe durch das Gebäudeenergiegesetz (GEG) sind in der Fassade hochwärmedämmende Verglasungen einzusetzen.¹⁷ Der relevante Kennwert zur Bestimmung der Wärmedämmeigenschaften einer Verglasung ist der Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert). In Tabelle 1 ist die Entwicklung der Verglasungsaufbauten mit dem jeweiligen U-Wert und Nenndicke aufgeführt.

Der Wärmedurchgangskoeffizient von Vakuum-Isolierglas entspricht dem Wert von einem Dreischeiben-Isolierglas mit gasgefülltem Scheibenzwischenraum und einer Beschichtung auf einer außenliegenden Glastafel. Eine weitere Reduzierung des Wärmedurchgangskoeffizienten ist technisch möglich, nach aktuellem Kenntnisstand allerdings nicht wirtschaftlich. Das Vakuum im Scheibenzwischenraum ermöglicht eine deutlich geringere Gesamtdicke des Verglasungsaufbaus. Auch durch die zusätzlich applizierten Schichten für den Widerstand gegen manuellen Angriff sind die Verglasungen gegenüber konventionellen Lösungen noch deutlich schlanker. Durch die Kombination von Vakuum-Isolierglas mit Kunststoffen ergeben sich sehr schlanke und leichte angriffshemmende Verglasungen, die auch Vorteile beim Einbau mit deutlich schlankeren und leichteren Unterkonstruktion zeigen.

| Verglasung | Wärmedurchgangskoeffizient | Gesamtdicke |
|--|----------------------------|-------------|
| Einscheibenglas | 5,8 W/(m ² ·K) | 4 mm |
| Zweischeiben-Isolierglas (Luftfüllung) | 2,7 W/(m ² ·K) | 24 mm |
| Zweischeiben-Isolierglas (Edelgasfüllung) | 2,4 W/(m ² ·K) | 24 mm |
| Zweischeiben-Isolierglas (Edelgasfüllung und Beschichtung) | 1,2 W/(m ² ·K) | 22 mm |
| Dreischeiben-Isolierglas (Luftfüllung und Beschichtung) | 0,7 W/(m ² ·K) | 32 mm |
| Dreischeiben-Isolierglas (Edelgasfüllung) | 0,5 W/(m ² ·K) | 32 mm |
| Vakuum-Isolierglas | 0,7 W/(m ² ·K) | 8 mm |

Tabelle 1 Entwicklung von Verglasungen in Abhängigkeit des Wärmedurchgangskoeffizienten und der Gesamtdicke.

¹⁷ Vergleiche GEG 2023.

Insbesondere bei dem Einbau von angriffhemmenden Verglasungen in Bestandsbauten ist die geringe Gesamtdicke relevant. Meist ist ein nachträglicher Einbau von herkömmlichen Verglasungen wegen der Gesamtdicke und des Eigengewichts nicht möglich. Dies verhindert gegebenenfalls eine energetische Ertüchtigung von Bestandsbauten mit hohen Sicherheitsanforderungen, wie beispielsweise Ministerien, Botschaften oder Justizgebäuden.

2.2 Anforderungen und Beanspruchungen

Im Rahmen des Forschungsprojekts werden Vakuum-Isoliergläser mit aktiven und passiven Sicherheitsanforderungen durch eine nachträglich applizierte Dünnglas- und/oder Polycarbonatplatte entwickelt. Daher ist für die passive Sicherheit mit einer ausreichenden Splitterbindung der zerstörten Glastafel durch die Zwischenschicht erforderlich, um eine Resttragfähigkeit zu gewährleisten und ein Verletzungsrisiko zu minimieren. Durch die Klassifizierung als Verbundsicherheitsglas¹⁸ werden diese Anforderungen nachgewiesen und gewährleistet. Die aktive Sicherheit unterteilt sich in den Widerstand gegen manuellen Angriff, gegen Beschuss und gegen Explosion. Ziel des Forschungsprojektes ist das Erreichen eines ausreichenden Widerstands gegen manuellen Angriff entsprechend den Vorgaben für durchbruch- und durchwurfsichere Verglasungen.¹⁹

Die allgemeinen Anforderungen an Verbundsicherheitsglas für die passive Sicherheit sowie und an Sicherheitssonderverglasungen für die aktive Sicherheit sind in Tabelle 1 mit den zugehörigen Normen und den Abmessungen der erforderlichen Prüfkörper angegeben.

| Anforderungen | Norm | Prüfkörperabmessungen |
|--|--------------------|-----------------------|
| Klimatische Beständigkeit | | |
| Temperatur | DIN EN ISO 12543-4 | 300 mm x 200 mm |
| Feuchte | DIN EN ISO 12543-4 | 300 mm x 200 mm |
| Bestrahlung | DIN EN ISO 12543-4 | 300 mm x 150 mm |
| Mechanische Beständigkeit Passive Sicherheit | | |
| Kugelfallversuch | DIN 52338 | 500 mm x 500 mm |
| Pendelschlagversuch | DIN EN 12600 | 1.938 mm x 876 mm |
| Mechanische Beständigkeit Aktive Sicherheit | | |
| Axtversuch | DIN EN 356 | 1.100 mm x 900 mm |

Tabelle 2 Anforderungen an Verbundsicherheitsglas für passive Sicherheit und an Sicherheitssonderverglasungen für aktive Sicherheit mit zugehörigen Normen und Prüfkörperabmessungen.

¹⁸ Vergleiche DIN EN 14449.

¹⁹ Vergleiche DIN EN 356.

Der Nachweis der einzelnen Widerstandsklassen gegen manuellen Angriff erfolgt nach einem vorgegebenen Prüfverfahren durch Abwurf einer Stahlkugel aus einer definierten Höhe oder die Einwirkung einer Anzahl von Axtschlägen. Tabelle 3 zeigt die Widerstandsklassen mit den jeweils festgelegten Anforderungen im Prüfverfahren.

| Klasse | Fallhöhe | Gesamtanzahl an Schlägen |
|--------|----------|--------------------------------|
| P1A | 1.500 mm | 3 in einem Dreieck (Kugel) |
| P2A | 3.000 mm | 3 in einem Dreieck (Kugel) |
| P3A | 6.000 mm | 3 in einem Dreieck (Kugel) |
| P4A | 9.000 mm | 3 in einem Dreieck (Kugel) |
| P5A | 9.000 mm | 3 x 3 in einem Dreieck (Kugel) |
| P6B | - | 30 bis 50 (Axt) |
| P7B | - | 51 bis 70 (Axt) |
| P8B | - | über 70 (Axt) |

Tabelle 3 Widerstandsklassen für durchwurf- und durchbruchhemmende Verglasungen nach DIN EN 356.

Die Durchwurfhemmung einer Verglasung wird durch die Fallprüfung mit einer Kugel aus Stahl mit einem Durchmesser von 100 mm und einer Masse von 4,11 kg nachgewiesen. In Abhängigkeit der erforderlichen Widerstandsklasse ist die Fallhöhe der Kugel auf 1.500 mm bis 9.000 mm festgelegt. Die Auftreffpunkte der Kugel sollten um die geometrische Mitte des Prüfkörpers ein gleichseitiges Dreieck mit der Seitenlänge von 130 mm bilden. Das Prüfverfahren wird für Verglasungen der Widerstandsklasse P5A für jeden Prüfkörper dreimal ausgeführt. Die Prüfung gilt als bestanden, wenn die Kugel den Prüfkörper nicht durchschlägt und die Prüfkörper nicht von den Auflagern abgleiten. Alle drei Prüfkörper müssen der Mindestanzahl an Aufschlägen für die entsprechende Widerstandsklasse widerstehen.

Die Prüfkörper verfügen für die Prüfverfahren über die Abmessungen von 900 mm auf 1.100 mm. Die Halteeinrichtung für die Prüfkörper sieht eine planparallele Einspannung als vierseitig linienförmige Lagerung vor. Es ist daher zu beachten, dass der Rahmen der Sicherheitssonderverglasung einen ausreichenden Widerstand gegen die Angriffe bietet. In Abhängigkeit des bestandenen Prüfverfahrens wird dem Prüfkörper eine entsprechende Widerstandsklasse zugeordnet.

Durchbruchhemmende Verglasungen sind durch die Prüfung mit der Axt nachzuweisen. Die Widerstandsklasse ist abhängig von der Anzahl an Schlägen auf den Prüfkörper mit einer maschinell geführten 2,0 kg schweren Axt, bis eine quadratische Öffnung von 400 mm auf 400 mm entsteht. Das Glas der Prüfkörper wird vor Anwendung der

Axt entlang der Ränder einer quadratischen Prüffläche durch mindestens 12 Hammerschläge gebrochen. Anschließend erfolgen die Schläge mit der Axt in gleicher Reihenfolge. Danach wird der Prüfkörper um die Länge des entstandenen Schlitzes versetzt und das Verfahren wiederholt. Das Verfahren ist beendet, wenn sich die quadratische Fläche vollkommen vom Rest der Verglasung löst oder trotz einer noch teilweisen Verzahnung mit den zurückbleibenden Bruchstücken durch sein Eigengewicht herabfällt. Die Anzahl der Hammer- und Axtschläge bis zum Versagen des Prüfkörpers werden gezählt und bestimmen die erreichte Widerstandsklasse. Der Prüfkörper darf während der Prüfung nicht von den Auflagern gleiten.²⁰

Die Herstellung eines dauerhaften und stoffschlüssigen Verbundes zwischen dem Vakuum-Isolierglas als Halbzeug und den nachträglich angebrachten Schichten ist Voraussetzung für die Sicherstellung eines ausreichenden Schutzes gegen manuellen Angriff. Der Haftverbund für die Zwischenschicht zwischen Polycarbonat und bestehendem Vakuum-Isolierglas wird deshalb für die mechanischen Einwirkungen²¹ aus dem Kugelfallversuch und dem Pendelschlagversuch sowie für die klimatischen Einwirkungen²² durch die Prüfung bei hoher Temperatur, in der Feuchte und bei UV-Bestrahlung untersucht.

An die Zwischenschicht sind weitere Anforderungen bezüglich des Spannungsabbaus bei unterschiedlichen Temperaturen gebunden. Im Bauwesen liegt der relevante Temperaturbereich für Isolierglas ungefähr zwischen -20 °C bis $+80\text{ °C}$. Die Materialien Glas und Polycarbonat weisen einen unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten auf. Der Wärmeausdehnungskoeffizient von Kalk-Natronsilikatglas liegt bei $9 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ und von Polycarbonat mit einem Faktor von über 7 bei $70 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$. Die unterschiedlichen Wärmeausdehnungen der beiden Materialien und die damit verbundenen Spannungen zwischen den Schichten sind von der Zwischenschicht ohne den Verlust der Verbundwirkung auszugleichen.

Der Wärmeschutz von einem Vakuum-Isolierglas lässt sich energetisch nicht maßgeblich verbessern, da ohne zusätzliche Beschichtung bereits ein Wärmedurchgangskoeffizient von $0,7 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ erreicht wird. Die zusätzlich applizierten Schichten nehmen einen vernachlässigbar geringen Einfluss auf die Wärmedämmung. Allerdings beeinflussen die zusätzlichen Schichten aus Polycarbonat oder Dünnglas die strahlungsphysikalischen Eigenschaften der Verglasung. Es wird deshalb für die zu entwickelnden Querschnittsaufbauten der Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert) der Verglasung untersucht.

²⁰ Vergleiche DIN EN 14449.

²¹ Vergleiche DIN EN ISO 12543-2.

²² Vergleiche DIN EN 356.

3 Materialauswahl

3.1 Vakuum-Isolierglas

Ein Vakuum-Isolierglas besteht aus zwei Flachgläsern mit einer Nenn-
dicke von etwa 3 mm bis 6 mm, die durch einen Scheibenzwischen-
raum von weniger als 1 mm miteinander verbunden sind. Der Zwi-
schenraum ist evakuiert, sodass die Glastafeln wegen des atmosphä-
rischen Drucks gegen Verformung zu sichern sind. Dafür werden
kleine Abstandhalter aus Metall, Glas oder Kunststoff in einem be-
stimmten Raster im Scheibenzwischenraum eingesetzt. In Bild 1 ist
das Raster mit den Abstandhaltern zu erkennen.



Bild 1 Vakuum-Isolierglas mit Ab-
standhaltern im Scheibenzwischen-
raum.²³

Durch das Vakuum im Scheibenzwischenraum wird der Wärmetrans-
port durch das Isolierglas erheblich reduziert. Die Wärmeübertragung
findet fast ausschließlich über Strahlung statt, sodass ein Wärme-
durchgangskoeffizient von $0,7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ erreicht wird.

Auf dem europäischen Markt ist aktuell das Vakuum-Isolierglas Fineo
von AGC Glass Europe in ausreichender Menge verfügbar. Im Ver-
gleich zu früheren Entwicklungen und Produkten anderer Hersteller
weist dieses Vakuum-Isolierglas keine Evakuierungsöffnung mit ent-
sprechendem Verschluss am Rand der Glasfläche auf. Dadurch ergibt
sich keine visuelle Beeinträchtigung in der Ansicht der Verglasung
und die glatte Oberflächenbeschaffenheit ist unkritisch in Bezug auf
den Verbund. Deshalb wird dieses Produkt für die weitere Verarbei-
tung im Rahmen des Forschungsprojekts verwendet. In Tabelle 4 sind
die wesentlichen Kennwerte von dem Produkt aufgeführt.

²³ Vergleiche AGC 2021.

| Produkttyp | Gesamtdicke | Wärmedurchgangskoeffizient | Lichttransmissionsgrad | Gesamtenergiedurchlassgrad | Schalldämmmaß Rw |
|------------|-------------|----------------------------|------------------------|----------------------------|------------------|
| Fineo 6 | 6,7 mm | 0,7 W/(m ² ·K) | 80 % | 0,62 | keine Angabe |
| Fineo 8 | 7,7 mm | 0,7 W/(m ² ·K) | 79 % | 0,61 | 35 dB |
| Fineo 10 | 9,7 mm | 0,7 W/(m ² ·K) | 79 % | 0,60 | 36 dB |
| Fineo 12 | 11,7 mm | 0,7 W/(m ² ·K) | 78 % | 0,60 | 36 dB |

In Tabelle 4 ist das Vakuum-Isolierglas Fineo 8 mit 7,7 mm Gesamtdicke aufgeführt. Die äußere und innere Glastafel weist eine tatsächliche Dicke von etwa 3,8 mm auf. Den Abstand für den evakuierten Scheibenzwischenraum stellen kugelförmige Abstandhalter aus Kunststoff mit einem Rasterabstand von 20 mm sicher. Der symmetrische Aufbau des Vakuum-Isolierglases Fineo 8 ist für die weiteren Untersuchungen zu aktiven und passiven Sicherheitsanforderungen vorteilhaft. Die nächstgrößere Variante Fineo 10 besteht aus einem asymmetrischen Aufbau, der für die Prüfungen des Verbundglases wegen der zwei möglichen Angriffsseiten eine deutlich höhere Anzahl an erforderlichen Prüfkörpern bedeutet. Daher wird für die weiteren Untersuchungen im Forschungsprojekt das Vakuum-Isolierglas Fineo 8 verwendet und als Mindestgröße festgelegt. In Abhängigkeit der Abmessungen gibt der Hersteller die Verwendung der nächstgrößeren Variante vor. Auf der sicheren Seite liegend erfolgt im Forschungsprojekt der Nachweis mit Fineo 8, in der Praxis könnten allerdings durch Vorgaben vom Hersteller bei großen Abmessungen die Verwendung von Fineo 10 oder Fineo 12 erforderlich werden. Durch die höhere Nenndicke von Fineo 10 und Fineo 12 ist ein günstiger Einfluss auf die Eigenschaften des Vakuum-Isolierglases mit passiven und aktiven Sicherheitsanforderungen zu erwarten.

Tabelle 4 Eigenschaften des Vakuum-Isolierglases Fineo²⁴ von AGC Glass Europe.

3.2 Dünnglas und Polycarbonat

Als Dünnglas wird Flachglas mit einer Nenndicke unter 3 mm bezeichnet.²⁵ Die Herstellung erfolgt entweder im Overflow-Fusion-Verfahren, im Down-Draw-Verfahren oder im Float-Verfahren. Durch die speziellen Ziehverfahren wird die Herstellung von einem dünnen Glasfilm ermöglicht. Das Glasprodukt kann anschließend noch thermisch oder chemisch vorgespannt werden. Die Auswahl des Dünnglases mit einer Nenndicke unterhalb von 3 mm erfolgt nach der Verfügbarkeit und den maximalen Abmessungen. Zur Entwicklung der Querschnittsaufbauten eignen sich beispielsweise die nicht vorgespannten Dünngläser Microwhite und Optiwhite von Pilkington Deutschland AG sowie das chemisch vorgespannte Dünnglas Falcon von Asahi Glass Co,

²⁴ Vergleiche Fineo 2019.

²⁵ Vergleiche DIN 18008-1.

Ltd.. Tabelle 5 zeigt die mechanischen, optischen und thermischen Eigenschaften der ausgewählten Dünngläser.

| Eigenschaften | Microwhite | Optiwhite | Falcon |
|----------------------------------|------------------------------|------------------------------|--|
| Hersteller | Pilkington Deutschland AG | Pilkington Deutschland AG | Asahi Glass Co., Ltd. |
| Glasart | Kalk- Natronsilicatglas | Kalk- Natronsilicatglas | Alumo-Silicatglas |
| Vorspannung | keine | keine | chemisch |
| Biegefestigkeit | 45 N/mm ² | 45 N/mm ² | keine Angabe |
| Abmessungen | 1.600 mm x 2.000 mm | 3.210 mm x 6.000 mm | 1.245 mm x 3.210 mm |
| Nennstärke | 1,00 mm – 1,30 mm | 2,00 mm – 19,00 mm | 0,50 mm – 4,00 mm |
| Elastizitäts- modul | 70.000 N/mm ² | 70.000 N/mm ² | 71.000 N/mm ² – 73.000 N/mm ² |
| Transmissions- grad | 91,6 % | 92,0 % | 92,1 % |
| Wärmeausdeh- nungskoeffizient | 9,00 · 10 ⁻⁶ 1/K | 9,00 · 10 ⁻⁶ 1/K | 9,10 · 10 ⁻⁶ 1/K |
| Wärmeleit- fähigkeit | 1,00 W/(m·K) | 1,00 W/(m·K) | 1,19 W/(m·K) |

Tabelle 5 Eigenschaften der Dünngläser Microwhite, Optiwhite und Falcon.

Die Grundlage für die Auswahl der Dünngläser ist der Vergleich zwischen einem Dreischeiben-Isolierglas bestehend aus drei Glastafeln der Nennstärke von 4 mm und zwei Scheibenzwischenräumen der Nennstärke von 12 mm sowie einem Vakuum-Isolierglas Fineo 8, die beide symmetrisch mit den weiteren Schichten aus jeweils einer Polycarbonattafel der Nennstärke von 5 mm und einer Dünnglastafel verbunden mit Zwischenschichten aus thermoplastischen Polyurethan der Nennstärke von 2 mm ergänzt werden.

Der Querschnittsaufbau mit Fineo 8 reduziert mit dem Dünnglas Optiwhite das Gesamtgewicht um etwa 16 %, durch die Verwendung des Dünnglases Falcon um 24 %. Analog werden für den Querschnittsaufbau mit dem Vakuum-Isolierglas und dem Dünnglas Optiwhite die Kosten im Vergleich zum Dreischeiben-Isolierglas um etwa 35 %, mit dem Dünnglas Falcon um mehr als 70 % erhöht. Die deutlich höheren Kosten des Vakuum-Isolierglases mit chemisch vorgespanntem Dünnglas sind nicht mit der zusätzlichen Gewichtsreduktion zu relativieren. Zusätzlich sind die maximalen Abmessungen des chemisch vorgespannten Dünnglases geringer. Daher wird für die Entwicklung der Querschnittsaufbauten das Dünnglas Optiwhite von Pilkington mit einer Nennstärke von 2 mm gewählt.

Polycarbonate sind thermoplastische Kunststoffe und zählen zu den Polyestern. Diese bestehen aus linearen oder verzweigten Molekülketten, die untereinander keine chemische Bindung eingehen, sondern durch Nebervalenzkräfte halten. Polycarbonat wird durch Polykondensation aus Bisphenol A und Phosgen oder Bisphenol A und Diphenylcarbonat im Schmelzverfahren hergestellt. Das Material zeichnet sich insbesondere durch hohe Transparenz, hohe Wärmebeständigkeit und sehr gute Schlagzähigkeit aus.²⁶

Der Kooperationspartner SiLATEC Sicherheits- und Laminatglastechnik GmbH besitzt langjährige Erfahrung in der Produktion von Sicherheitssonderverglasungen aus Glas-Polycarbonat-Verbunden. Das Unternehmen verwendet für die Herstellung der angriffhemmenden Verglasungen das Produkt Lexan® 9030 von SABIC Deutschland GmbH. In Tabelle 6 sind die Eigenschaften von Lexan® 9030 dargestellt.

| Eigenschaften | Lexan® 9030 |
|--------------------------------------|---------------------------------------|
| Dichte | 1,20 g/cm ³ |
| Brechungsindex | 1,586 |
| Wärmeleitfähigkeit | 0,20 W/(m ² ·K) |
| Linearer Wärmeausdehnungskoeffizient | 70,1·10 ⁻⁶ K ⁻¹ |
| Elastizitätsmodul | 2.300 MPa |

Tabelle 6 Eigenschaften des Polycarbonats Lexan® 9030 von Sabc Deutschland GmbH.²⁷

3.3 Zwischenschichten

Die Zwischenschicht gewährleistet als Verbundmittel den flächigen Verbund zwischen dem Vakuum-Isolierglas und der applizierten Dünnglas- und/oder Polycarbonatplatte. Das Polymer beeinflusst dabei maßgebend die Eigenschaften des Verbundes. Als Zwischenschicht wird ein Polyurethan (PU) verwendet, das nach einer Aushärtung bei Raumtemperatur vernetzt ist. In dem Forschungsprojekt erfolgt die Untersuchung von zwei unterschiedlichen Zwischenschichten. Die beiden Materialien sind von SiLATEC Sicherheits- und Laminatglastechnik GmbH entwickelt und werden im Unternehmen hergestellt. Die Ermittlung der mechanischen Eigenschaften für die beiden Zwischenschichten erfolgt in Kapitel 4.3.

²⁶ Vergleiche Seidel 2014.

²⁷ Vergleiche Lexan® 9030.

4 Querschnittsaufbau und Verbundwirkung

4.1 Versuchsplanung und Querschnittsaufbau

Die im Forschungsprojekt vorgesehene experimentelle Untersuchung umfasst zum einen Versuche an Prüfkörpern mit kleinerem Format zur Ermittlung der thermo-mechanischen Eigenschaften²⁸ der vom Kooperationspartner entwickelten Zwischenschicht, die bislang nicht vorliegen. Zum anderen sind Versuche an Prüfkörpern mit mittlerem Format vorgesehen, um das Verhalten unter klimatischer Beanspruchung²⁹ bei hoher Temperatur, in der Feuchte oder unter Bestrahlung zu untersuchen. Versuche an Prüfkörper mit größerem Format dienen der Beschreibung des Verhaltens unter statischer und stoßartiger Beanspruchung. In diesem Zusammenhang sind eine ausreichende Resttragfähigkeit sowie die Absturzsicherung und die Angriffshemmung nachzuweisen. Bild 2 zeigt die Abfolge der einzelnen Arbeitspakete mit Zuordnung der Methoden und Zielkriterien.

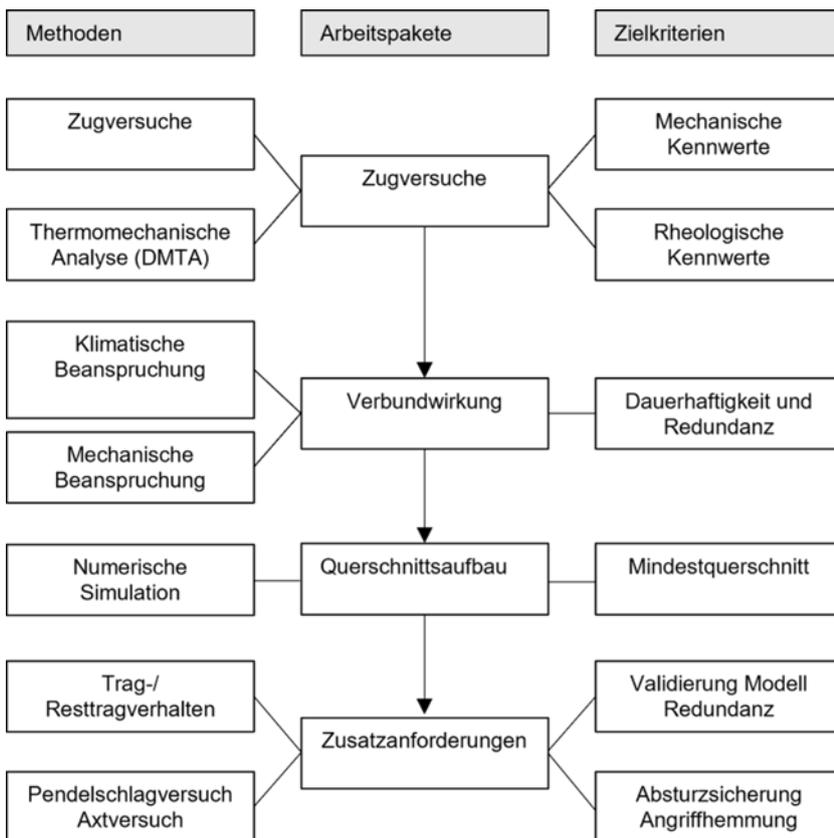


Bild 2 Abfolge der im Forschungsprojekt durchzuführenden Untersuchungen. Den einzelnen Arbeitspaketen sind Methoden und Zielkriterien zugeordnet.

In Tabelle 7 sind die im Rahmen des Forschungsprojekts durchgeführten Versuche gezeigt.

²⁸ Vergleiche Grellmann 2015 und DIN EN ISO 6721.

²⁹ Vergleiche Quelle DIN EN 12543-2.

Die zwei grundsätzlich möglichen Varianten für den Querschnittsaufbau ergeben sich aus den Eigenschaften der verwendeten Materialien. Variante 1 enthält die Komponenten Polycarbonat als schlagzähe Schicht, teilvorgespanntes Floatglas als Bestandteil des Vakuum-Isolierglases, Dünnglas als oberflächenharte Deckschicht sowie Polyurethan mit niedriger Steifigkeit (PU1) als Zwischenschicht und Verbundmittel. Variante 2 besteht aus den Komponenten teilvorgespanntes Floatglas als Bestandteil des Vakuum-Isolierglases, Dünnglas als oberflächenharte Deckschicht und Polyurethan mit hoher Steifigkeit (PU2) als Zwischenschicht und Verbundmittel sowie schlagzähe Schicht.

| Versuch | Arbeitspaket | Prüfung | Prüfgerät | Zwischenschicht | Versuchsziel |
|---------|--------------|--|--|-----------------|--|
| 1 | 4.3 | Zugversuch | Universalprüfmaschine | PU1 und PU2 | Elastizitätsmodul, Relaxationsmodul |
| 2 | 4.3 | Dynamisch-Mechanisch Thermische Analyse | Dynamisch-Mechanisch Thermische Analyse | PU1 und PU2 | Rheologische Klassifizierung |
| 3 | 4.3 | Wärmeausdehnung | Dilatometer | PU1 und PU2 | Wärmeausdehnungskoeffizient |
| 4 | 4.3 | Rohdichte | Feinwaage | PU1 und PU2 | Eigengewicht |
| 5 | 4.3 | Mechanische Beständigkeit | Kugelfallversuch | PU1 und PU 2 | Haftverbund |
| 6 | 4.3 | Klimatische Beständigkeit | Klimaschrank | PU1 und PU2 | Widerstand gegen Temperatur |
| 7 | 4.3 | Klimatische Beständigkeit | Klimaschrank | PU1 und PU2 | Widerstand gegen Feuchte |
| 8 | 4.3 | Klimatische Beständigkeit | Bestrahlungskammer | PU1 und PU2 | Widerstand gegen UV-Strahlung |
| 9 | 5.3 | Mechanische Beständigkeit | Pendelschlagversuch | PU1 und PU2 | Widerstandsklasse, Haftverbund |
| 10 | 5.3 | Angriffhemmung | Axtversuch | PU1 und PU2 | Widerstandsklasse Durchbruchhemmung |
| 11 | 5.3 | Schallschutz | Schallmessung | PU1 und PU2 | Bauschalldämmmaß |
| 12 | 5.3 | Wärmeleitfähigkeit | Wärmeleitfähigkeitsmessgerät | PU1 und PU2 | Wärmeleitfähigkeit |
| 13 | 5.3 | Spektrale Kenngrößen | Spektrometer | PU1 und PU2 | Gesamtenergiedurchlassgrad |
| 14 | 5.5 | Resttragfähigkeit | Prüfrahen | PU1 und PU2 | Resttragverhalten |

In Tabelle 8 sind die Querschnittsvarianten mit Komponenten und den jeweils zugeordneten vorrangigen Eigenschaften aufgeführt.

Tabelle 7 Durchzuführende experimentelle Untersuchungen mit zugeordneten Arbeitspaketen.

| Variante | Schlagzähigkeit | Verbundmittel | Oberflächenhärte |
|----------|-----------------|---------------|------------------|
| 1 | Polycarbonat | PU1 | Dünnglas |
| 2 | PU2 | PU2 | Dünnglas |

Tabelle 8 Zusammensetzung der beiden Querschnittsvarianten.

Es ist für die Untersuchungen des Haftverbunds und der Dauerhaftigkeit nicht erforderlich, ein Vakuum-Isolierglas im Kern des Querschnitts anzuordnen. Das in Vakuum-Isolierglas verwendete teilvorgespannte Floatglas entspricht in der Zusammensetzung und der Oberflächenbeschaffenheit dem eines Flachglases aus Kalk-Natronsilikatglas. Aus diesem Grund besteht der Kern des symmetrischen Verglasungsaufbaus der Prüfkörper für die Prüfungen der klimatischen Beständigkeit aus einer Floatglastafel.

4.2 Herstellung von Prüfkörpern

4.2.1 Prüfkörper aus Zwischenschichtmaterial

Die Prüfkörper aus den Zwischenschichten PU1 und PU2 werden mit Gussformen aus Polytetrafluorethylen (PTFE) (Marktbezeichnung: Teflon) hergestellt. Die Abmessungen der Prüfkörper für den Zugversuch entsprechen den Vorgaben in DIN EN ISO 527-1. Mit zunächst unbekanntem Materialverhalten unter Krafteinwirkung ist der Prüfkörper mit der Bezeichnung 1A empfohlen³⁰. Die Strecke mit den parallelen Kanten beträgt 80 mm, der Messbereich 50 mm. Die Dicke ist mit 4 mm und die Gesamtlänge > 150 mm definiert. Der Übergang zwischen dem Bereich mit parallelen Kanten, der eine Breite von 10 mm aufweist und den Einspannflächen mit der Breite von 20 mm, erfolgt über ein Kreissegment mit dem Radius von 20 mm bis 25 mm. Mit dem kontinuierlichen Übergang zwischen dem schmalen Bereich hin zum Einspannbereich werden Spannungskonzentrationen an Kerben vermieden. In Bild 3 ist die Gussform zur Herstellung der Prüfkörper für die Zugversuche mit Ein- und Auslaufkanälen sowie die Klemmvorrichtung aus Eichenholz mit verschraubten Stahlprofilen dargestellt.



Bild 3 Gussform aus PTFE zur Herstellung von Prüfkörpern für die Zugversuche mit der Bezeichnung 1A nach DIN EN ISO 527-1.

³⁰ Vergleiche Grellmann 2015 und DIN EN ISO 527-3.

4.2.2 Prüfkörper aus Glas-Kunststoffverbund

Die Prüfkörper für die Prüfung der Beständigkeit gegen klimatische Beanspruchung nach DIN EN 12543-4 weisen die äußeren Abmessungen von 150 mm auf 300 mm auf. Die Lamination von Glas, Polycarbonat und Polyurethan erfolgt im Kaltverbund. Zur Untersuchung des Widerstands gegen klimatische Beanspruchung sind die Querschnittsaufbauten nach Tabelle 9 festgelegt. Anstelle des Vakuum-Isolierglases tritt die Kernschicht aus Floatglas mit der Nenndicke von 4 mm. Alle weiteren Schichten weisen die Nenndicke von 2 mm auf.

| Variante | Querschnittsaufbau |
|----------|--|
| 1 | DG PU1 PC PU1 FG PU1 PC PU1 DG 2 mm 2 mm 2 mm 2 mm 4 mm 2 mm 2 mm 2 mm 2 mm |
| 2 | DG PU2 FG PU2 DG 2 mm 2 mm 4 mm 2 mm 2 mm |

Tabelle 9 Zusammensetzung der beiden Querschnittsaufbauten für die Prüfung der klimatischen Beständigkeit nach DIN EN 12543-4.

Bild 4 zeigt einen Prüfkörper während der Befüllung mit Polyurethan. Zur Entlüftung dienen teilverschlossene Kapillare aus Aluminium, die in den Randverbund eingesetzt sind. Nach vollständiger Entlüftung wird die Öffnung mit Butyl verschlossen. In Bild 5 sind die Querschnitte und in Bild 6 die Aufsicht der Prüfkörper dargestellt.

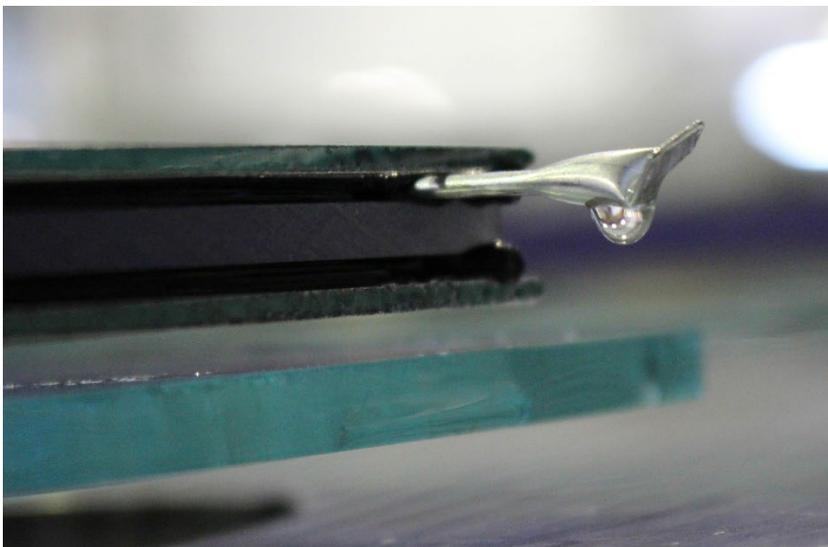


Bild 4 Herstellung der Prüfkörper für die Prüfung der klimatischen Beständigkeit. Kapillare zur Entlüftung während der Befüllung mit flüssigem Polyurethan.



Bild 5 Querschnitt der zwei Varianten mit Angabe der einzelnen Schichten. Links: Variante 1 mit Glas, Polycarbonat und PU1. Rechts: Variante 2 mit Glas und PU2.

| | |
|------|----------------------------------|
| FG-D | Floatglas, Deckschicht, d = 2 mm |
| FG-K | Floatglas, Kern, d = 4 mm |
| PC | Polycarbonat, d = 2 mm |
| PU1 | Polyurethan, weich, d = 2 mm |
| PU2 | Polyurethan, hart, d = 2 mm |

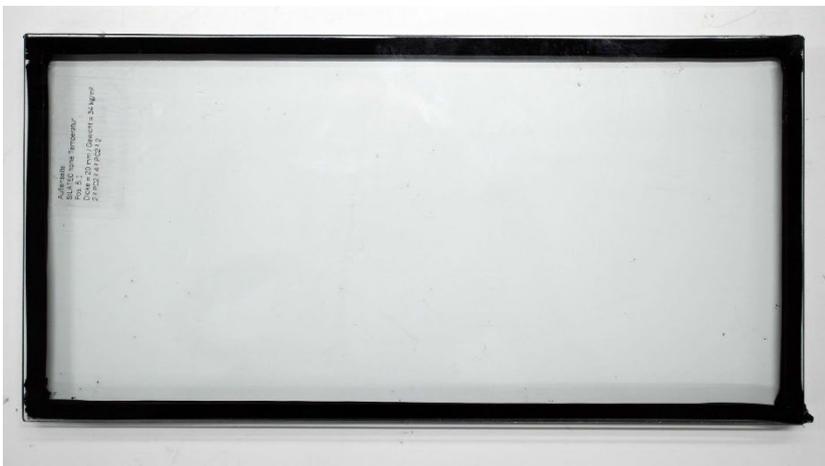


Bild 6 Aufsicht eines Prüfkörpers für die Prüfung der klimatischen Beständigkeit nach DIN EN 12543-2.

4.2.2 Prüfkörper aus Vakuum-Isolierglas-Kunststoffverbund

Im Vergleich zu der Untersuchung der Beständigkeit und der Ermittlung von Materialkennwerten erfordern die Versuche zum Trag- und Resttragverhalten sowie zur passiven und aktiven Sicherheit die Abbildung des Verbundes mit dem Vakuum-Isolierglas. Der Aufbau der Prüfkörper erfolgt in einzelnen Schichten vom Vakuum-Isolierglas nach außen. Die Einfassung der Zwischenschichten bildet ein umlaufendes Butylband, das die jeweilige Nenndicke einstellt. Nach dem Auflegen der folgenden Schicht wird das Material der Zwischenschicht durch die Einlauföffnung eingepresst. Der Füllvorgang ist abgeschlossen, nachdem an den Auslauföffnungen das Material austritt. Die äußeren Dünnglastafeln werden zur Vermeidung von unplanmäßigen Verformungen während des Füllvorgangs mit einer zusätzlichen Glas-tafel der Nenndicke von 4 mm temporär unterstützt. Die beiden Zwischenschichten PU1 und PU2 aus thermoplastischem Polyurethan härten bei Raumtemperatur ohne zusätzliche Bestrahlung innerhalb von 24 h aus.

4.3 Untersuchung des Zwischenschichtmaterials und der Verbundwirkung

4.3.1 Zugversuch

Der Zugversuch nach DIN EN ISO 527-1 dient der Bestimmung der Eigenschaften von Kunststoffen. Es werden die Bruchdehnung und die Bruchspannung ermittelt sowie das Deformationsverhalten mit Angabe der Spannungs-Dehnungs-Beziehung. Insbesondere bei großen Dehnungen ist die Veränderung der Querschnittsfläche in Abhängigkeit der Streckung zu berücksichtigen.³¹ Die simultane Aufzeichnung der Deformation des Prüfprismas mit den Abmessungen von 50 mm in der Länge, 10 mm in der Breite sowie 4 mm in der Dicke für die drei Raumrichtungen ermöglicht die Angabe der wahren Dehnung und der wahren Spannung. Der Zugversuch wird in der Regel weggesteuert gefahren, sodass die Kraft als Antwortsignal auf die konstant gehaltene Prüfgeschwindigkeit auch Bereiche der Erweichung und der Verfestigung abbildet. Im kraftgeregelten Versuch ist die Prüfgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Steifigkeit so einzustellen, dass die Kraft-rate konstant bleibt. Ist die Steifigkeitsveränderung auf dem Dehnungsbereich im Vorfeld nicht bekannt, führt die Regelung der Prüfmaschine im Bereich der Kapazitätsgrenzen eventuell zu veränderlichen Krafraten. Bereiche der Erweichung durch mögliches Plastizieren bleiben verborgen. Die Messung der Kraft erfolgt mit einer sensitiven Kraftmessdose der elektromechanischen, spindelgetriebenen Universalprüfmaschine am Lehrstuhl für Tragkonstruktion der Universität Siegen. Die Verformung wird mit einem berührungslosen optischen Messsystem auf Basis von Fotogrammetrie³² (Digital Image Correlation – DIC) aufgezeichnet und ausgewertet. Mit dem optischen Messsystem sind die Abweichungen von der Ausgangsgeometrie in alle drei Raumrichtungen mit Höhe, Breite und Tiefe erfasst. In Bild 7 ist der Versuchsaufbau mit eingebauten Normprüfkörper 1A mit Messmarken und stochastisch verteiltem Punktemuster unter Verwendung von Keilspannzeug und optischem Dehnungsmesssystem dargestellt.

³¹ Vergleiche Schwarzl 1990 und Grellmann 2015.

³² Vergleiche Schuth 2017.

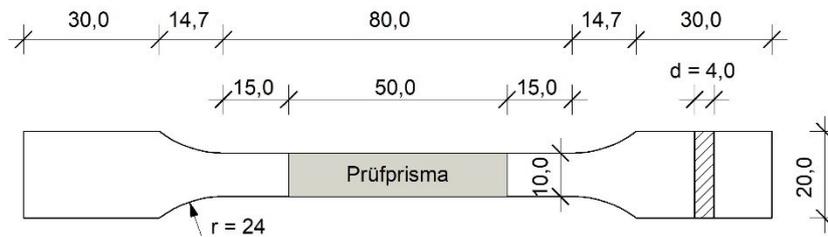


Bild 7 Darstellung des Normprüfkörpers 1A. Oben: CAD-Zeichnung. Mitte: Prüfkörper mit querverlaufenden Messmarken. Unten: Prüfkörper mit stochastisch verteiltem Punktemuster.

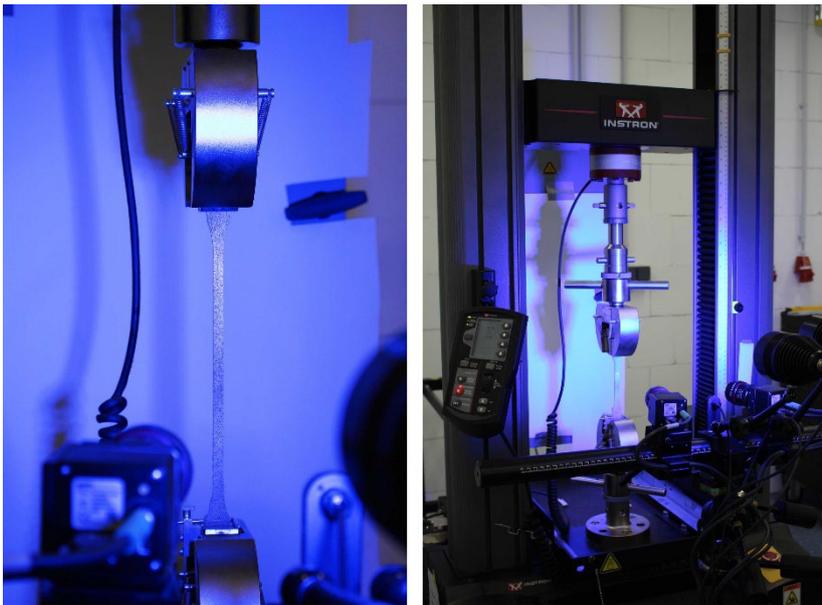
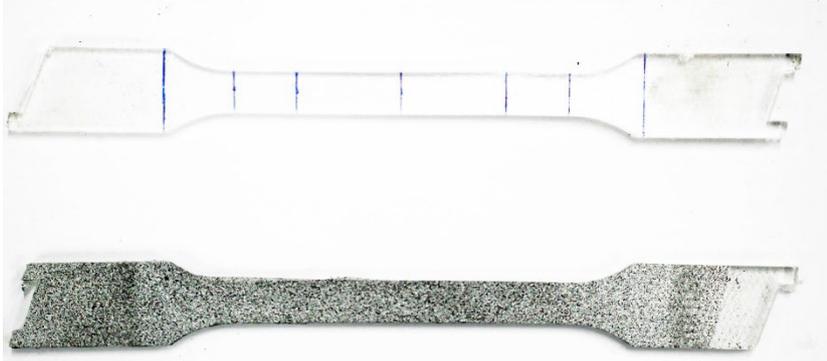


Bild 8 Zugversuch am Normprüfkörper 1A. Links: In das Keilspannzeug eingespannter und gestreckter Prüfkörper. Rechts: Versuchsaufbau mit Universalprüfmaschine und optischem Dehnungsmesssystem auf Basis von Digital Image Correlation (DIC)

Verschiedene Prüfmodi ermöglichen die Klassifizierung der Kunststoffe hinsichtlich der rheologischen Eingruppierung. Grundsätzlich ist zwischen ideal-elastisch, linear viskoelastisch, nichtlinear viskoelastisch, viskos oder plastisch zu unterscheiden.³³ Die Zeitabhängigkeit zeigt sich mit der Variation der Prüfgeschwindigkeit, elastisches, viskoelastisches oder plastisches Verhalten tritt in zyklischen Belastungen in Erscheinung.³⁴ Die Versuche werden bei einer Temperatur von +23 °C und einer relativen Luftfeuchte von 50 % durchgeführt.³⁵

³³ Vergleiche Rösler 2008.

³⁴ Vergleiche Schwarzl 1990.

³⁵ Vergleiche DIN EN ISO 291.

Tabelle 10 gibt die unterschiedlichen Prüfmodi mit zugeordnetem Versuchsziel an. Die in grau hervorgehobenen Prüfmodi sind im Forschungsprojekt angewendet.

| Modus | Versuchsziel |
|---|---|
| Statisch, Belastung bis zum Bruch, variable Geschwindigkeiten | Geschwindigkeitsabhängige Bruchlast- und Bruchdehnung |
| Zyklisch, Be- und Entlastung, variable Geschwindigkeiten | Rheologische Eingruppierung |
| Quasistatisch, Belastung, variable Geschwindigkeit | Zug-Elastizitätsmodul, Querdehnzahl |
| Dauerstandsversuch, Belastung Variable Dehngrenzen | Relaxationsmodul, Relaxations-Querdehnzahl |

Tabelle 10 Prüfmodi und Versuchsziel beim Zugversuch. Die in grau hervorgehobenen Prüfmodi sind Gegenstand des Forschungsprojektes.

Zur Bestimmung von Spannung und Dehnung innerhalb eines Mehrschichtverbunds sind Elastizitätsmodul, Schubmodul und Querdehnzahl von Bedeutung. Die zeit- und lastabhängigen Kennwerte können im üblichen Zugversuch ermittelt werden. Der Schubmodul ergibt sich rechnerisch aus dem Zug-Elastizitätsmodul mit Berücksichtigung der Querdehnzahl, sofern isotropes Materialverhalten³⁶ vorliegt. Die Gefügestruktur der Zwischenschicht ist homogen sowie isotrop und weist deshalb keine richtungsabhängigen Eigenschaften auf. Die Validierung erfolgt üblicherweise im Belastungsversuch am großformatigen Prüfkörpern, wie beispielsweise dem Vierpunkt-Biegeversuch³⁷.

Aus Ergebnissen des zyklischen Zugversuchs lässt sich die rheologische Eingruppierung vornehmen. Weiterhin ist das zeit- und dehnungsabhängige Verhalten zu ermitteln. Um die Abhängigkeit von Dehnung und Belastungsdauer zu erfassen, werden verschiedene Zeitprogramme gefahren. Der Lastumkehrpunkt befindet sich vor der Bruchdehnung bei dem Grenzwert der Dehnung von 100 %. In Vorversuchen sind die Dehnungsgrenzen in Schritten von 25 % dem Verfahrensweg der Traverse der Universalprüfmaschine zugeordnet. Aus Vorversuchen geht hervor, dass die für den gesamten Zyklus konstant zu haltende Geschwindigkeit einen Höchstwert von 5 mm/min nicht überschreiten darf. Höhere Geschwindigkeiten führen aufgrund von langsamerer Rückverformung zu Stabilitätsversagen des Prüfkörpers in Form des seitlichen Ausweichens. Die Geschwindigkeit ist deshalb für die zyklischen Versuche auf 5 mm/min festgelegt. Tabelle 11 fasst das Zeitprogramme mit Angabe von Belastungsgeschwindigkeit, Dehnungsstufe am Prüfprisma und Traversenweg für beiden Zwischenschichtmaterialien zusammen. Das Zeitprogramm wird an insgesamt drei Prüfkörpern angewendet.

³⁶ Vergleiche Schwarzl 1990.

³⁷ Vergleiche DIN EN 1288-3.

| Zyklenanzahl | Geschwindigkeit | Dehnungsstufen | Traversenweg |
|--------------|-----------------|-----------------------|--------------------------|
| 3 | 5 mm/min | 25 % 50 % 100 % | 27 mm 57 mm 113 mm |

Tabelle 11 Zeitprogramm der zyklischen Belastung für die beiden Zwischenschichten PU1 und PU2.

Für die weggesteuerten Versuche sind die Kraft-Traversenweg-Verläufe in Bild 9 für PU1 und in Bild 10 für PU2 dargestellt.

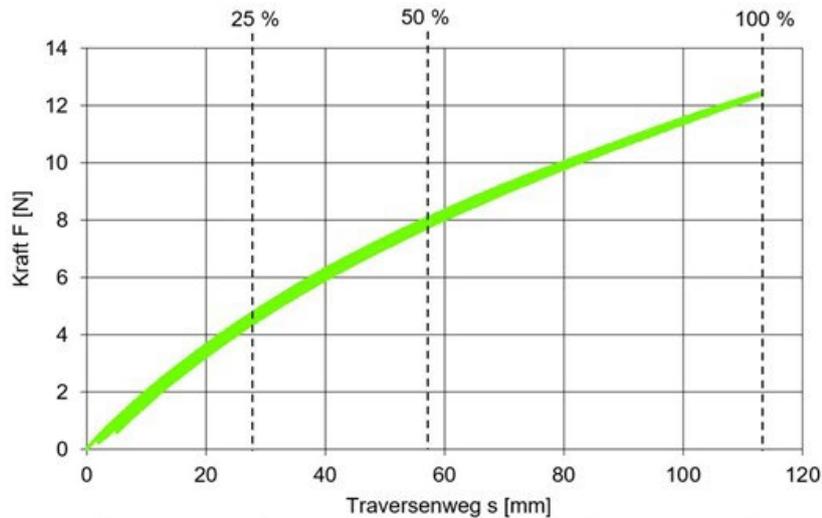


Bild 9 Kraft-Traversenweg-Verlauf für PU1.

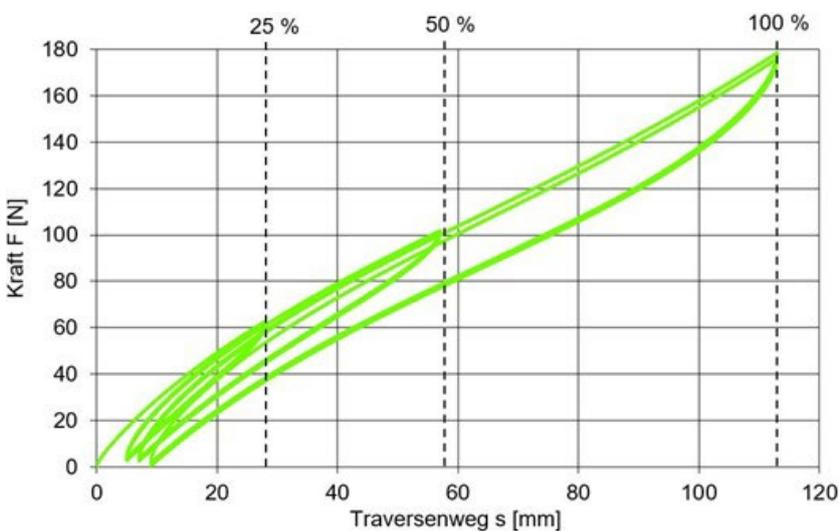


Bild 10 Kraft-Traversenweg-Verlauf für PU2.

Die beiden Materialien der Zwischenschicht weisen einen nichtlinearen Zusammenhang zwischen Kraft und Traversenweg auf. Die Zwischenschicht PU1 zeigt eine deutlich geringere Steifigkeit als die Zwischenschicht PU2. Die nur schwach ausgeprägte Hysterese lässt erkennen, dass der Pfad der Entlastung näherungsweise dem Pfad der Belastung entspricht. Aufgrund des Rückstellvermögens ist das Material daher näherungsweise dem ideal-elastischem Verhalten zuzuordnen, wird aber aufgrund der vorhandenen Hysterese im Verlauf der

Untersuchungen als linear-viskoelastisch behandelt. Die Zwischenschicht PU2 zeigt eine deutlich ausgeprägte Hystereseschleife aufgrund des viskosen Anteils der Deformation. Das in Tastversuchen ermittelte Rücklaufniveau der Traverse auf den Kraft-Nullpunkt ergibt je Dehnstufe eine bleibende Deformation, die auf den Schlupf zwischen Prüfkörper und Keilspannzeug zurückzuführen ist. Die drei Zyklen weisen je Dehnungsstufe allerdings eine geschlossene Hystereseschleife auf, sodass die Zwischenschicht PU2 als linear-viskoelastisch einzustufen ist. Tabelle 12 gibt die rheologische Einordnung der beiden Zwischenschichten an.

| Material | Steifigkeit | Hysterese | Rheologie |
|----------|-------------|-----------------------|--------------------------|
| PU1 | gering | schwach ausgeprägt | linear viskoelastisch |
| PU2 | hoch | stark ausgeprägt | linear viskoelastisch |

Tabelle 12 Rheologische Einordnung der beiden Zwischenschichten PU1 und PU2.

Der Relaxationsversuch dient der Bestimmung der Spannungsrelaxation durch abgleitende Monomere im molekularen Gefüge des Polymers während konstanter Deformation und bildet die Grundlage zur Ermittlung von Relaxationsmodul, Relaxations-Querdehnzahl sowie Relaxationsschubmodul durch Berechnung. Diese zeitabhängige Elastizität beziehungsweise Steifigkeit der Zwischenschicht ist insbesondere für die Vorhersage des Deformations- und Spannungszustands unter Belastungen mit unterschiedlicher Dauer von Bedeutung.

Die im quasistatischen Relaxationsversuch ermittelten Kennwerte bilden das Spektrum von Kurzzeit- bis zu Langzeitbelastungen ab. Dynamische Belastungssituationen sind in diesem Versuch nicht abbildbar. Das dynamische Verhalten unter Berücksichtigung von mit-schwingenden Massen infolge Schwingungsanregung sowie das Verhalten unter stoßartiger Einwirkung sind in Versuchen mit höher frequenten Zyklen zu untersuchen sowie auf Bauteilmaßstab durchzuführen. Tabelle 13 zeigt die Parameter des Relaxationsversuchs. Die mit der Geschwindigkeit von 100 mm/min sprunghaft angefahrenen Dehnungsstufen durchlaufen eine Haltezeit von 30 min bis näherungsweise der Grenzwert der residualen Spannung erreicht ist. Das Zeitprogramm wird an insgesamt drei Prüfkörpern angewendet.

| Anzahl Stufen | Geschwindigkeit | Dehnungsstufen | Haltezeit |
|---------------|-----------------|-------------------------------|-----------|
| 4 | 100 mm/min | 25 % 50 % 75 % 100 % | 30 min |

Tabelle 13 Zeitprogramm des Relaxationsversuchs mit zugeordneten Dehnungsstufen.

In den Bildern 11 und 12 sind die Zeitverläufe der Kraft und des Traversenwegs für die Zwischenschichten PU1 und PU2 dargestellt.

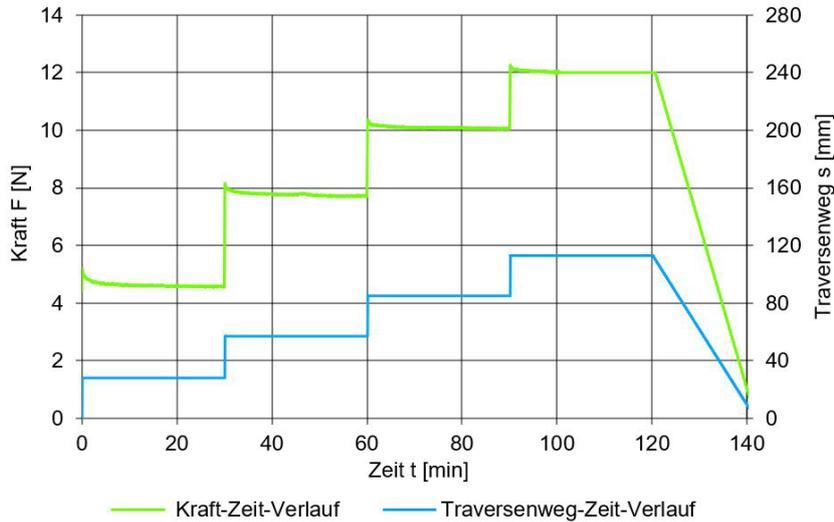


Bild 11 Zeitverläufe von Kraft und Traversenweg während des Relaxationsversuch an Zwischenschicht PU1.

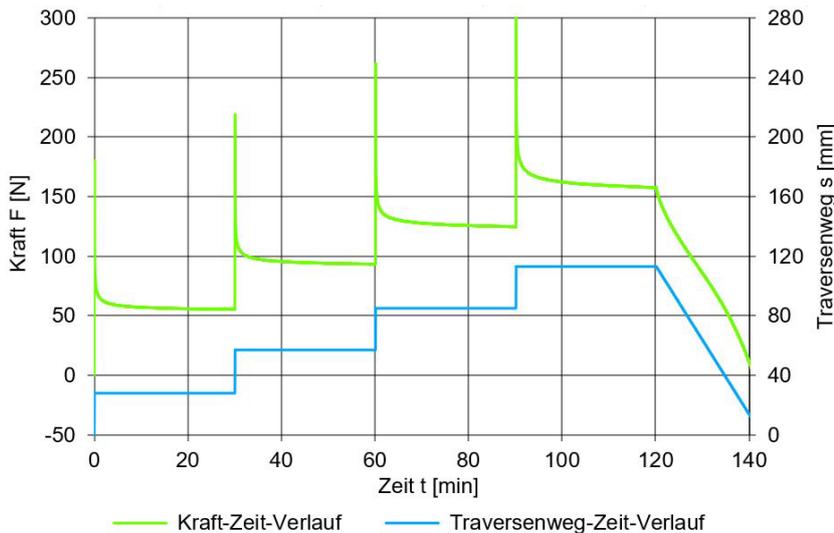


Bild 12 Zeitverläufe von Kraft und Traversenweg während des Relaxationsversuch an Zwischenschicht PU2.

Die beiden Zwischenschichten weisen ein Relaxationsvermögen auf mit einem schwach ausgeprägten Spannungsabfall bei PU1 und einem erheblichen Spannungsabfall bei PU2. PU1 zeigt über die Dauer von 30 min einen durchschnittlichen Spannungsabfall von 6 %, PU2 von durchschnittlich 68 %. Es ist weiterhin erkennbar, dass das zeitabhängige Verhalten nicht von der Höhe der Belastung abhängt. Damit ist das Boltzmann'sche Superpositionsprinzip anwendbar, sodass der dehnungsabhängige Bestandteil der Deformationsgleichung vom zeitabhängigen entkoppelt ist. Das ermöglicht die Bestimmung von Kennfeldern an ausgewählten Belastungsstufen mit kontinuierlichem Zeitverlauf der Spannung.

Die Bestimmung von Elastizitätsmodul und Querdehnzahl erfolgt im weggesteuerten Zugversuch mit der Geschwindigkeit von 1 mm/min.

Dieser Wert entspricht näherungsweise der normativ festgelegten Dehnungsgeschwindigkeit von 1 %/min für die Messtrecke von 50 mm und den Abstand von etwa 100 mm zwischen den Spannbacken. Im Allgemeinen gilt, dass der zeitabhängige Einfluss aus Retardation und Relaxation mit fallender Prüfgeschwindigkeit zunimmt. Demzufolge weisen viskoelastische Materialien niedrigere Modulwerte bei niedrigeren Belastungsgeschwindigkeiten auf. Da aus den zyklischen Versuchen hervorgeht, dass ideal-viskoelastisches Verhalten vorliegt, ist die lineare Extrapolation der Modulwerte auf der Zeitachse zulässig. Die Basis der Extrapolation nach dem Boltzmann'schen Superpositionsprinzip bilden die Ergebnisse der dynamisch-mechanische-thermischen Analyse. Liegt weiterhin thermorheologische Einfachheit vor, können Modulwerte auch entlang der Temperaturachse linear extrapoliert werden. Die Durchführung der Versuche erfolgt bei einer Temperaturstufe und drei Geschwindigkeiten als Stützstellen für die Übertragung auf den gesamten Zeitbereich. Tabelle 14 fasst die Versuchsparameter zusammen.

| Durchlauf | Geschwindigkeit | Dehnungsstufe | Traversenweg |
|-----------|-----------------|---------------|--------------|
| 1 | 5 mm/min | 100 % | 113 mm |
| 2 | 25 mm/min | 100 % | 113 mm |
| 3 | 50 mm/min | 100 % | 113 mm |

Tabelle 14 Parameter für den statischen Zugversuch zur Bestimmung von Elastizitätsmodul und Querdehnzahl.

Die Bilder 13 und 14 geben die Verläufe der Kraft in Abhängigkeit vom Traversenweg für die Zwischenschichten PU1 und PU2 bei drei Belastungsgeschwindigkeiten an.

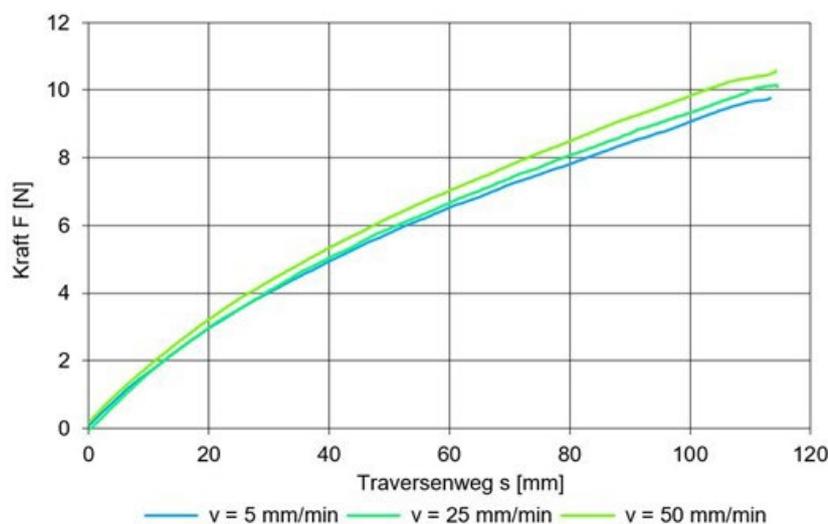


Bild 13 Verlauf der Kraft in Abhängigkeit vom Traversenweg für PU1.

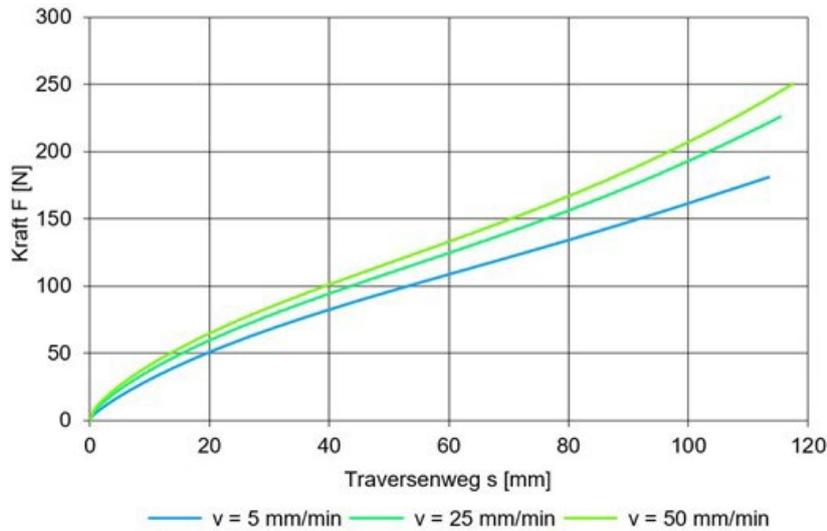


Bild 14 Verlauf der Kraft in Abhängigkeit vom Traversenweg für PU2.

Bild 15 zeigt die Verläufe der Spannung in Abhängigkeit der Dehnung für die beiden Zwischenschichten PU1 und PU2 exemplarisch unter der Belastungsgeschwindigkeit von 1 mm/min. In Bild 16 ist die Querdehnzahl in Abhängigkeit der Längsdehnung für beide Zwischenschichten PU1 und PU2 dargestellt. Die Ermittlung der Spannungs-Dehnungs-Verläufe sowie der Querdehnungs-Längsdehnungs-Beziehung basiert auf den Ergebnissen der optischen Dehnungsmessung unter Berücksichtigung der Querschnittsverringerung mit zunehmender Längsdehnung.

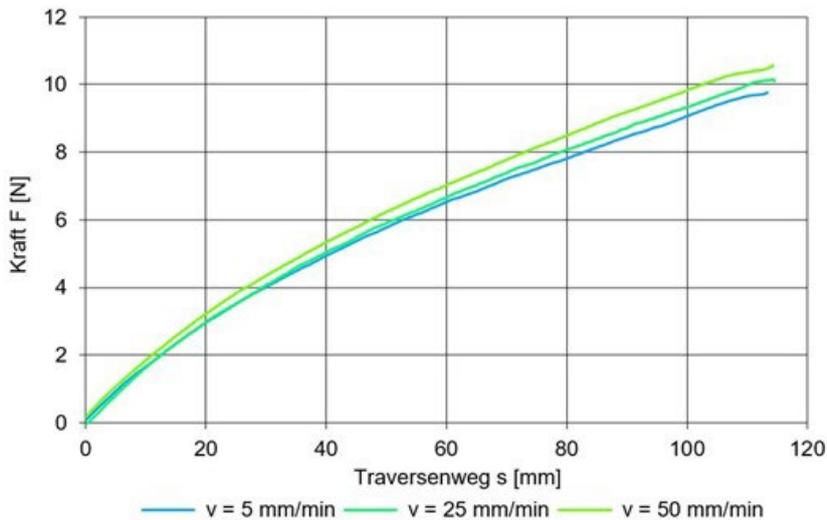


Bild 15 Spannungsverläufe in Abhängigkeit der Längsdehnung für die beiden Zwischenschichten PU1 und PU2 exemplarisch für die Geschwindigkeit 1 mm/min.

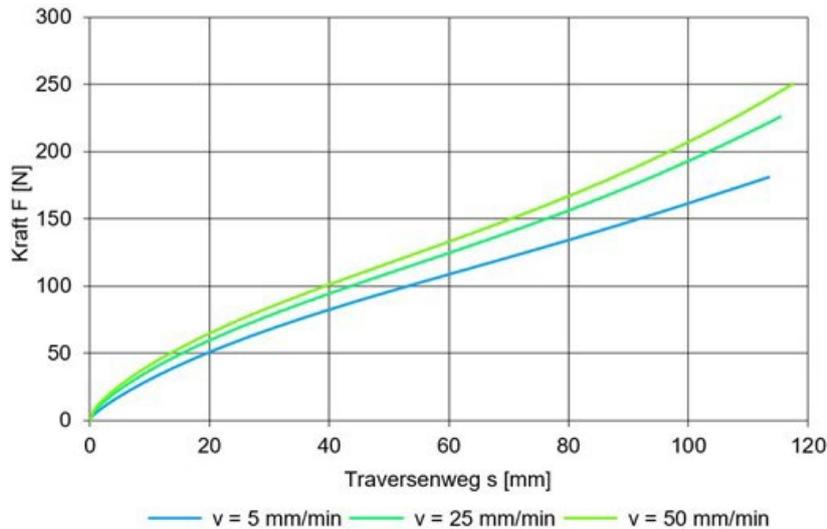


Bild 16 Verlauf der Querdehnzahl in Abhängigkeit der Längsdehnung für die beiden Zwischenschichten PU1 und PU2 exemplarisch für die Geschwindigkeit 1 mm/min.

PU1 weist ein schwach ausgeprägtes geschwindigkeitsabhängiges Deformationsverhalten auf, PU2 ein stark ausgeprägtes geschwindigkeitsabhängiges Deformationsverhalten. PU1 besitzt eine stark ausgeprägte Abhängigkeit der Querdehnzahl von der Längsdehnung, die im Bereich von 0 % bis 10 % der Längsdehnung näherungsweise gummiartiges Verhalten durch Volumenkonstanz aufweist. Mit ansteigender Längsdehnung fällt die Querdehnzahl auf einen Wert von 0,30 bei einer Längsdehnung von 100 % ab. Bei Zwischenschicht PU2 ist die Querdehnung schwächer ausgeprägt, allerdings über das Dehnungsspektrum in Längsrichtung gleichmäßiger verteilt. Die Querdehnzahl fällt von 0,40 bei der Längsdehnung von 0 % auf 0,30 bei der Längsdehnung von 100 % fast linear ab.

Aus dem Relaxationsversuch und dem quasistatischen Versuch zur Bestimmung von Elastizitätsmodul und Querdehnzahl lassen sich Funktionen des Elastizitätsmoduls in Abhängigkeit der Zeit und des Belastungsniveaus angeben. Dem Kraft-Zeit-Verlauf ist jeweils eine der vier Dehnungsstufen beziehungsweise Querschnittsflächen zugeordnet. In Tabelle 15 sind die Dehnungsstufe, der Traversenweg und die tatsächliche, optisch ermittelte Querschnittsfläche angegeben.

| Material | Dehnstufe | Traversenweg | Querschnittsfläche |
|----------|-----------|--------------|----------------------|
| PU1 | 25 % | 28 mm | 31,8 mm ² |
| | 50 % | 57 mm | 26,6 mm ² |
| | 75 % | 86 mm | 21,9 mm ² |
| | 100 % | 113 mm | 19,8 mm ² |
| PU2 | 25 % | 28 mm | 32,6 mm ² |
| | 50 % | 57 mm | 27,1 mm ² |
| | 75 % | 86 mm | 22,4 mm ² |
| | 100 % | 113 mm | 20,2 mm ² |

Tabelle 15 Querschnittsflächen in Abhängigkeit von der Längsdehnung für die beiden Zwischenschichten PU1 und PU2.

Die Ergebnisse zeigen die unterschiedlich ausgeprägte Querdehnung anhand der reduzierten Querschnittsfläche. Aus der dehnungsabhängigen Querschnittsfläche und dem zeitabhängigen Kraftverlauf lassen sich die zeitabhängigen Spannung-Dehnungs-Funktionen auf Grundlage der folgenden Gleichungen ableiten.

$$E(t, \varepsilon) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon} = \frac{F(t)}{\varepsilon A(\varepsilon)}$$

Gleichung 1

mit

A(ε) Querschnittsfläche in Abhängigkeit der Dehnung

F(t) Kraft in Abhängigkeit der Zeit

σ(t) Spannung in Abhängigkeit der Zeit

ε Dehnung

t Zeit in min

Die Funktion F(t) wird in eine Exponentialfunktion überführt, deren Koeffizienten auf dem Zeitintervall zu bestimmen sind. Die Exponentialfunktion nach Gleichung 2 ist in Gleichung 1 für den Elastizitätsmodul zu Gleichung 3 eingesetzt. Es ergibt sich folgender Zusammenhang.

$$F(t) = ae^{bt} + ce^{dt}$$

Gleichung 2

$$E(t, \varepsilon) = \frac{1}{\varepsilon A(\varepsilon)} (ae^{bt} + ce^{dt})$$

Gleichung 3

mit

a, b, c, d Koeffizienten auf dem Zeitintervall

Die Koeffizienten der Exponentialfunktionen sind für beide Materialien in Tabelle 16 angegeben. Die Bilder und 17 und 18 zeigen exemplarisch die Messwerte aus dem Zugversuch und die Funktionen F(t) für das erste Zeitintervall.

| Material | Koeffizient a | Koeffizient b | Koeffizient c | Koeffizient d |
|----------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| PU1 | 0,427 | -0,672 | 4,658 | -0,001 |
| PU2 | 25,390 | -1,099 | 58,830 | -0,002 |

Tabelle 16 Koeffizienten für die Exponentialfunktion zur analytischen Berechnung des zeitabhängigen Elastizitätsmoduls.

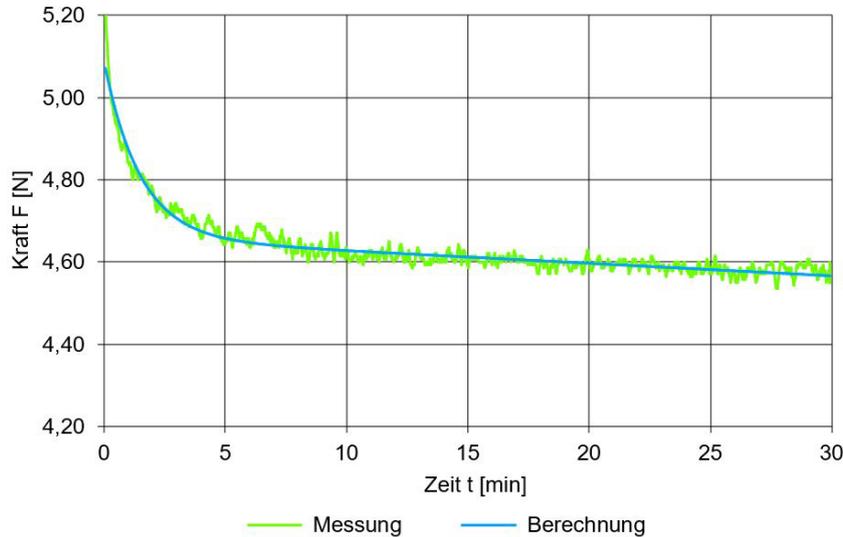


Bild 17 Messwerte und Berechnung mit Exponentialfunktion vom Last-Zeit-Verlauf im ersten Zeitintervall für PU1.

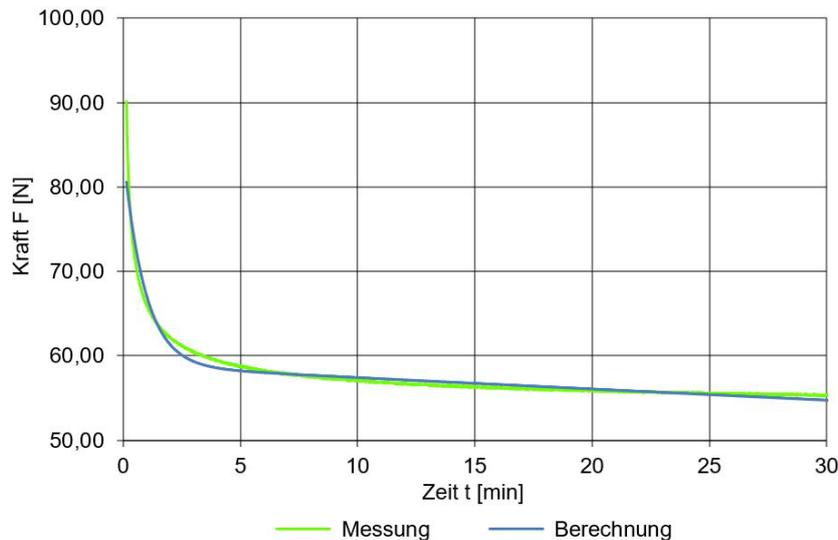


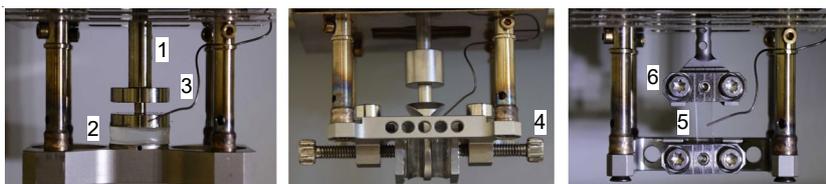
Bild 18 Messwerte und Berechnung mit Exponentialfunktion vom Last-Zeit-Verlauf im ersten Zeitintervall für PU2.

Die für die numerische Berechnung erforderlichen Materialgesetze sind durch die Beschreibung der Exponentialfunktionen gegeben. Der Term vor der Klammer repräsentiert die Dehnungsabhängigkeit als von der Zeit entkoppelter Bestandteil, der Term in der Klammer beschreibt die Zeitabhängigkeit des Materials. Insgesamt zeigt PU1 eine sehr niedrige Steifigkeit, ein schwach ausgeprägtes Relaxationsverhalten und eine durchschnittlich hohe Querdehnung. PU2 weist eine hohe Steifigkeit auf, ein stark ausgeprägtes Relaxationsverhalten und eine durchschnittlich geringe Querdehnung.

Das für die Entwicklung von dauerhaften und tragfähigen Verbundquerschnitten erforderliche Vermögen des Spannungsabbaus aufgrund von temperaturinduzierten Differenzverschiebungen kann mit PU1 durch geringe Steifigkeit und mit PU2 durch ein hohes Relaxationsvermögen gewährleistet werden. Es ist für Zwischenschicht PU2 eine ausreichende Schlagzähigkeit zum Nachweis der aktiven und passiven Sicherheit zu bestimmen, die die Substitution von Polycarbonat in der Verglasung ermöglicht.

4.3.2 Dynamisch-mechanisch-thermische Analyse

Das Verfahren der dynamisch-mechanisch-thermischen Analyse basiert auf der Messung des Antwortverhaltens deformierbarer Proben. Die prismatischen Proben werden in Zug-, Druck-, Biege-, Scher- und Penetrationsversuchen zyklisch belastet. Neben den unterschiedlichen Beanspruchungsarten ist in dem Verfahren die Anwendung von zwei Modi der dynamischen Belastung möglich. Im ersten Modus liegt die Kraftanregung durch den Oszillator außerhalb der Eigenfrequenz der Probe und erzeugt eine erzwungene Schwingung. Da sich, analog zum physikalisch nichtlinearen Einmassenschwinger, ein Phasenversatz auf der Zeitachse und eine Amplitudendifferenz auf der Spannungs- beziehungsweise Dehnungsachse zwischen Erreger- und Antwortsignal einstellt, lässt die Messung der dissipierten Energie über Spannung und Dehnung entsprechende Rückschlüsse auf die innere Reibung der Probe zu. Im zweiten Modus erfolgt die Bestimmung der Energiedissipation bei freier Schwingung mit anschließender Analyse des Dämpfungsdekrementes über das Abklingverhalten des einmal angestoßenen Schwingers. Da die Eigenfrequenz mit ansteigender Temperatur und zunehmendem Erweichen der Probe ab- und die Dämpfung zunimmt, entsteht eine unvollständige Schwingung ohne erkennbare Periodizität, sodass bei höheren Temperaturen keine verwertbaren Daten zu ermitteln sind. Aus diesem Grund erfolgt die dynamisch-mechanisch thermische Analyse der beiden Zwischenschichten im ersten Modus mit erzwungener Schwingung. In Bild 19 sind die drei unterschiedlichen Modi Kompression, Scherung und Zug dargestellt. Bild 20 zeigt die zylindrischen Proben für den Kompressions- und Schermodus und die prismatischen Proben für den Zugversuch. Tabelle 17 enthält die äußeren Abmessungen der Proben.



| | | | |
|---|--------------------------|---|---------------------|
| 1 | Fühlstempel / Oszillator | 4 | Schraubklemme |
| 2 | Zylindrische Probe | 5 | Prismatische Probe |
| 3 | Thermoelement, Pt-100 | 6 | Schraub-Klemmbacken |

Bild 19 Halterungen der Proben für die unterschiedlichen Modi der dynamisch-mechanisch thermischen Analyse (DMTA) der Zwischenschichten. Links: Kompressionsmodus. Mitte: Schermodus. Rechts: Zugmodus.

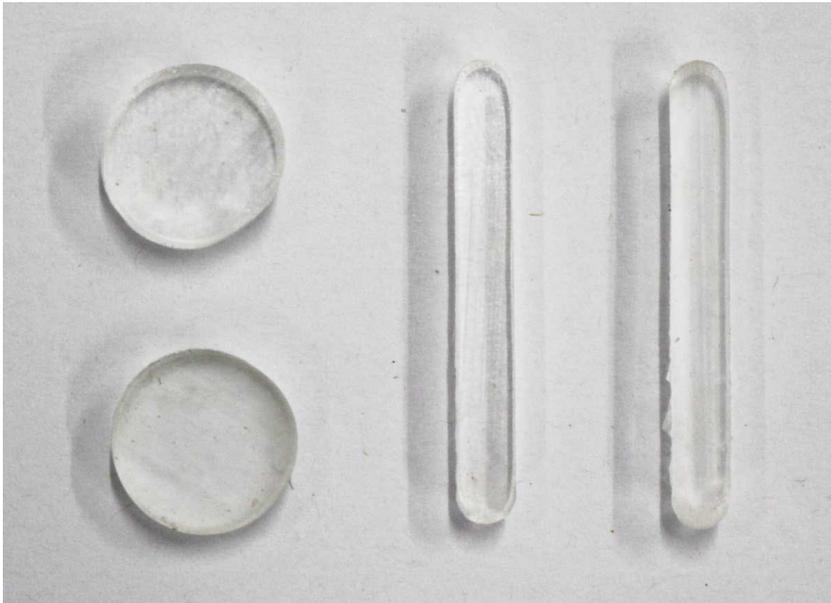


Bild 20 Proben für die dynamisch-mechanisch thermische Analyse der Zwischenschichten. Links: Zylindrische Proben. Rechts: Prismatische Proben.

| Prüfmodus | Form | Abmessungen |
|-----------|----------|---|
| Druck | Zylinder | $r = 15 \text{ mm} \mid d = 4 \text{ mm}$ |
| Scherung | Zylinder | $r = 15 \text{ mm} \mid d = 4 \text{ mm}$ |
| Zug | Prisma | $l = 40 \text{ mm} \mid b = 5 \text{ mm} \mid d = 4 \text{ mm}$ |

Tabelle 17 Abmessung der Proben für die dynamisch-mechanisch thermische Analyse (DMTA) der Zwischenschichten.

Das temperaturabhängige mechanische Verhalten wird mit dem aus der Messung abgeleiteten Speicher- und Verlustmodul angegeben. Der Verlustmodul E'' kennzeichnet die durch innere Reibung in Wärme umgewandelte mechanische Energie und der Speichermodul E' die über elastische Verformung gespeicherte Energie. Der Verlustfaktor $\tan(\delta)$ beschreibt das Verhältnis von Verlust- zu Speichermodul. Der Übergang vom energieelastischen zum entropieelastischen Zustand ist durch den starken Abfall des Speichermoduls und den Maximalwert des Verlustmoduls gekennzeichnet. Die Extremstelle des Verlustmoduls entspricht dabei der Wendestelle des Speichermoduls. Da der Speichermodul an der Stelle des Maximums des Verlustmoduls den Minimalwert noch nicht erreicht, liegt das Maximum des Verlustfaktors als Quotient aus Verlust- zu Speichermodul etwas oberhalb auf der Temperaturachse.

Die Glasübergangstemperatur T_g ist die nach normativ festgelegten Verfahren der Kurvenauswertung ermittelte Temperatur im Glasübergangsbereich. Gebräuchliche Verfahren der Bestimmung des Glasübergangspunkts aus dem Verlauf des Speichermoduls sind die Stufen- und die Tangentenmethode.

Zur Untersuchung der beiden Zwischenschichten PU1 und PU2 werden die beiden Modi Zug und Druck an jeweils fünf Proben angewendet. Der Modus Scherung bildet das Verhalten des Materials nur unzureichend ab, da Polyurethan ein ausgeprägte Ausdehnungsverhalten mit ansteigender Temperatur aufweist. Während dem zweischnittigen Scherversuch gemäß Bild 19 bleiben die Widerlagerflächen links und rechts der Probe unverschieblich, sodass sich mit ansteigender Temperatur eine Zwangsspannung infolge Ausdehnung der Probe einstellt. Die in Querrichtung nicht messbaren Normalspannungen infolge Temperaturexpansion überlagern sich mit der Scherspannung in Beanspruchungsrichtung und verfälschen dadurch das Ergebnis.

In den beiden Modi Zug und Druck tritt der Effekt der Temperaturexpansion zwar auch auf, kann aber durch Nachführen des Fühlstempels ausgeglichen werden. Mit der Definition einer konstanten Vorspannkraft verfährt der Fühlstempel in der Art, dass die Kraft über die Versuchsdauer konstant bleibt. Die Ausdehnung infolge Temperatur bleibt damit unbehindert und zeigt nur einen geringen Einfluss auf die Ergebnisse der Untersuchung. Die Verlängerung der Probe, die theoretisch zu einer Reduzierung der Dehnsteifigkeit führt, ist aufgrund sehr kleiner Dehnungen im linear-elastischen Bereich des Spannungs-Dehnungsverlaufs ausgeschlossen. Der Prüfung im Kompressionsmodus sind die Parameter Frequenz, Amplitude, statische Kraft, Temperaturspektrum und Heizrate zugrunde gelegt. Die Frequenz ist in allen Versuchen mit 1 Hz definiert.³⁸ Tabelle 18 gibt die Parameter für den Versuch im Kompressionsmodus an.

| Frequenz | Amplitude | Statische Kraft | Temperatur | Heizrate |
|----------|-----------|-----------------|--------------------|----------|
| 1 Hz | 25 µm | 1 N | -80 °C bis +120 °C | 2 K/min |

Tabelle 18 Parameter für die dynamisch-mechanisch thermische Analyse (DMTA) der Zwischenschichten im Kompressionsmodus.

In Bild 21 und Bild 22 sind Speicher- und Verlustmodul als Mittelwertkurven aus jeweils fünf Proben für PU1 und PU2 in Abhängigkeit der Temperatur für den Kompressionsmodus dargestellt.

³⁸ Vergleiche DIN EN ISO 6721-1.

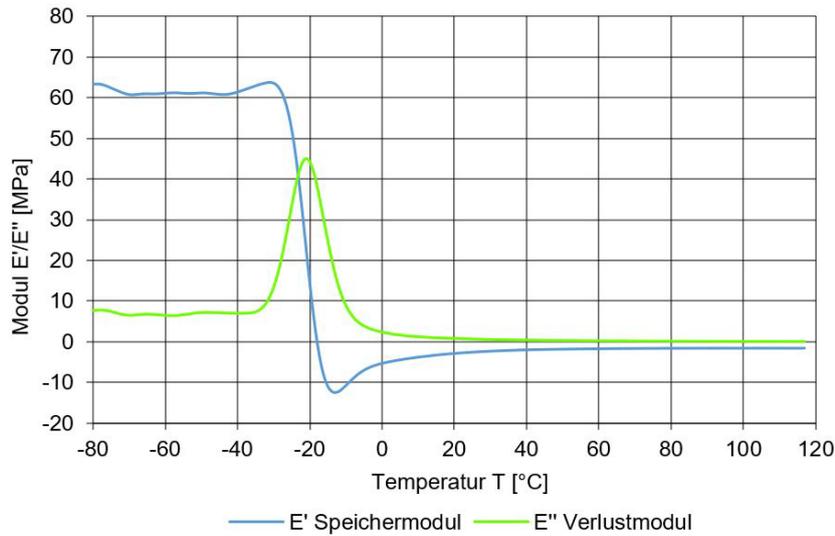


Bild 21 Dynamisch-mechanisch thermische Analyse von PU1 im Kompressionsmodus. Darstellung von Speicher- und Verlustmodul in Abhängigkeit der Temperatur.

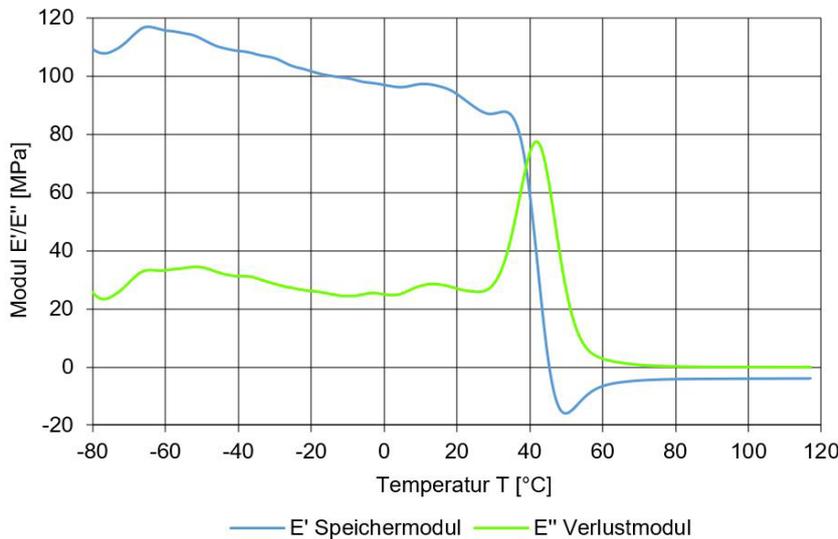


Bild 22 Dynamisch-mechanisch thermische Analyse von PU2 im Kompressionsmodus. Darstellung von Speicher- und Verlustmodul in Abhängigkeit der Temperatur.

Das Maximum des Verlustmoduls von PU1 kennzeichnet den Glasübergangspunkt bei der Glasübergangstemperatur T_g von -21 °C . PU2 verzeichnet die Glasübergangstemperatur bei $+42\text{ °C}$. Beide Zwischenschichten weisen einen sprunghaften Phasenübergang vom energieelastischen zum entropieelastischen Zustand auf.

Der Prüfung im Modus Zug sind die Parameter Frequenz, Amplitude, statische Kraft, Temperaturspektrum und Heizrate zugrunde gelegt. Die Frequenz ist in allen Versuchen mit 1 Hz definiert.³⁹ Tabelle 19 gibt die Parameter für den Zugversuch an.

³⁹ Vergleiche DIN EN ISO 6721-1.

| Frequenz | Amplitude | Statische Kraft | Temperatur | Heizrate |
|----------|-------------------|-----------------|--------------------|----------|
| 1 Hz | 125 μm | 0,5 N | -80 °C bis +120 °C | 2 K/min |

Tabelle 19 Parameter für die dynamisch-mechanisch thermische Analyse der Zwischenschichten im Modus Zug.

Da im Zugversuch prismatische Proben verwendet werden, die einen geringeren Querschnitt als die zylindrischen Proben aufweisen, fällt die statische Kraft niedriger aus. Zu hohe Vorspannkkräfte bewirken eine große Dehnung der Probe mit signifikantem Einfluss auf die Querschnittsfläche und damit die Modulwerte. Aufgrund der größeren Probenlänge ergibt sich eine größere erforderliche Amplitude, um den Fühlstempel im mittleren Bereich der Kraftkapazität zu belasten. Zu niedrige Amplituden ergeben niedrige dynamische Kräfte, die im Grundrauschen des Messsignals liegen. Da sich der Glasübergangspunkt bei PU1 unter dem Gefrierpunkt befindet, werden die Versuche im Modus Zug im Bereich von -80 °C bis ± 0 °C durchgeführt. Mit dem Erweichen der Probe über ± 0 °C ist die Vorspannung der Probe mit großen Dehnungen verbunden und ab etwa +30 °C nicht mehr möglich. Das Temperaturspektrum von PU2 reicht von -80 °C bis +120 °C, da die Erweichung später eintritt.

In Bild 23 und Bild 24 sind Speicher- und Verlustmodul als Mittelwertkurven aus jeweils fünf Proben für PU1 und PU2 in Abhängigkeit der Temperatur für den Modus Zug dargestellt.

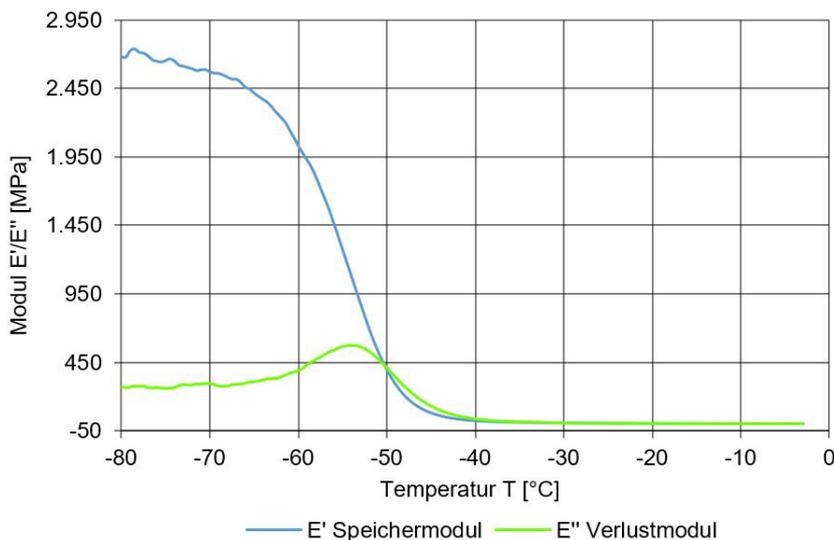


Bild 23 Dynamisch-mechanisch thermische Analyse von PU1 im Modus Zug. Darstellung von Speicher- und Verlustmodul in Abhängigkeit der Temperatur.

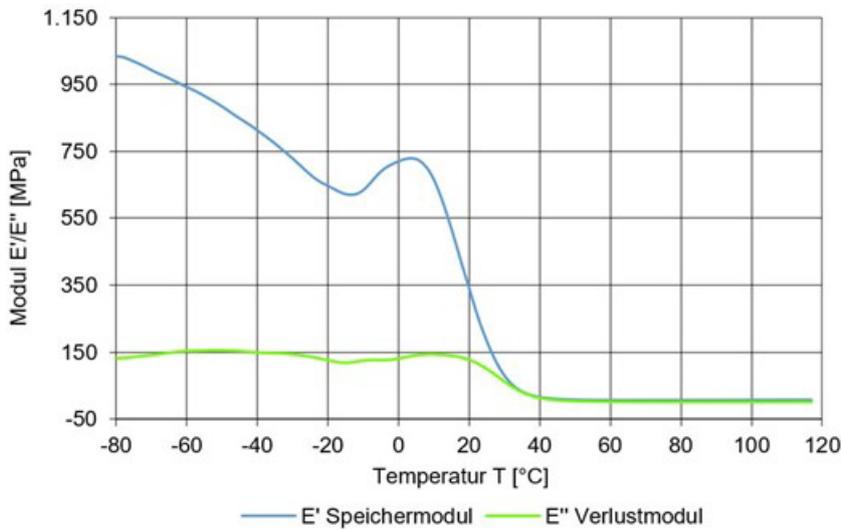


Bild 24 Dynamisch-mechanisch thermische Analyse von PU2 im Modus Zug. Darstellung von Speicher- und Verlustmodul in Abhängigkeit der Temperatur.

Das Maximum des Verlustmoduls von PU1 kennzeichnet den Glasübergangspunkt bei der Glasübergangstemperatur T_g von -54 °C . PU2 verzeichnet die Glasübergangstemperatur bei $+17\text{ °C}$. Beide Zwischenschichten weisen einen sprunghaften Phasenübergang vom energieelastischen Zustand zum entropieelastischen Zustand auf. PU2 erfährt zwischen -12 °C und $+4\text{ °C}$ eine Verfestigung, die im Kompressionsmodus nicht in Erscheinung tritt.

Die Ergebnisse der dynamisch-mechanisch thermischen Analyse zur Identifizierung der Phasenübergänge beider Zwischenschichten weichen in Abhängigkeit der unterschiedlichen Modi ab. Tendenziell zeigt PU1 den Glasübergangspunkt im Bereich unterhalb von $\pm 0\text{ °C}$ und PU2 einen Glasübergangspunkt im Bereich oberhalb von dieser Temperatur. Die Energiedissipation ergibt sich im Modus Druck aufgrund der geringeren möglichen Amplituden und der deshalb geringeren Differenzverschiebung der Monomere im Vergleich zum Modus Zug erst bei höheren Temperaturen. Im Modus Zug stellt sich der Effekt der inneren Reibung schon bei niedrigeren Temperaturen ein. Tabelle 20 fasst die Ergebnisse der Untersuchung zusammen.

| Material | Prüfmodus | Glasübergangstemperatur |
|----------|-----------|-------------------------|
| PU1 | Druck | -21 °C |
| | Zug | -54 °C |
| PU2 | Druck | $+42\text{ °C}$ |
| | Zug | $+17\text{ °C}$ |

Tabelle 20 Glasübergangstemperaturen in Abhängigkeit vom Prüfmodus für beide Zwischenschichten PU1 und PU2.

4.3.3 Untersuchung zum Haftverbund

Grundlage für die Untersuchung des Haftverbunds sind die in 5.1 festgelegten Querschnittsaufbauten mit dem Vakuum-Isolierglas Fineo 8. In Variante 1 schließen sich jeweils symmetrisch eine Zwischenschicht aus PU1 der Nenndicke von 2 mm, Polycarbonat der Nenndicke von 5 mm, eine weitere Zwischenschicht aus PU1 der Nenndicke von 2 mm und Dünnglas der Nenndicke von 2 mm an. In Variante 2 folgt auf das Vakuum-Isolierglas symmetrisch eine Zwischenschicht aus PU2 der Nenndicke von 6 mm und das außenliegende Dünnglas der Nenndicke von 2 mm.

Die Untersuchung des Haftverbunds erfolgt durch den harten Stoß auf den Verbund mit dem Kugelfallversuch nach DIN 52338. Dabei fällt eine Stahlkugel mit einem Durchmesser von 63,5 mm aus einer Höhe von 4.000 mm auf den Prüfkörper. Die am Lehrstuhl für Tragkonstruktion der Universität Siegen verfügbare Prüfeinrichtung ermöglicht den Stoß der Stahlkugel ohne Anfangsimpuls. Der Abstand der Auftreffstelle zum Mittelpunkt des Prüfkörpers darf 50 mm nicht überschreiten. Bild 25 zeigt den Versuchsaufbau mit dem eingespannten Prüfkörper im Moment unmittelbar nach dem Aufprall der Stahlkugel. Zu erkennen ist die abprallende Stahlkugel sowie als weiße Verfärbung am Auftreffpunkt aufwirbelnde Glassplitter. Nur unmittelbar an der Auftreffstelle entstehen sehr feine Bruchstücke der oberen Glastafel, die sich ablösen, in der restlichen Fläche ist die Glastafel auch nach dem Bruch fest mit der Zwischenschicht verbunden.



Bild 25 Stahlkugel im Kugelfallversuch unmittelbar nach dem Aufprall auf die Verglasung.

Die Prüfkörper sind in einem Stahlrahmen vierseitig linienförmig gelagert. Nach dem Auftreffen der Kugel erfolgt die Dokumentation der durchschlagenen Prüfkörper sowie der geschädigten, aber nicht durchdrungenen Prüfkörper. Zusätzlich werden die Masse und die

größten Abmessungen der von der Zwischenschicht abgelösten Glassplitter erfasst. Die Prüfung gilt als bestanden, wenn der Prüfkörper nicht von der Kugel durchdrungen wird. Tabelle 21 zeigt die Ergebnisse des Kugelfallversuchs. Keiner der fünf Prüfkörper wird vom Stoßkörper durchdrungen. Es tritt bei allen Prüfkörpern eine Zerstörung der oberen Dünnglastafel sowie des Vakuum-Isolierglases auf. Die untere Dünnglastafel bleibt bei einem Prüfkörper intakt, bei den anderen vier treten Risse auf. Insgesamt liegt bei allen Prüfkörpern kein Splitterabgang auf der Unterseite der Verglasung vor. Das Rückhalten der Glasbruchstücke auf der Unterseite der Prüfkörper durch die Zwischenschicht bestätigt den günstigen Haftverbund mit der Glasoberfläche.

| Prüfkörper | Nenn-dicke | Realdicke | Durchschlag | Zerstörung | Splitter-masse |
|------------|------------|-----------|-------------|--------------------|----------------|
| 1 | 30 mm | 29,4 mm | nein | oben / VIG | keine |
| 2 | 30 mm | 29,3 mm | nein | oben / VIG / unten | keine |
| 3 | 30 mm | 29,3 mm | nein | oben / VIG / unten | keine |
| 4 | 30 mm | 29,3 mm | nein | oben / VIG / unten | keine |
| 5 | 30 mm | 29,2 mm | nein | oben / VIG / unten | keine |

Tabelle 21 Ergebnisse der Kugelfallversuche nach DIN EN 14449 für Variante 1.

Die durch den Aufprall des Stoßkörpers beim Kugelfallversuch induzierte Verformung ist in Bild 26 dokumentiert. In Abhängigkeit der Zeit wird die Verformung der Prüfkörper in Plattenmitte abgebildet. Die maximale Verformung als Durchbiegung in Reaktion auf das erste Auftreffen der Stahlkugel verhält sich bei allen Prüfkörpern ähnlich und liegt zwischen -9,15 mm bei Prüfkörper 5 bis -6,89 mm bei Prüfkörper 1. Das anschließende Rückschwingen des Prüfkörpers ist bei Prüfkörper 1 am stärksten ausgeprägt, bei Prüfkörper 3 am geringsten. In Abhängigkeit der absorbierten Energie durch den Verglasungsaufbau und den Rückprallwinkel erfolgt der zweite Aufprall der Stahlkugel etwas zeitversetzt. Die bleibende Verformung ist mit 0,5 mm bei Prüfkörper 1 am geringsten und liegt für die anderen Prüfkörper bei ungefähr 1,1 mm. Die größere Rückverformung des Prüfkörpers 1 und die geringere plastische Verformung entsprechen dem Ergebnis der visuellen Untersuchung, dass nur bei diesem Prüfkörper die untere Glastafel intakt bleibt.

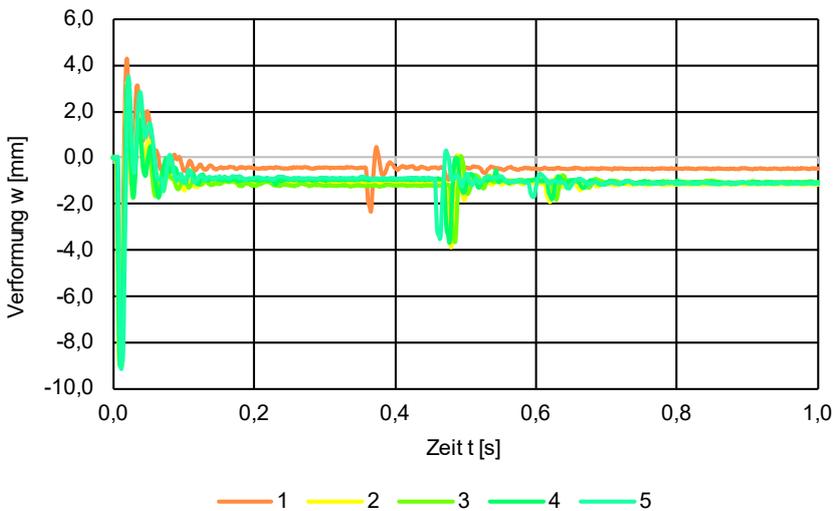


Bild 26 Verformung in Prüfkörpermitte durch den harten Stoß mit einer Stahlkugel bei Variante 1.

Die Analyse von Bruchbildern bei Glas ermöglicht die Einschätzung der Bruchursache und das Treffen von Aussagen über den Spannungszustand vor dem Bruch. Die zum Zeitpunkt des Bruches im Glas gespeicherte Energie in Form von Eigenspannungen und gegebenenfalls einer gezielten Vorspannung bestimmt die Größe der Bruchstücke. Mit zunehmender Vorspannung reduziert sich die Größe der Bruchstücke. Das typische Bruchbild bei nicht vorgespanntem Floatglas weist entsprechend große Bruchstücke auf. Im Unterschied dazu sind die Bruchstücke von thermisch vorgespanntem Einscheibensicherheitsglas mit einer hohen Vorspannung kleinteilig.⁴⁰

Die Erfassung und die Analyse des Bruchbildes im Kugelfallversuch erfolgt durch das Gerät CulletScanner von Softsolution GmbH am Lehrstuhl für Tragkonstruktion der Universität Siegen. Das Gerät erstellt hochauflösende Aufnahmen der Prüfkörper, die eine detaillierte Untersuchung kleinster Bereiche und Bruchstücke ermöglichen.

Bild 27 zeigt einen zerstörten Prüfkörper nach dem Kugelfallversuch. Das Bruchbild weist große Bruchstücke auf, die typisch für das Bruchverhalten von nicht vorgespanntem Glas sind. Im Bereich um die Auftreffstelle der Stahlkugel ist die Größe der Bruchstücke deutlich kleiner. Die Energie des harten Stoßes ist in diesem Bereich maximal und in Plattenmitte tritt die größte Verformung auf. Im Unterschied zum duktilen Materialverhalten der beiden Kunststoffe Polycarbonat und Polyurethan ist eine Anpassung an die Verformung für das spröde Glas nur durch den Bruch in kleinere Bruchstücke möglich.

⁴⁰ Vergleiche Wagner 2020.



Bild 27 Aufnahme von Bruchbild des beschädigten Prüfkörpers nach dem Kugelfallversuch.

Dieser Zusammenhang wird in Bild 28 oben mit großen Bruchstücken und unten mit kleinen Bruchstücken schematisch dargestellt. In den Randbereichen ist die Verformung des Prüfkörpers durch die Auflagerung im Rahmen deutlich geringer und die Bruchstücke fallen in diesem Bereich größer aus.

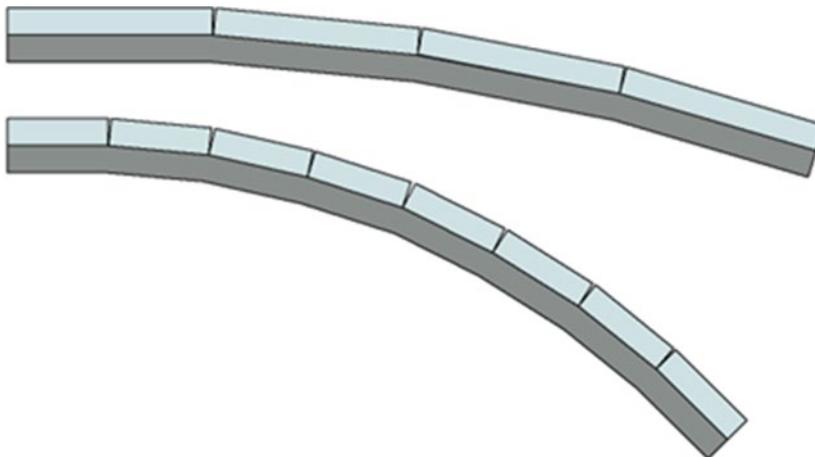


Bild 28 Schematische Darstellung des Zusammenhangs zwischen Bruchstückgröße und Verformbarkeit.

Im gebrochenen Zustand gewährleisten größere Bruchstücke eine höhere Resttragfähigkeit als kleinere Bruchstücke, da die größeren Abmessungen eine Verkantung untereinander ermöglichen und dadurch mit dem Haftverbund der Zwischenschicht im gebrochenen Zustand

eine höhere Steifigkeit erzeugen. Die großen Bruchstücke führen zu einem stabilen Zustand, eine Rückverformung in den Ausgangszustand ist durch die plastische Verformung aber nicht möglich. Die gebrochene untere Glastafel bei den Prüfkörpern 2 bis 5 behindert die Rückverformung in den Ausgangszustand. Prüfkörper 1 mit intakter unterer Glastafel weist eine wesentlich geringere plastische Verformung auf.

Ein Modell für die geometrisch nichtlineare Berechnung mit dem Programm Ansys simuliert den Aufprall der Kugel vereinfacht mit einer statischen Ersatzlast als Punktlast. Die qualitative Spannungsverteilung ist in Bild 29 dem realen Bruchbild gegenübergestellt. Auf der Oberseite der Verglasung bilden sich insbesondere radial verlaufende und ringförmige Risslinien aus, die dem Verlauf der Spannungen entsprechen. Die vereinfachte Darstellung der Spannungen berücksichtigt allerdings nicht die tatsächliche Einwirkung des Stoßkörpers sowie lokale Effekte, die um den Bruchursprung entstehen. In den tieferliegenden Glasschichten verlaufen die Risslinien stärker in diagonaler Richtung, wie im Bruchbild erkennbar. Auf der Unterseite bilden sich Druckbereiche in der Mitte der seitlichen Auflager aus, die diagonalen Risslinien entstehen entlang der sich ausbildenden Zugbereiche.

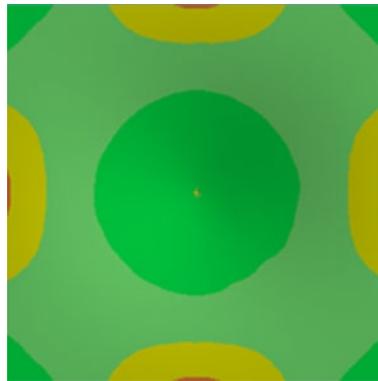


Bild 29 Vergleich zwischen dem Bruchbild nach dem Auftreffen der Stahlkugel (links) und der Spannungsverteilung der oberen Glastafel an der Oberseite nach der numerischen Berechnung unter einer Punktlast mit Ansys (rechts). Das Rissbild stimmt qualitativ mit dem Verlauf der Hauptspannungen überein. Maximale Zugspannungen sind rot, Druckspannungen blau markiert.

Das Vakuum-Isolierglas wird durch den Aufprall der Stahlkugel bei allen fünf Prüfkörpern zerstört. Dabei tritt der initiale Bruch in der Mitte der seitlichen Ränder auf, da hier im Randverbund die höchsten Spannungen auftreten. Bild 29 verdeutlicht den Zusammenhang. Die größten Hauptzugspannungen liegen mittig im Randverbund auf der Oberseite der oberen Glastafel vor, gleichzeitig wirken auf der Unterseite an gleicher Stelle die größten Hauptdruckspannungen, sodass im Randverbund entsprechende Scherspannungen entstehen. Die Aufnahme in Bild 30 zeigt die Situation an dieser Stelle des Randverbundes nach dem Bruch. Durch den Bruch der äußeren Glastafeln des Vakuum-Isolierglases tritt schlagartig Luft in den evakuierten Scheibenzwischenraum ein. Die einströmende Luft bildet an dieser Stelle einen Sog aus, der Bruchstücke des Randverbundes in das Innere des Scheibenzwischenraumes trägt.

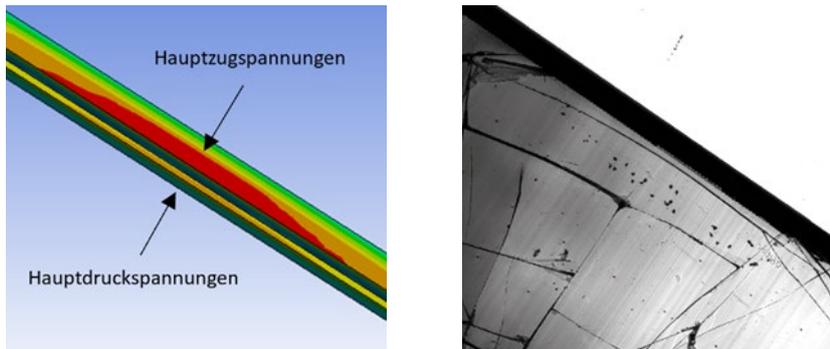


Bild 30 Vergleich zwischen dem Randverbund aus der Aufnahme nach dem Bruch (links) und der Spannungsverteilung im Vakuum-Isolierglas nach der numerischen Berechnung (rechts).

Die hochauflösende Aufnahme erfasst auch die starke Verformung der Abstandhalter im Bereich erhöhter Schubkräfte. Um die gleiche Verformung in Plattenmitte zu erreichen, müssen sich die obere und untere Glastafel auf der Diagonalen weniger gegeneinander verschieben als auf dem kürzeren Weg von der Plattenmitte zum Rand. Diesen Zusammenhang bilden die stark deformierten Abstandhalter deutlich ab, deren Verformung im Bereich der Mittelachsen der Prüfkörper am stärksten ist. Durch die Scherbeanspruchung werden die kugelförmigen Abstandhalter in eine länglich ellipsenförmige Form gebracht.

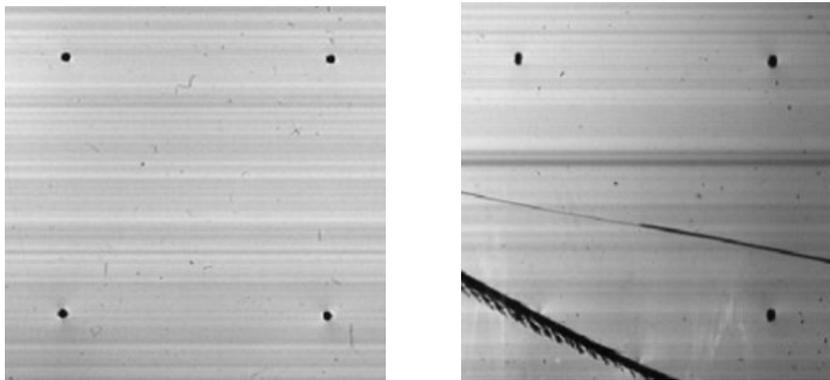


Bild 31 Vergleich zwischen den unverformten (links) und den verformten Abstandhaltern (rechts) nach dem Aufprall der Kugel im Bereich der Mittelachsen des Prüfkörpers.

Bild 31 zeigt links vier kugelförmige Abstandhalter mit einem Durchmesser von 0,1 mm bei unzerstörtem Zustand der Glastafeln. Auf der rechten Seite ist deutlich die Verformung von einer runden in eine ovale Form in Richtung der Scherbeanspruchung erkennbar. Die Detailaufnahme zeigt einen Ausschnitt im mittleren Bereich des Prüfkörpers nahe dem Randverbund.

Variante 2 unterscheidet sich von Variante 1 durch den Ersatz der Polycarbonatplatte durch die steifere Zwischenschicht PU2 mit einer Nennstärke von 6 mm.

| Prüf- körper | Nenn- dicke | Realdicke | Durch- schlag | Zerstörung | Splitter- masse |
|-----------------|----------------|-----------|------------------|--------------------|--------------------|
| 1 | 23 mm | 25,2 mm | nein | oben / VIG | keine |
| 2 | 23 mm | 25,1 mm | nein | oben / VIG | keine |
| 3 | 23 mm | 24,6 mm | nein | oben / VIG | keine |
| 4 | 23 mm | 25,2 mm | nein | oben / VIG | keine |
| 5 | 23 mm | 25,0 mm | nein | oben / VIG / unten | keine |

Tabelle 22 Ergebnisse des Kugelfallversuchs nach DIN EN 14449 für Variante 2.

Die Ergebnisse des Kugelfallversuchs sind in Tabelle 22 dargestellt. Bei keinem der fünf Prüfkörper erfolgt ein Durchschlag der Stahlkugel und die Prüfung ist bestanden. Der Aufprall des Stoßkörpers zerstört bei allen Prüfkörpern die obere Dünnglastafel sowie das Vakuum-Isolierglas. Nur bei Prüfkörper 5 bricht auch die untere Dünnglastafel. Ein Splitterabgang liegt bei keinem Prüfkörper vor.

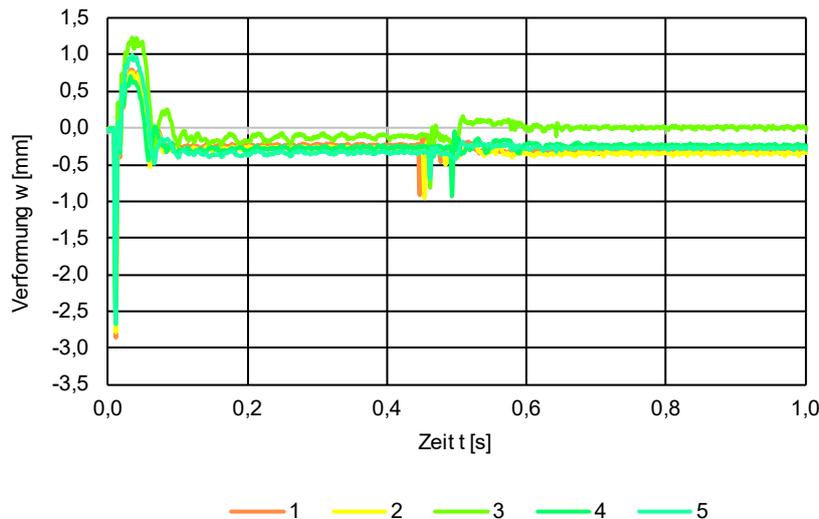


Bild 32 Verformung in Prüfkörpermitte durch den Stoß mit einer Stahlkugel bei Variante 2.

Die deutlich höhere Steifigkeit von Variante 2 im Vergleich zum Aufbau von Variante 1 zeigt Bild 32. Die Verformung bei Auftreffen der Stahlkugel liegt unter der von Variante 1. Im Mittelwert weist Variante 1 eine maximale Verformung von 8,4 mm auf, im Vergleich dazu liegt die maximale Verformung für Variante 2 bei 2,7 mm. Damit beträgt die maximale Verformung bei Variante 2 nur etwa 32 % von Variante 1, bei gleichzeitiger Reduktion der Gesamtnennstärke von 30,0 mm auf 24,0 mm um etwa 80 %. Die Schwingungen nach dem Auftreffen der Stahlkugel sind bei Variante 2 ebenfalls deutlich geringer als bei Variante 1. Die maximale Verformung in positiver Richtung liegt für Variante 1 bei einem Mittelwert von 3,3 mm und für Variante 2 bei 0,9 mm. Analog zu Variante 1 zeigt Bild 32 den Einfluss der gebrochenen unteren Glastafel auch für Variante 2. Prüfkörper 1 weist als einziger mit gebrochener unterer Glastafel die größte plastische Verformung auf,

die ungefähr dem doppelten Wert im Vergleich zu den Prüfkörpern mit intakter Unterseite entspricht.

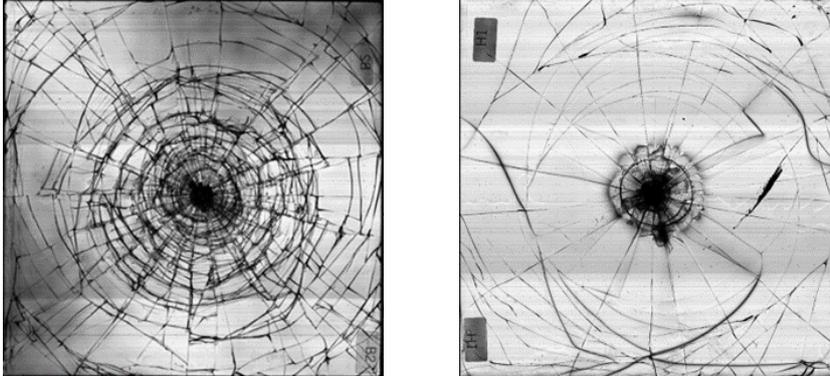


Bild 33 Vergleich zwischen dem Bruchbild von Variante 1 mit dem Bruchbild von Variante 2 nach dem Auftreffen der Stahlkugel.

Bild 33 zeigt den Vergleich des Bruchbildes von Variante 1 links und Variante 2 rechts durch die beiden Aufnahmen mit dem Culetscanner. Es ist bei Variante 1 deutlich der Einspanneffekt in den Ecken der Prüfkörper zu erkennen. Die damit verbundene geringere Verformung beim Aufprall der Stahlkugel führt zu größeren Bruchstücken in diesem Bereich. Im Vergleich dazu liegen im Bereich unmittelbar um die Auftreffstelle deutlich größere Verformungen und kleinere Bruchstücke vor. Bei der steiferen Variante 2 ist im Bruchbild ebenfalls der Einspanneffekt in den Ecken zu erkennen. Durch die höhere Steifigkeit der Zwischenschicht und die reduzierte Durchbiegung weist Variante 2 allerdings deutlich größere Bruchstücke der oberen Glastafel des Vakuum-Isolierglases um die Auftreffstelle auf. Die Aufprallenergie der Stahlkugel wird von der steiferen Zwischenschicht aufgenommen und anschließend in die Auflager abgeleitet und die Spannungen im Glas sind deutlich geringer, als bei Variante 1. In der Aufnahme von Variante 2 ist ein nahezu kreisrunder Rissverlauf mit einem Radius von etwa 40 mm um die Auftreffstelle deutlich zu erkennen. Diese ringförmig verlaufenden Risse treten bei allen Prüfkörpern in ähnlicher Form in der oberen Glastafel des Vakuum-Isolierglases auf.

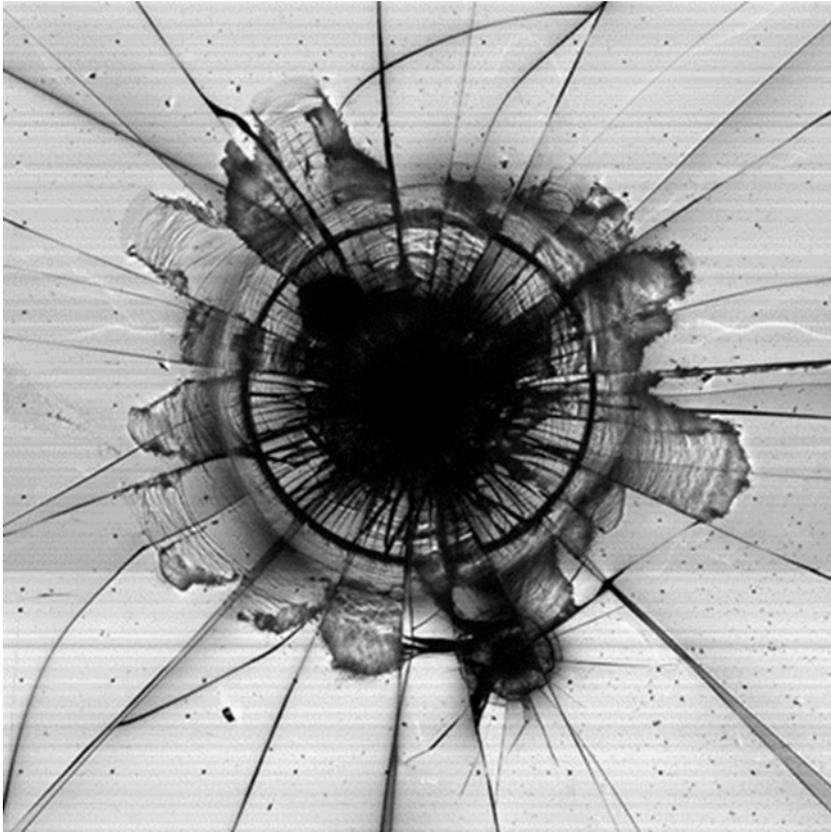


Bild 34 Detail des ringförmigen Rissverlaufs in der oberen Glastafel des Vakuum-Isolierglas bei Variante 2.

Bild 34 zeigt im Detail den ringförmigen Rissverlauf um die Auftreffstelle. Der Winkel der Rissfront liegt bei ungefähr 70° , gleichzeitig treten Ausmuschelungen außerhalb des ringförmigen Risses auf der Unterseite der Glastafel an der Bruchkante auf. Die Aufprallenergie der Stahlkugel wird von der oberen Zwischenschicht weitestgehend aufgenommen und nur partiell an die darunterliegende Glastafel weitergeleitet. Die punktuelle Belastung führt zur Bildung eines Durchstanzkegels in der oberen Glastafel des Vakuum-Isolierglases. Die Steifigkeit der Zwischenschicht lässt eine größere Verformung nur im unmittelbaren Bereich um die Auftreffstelle zu, im Bereich des ringförmigen Risses ist die Verformung deutlich geringer. Bei einem ungünstigen Haftverbund zwischen Glas und Zwischenschicht erfolgt durch die vorliegende Belastung eine Trennung beider Schichten zur Aufnahme der Verformungen. Die Ausmuschelungen an der Risskante zeigen, dass die Trennung im Glas vorliegt und bestätigen damit den günstigen Haftverbund zwischen Zwischenschicht und Glas.

Variante 2 zeigt deutlich geringere Verformungen der Abstandhalter nach dem Aufprall der Stahlkugel. Die verformten Abstandhalter treten bei Variante 2 gemäß der Darstellung in Bild 35 nur in den äußersten Reihen am Randverbund auf. Bereits in der zweiten Reihe vor dem Randverbund ist keine wesentliche Verformung der Abstandhalter zu erkennen.

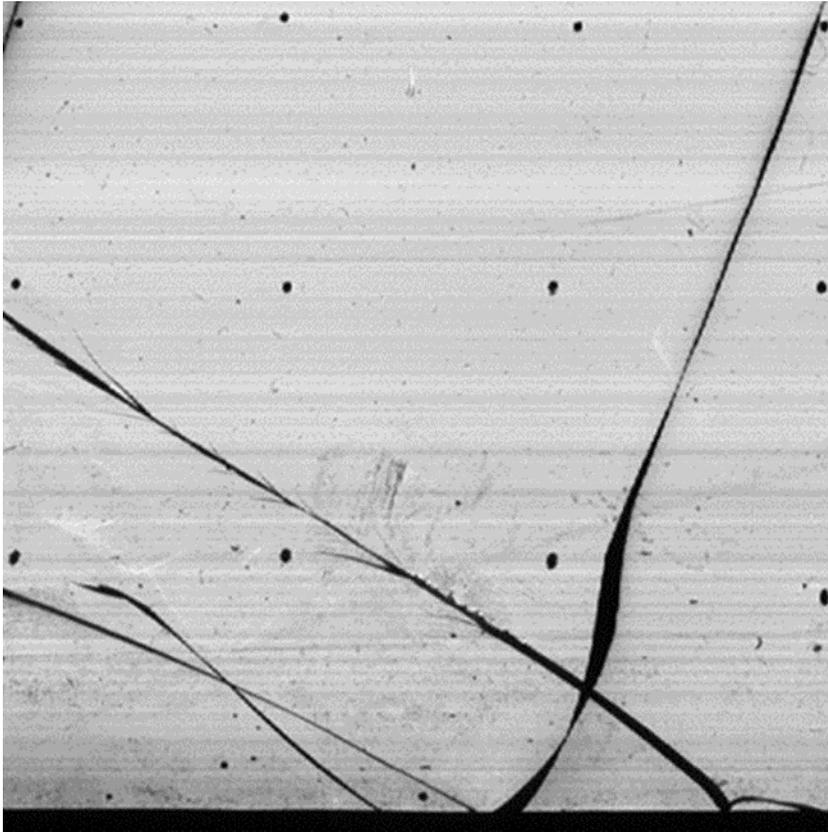


Bild 35 Abstandhalter von Variante 2 im Randbereich nach dem Auftreffen der Kugel.

Ein möglicher Zusammenhang, der zur partiellen Verformung der Abstandhalter am Rand führt, ist in Bild 36 schematisch dargestellt. Das Bild zeigt einen Schnitt durch das Vakuum-Isolierglas nach dem Aufprall der Stahlkugel.



Bild 36 Schematische Darstellung des Vakuum-Isolierglas nach Aufprall der Stahlkugel mit verformten und unverformten Abstandhaltern.

Die Steifigkeit der Zwischenschicht führt zu einer konzentrierten punktuellen Weitergabe der Last in der Mitte des Prüfkörpers und es entsteht der abgebildete Durchstanzkegel. Die Verformung wird in der Mitte auf die untere Glastafel übertragen, allerdings ist die obere Glastafel teilweise vom Durchstanzkegel entkoppelt und es stellt sich im Bereich um den ringförmigen Riss eine geringere Verformung der oberen im Vergleich zur unteren Glastafel ein. Im Bereich des Randverbundes mit einspannender Wirkung ist die Verformung der unteren und oberen Glastafel etwa gleich gering und es erfolgt im Übergangsbereich der Verformungen eine Stauchung beziehungsweise ein Abscheren der Abstandhalter.

4.3.4 Untersuchung der Beständigkeit

Mit den Versuchen bei hoher Temperatur, in der Feuchte sowie unter Bestrahlung wird die Beständigkeit der Zwischenschicht gegen klimatische Beanspruchungen nach DIN EN ISO 12543-4 experimentell nachgewiesen. In der Zwischenschicht dürfen nach dem Versuch keine wesentlichen Veränderungen wie Blasen, Delaminationen oder Trübungen in der Zwischenschicht auftreten.⁴¹

Die Untersuchungen beinhalten die Auswirkungen bei hoher Temperatur auf die Zwischenschicht der Verglasung über einen bestimmten Zeitraum. Dabei wird die Veränderung der Eigenschaften durch Fehlstellen festgestellt. Insgesamt lagern jeweils drei Prüfkörper mit den Mindestabmessungen von 300 mm auf 200 mm entweder 16 h bei einer Temperatur von +100 °C in einem Ofen oder für 2 h in kochendem Wasser. Die Prüfungen der beiden Varianten erfolgen am Lehrstuhl für Tragkonstruktion der Universität Siegen. Die untersuchten Varianten sind in Tabelle 23 aufgeführt. In der Auswertung zeigen sich bei keinem Prüfkörper Veränderungen in der Zwischenschicht. Alle Prüfkörper bestehen die Prüfung bei hoher Temperatur.

| Variante | Abmessungen | Aufbau |
|----------|--------------------|---|
| 1 | 300 mm x 200 mm | 2 mm FG 2 mm PU1 2 mm PC 2 mm PU1 4 mm FG 2 mm PU1 2 mm PC 2 mm PU1 2 mm FG |
| 2 | 300 mm x 200 mm | 2 mm FG 2 mm PU2 4 mm FG 2 mm PU2 2 mm FG |

Tabelle 23 Aufbau und Abmessungen der Prüfkörper zur Prüfung bei hoher Temperatur.

Die Prüfung in der Feuchte simuliert die Einwirkung von Luftfeuchtigkeit auf die Zwischenschicht über einen längeren Zeitraum. Die Prüfkörper mit den Mindestabmessungen von 300 mm auf 200 mm stehen während des Versuchs unter Vermeidung von Kondensatbildung senkrecht bei einer Temperatur von +50 °C und einer relativen Luftfeuchte von 80 % in einer Klimakammer. Tabelle 24 gibt einen Überblick über die untersuchten Varianten. Die Prüfungen der beiden Varianten erfolgen am Lehrstuhl für Tragkonstruktion der Universität Siegen. Die Dauer des Versuchs liegt bei 14 d. In der anschließenden Analyse weist kein Prüfkörper Fehlstellen in der Zwischenschicht auf.

⁴¹ Vergleiche DIN EN ISO 12543-4.

| Variante | Abmessungen | Aufbau |
|----------|--------------------|---|
| 1 | 300 mm x 200 mm | 2 mm FG 2 mm PU1 2 mm PC 2 mm PU1 4 mm FG 2 mm PU1 2 mm PC 2 mm PU1 2 mm FG |
| 2 | 300 mm x 200 mm | 2 mm FG 2 mm PU2 4 mm FG 2 mm PU2 2 mm FG |

Tabelle 24 Aufbau und Abmessungen der Prüfkörper zur Prüfung in der Feuchte.

Die Bestrahlungsprüfung bildet die Beanspruchung durch Sonneneinstrahlung ab. Anschließend wird der Einfluss auf die Eigenschaften der Zwischenschicht durch Veränderungen visuell analysiert. Über eine Dauer von 2.000 h befinden sich die drei Prüfkörper mit den Mindestabmessungen von 300 mm auf 150 mm in einer Bestrahlungskammer mit einer Strahlungsintensität von 900 W/m² bei einer Temperatur von +45 °C. Eine Übersicht über die untersuchten Prüfkörper gibt Tabelle 25. Nach den Prüfungen werden die Prüfkörper auf mögliche Fehlstellen untersucht, insbesondere der Zustand des Polycarbonates ist entscheidend, da das Material unter ultravioletter Bestrahlung versprödet und vergilbt. Die Untersuchung ergibt keine optischen Veränderungen der Prüfkörper nach der Bestrahlung. Alle Prüfkörper bestehen die Bestrahlungsprüfung.

Zusätzlich muss der Transmissionsgrad der außenliegenden Glastafeln sowie der Zwischenschicht zum Schutz des innenliegenden Polycarbonates und zum Eigenschutz der Zwischenschicht im ultravioletten Bereich möglichst gering sein. Die Durchlässigkeit beider Zwischenschichtmaterialien für ultraviolette Strahlung liegt bei 0 %. Die detaillierte Untersuchung zur Transmission ultravioletter Strahlung durch den Verbund erfolgt unter 5.3.5 mit dem Spektrometer.

| Variante | Abmessungen | Aufbau |
|----------|--------------------|---|
| 1 | 300 mm x 150 mm | 2 mm FG 2 mm PU1 2 mm PC 2 mm PU1 4 mm FG 2 mm PU1 2 mm PC 2 mm PU1 2 mm FG |
| 2 | 300 mm x 150 mm | 2 mm FG 2 mm PU2 4 mm FG 2 mm PU2 2 mm FG |

Tabelle 25 Aufbau und Abmessungen der Prüfkörper für die Bestrahlungsprüfung.

5 Querschnittsaufbau für Trag- und Resttragverhalten sowie Zusatzanforderungen

5.1 Querschnittsaufbau

Die maßgebende Einwirkung für die Herstellung eines Vakuum-Isolierglases mit passiven und aktiven Sicherheitsanforderungen ist die dynamische Beanspruchung durch Axtschlag nach DIN EN 356. Das Erreichen der Widerstandsklassen P6B mit 30 bis 50 Axtschlägen, P7B mit 51 bis 70 Axtschlägen und P8B mit über 70 Axtschlägen stellt die höchsten Anforderungen an den Verglasungsaufbau. Eine numerische Untersuchung des Axtversuches als hochdynamische Einwirkung mit einer Zerstörung des Verbundes ist im Vorfeld allerdings nicht ohne weiteres möglich. Die Dimensionierung erfolgt daher unter Betrachtung von zwei unterschiedlichen Einwirkungen.⁴²

Grundsätzlich werden im Bauwesen ständige, veränderliche und außergewöhnliche Einwirkungen unterschieden. Zu den ständigen Einwirkungen zählt die Eigenlast der Verglasung. Der wesentliche Einsatzbereich von Vakuum-Isolierglas mit passiven und aktiven Sicherheitsanforderungen konzentriert sich auf die Einbausituation als vertikale Verglasung. Maximale Lasten resultieren in dieser Einbausituation in horizontaler Richtung. Die Eigenlast muss deshalb in diesem Zusammenhang nicht berücksichtigt werden. Wesentliche veränderliche Lasten stellen Schnee- und Windlasten dar. In der Einbausituation als vertikale Verglasung ist ein Anhaften von Eis- und Schneelasten nur bedingt möglich, sodass die maßgebende Einwirkung durch Windlast generiert wird.⁴³

Die Berechnung von Windlasten erfolgt nach DIN EN 1991-1-4. Dabei entscheiden insbesondere drei Faktoren über die Größe der Windlast.⁴⁴ Durch den Standort eines Bauwerks innerhalb von Deutschland wird die Lage in einer der vier Windzonen mit verschiedenen Geschwindigkeitsdrücken festgelegt. Da sich in Deutschland nur wenige zusammenhängende Gebiete einer Geländekategorie zuordnen lassen, werden drei Regelprofile des Böengeschwindigkeitsdrucks festgelegt. Die Regelprofile umfassen das Binnenland, küstennahe Gebiete und die Ostseeinseln sowie die Nordseeinseln. Der größte Teil von Deutschland ist den Windzonen 1 und 2 im Binnenland zugeordnet. Allerdings werden insbesondere die Festlandbereiche, die sich unmittelbar an die Küsten anschließen, höheren Windlasten ausgesetzt. Die insgesamt höchste Windlast resultiert für Standorte auf den Inseln der Nordsee. Für die Bemessung der einwirkenden Windlasten

⁴² Vergleiche DIN EN 356.

⁴³ Vergleiche DIN EN 1991-1-3.

⁴⁴ Vergleiche DIN EN 1991-1-4.

auf die Fassade eines Bauwerks erfolgt die Einteilung in verschiedene Bereiche. In Abhängigkeit der Anströmrichtung entstehen auf den Flächen des Bauwerks abhebende Sog- oder Drucklasten sowie entsprechend der Lage des Bauteils in der Fassade unterschiedliche Außendruckbeiwerte. Der Außendruckbeiwert hängt zudem von der Lasteinzugsfläche ab, die bei den exemplarisch für die Dimensionierung betrachteten Abmessungen unter 10 m^2 liegt.⁴⁵

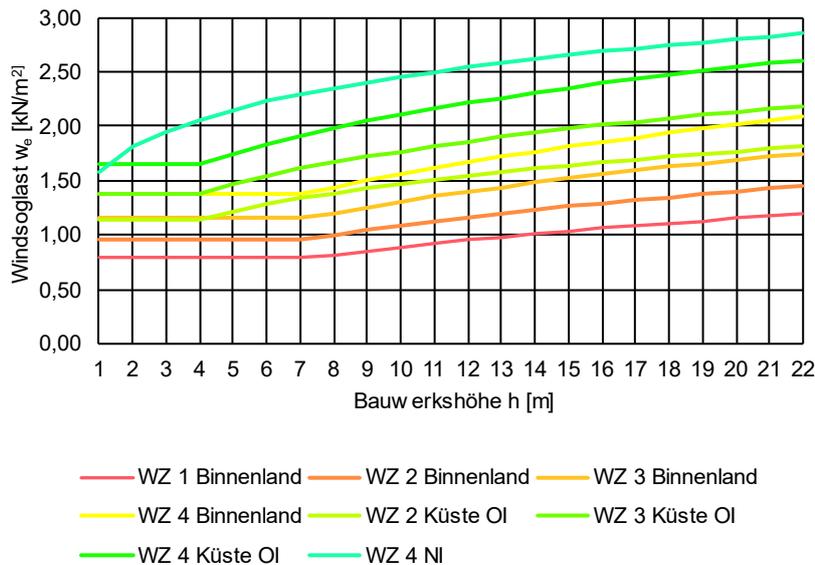


Bild 37 Maximale Windsoglast an einer vertikalen Wand an der Gebäudeecke in Abhängigkeit von der Windzone und der Bauwerkshöhe (Binnenland, Küstennahe Gebiete sowie Inseln der Ostsee und Nordseeinseln).

Die maximale Windlast auf eine vertikale Wand liegt als Windsoglast an der Gebäudeecke vor. Bild 37 zeigt die Windsoglast in diesem Bereich in Abhängigkeit von der Windzone und der Bauwerkshöhe. Die Windlasten im Binnenland liegen deutlich unter denen im Bereich der Küsten sowie der Inseln von Ost- und Nordsee und nehmen mit steigender Gebäudehöhe zu. Aus einer angenommenen Bauwerkshöhe von 22 m resultiert die maximale Windsoglast von $2,86 \text{ kN/m}^2$ auf den Inseln der Nordsee.

Der weiche Stoß auf eine Verglasung, der zum Beispiel durch den Anprall einer stürzenden Person verursacht werden kann, stellt einen außergewöhnlichen Lastfall dar. Die Einwirkungsdauer dieser Belastung ist sehr kurz bei gleichzeitig hoher Intensität. Der versuchstechnische Nachweis für den weichen Stoß erfolgt im Glasbau nach DIN EN 12600 durch den Pendelschlagversuch. Die Belastung ist in Abhängigkeit von der Fallhöhe des Doppelreifen-Pendels in drei Klassen mit Fallhöhen von 190 mm, 450 mm und 1200 mm eingeteilt.⁴⁶

Die Bemessung geometrisch und mechanisch aufwändiger Strukturen ist mit analytischen Berechnungen häufig nicht möglich. Ein gängiges

⁴⁵ Vergleiche DIN EN 1991-1-4/NA.

⁴⁶ Vergleiche DIN EN 12600.

Verfahren zur Lösung komplexer Problemstellungen stellt die numerische Berechnung nach der Finite-Elemente-Methode dar. Durch Zerlegung nicht berechenbarer komplexer Geometrien in berechenbare einzelne Elemente ist die Lösung des Gesamtsystems möglich.⁴⁷

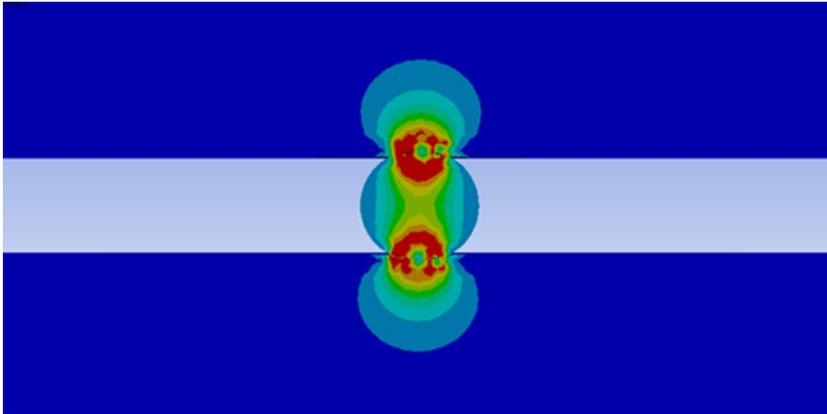


Bild 38 Qualitative Darstellung der Spannungsverteilung in einem Abstandhalter sowie in der oberen und unteren Glasplatte von einem Vakuum-Isolierglas im Schnitt. Hohe Spannungen sind rot, niedrige blau gekennzeichnet. Scheibenzwischenraum ohne Spannung in hellblau.

Der Verglasungsaufbau setzt sich aus dem Vakuum-Isolierglas in Kombination mit Polycarbonat- und Dünnglastafeln zusammen, die durch Schichten aus Polyurethan miteinander verbunden sind. Das Vakuum-Isolierglas stellt das Bauteil mit der höchsten Komplexität im Aufbau dar. Bild 38 zeigt im Schnitt die auftretenden Spannungen in einem kugelförmigen Abstandhalter sowie in den angrenzenden Glasplatten. Durch die Evakuierung des Scheibenzwischenraumes wirkt auch ohne zusätzliche äußere Last durch den atmosphärischen Luftdruck von etwa 1.013 hPa eine permanente Druckkraft auf die Abstandhalter.⁴⁸ Bei der Hertz'schen Pressung tritt die Verformung des elastischen Körpers in Form eines leichten Abflachens der Kugeln im Kontaktbereich zu den Glasplatten auf und die kraftübertragende Fläche wird vergrößert. Allerdings erfordert die korrekte Abbildung eine entsprechend feine Vernetzung.⁴⁹ Im Verhältnis zur Gesamtfläche der Glasplatten und zu deren Nenndicke von 4 mm sind die kugelförmigen Abstandhalter sowie der Zwischenraum mit einer Nenndicke von 0,1 mm sehr klein. Verbunden mit der Anzahl von etwa 2.401 Abstandhaltern auf eine Fläche von 1 m² und der in diesen Bereichen erforderlichen feinen Vernetzung resultiert ein enormer Aufwand für die numerische Berechnung von detailliert modelliertem Vakuum-Isolierglas.

Dieses detaillierte Modell für die numerische Berechnung ist für die Dimensionierung von Vakuum-Isolierglas mit passiven und aktiven Sicherheitsanforderungen nicht geeignet. Eine Vereinfachung des Vakuum-Isolierglases zu einer monolithischen Glasplatte mit reduzierter

⁴⁷ Vergleiche Steinke 2015.

⁴⁸ Vergleiche Langeheinecke 2020.

⁴⁹ Vergleiche Nguyen-Schäfer 2017.

Dicke führt zu ausreichend genauen Ergebnissen. Forschungsergebnisse zu Vakuum-Isolierglas unter Windlast zeigen, dass ein Modell des Vakuum-Isolierglases als monolithisches Glas mit ungefähr 80 % bis 90 % der tatsächlichen Dicke das Tragverhalten realistisch abbildet. Die im Zusammenhang mit der Windlast verwendeten Modelle basieren auf diesem Ansatz des Vakuum-Isolierglases als monolithisches Glas mit einer Dicke von 6,4 mm, die 80 % der tatsächlichen Dicke entspricht.⁵⁰ Auf der sicheren Seite liegend erfolgt die Annahme der Grenzspannungen für das Vakuum-Isolierglas als monolithische Schicht ohne Berücksichtigung einer teilweisen Vorspannung.

Es wird für die Dimensionierung der Verglasungsaufbauten das Programm SJ-Mepla 5.0.14 verwendet. Auf Grundlage der Finite-Elemente-Methode ermöglicht das Programm die Berechnung von Spannungen im Verglasungsaufbau sowie die Bewertung des Tragverhaltens. Gebäude werden nach der Musterbauordnung (MBO) in Abhängigkeit der Höhe und weiterer Faktoren in fünf Gebäudeklassen eingeteilt. Grundlage der Dimensionierung unter Windlast ist ein Bauwerk der Gebäudeklasse 4 mit einer maximalen Höhe bis zur Fußbodenoberkante des letzten Geschosses von 13 m.⁵¹ Die angenommene Windlast auf eine Verglasung in diesem Geschoss ergibt sich ungefähr bei einer Höhe von 16 m. Unter Berücksichtigung des Teilsicherheitsbeiwertes für veränderliche Einwirkungen beläuft sich die für die Dimensionierung angesetzte Windlast an der Küste der Ostsee beziehungsweise den Ostseeinseln auf 3,59 kN/m². Es wird für die Dimensionierung eine maximale Last angesetzt, die sich in der Praxis durch die Lage in oberen Geschossen voraussichtlich nicht mit den Einwirkungen für die aktive Sicherheit überlagert.

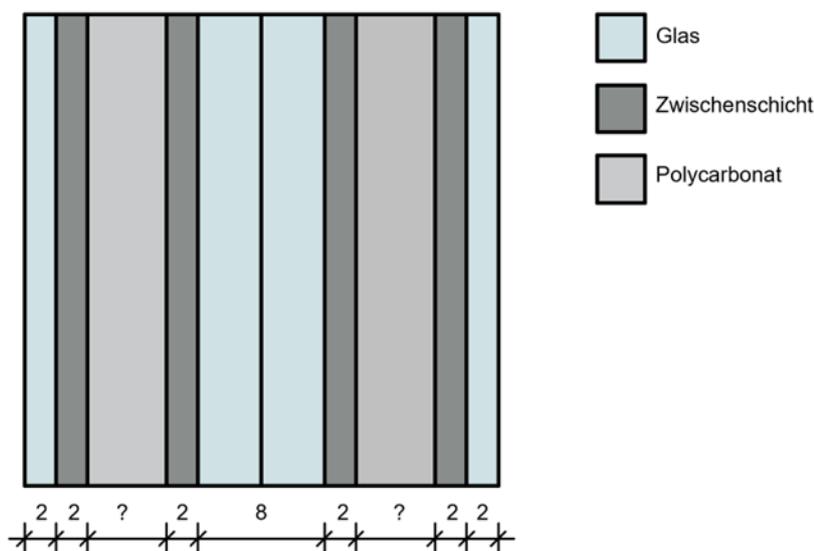


Bild 39 Schnitt durch Variante 1 mit Dünnglas, Zwischenschicht PU1 und Vakuum-Isolierglas in konstanter sowie Polycarbonat in variabler Nenndicke.

⁵⁰ Vergleiche Schulz 2022.

⁵¹ Vergleiche MBO 2019.

Bild 39 zeigt schematisch den Aufbau von Variante 1 im Querschnitt. Das Vakuum-Isolierglas ist mit einer Nenndicke von 8 mm in der Mitte angeordnet, innen und außen schließen den Verglasungsaufbau jeweils eine Dünnglastafel mit einer Nenndicke von 2 mm ab. Die Dimensionierung des gesamten Aufbaus hängt auch von der Nenndicke der Polycarbonatplatten ab, die sich zwischen Vakuum-Isolierglas und Dünnglas befinden. Die Festlegung der Nenndicke für das Polycarbonat wird in diesem Kapitel erarbeitet. Der Verbund zwischen den Gläsern und dem Polycarbonat erfolgt über die Zwischenschicht PU1 aus thermoplastischen Polyurethan mit einer Nenndicke von 2 mm.

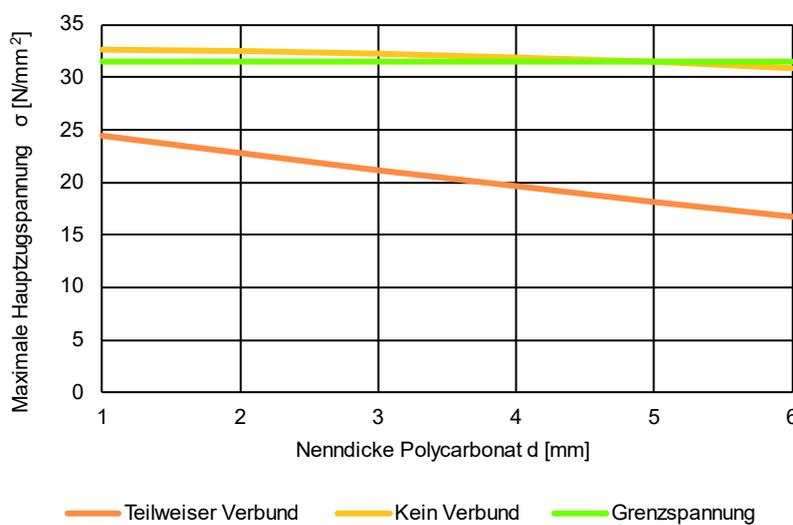


Bild 40 Maximale Hauptzugspannung für Variante 1 in Abhängigkeit von der Nenndicke des Polycarbonats unter Ansatz von teilweise Verbund sowie keinem Verbund der Zwischenschicht für eine Windlast von $3,59 \text{ kN/m}^2$.

Das Ergebnis der Berechnungen zeigt Bild 40 mit den maximalen Hauptzugspannungen in Abhängigkeit von der Nenndicke der Polycarbonatplatten. Die maximalen Hauptzugspannungen treten an der lastabgewandten Seite des Vakuum-Isolierglases auf. In den Berechnungen unterscheiden sich der Ansatz von teilweise Verbund mit dem unter AP 4 ermittelten Elastizitätsmodul von $0,64 \text{ N/mm}^2$ für die Zwischenschicht und der Ansatz von keinem Verbund. Die Hauptzugspannungen im Vakuum-Isolierglas reduzieren sich durch die vorhandene Verbundwirkung deutlich, allerdings ist der Ansatz einer günstig wirkenden Verbundwirkung in der aktuellen Norm für die Bemessung von Glas im Bauwesen nicht zulässig.⁵² Die obere gelbe Kurve bildet die Ergebnisse ohne Ansatz einer Verbundwirkung ab. Der Schnittpunkt mit der grünen Kurve, die die Grenzspannung von $31,5 \text{ N/mm}^2$ für das Ersatzglas unter einer kurzen Einwirkungsdauer darstellt, ergibt sich bei einer Nenndicke des Polycarbonats von 5 mm. Als Ergebnis der Untersuchungen zum Einfluss der Windlast auf die Verglasung wird für Variante 1 die Nenndicke der Polycarbonatplatten auf 5 mm festgelegt.

⁵² Vergleiche DIN 18008-1.

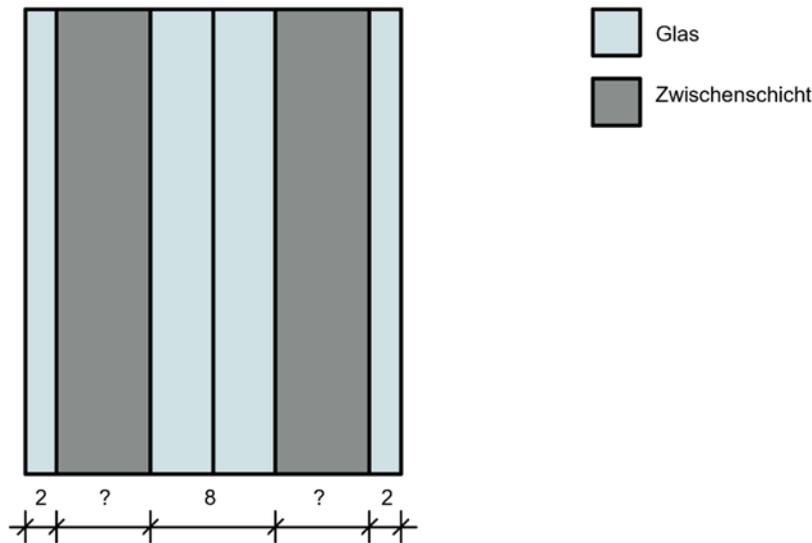


Bild 41 Schnitt durch Variante 2 mit Dünnglas und Vakuum-Isolierglas in konstanter und Zwischenschicht PU2 in variabler Nenndicke.

Die Entwicklung von Variante 2 sieht, wie Bild 41 zeigt, die Verwendung des steiferen Polyurethans PU 2 als Zwischenschicht sowie als Ersatz für die Polycarbonatplatten vor. Zwischen dem in der Mitte angeordneten Vakuum-Isolierglas mit 8 mm Nenndicke und dem Dünnglas mit einer Nenndicke von 2 mm an den beiden Außenseiten ist die Zwischenschicht PU 2 angeordnet.

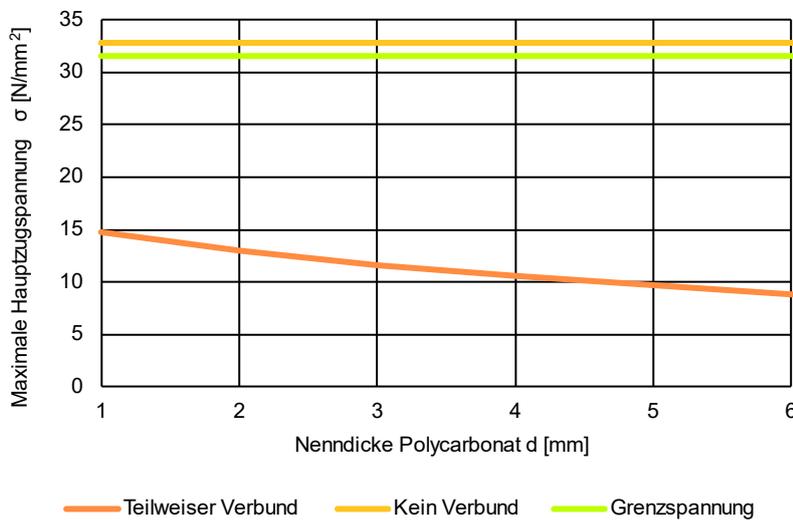


Bild 42 Maximale Hauptzugspannung für Variante 2 in Abhängigkeit von der Nenndicke der Zwischenschichten unter Ansatz von teilweisem Verbund sowie keinem Verbund der Zwischenschicht für eine Windlast von $3,59 \text{ kN/m}^2$.

Bild 42 zeigt die maximale Hauptzugspannung in Variante 2 unter Ansatz von teilweisem Verbund sowie unter Ansatz von keinem Verbund der Zwischenschicht. Deutlich sichtbar ist die Reduzierung der Hauptzugspannung mit zunehmender Dicke der Zwischenschicht beim Ansatz eines teilweisen Verbundes. Die Vernachlässigung des Verbundes erfolgt mit dem Programm SJ Mepla durch den Ansatz eines sehr geringen Elastizitätsmoduls von $0,03 \text{ N/mm}^2$ für die Zwischenschichten. Dadurch wird der gesamte vorhandene Anteil der Zwischen-

schichten am Lastabtrag auch bei größerer Schichtdicke vernachlässigt. Die Dimensionierung der Zwischenschicht ist mit der Windlast als einziges Kriterium nicht möglich.

Glas weist ein sprödes Materialverhalten auf, das zu einem spontanen Bruch ohne Vorankündigung führt. Im Glasbau wird deshalb die Stoßbeanspruchung als Nachweis der mechanischen Beständigkeit für die Eigenschaften von Verbundsicherheitsglas berücksichtigt. Der Anprall einer Person gegen die Verglasung erfolgt nach DIN EN 12600 als weicher Stoß durch den Pendelschlagversuch mit einem Doppelreifen-Pendel. Die dynamische Beanspruchung durch die Fallhöhen von 190 mm, 450 mm und 1.200 mm dient als weitere Grundlage zur Dimensionierung der Vakuum-Isoliergläser mit passiven und aktiven Sicherheitsanforderungen. Der rechnerische Nachweis der Stoßsicherheit nach DIN 18008-4 sieht für Isolierglas mit einem Dickenverhältnis der Außen- zur Innenscheibe von maximal 1,5 den Ansatz der halben Basisenergie auf das innere Glaspaket unter Vernachlässigung des äußeren Glaspakets vor. Allerdings liegt der Mindestwert für die Dicke des Scheibenzwischenraumes bei 12 mm und wird durch das verwendete Vakuum-Isolierglas Fineo mit 0,1 mm als Zwischenraum deutlich unterschritten.⁵³ Die Beeinflussung der Interaktion zwischen innerer und äußerer Scheibe durch die Evakuierung des Scheibenzwischenraumes unterscheidet sich von einem gasgefüllten Zwischenraum. Eine spezielle Regelung für die Bemessung von Vakuum-Isolierglas unter Stoßbelastung ist bisher in DIN 18008-4 nicht gegeben. Unter stoßartiger Belastung kann allerdings der Ansatz voller Verbundwirkung zu maximalen Spannungen führen und für die Bemessung maßgebend sein. In Anlehnung an die Bemessung unter Windlast erfolgt die Berücksichtigung des Vakuum-Isolierglases auch unter stoßartiger Beanspruchung als monolithische Glastafel mit einem Ansatz der Nenndicke von 80 %.

Bild 43 zeigt die Hauptzugspannungen für Variante 1 bei dem Pendelschlag mit einer Fallhöhe von 450 mm in der monolithischen Glastafel als Ersatz für das Vakuum-Isolierglas als Volllinien und für das Dünn- glas mit einer Nenndicke von 2 mm als Strichlinie auf der stoßabgewandten Seite.

Die größte Hauptzugspannung ergibt sich unter Ansatz von vollem Verbund an der stoßabgewandten Seite des Dünn- glases. Der Ansatz von teilweise Verbund sowie von keinem Verbund für die Zwischenschicht erzeugt die maximale Hauptzugspannung im Vakuum-Isolierglas als Schicht mit der größten Nenndicke. Die Grenzspannung bei der Annahme von nicht vorgespanntem Glas für die Ersatzschicht unter Stoßbeanspruchung liegt bei 81,0 N/mm².

⁵³ Vergleiche DIN 18008-4.

Diese Grenzspannung wird durch die maximale Hauptzugspannung im Vakuum-Isolierglas bei Ansatz von teilweise sowie von keinem Verbund überschritten. Die maximale Hauptzugspannung bei Ansatz von vollem Verbund liegt deutlich unter der Grenzspannung. Die maximale Hauptzugspannung auf der stoßabgewandten Seite des Dünn-
glases unter Ansatz von vollem Verbund liegt ab einer Nenndicke der Polycarbonat-
tafel von 2 mm unter der Grenzspannung. Der Ansatz von teilweise Verbund sowie von keinem Verbund führt im Dünn-
glas bei allen Nenndicken der Polycarbonat-
tafel zu maximalen Hauptzug-
spannung unterhalb der Grenzspannung.

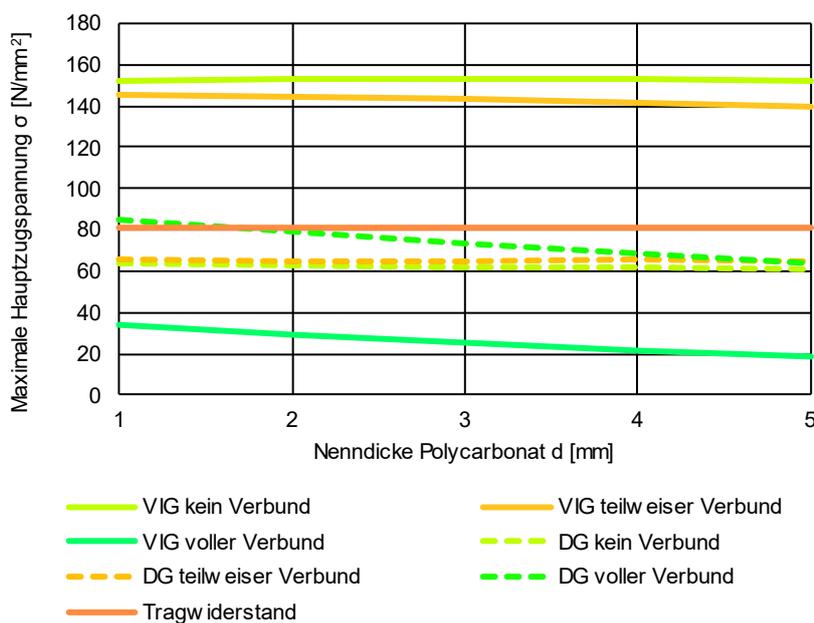


Bild 43 Maximale Hauptzugspannung für Variante 1 in Abhängigkeit von der Nenndicke des Polycarbonats unter Ansatz von keinem Verbund, teilweisen Verbund sowie vollem Verbund der Zwischenschicht bei einer Fallhöhe des Stoßkörpers von 450 mm im Vakuum-Isolierglas (VIG) und Dünn-
glas (DG).

Das Überschreiten der Grenzspannung im Vakuum-Isolierglas führt üblicherweise zum Bruch. Durch die Lage des Vakuum-Isolierglases zwischen den Polycarbonat-
tafeln und der Zwischenschicht ist allerdings ein Herauslösen von Bruchstücken nicht möglich. Dadurch kann die nächste Widerstandsklasse im Versuch geprüft und grundsätzlich erreicht werden. Ein Versagen der äußeren Dünn-
glastafeln tritt bei dieser Fallhöhe rechnerisch nicht auf. In Verbindung mit den Ergebnissen aus der Bemessung der Windlasten erfolgt die Festlegung der Nenndicke des Polycarbonats auf 5 mm.

Bild 44 zeigt die maximalen Hauptzugspannungen im Vakuum-Isolierglas als Volllinien und dem äußeren Dünn-
glas als Strichlinien für eine Fallhöhe des Pendelkörpers von 1.200 mm. Die maximalen Hauptzugspannungen liegen bei dieser Fallhöhe für das Vakuum-Isolierglas nur unter Ansatz von vollem Verbund unter der Grenzspannung. Im Dünn-
glas überschreiten die maximalen Hauptzugspannungen bei allen betrachteten Möglichkeiten zur Berücksichtigung des Verbundes in der Zwischenschicht die Grenzspannung. Als Ergebnis der numerischen

Berechnungen versagen die Dünngläser mit einer Nenndicke von 2 mm bei dem weichen Stoß mit dem Doppelreifen-Pendel bei einer Fallhöhe von 1.200 mm. Die Auslastung der Polycarbonatplatten ist allerdings deutlich geringer. Deshalb wird nicht von einem Durchdringen des Verglasungsaufbaus durch den Stoßkörper ausgegangen. Die experimentellen Untersuchungen mit dem Pendelschlagversuch sollen die Verifizierung der Ergebnisse aus der numerischen Berechnung ermöglichen.

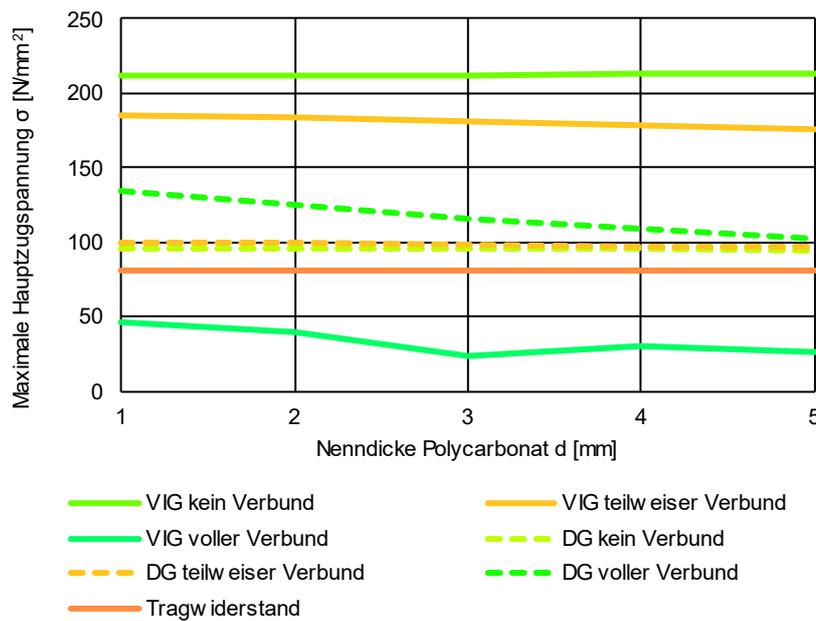


Bild 44 Maximale Hauptzugspannung für Variante 1 in Abhängigkeit von der Nenndicke des Polycarbonats unter Ansatz von keinem Verbund, teilweisen Verbund sowie vollem Verbund der Zwischenschicht bei einer Fallhöhe des Stoßkörpers von 1.200 mm im Vakuum-Isolierglas (VIG) und Dünnglas (DG).

In Variante 2 des Verglasungsaufbaus ersetzt das steifere Polyurethan PU 2 die Zwischenschicht aus PU 1 und das Polycarbonat. In Abbildung 45 zeigen die Volllinien die maximalen Hauptzugspannungen im Vakuum-Isolierglas und die Strichlinien im äußeren Dünnglas. Die maximalen Hauptzugspannungen im Vakuum-Isolierglas liegen bei Ansatz von vollem Verbund bei allen untersuchten Nenndicken der Zwischenschicht unterhalb der Grenzspannung. Ein Unterschreiten der Grenzspannung im äußeren Dünnglas ergibt sich ab einer Nenndicke der Zwischenschichten von 6 mm. Daher wird für die experimentellen Untersuchungen die Nenndicke der Zwischenschichten auf 6 mm definiert, die eine Widerstandsklasse 2(B)2 erreicht. Das tatsächliche Bruchverhalten wird auch durch den Haftverbund der Bruchstücke mit den Zwischenschichten beeinflusst und kann grundsätzlich das Erreichen von höheren Widerstandsklassen ermöglichen.

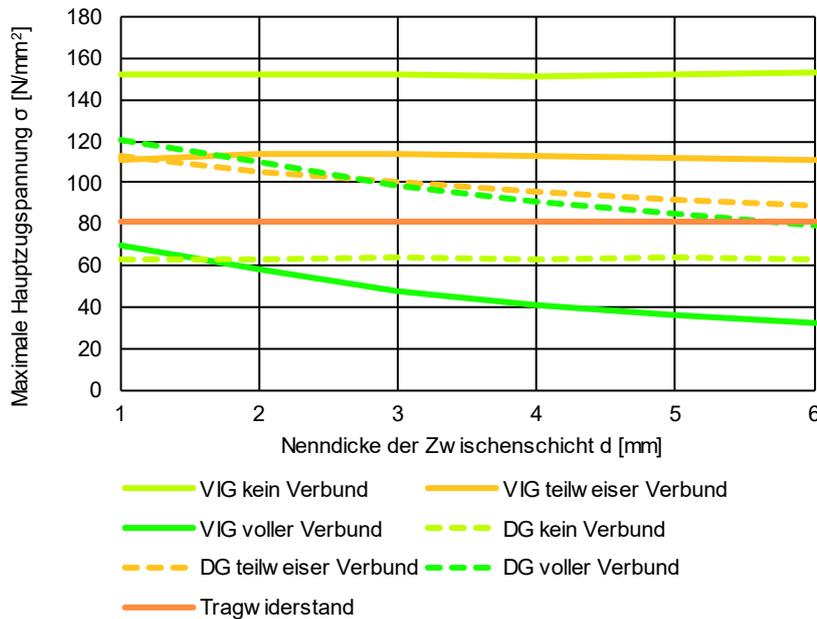


Bild 45 Maximale Hauptzugspannung für Variante 2 in Abhängigkeit von der Nennstärke der Zwischenschicht aus PU2 unter Ansatz von keinem Verbund, teilweisen Verbund sowie vollem Verbund der Zwischenschicht bei einer Fallhöhe des Stoßkörpers von 450 mm. im Vakuum-Isolierglas (VIG) und Dünnglas (DG).

5.2 Untersuchung der Zusatzanforderungen

5.2.1 Pendelschlagversuch

Neben statischen Einwirkungen treten im Glasbau auch stoßartige Einwirkungen als außergewöhnliche Bemessungssituation auf, wie beispielsweise der Anprall einer Person gegen die Verglasung. Die Verglasung soll den Absturz einer Person verhindern sowie den Splitterabgang auf der stoßabgewandten Seite geringhalten, um die Gefährdung von Passanten zu minimieren. Die Absturzsicherung kann experimentell, rechnerisch oder konstruktiv nachgewiesen werden.⁵⁴ Der experimentelle Nachweis erfolgt an der betrachteten Verglasung mit dem Pendelschlagversuch nach DIN EN 12600 in Abhängigkeit der zugeordneten Kategorie für die Absturzsicherung. Mit dem Pendelschlagversuch wird auch die Beständigkeit gegen mechanische Beanspruchung als notwendige Eigenschaft von Verbundsicherheitsglas nachgewiesen.⁵⁵

Der Pendelschlagversuch wird am Lehrstuhl für Tragkonstruktion der Universität Siegen durchgeführt. Die Lagerung der Prüfkörper mit den Abmessungen von 876 mm in der Breite und 1.938 mm in der Länge erfolgt durch einen Klemmrahmen, der durch Elastomerstreifen den Kontakt von Glas mit der Unterkonstruktion verhindert. Eine Winde ermöglicht das Einstellen der drei Fallhöhen nach DIN 12600, wobei das Auslösen des Pendels pneumatisch impulsfrei möglich ist. Nach dem ersten Aufprall erfolgt die manuelle Sicherung des Pendels, um einen zweiten Aufschlag zu verhindern.

⁵⁴ Vergleiche DIN 18008-4.

⁵⁵ Vergleiche DIN EN ISO 12543-4 und DIN EN 14449.

| Prüfkörper | Aufbau | Nenn- dicke | Real- dicke |
|------------|--|----------------|----------------|
| A1 | 2,0 mm DG 2,0 mm PU1 5,0 mm PC 2,0 mm PU1 8,0 mm VIG 2,0 mm PU1 5,0 mm PC 2,0 mm PU1 2,0 mm DG | 30,0 mm | 29,1 mm |
| A2 | 2,0 mm DG 2,0 mm PU1 5,0 mm PC 2,0 mm PU1 8,0 mm VIG 2,0 mm PU1 5,0 mm PC 2,0 mm PU1 2,0 mm DG | 30,0 mm | 29,2 mm |
| A3 | 2,0 mm DG 2,0 mm PU1 5,0 mm PC 2,0 mm PU1 8,0 mm VIG 2,0 mm PU1 5,0 mm PC 2,0 mm PU1 2,0 mm DG | 30,0 mm | 29,1 mm |
| A4 | 2,0 mm DG 2,0 mm PU1 5,0 mm PC 2,0 mm PU1 8,0 mm VIG 2,0 mm PU1 5,0 mm PC 2,0 mm PU1 2,0 mm DG | 30,0 mm | 29,4 mm |

Tabelle 26 Querschnittsaufbau der Prüfkörper für den Pendelschlagversuch von Variante 1 mit der Zwischenschicht (PU1), Polycarbonat (PC), Vakuum-Isolierglas (VIG) und Dünnglas (DG).

Tabelle 26 zeigt den Aufbau der Prüfkörper für den Pendelschlagversuch. Zur Reduzierung der erforderlichen Anzahl von Prüfkörpern wird an jedem Prüfkörper die Prüfung aller Fallhöhen durchgeführt. Die Untersuchung und Dokumentation des durch die verschiedenen Fallhöhen verursachten Bruchbildes erfolgt durch die optische Aufnahme der Prüfkörper.



Bild 46 Pendelschlagversuch mit eingebautem Prüfkörper bei einer Fallhöhe von 450 mm.

Bild 46 zeigt den Pendelschlagversuch mit eingebautem Prüfkörper sowie das auf eine Fallhöhe von 450 mm eingestellte Doppelreifen-Pendel.

| Prüfkörper | A1 | A2 | A3 | A4 |
|-------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Nennstärke | 30,0 mm | 30,0 mm | 30,0 mm | 30,0 mm |
| Realdicke | 29,1 mm | 29,2 mm | 29,1 mm | 29,4 mm |
| Fallhöhe 190 mm | | | | |
| Durchschlag | nein | nein | nein | nein |
| Bruch | nein | nein | nein | nein |
| Fallhöhe 450 mm | | | | |
| Durchschlag | nein | nein | nein | nein |
| Bruch | VIG | VIG | VIG | VIG |
| Fallhöhe 1.200 mm | | | | |
| Durchschlag | nein | nein | nein | nein |
| Bruch | FG VIG FG | FG VIG FG | FG VIG FG | FG VIG FG |

Tabelle 27 Ergebnisse des Pendelschlagversuchs nach DIN 12600 für Variante 1.

Nach der Fallhöhe von 190 mm ist im Bereich der Auftreffstelle weder eine Beschädigung der außenliegenden Dünnglastafeln noch des Vakuum-Isolierglases festzustellen. Das Auftreffen des Stoßkörpers aus einer Fallhöhe von 450 mm zerstört das innenliegende Vakuum-Isolierglas, es findet allerdings kein Durchschlag statt. Da auch bei dieser Fallhöhe die außenliegenden Dünnglastafeln intakt bleiben, tritt auf der stoßabgewandten Seite kein Splitterabgang auf. Zusätzlich werden die Prüfkörper auf das Verhalten bei der Fallhöhe von 1.200 mm untersucht. Die Dünnglastafeln brechen bei dieser Fallhöhe auf der stoßzu- und stoßabgewandten Seite, allerdings durchschlägt das Pendel den Prüfkörper nicht und es fällt kein messbarer Splitterabgang an. Die Pendelschlagversuche erfolgen für alle Fallhöhen in Anlehnung an DIN EN 12600 mit jeweils demselben Prüfkörper. Die Nutzung vorgeschädigter Prüfkörper stellt damit ein ungünstigeres Ergebnis als mit ungeschädigten Prüfkörpern dar. Die Prüfkörper erreichen die Pendelschlagklasse 1 (B) 1 und erfüllen die Anforderungen an ein Verbund sicherheitsglas.

Zusätzlich zur qualitativen Bewertung der Prüfkörper durch die Einstufung in Pendelschlagklassen wird das Tragverhalten unter der stoßartigen Einwirkung untersucht. Bild 47 zeigt exemplarisch einen Laserwegaufnehmer, der die Verformung in der Mitte des Prüfkörpers misst, sowie einen Dehnungsmessstreifen an gleicher Stelle zur Aufnahme

von Dehnungen. Ein weiterer Dehnungsmessstreifen ist in der Mitte der Diagonalen vom Mittelpunkt zur oberen linken Ecke appliziert. Die Dehnungsmessstreifen zeichnen die Dehnungen in Längs- und Querrichtung auf der stoßabgewandten Seite des Prüfkörpers auf.

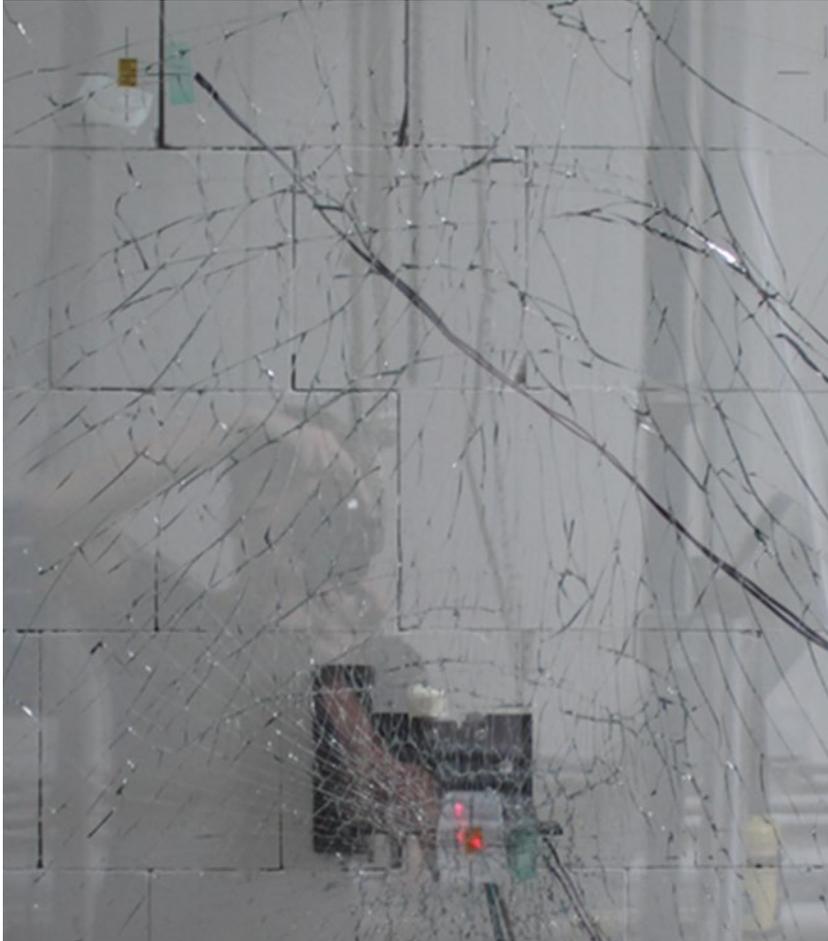


Bild 47 Laserwegaufnehmer und Dehnungsmessstreifen zur Messung des Tragverhaltens beim Pendelschlagversuch.

Bild 48 zeigt die ähnliche Verformung und das gleichmäßige Schwingungsverhalten der Prüfkörper nach dem Aufprall des Stoßkörpers aus der Fallhöhe von 190 mm. Die mit dem Laserwegaufnehmer im Mittelpunkt gemessene maximale Verformung beträgt -15,3 mm als Mittelwert. Nach der deutlichen Verformung durch das Auftreffen des Doppelreifen-Pendels im negativen Bereich fällt das Maximum im positiven Bereich geringer aus. Durch die Steifigkeit des Verglasungsaufbaus stellt sich bereits nach ungefähr 0,3 s eine neue Ruhelage ein.

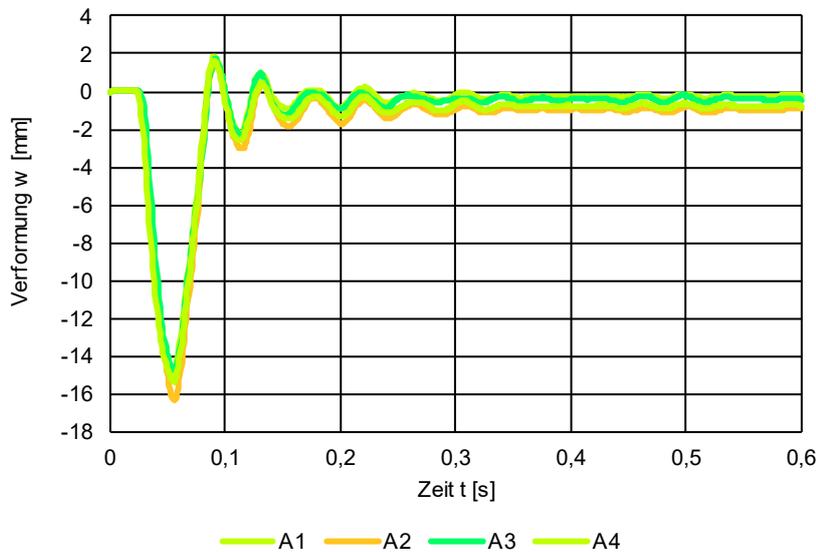


Bild 48 Verformung der Prüfkörper beim Pendelschlagversuch mit einer Fallhöhe von 190 mm für Variante 1.

Die Ergebnisse für die Verformung und die Spannungen an Messpunkt 1 im Mittelpunkt und die Spannungen an Messpunkt 2 in der Diagonalen werden für die Messung sowie die numerische Berechnung in Bild 49 verglichen. Das Programm SJ Mepla unterscheidet grundsätzlich in die beiden Grenzfälle für keinen Verbund und vollen Verbund. Mit dem Elastizitätsmodul der Zwischenschichten kann ein teilweiser Verbund eingestellt werden, der für die Zwischenschicht PU1 die genauesten Ergebnisse erzielt. Auf der sicheren Seite liegend überschätzt das Modell für die numerische Berechnung die gemessene Verformung der Prüfkörper um etwa 23 %. Die aus den Dehnungen der Dehnungsmessstreifen ermittelten Spannungen liegen an allen Messpunkten mit maximal 40 % unterhalb der numerisch berechneten Spannungen und übersteigen diese nur an Messpunkt 1 in x-Richtung um etwa 4 %.

Einen weiteren Einfluss auf die Genauigkeit des Modells könnte der vereinfachte Ansatz des Vakuum-Isolierglases als monolithisches nicht vorgespanntes Glas mit 80 % der tatsächlichen Nenndicke aufweisen. Ein Vergleich der Ergebnisse aus numerischer Berechnung und Messung zeigt, dass der unter Windlast empirisch ermittelte Ansatz auch unter stoßartiger Einwirkung vereinfachend zutrifft. Zur genaueren Definition eines Ersatzmodells für Vakuum-Isolierglas unter stoßartiger Einwirkung bedarf es allerdings weiterer Untersuchungen.⁵⁶

⁵⁶ Vergleiche Schulz 2022.

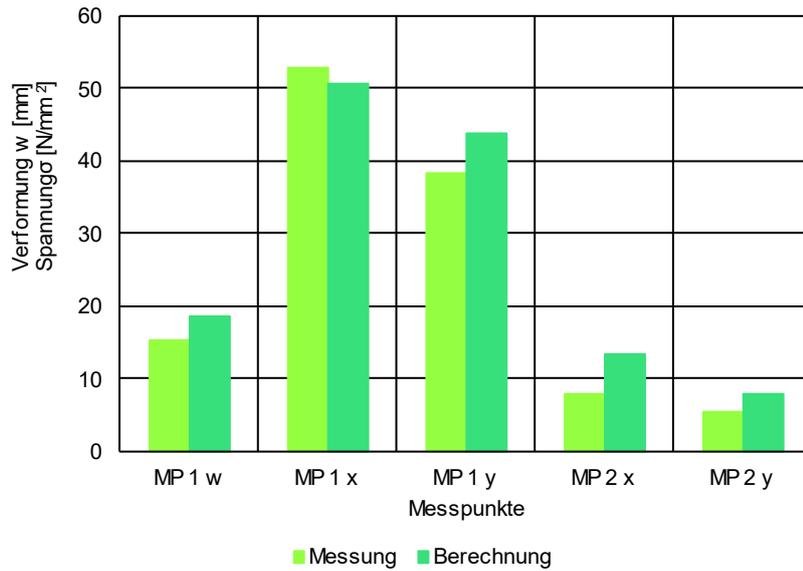


Bild 49 Vergleich der Spannungen und der Verformungen aus der Messung mit der numerischen Berechnung des Pendelschlagversuchs für eine Fallhöhe von 190 mm für Variante 1.

In Bild 50 ist die Verformung im Mittelpunkt der Prüfkörper in Abhängigkeit von der Zeit für eine Fallhöhe von 450 mm dargestellt. Die maximale Verformung liegt mit einem Mittelwert von 26,3 mm etwa 70 % über der Verformung bei einer Fallhöhe von 190 mm. Der Verlauf der Verformungskurve ist auch bei einer Fallhöhe von 450 mm für die Prüfkörper zunächst relativ identisch. Da beim Auftreffen des Stoßkörpers allerdings das Vakuum-Isolierglas zerstört wird, unterscheidet sich das Schwingungsverhalten der einzelnen Prüfkörper danach erkennbar.

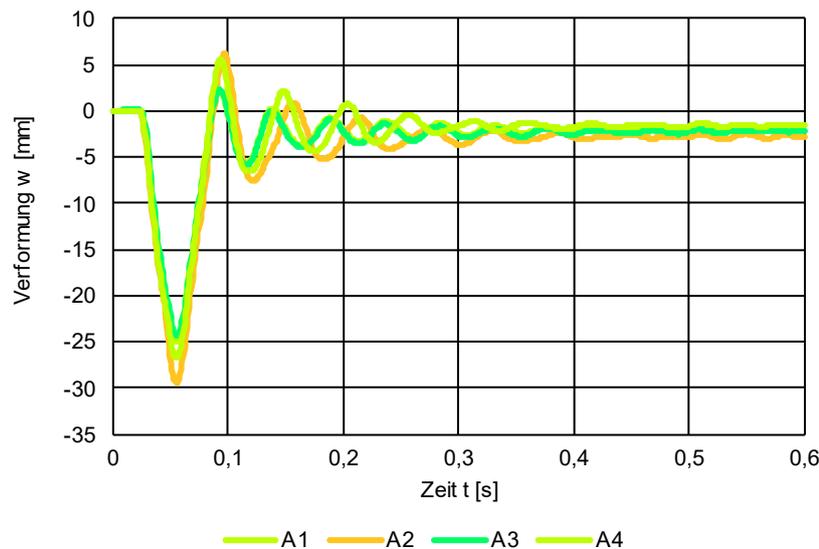


Bild 50 Verformung der Prüfkörper beim Pendelschlagversuch mit einer Fallhöhe von 450 mm für Variante 1.

Bild 51 zeigt den Vergleich der gemessenen und der numerisch berechneten Verformung im Mittelpunkt des Prüfkörpers sowie die Spannungen an den beiden Messpunkten. Die Abweichung der Verformung ist bei einer Fallhöhe von 450 mm mit etwa 0,9 % relativ gering. An beiden Messpunkten liegen die aus den gemessenen Dehnungen

ermittelten Spannung mit einer maximalen Abweichung von 37,5 % über der numerisch berechneten Spannung. Das Vakuum-Isolierglas besitzt allerdings durch die Zerstörung bei dem Pendelschlagversuch mit einer Fallhöhe von 450 mm nur noch eine Resttragfähigkeit in Verbindung mit den angrenzenden Zwischenschichten. Die tatsächlichen Dehnungen unter Berücksichtigung des zerstörten Vakuum-Isolierglas werden im Versuch aufgenommen, während die numerische Berechnung auf den Materialkennwerten des intakten Prüfkörpers basiert. Im numerischen Modell liegen sowohl bei der Fallhöhe von 190 mm als auch von 450 mm die höchsten Spannungen auf der stoßabgewandten Seite des Vakuum-Isolierglases vor. Die Versuche bestätigen dieses Ergebnis, indem das Vakuum-Isolierglas als erste Schicht versagt. Durch die deutlich reduzierte Steifigkeit dieser Schicht nach dem Bruch tritt die höchste Zugspannung im Versuch auf der Außenseite der stoßabgewandten Dünnglastafel auf, in der numerischen Berechnung liegt diese weiterhin im Vakuum-Isolierglas vor.

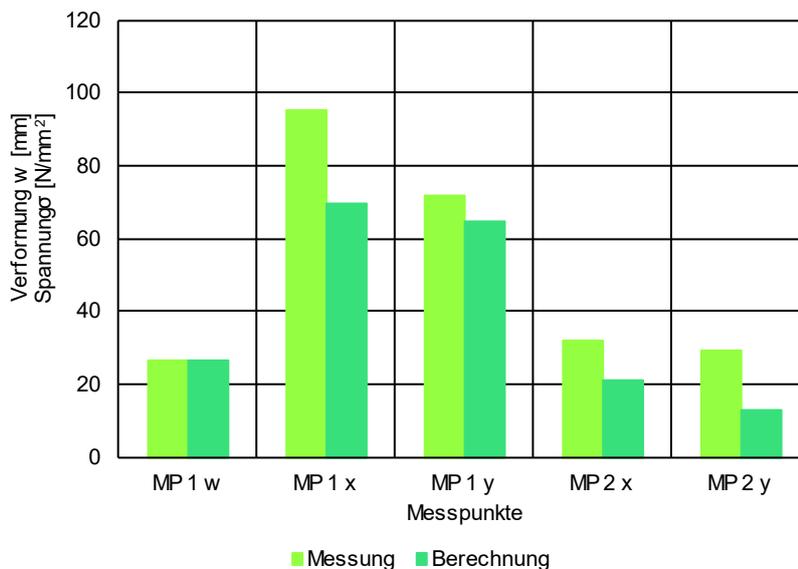
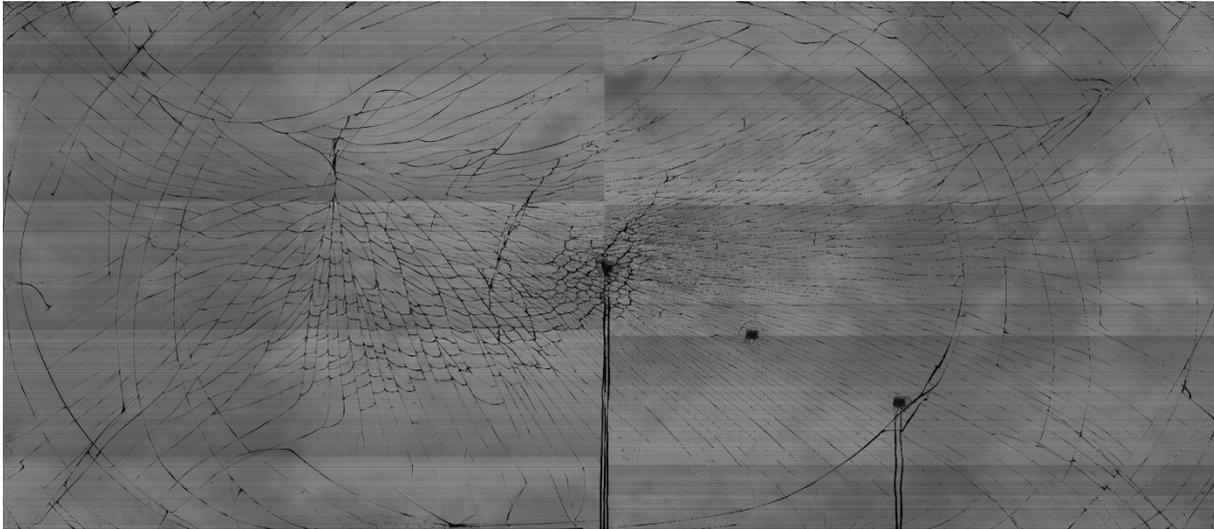


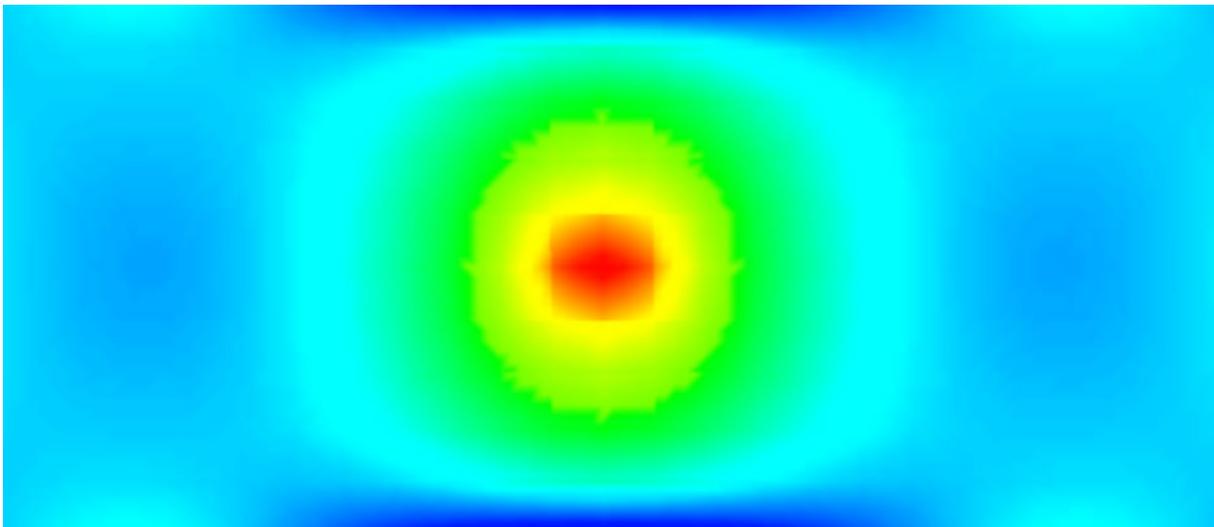
Bild 51 Vergleich der Spannungen und Verformungen aus der Messung mit der numerischen Berechnung des Pendelschlagversuchs für eine Fallhöhe von 450 mm für Variante 1.

Das Bruchbild bei einer Fallhöhe von 450 mm zeigt die Aufnahme in Bild 52. Deutlich erkennbar ist die Auftreffstelle im Mittelpunkt des Prüfkörpers. Die auftretenden maximalen Spannungen in diesem Bereich führen zu kleineren Bruchstücken als in der restlichen Fläche. Die einspannende Wirkung des Rahmens wird durch die ringförmigen Risse in der oberen Glastafel des Vakuum-Isolierglases sichtbar.



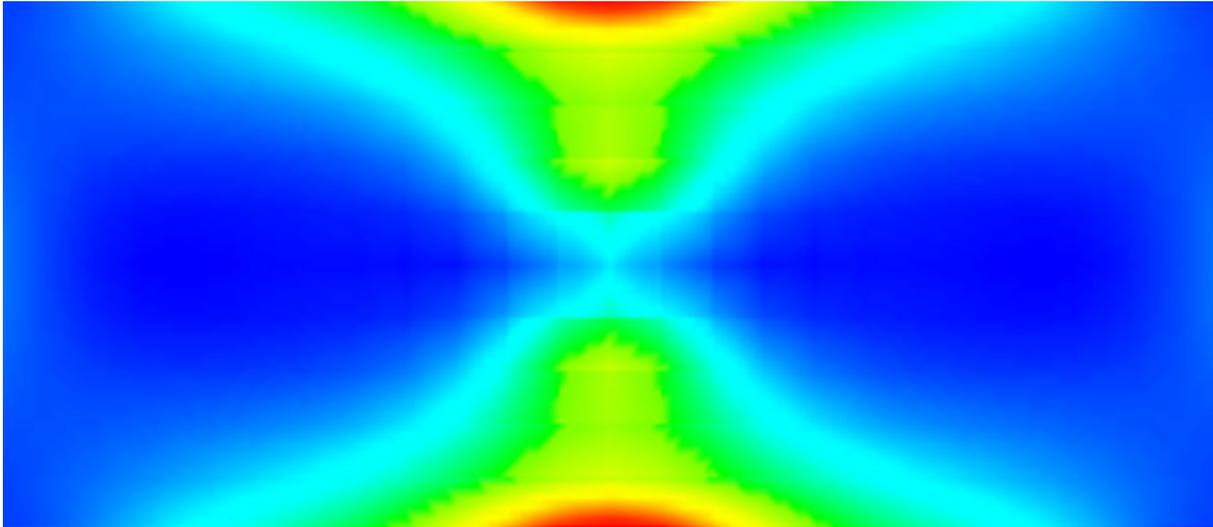
Die ringförmig verlaufenden Bruchlinien bilden qualitativ die Spannungslinien ab, die zum Vergleich in Bild 53 aus einer numerischen Berechnung dargestellt sind. Im Kugelfallversuch sind die auftretenden ringförmigen Bruchlinien durch die umlaufende linienförmige Lagerung der quadratischen Prüfkörper kreisförmig. Durch die rechteckigen Prüfkörper beim Pendelschlagversuch werden die Risse analog zum Verlauf der Spannungen ovalförmig ausgebildet. In den Randbereichen oben und unten tritt eine einspannende Wirkung durch die Steifigkeit des Verglasungsaufbaus auf.

Bild 52 Exemplarische Aufnahme des Bruchbildes von einem Prüfkörper beim Pendelschlagversuch mit einer Fallhöhe 450 mm für Variante 1.



Die Unterseite des Vakuum-Isolierglases weist Risse auf, die in Diagonalrichtung verlaufen. Unter der starken Verformung des Aufpralls durch den Stoßkörper bilden sich Zugdiagonalen aus, entlang deren Verlauf die Risse entstehen. Zum Vergleich zeigt Bild 54 die numerisch berechneten Spannungen auf der Unterseite des Vakuum-Isolierglases, die analog zum Rissbild verlaufen.

Bild 53 Numerisch berechnete Spannungen auf der Oberseite des Vakuum-Isolierglases beim Pendelschlagversuch mit einer Fallhöhe von 450 mm für Variante 1.



Anschließend wird der Pendelschlagversuch mit der höchsten Fallhöhe von 1.200 mm mit den durch eine Fallhöhe von 450 mm bereits vorgeschädigten Prüfkörpern durchgeführt. Durch den Aufprall des Stoßkörpers werden auch die beiden äußeren Dünnglastafeln zerstört und das Bruchbild des Vakuum-Isolierglases erweitert. Bild 55 zeigt die Verformung im Mittelpunkt der Prüfkörper in Abhängigkeit von der Zeit. Der Mittelwert beträgt 58,9 mm. Durch den Bruch aller Glastafeln im Verglasungsaufbau unterscheidet sich das Verhalten der Prüfkörper nach dem Aufprall des Stoßkörpers.

Bild 54 Numerisch berechnete Spannungen auf der Unterseite des Vakuum-Isolierglases beim Pendelschlagversuch mit einer Fallhöhe von 450 mm für Variante 1.

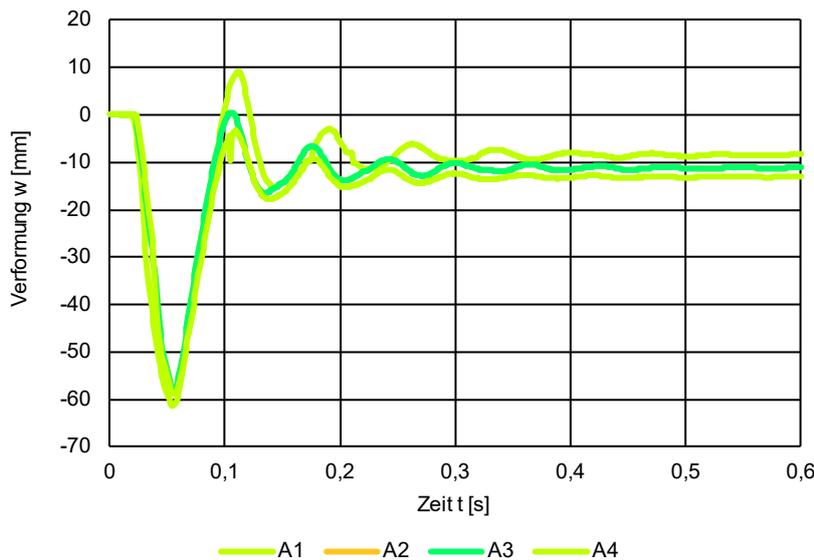
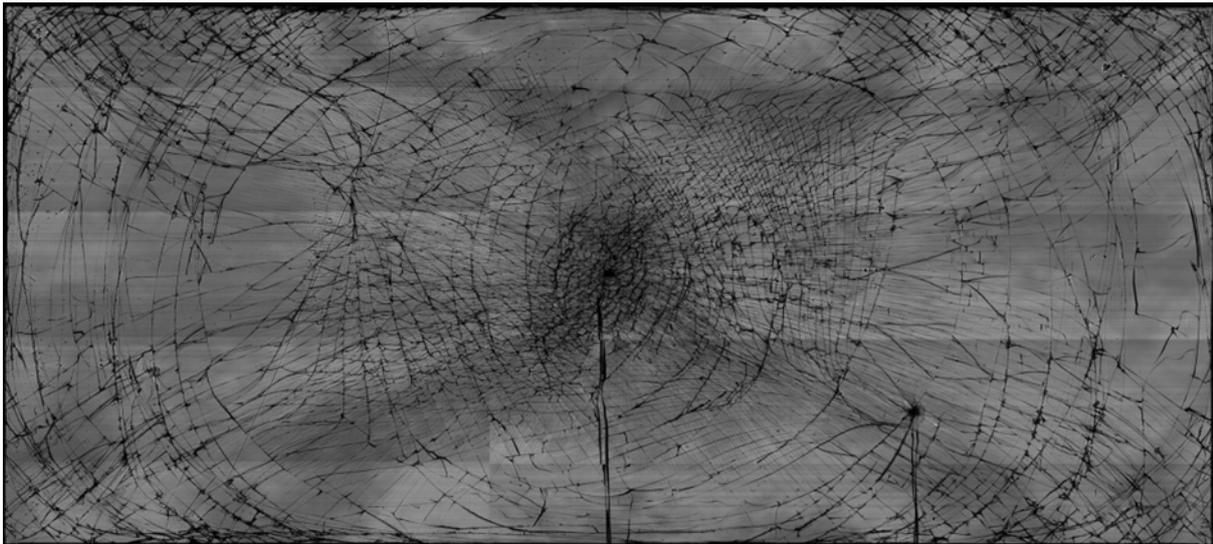


Bild 55 Verformung der Prüfkörper beim Pendelschlagversuch mit einer Fallhöhe von 1200 mm für Variante 1.

Durch den Bruch der beiden äußeren Dünnglastafeln ist ein korrektes Aufzeichnen von Dehnungen durch die Dehnungsmessstreifen und ein Vergleich mit den numerisch berechneten Ergebnissen nicht mehr möglich. Der Einfluss der größeren Fallhöhe ist allerdings in Bild 56 deutlich erkennbar. Insbesondere im Bereich um den Auftreffpunkt

des Stoßkörpers treten kleine Bruchstücke auf, die etwa die quadratische Fläche der Ersatzlast des vereinfachten Verfahrens nach DIN 18008-4 von 200 mm auf 200 mm abbilden. Insgesamt verstärken die zusätzlichen Risse die Verläufe der vorhandenen Risse. Auf der Oberseite treten im inneren Bereich zu den ringförmigen Rissen weitere sekundäre Risse auf, die zu einem feinen Rissbild führen. Zusätzliche Bruchlinien auf der Unterseite entstehen im Bereich der Diagonalen.



Analog zu Variante 1 erfolgt die Durchführung des Pendelschlagversuchs für Variante 2 ohne Polycarbonat und zwei Zwischenschichten aus PU 2 mit einer Nenndicke von 6 mm. Der Aufbau der Prüfkörper mit den zugehörigen Nenn- und Realdicken zeigt Tabelle 28.

Bild 56 Exemplarische Aufnahme des Bruchbildes von einem Prüfkörper beim Pendelschlagversuch mit einer Fallhöhe 1.200 mm für Variante 1.

| Prüfkörper | Aufbau | Nenn- dicke | Real- dicke |
|------------|---|----------------|----------------|
| G1 | 2,0 mm DG 6,0 mm PU2 8,0 mm VIG 6,0 mm PU2 2,0 mm DG | 24,0 mm | 25,0 mm |
| G2 | 2,0 mm DG 6,0 mm PU2 8,0 mm VIG 6,0 mm PU2 2,0 mm DG | 24,0 mm | 25,1 mm |
| G3 | 2,0 mm DG 6,0 mm PU2 8,0 mm VIG 6,0 mm PU2 2,0 mm DG | 24,0 mm | 25,0 mm |
| G4 | 2,0 mm DG 6,0 mm PU2 8,0 mm VIG 6,0 mm PU2 2,0 mm DG | 24,0 mm | 25,0 mm |

Tabelle 28 Querschnittsaufbau der Prüfkörper für den Pendelschlagversuch von Variante 2 mit der Zwischenschicht (PU2), Vakuum-Isolierglas (VIG) und Dünn-
glas (DG).

Die Ergebnisse des Pendelschlagversuchs für Variante 2 zeigt Tabelle 29. Ein Durchdringen der Prüfkörper durch das Doppelreifen-Pendel erfolgt bis zur höchsten Fallhöhe von 1.200 mm nicht. Im Vergleich zu Variante 1 führt bei zwei Prüfkörpern bereits der Stoß durch das Pendel bei einer Fallhöhe von 190 mm zum Bruch des Vakuum-Isolierglases. Allerdings brechen bei keinem Prüfkörper bis zu einer

Fallhöhe von 450 mm die äußeren Dünnglastafeln durch die Einwirkung des weichen Stoßes. Eine Zerstörung des Floatglases erfolgt bei allen Prüfkörpern bei einer Fallhöhe von 1.200 mm. Es bildet sich kein Versatz sowie keine Öffnung in der Verglasung und es fällt keine messbare Splittermenge an. Zur Reduzierung der erforderlichen Anzahl an Prüfkörpern erfolgt an jedem Prüfkörper die Prüfung aller Fallhöhen. Die durchgeführten Versuche zeigen, dass im Versuch nach DIN EN 12600 die Pendelschlagklasse 1 (B) 1 erreichbar ist.

| Prüfkörper | G1 | G2 | G3 | G4 |
|-------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Nennstärke | 24,0 mm | 24,0 mm | 24,0 mm | 24,0 mm |
| Realstärke | 25,0 mm | 25,1 mm | 25,0 mm | 25,0 mm |
| Fallhöhe 190 mm | | | | |
| Durchschlag | nein | nein | nein | nein |
| Zerstörung | nein | VIG | VIG | nein |
| Fallhöhe 450 mm | | | | |
| Durchschlag | nein | nein | nein | nein |
| Zerstörung | VIG | VIG | VIG | VIG |
| Fallhöhe 1.200 mm | | | | |
| Durchschlag | nein | nein | nein | nein |
| Zerstörung | DG VIG DG | DG VIG DG | DG VIG DG | DG VIG DG |

Tabelle 29 Ergebnisse des Pendelschlagversuchs nach DIN 12600 für Variante 2.

Bild 57 zeigt das Verformungsverhalten der Prüfkörper von Variante 2 gemessen in Plattenmitte. Die Verformung bei Auftreffen des Doppelreifen-Pendels liegt mit 5,1 mm als Mittelwert ungefähr bei einem Drittel der Verformung von Variante 1 mit einem Mittelwert von 15,3 mm. Die Verformung der Prüfkörper G2 und G3 liegen mit 1,0 mm bis 1,5 mm über der maximalen Verformung der beiden anderen Prüfkörper. Die größere Verformung resultiert aus dem Bruch des Vakuum-Isolierglases, der für die Prüfkörper G2 und G3 bei 190 mm eintritt. Analog zu der geringeren maximalen Verformung beim Aufschlag des Stoßkörpers zeigt die geringere Amplitude der Nachschwingungen im Vergleich zu Variante 1 die deutlich höhere Steifigkeit von Variante 2 unter dynamischer Einwirkung. Die höhere Steifigkeit von Variante 2 führt zu einer geringeren Gesamtverformung und zu höheren Spannungen im Verglasungsaufbau sowie zum früheren Bruch des Vakuum-Isolierglases bei einer Fallhöhe von 190 mm.

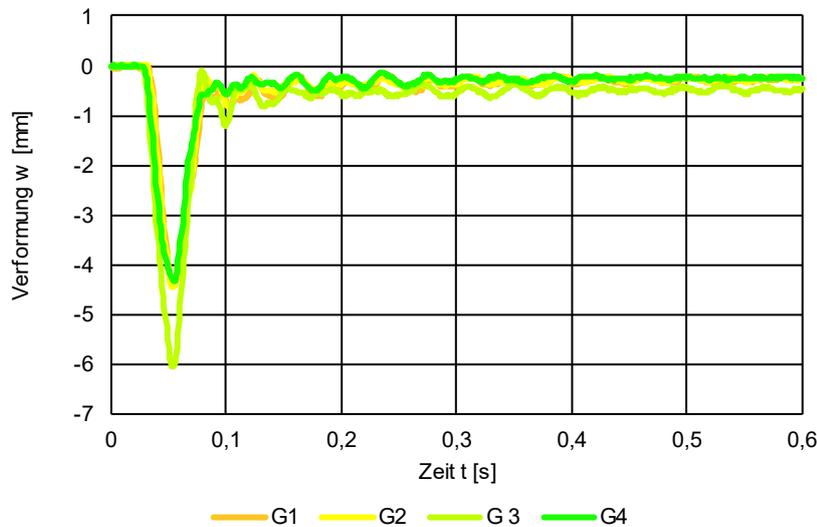


Bild 57 Verformung der Prüfkörper beim Pendelschlagversuch mit einer Fallhöhe von 190 mm für Variante 2.

Der Vergleich der Verformungen und der Spannungen an Messpunkt 1 sowie der Spannungen an Messpunkt 2 für die Messung und die numerische Berechnung erfolgt analog zu Variante 1 in Bild 58. Die bei Prüfkörper G2 und G3 auftretenden Risse im Vakuum-Isolierglas zeigen geringe Auswirkungen auf die Messung der Dehnungen. Im Vergleich der gemessenen Spannungen aller vier Prüfkörper an den zwei Messstellen ergibt sich eine maximale Standardabweichung von $0,8 \text{ N/mm}^2$. Durch die Anpassung des Elastizitätsmoduls der Zwischenschicht ist das Einstellen eines teilweisen Verbunds möglich. Die Annahme eines Elastizitätsmoduls von 90 N/mm^2 erzielt für die Zwischenschicht 2 das genaueste Ergebnis. Bild 56 zeigt ein nahezu identisches Ergebnis für die Verformung in Plattenmitte aus der numerischen Berechnung und der gemessenen Ergebnisse. Die Spannungen in Plattenmitte weichen im Modell ungefähr 3 % von der Messung ab. Die Spannungen an Messpunkt 2 weichen um maximal 37 % ab. Im Bereich der Längsspannungen liegen die Ergebnisse des Modells auf der sicheren Seite, die Querspannungen an beiden Messpunkten werden allerdings leicht unterschätzt.

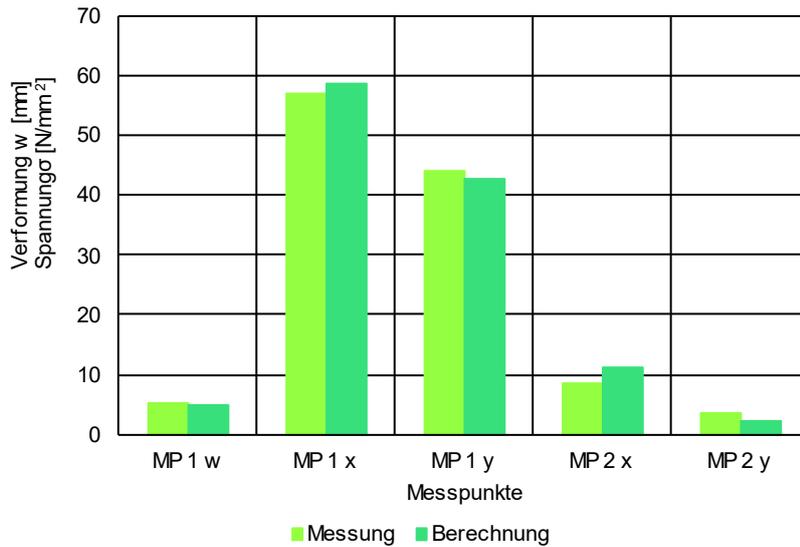


Bild 58 Vergleich der Spannungen und der Verformungen aus der Messung mit der numerischen Berechnung des Pendelschlagversuchs für eine Fallhöhe von 190 mm für Variante 2.

Bild 59 zeigt die Verformung im Mittelpunkt der Prüfkörper bei einer Fallhöhe von 450 mm in Abhängigkeit von der Zeit. Im Mittelwert tritt eine maximale Verformung von etwa 9,0 mm auf. Ähnlich wie bei der Fallhöhe von 190 mm beträgt die Verformung etwa ein Drittel der Verformung von Variante 1. Der Verlauf der Verformungskurve der vier Prüfkörper ist zunächst relativ identisch. Durch die Zerstörung des Vakuum-Isolierglases aller Prüfkörper bei Auftreffen des Stoßkörpers unterscheidet sich das Schwingungsverhalten danach deutlicher.

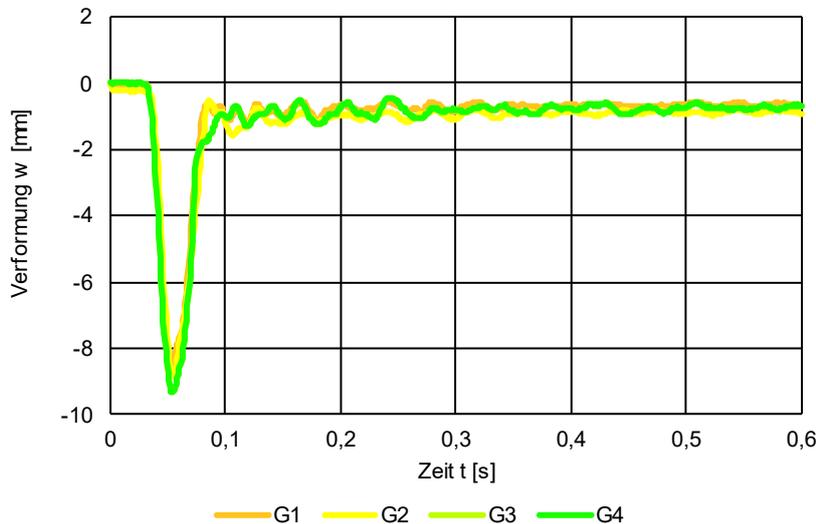


Bild 59 Verformung der Prüfkörper beim Pendelschlagversuch mit einer Fallhöhe von 450 mm für Variante 2.

In Bild 60 sind die gemessene und die berechnete Verformung im Mittelpunkt der Prüfkörper sowie die Spannungen für Messpunkt 1 und Messpunkt 2 bei einer Fallhöhe von 450 mm im Vergleich abgebildet. Die Verformung im Mittelpunkt liegt für den numerisch berechneten Wert ungefähr 15,8 % unter dem gemessenen Wert. Die Spannungen aus der numerischen Berechnung weichen in Messpunkt 2 mit 37,3 %

maximal von den aus den gemessenen Dehnungen ermittelten Spannungen ab. Analog zu Variante 1 erfolgt bei einer Fallhöhe von 450 mm die Zerstörung des Vakuum-Isolierglases aller Prüfkörper und besitzt nur noch eine Resttragfähigkeit in Verbindung mit den angrenzenden Zwischenschichten. Das numerische Modell bildet im Gegensatz zur Messung nicht die tatsächlichen Spannungen unter Berücksichtigung des zerstörten Vakuum-Isolierglases ab.

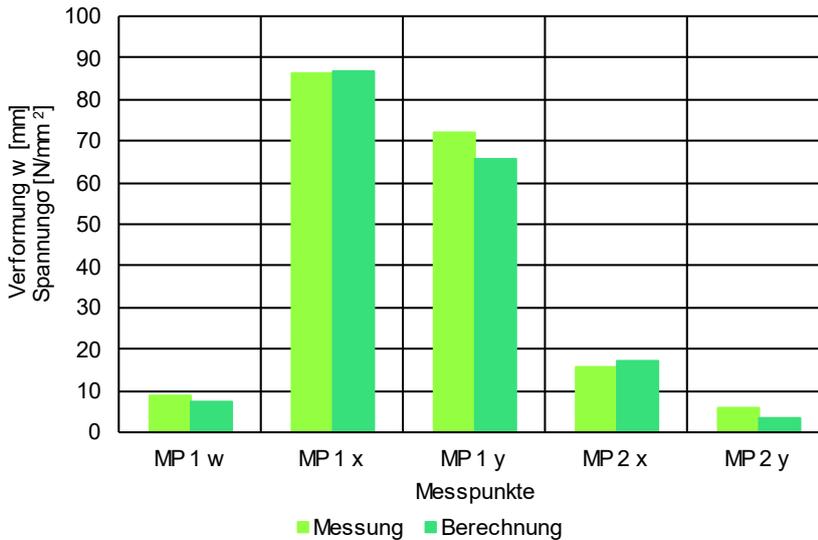
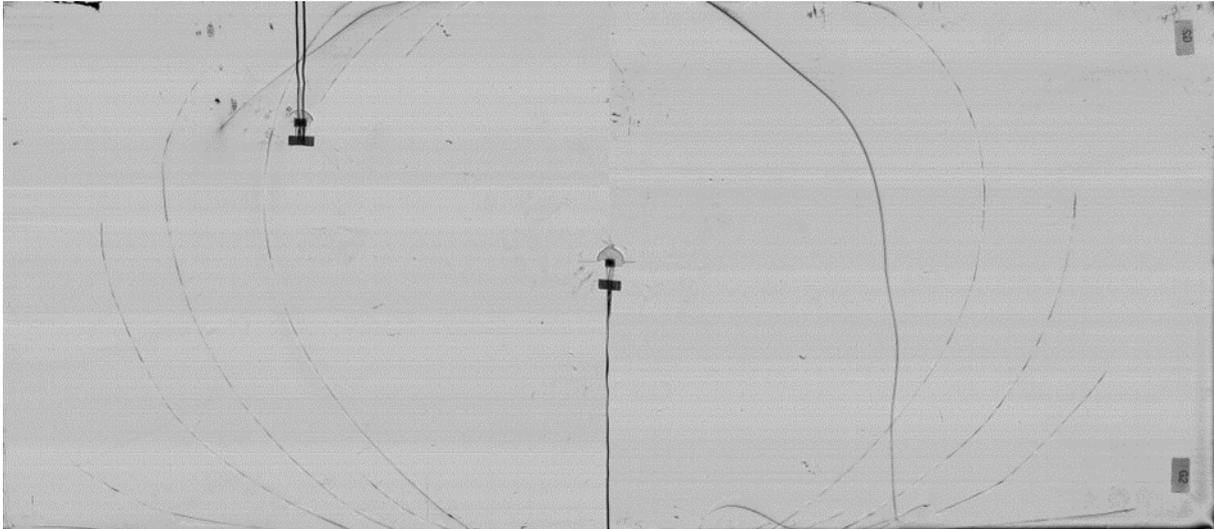


Bild 60 Vergleich der Spannungen und Verformungen aus der Messung mit der numerischen Berechnung des Pendelschlagversuchs für eine Fallhöhe von 450 mm für Variante 2.

Bild 61 zeigt das typische Bruchbild der Prüfkörper bei einer Fallhöhe von 450 mm. Die konzentrisch verlaufenden Risse im Vakuum-Isolierglas im Bereich um die Auftreffstelle des weichen Stoßkörpers verdeutlichen die einspannende Wirkung des Rahmens. Durch die geringere Steifigkeit von Variante 1 liegt eine ungefähr um den Faktor 3 höhere Verformung im Mittelpunkt vor als mit Variante 2 vor. Bedingt durch die geringere Verformung von Variante 2 ist die Anzahl der Bruchstücke deutlich niedriger. Es treten durch die höhere Steifigkeit von Variante 2 die Risse konzentrisch in einem Durchmesser, der ungefähr der Prüfkörperbreite entspricht, um die Auftreffstelle insbesondere in der stoßzugewandten Glastafel auf. Die bei Variante 1 feststellbaren Bruchlinien entlang der Diagonalen des Prüfkörpers in der unteren Glastafel des Vakuum-Isolierglases treten bei Variante 2 nicht auf. Der überwiegende Anteil der Aufprallenergie wird bereits durch die erste Lage der Zwischenschicht in Verbindung mit der äußeren Dünnglastafel und der stoßzugewandten Glastafel des Vakuum-Isolierglases abgetragen.



Die höchste Fallhöhe beträgt 1.200 mm und wird an den bereits bei einer Fallhöhe von 450mm vorgeschädigten Prüfkörpern untersucht. Bild 62 zeigt die Verformung im Mittelpunkt in Abhängigkeit von der Zeit. Die Zerstörung der beiden außenliegenden Dünnglastafeln führt zu unterschiedlichen Verformungen bei den Prüfkörpern. Die maximale Verformung von Prüfkörper G1 bis G4 weisen ungefähr die gleichen Werte auf. Das Schwingungsverhalten sowie die plastische Verformung der Prüfkörper unterscheiden sich allerdings deutlich. Die maximale plastische Verformung tritt mit Prüfkörper G4 auf und liegt bei etwa 30 mm. Der Mittelwert der plastischen Verformung beträgt bei Variante 1 ungefähr 10,9 mm, Prüfkörper G4 von Variante 2 weist eine um den Faktor 3 höhere plastische Verformung auf. Der höhere Elastizitätsmodul von Zwischenschicht PU2 führt zu einer größeren Steifigkeit von Variante 2. Nach dem Bruch der äußeren Dünnglastafeln basiert die Steifigkeit von Variante 1 maßgeblich auf dem Materialverhalten des Polycarbonats. Die Steifigkeit von Variante 2 reduziert sich mit dem Bruch der Dünnglastafeln deutlich, da die Resttragfähigkeit nun maßgeblich von der Zwischenschicht abhängt. Der gemessene Elastizitätsmodul der Zwischenschicht liegt mit $10,3 \text{ N/mm}^2$ für kurzzeitige Beanspruchungen deutlich unter dem von Polycarbonat mit 2.350 N/mm^2 und führt daher zu deutlich größeren Verformungen.

Bild 61 Exemplarische Aufnahme des Bruchbildes von einem Prüfkörper beim Pendelschlagversuch mit einer Fallhöhe 450 mm für Variante 2.

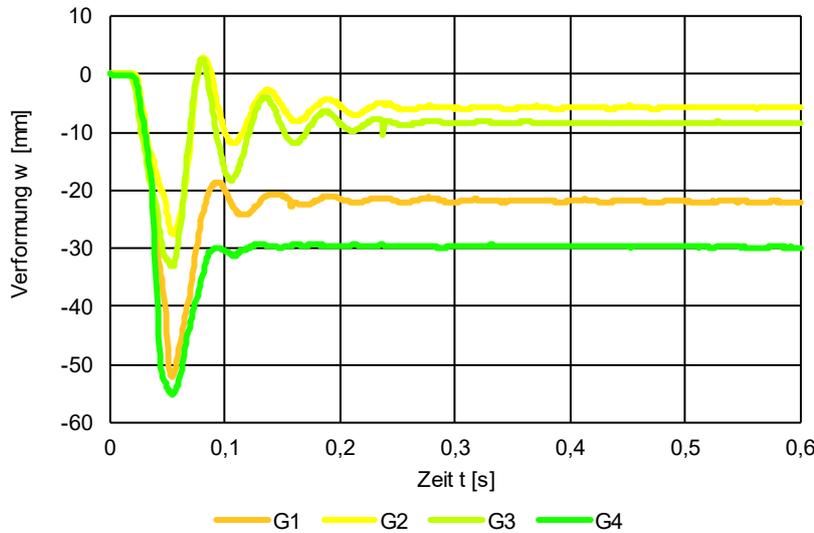
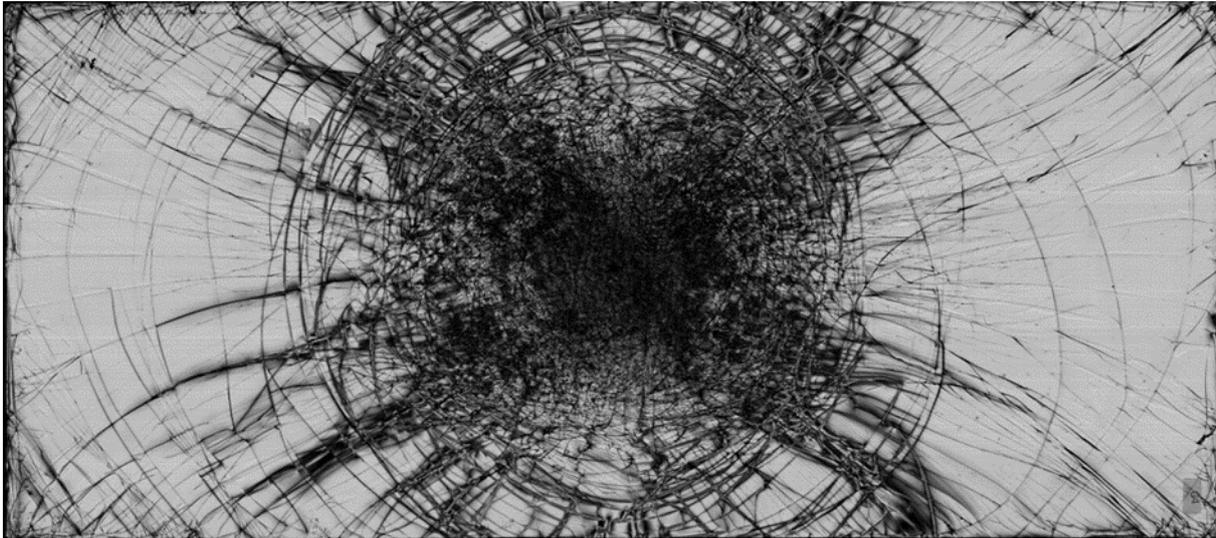


Bild 62 Verformung der Prüfkörper beim Pendelschlagversuch mit einer Fallhöhe von 1200 mm für Variante 2.

Der Bruch der beiden äußeren Dünnglastafeln ermöglicht keine korrekte Aufzeichnung von Dehnungen durch die Dehnungsmessstreifen und deshalb auch kein Vergleich mit den Ergebnissen aus der numerischen Berechnung. Den Einfluss der Fallhöhe von 1.200 mm auf das Bruchbild zeigt Bild 63. Im Vergleich zu Variante 1 treten besonders in einem ringförmigen Bereich um die Auftreffstelle, dessen Durchmesser etwa der Breite des Prüfkörpers entspricht, kleinere Bruchstücke auf. Außerhalb dieses Bereichs sind die Bruchstücke deutlich größer als bei Variante 1. Dadurch ergibt sich bei Variante 2 an den Rändern der Auftreffstelle eine einspannende Wirkung. Die Rissbildung entlang der Diagonalen erfolgt bei Variante 2 zwischen den Eckpunkten des inneren Radius. Bei Variante 1 mit geringerer Steifigkeit ist die einspannende Wirkung im äußeren Bereich der Verglasung niedriger und die Bruchlinien verlaufen entlang der Diagonalen zwischen den Eckpunkten des Prüfkörpers. Die höhere Steifigkeit von Variante 2 führt dazu, dass die Abtragung der Aufprallenergie in einem lokal begrenzten Bereich erfolgt. In diesem Bereich treten in Verbindung mit den kleineren Bruchstücken lokal höhere Verformungen auf, die mit zunehmender Entfernung vom Auftreffpunkt deutlicher abnehmen als bei Variante 1.



5.2.2 Untersuchung der Angriffshemmung

Neben den energetischen Anforderungen sollen die entwickelten Verglasungsaufbauten mit den Vakuum-Isoliergläsern eine hohe Widerstandsklasse gegen manuellen Angriff erreichen. Die Anforderungen an die Angriffshemmung werden in DIN EN 356 geregelt und in Widerstandsklassen eingeordnet. Die Einordnung in die Klassen P1A bis P5A erfolgt in Abhängigkeit der Fallhöhe einer Stahlkugel, die von einer Falleinrichtung auf die Verglasung fällt. Die höchsten Anforderungen an die Angriffshemmung stellen die Widerstandsklassen P6B bis P8B dar. Der Einbruch wird bei diesen Klassen durch eine mechanisch geführte Axt simuliert. Zum Erreichen der höchsten Widerstandsklasse P8B müssen die Prüfkörper dem genormten Axtangriff mit mindestens 71 Schlägen standhalten. Insgesamt erfordert die Prüfung mit der Axt drei Prüfkörper mit Abmessungen von 900 mm in der Breite und 1.100 mm in der Länge.

Bild 63 Exemplarische Aufnahme des Bruchbildes von einem Prüfkörper beim Pendelschlagversuch mit einer Fallhöhe 1.200 mm für Variante 2.

Für die Herstellung konventioneller Sicherheitssonderverglasungen mit Glasverbund sind häufig hohe Gesamtdicken erforderlich. Zur Sicherstellung des Wärmeschutzes erfolgt die Erweiterung zum Mehrscheiben-Isolierglas durch Vorlagerung einer weiteren Einzelscheibe. Die zusätzliche Glastafel leistet allerdings keinen Beitrag zur Erhöhung der Angriffshemmung. Bei den Vakuum-Isoliergläsern mit passiven und aktiven Sicherheitsanforderungen tragen durch den symmetrischen Aufbau das innen- und außenliegende Glaspaket zur Angriffshemmung bei.

| Anzahl | Abmessungen | Aufbau |
|--------|-------------------|---|
| 3 | 900 mm x 1.100 mm | FG PU1 PC PU1 VIG PU1 PC PU1 FG 2 mm 2 mm 5 mm 2 mm 8 mm 2 mm 5 mm 2 mm 2 mm |
| 3 | 900 mm x 1.100 mm | FG PU2 VIG PU2 FG 2 mm 6 mm 8 mm 6 mm 2 mm |

Tabelle 30 Prüfkörper für die Axtprüfung nach DIN EN 356

Der Versuchsablauf erfordert eine umlaufende Einspannung der Prüfkörper am Rand zwischen zwei Gummistreifen in der Halteeinrichtung mit einer Flächenpressung von $140 \pm 20 \text{ kN/m}^2$. Das Ziel der Axtprüfung ist eine quadratische Öffnung von 400 mm in der Mitte des Prüfkörpers. Vor Beginn der eigentlichen Axtprüfung erfolgt die Lockerung der Prüfkörper durch mindestens 12 Hammerschläge, die die flache Seite der Axt abbilden. Das Schlaggerät wird vor der Prüfung mit einem Anstellwinkel von 25° zur Angriffsfläche über den Hammerstiel eingestellt. Zum Erreichen der höchsten Widerstandsklasse P8B müssen die Prüfkörper neben den 12 Lockerungsschlägen noch 59 Trennschlägen mit der Axt widerstehen. In Tabelle 30 sind die Abmessungen sowie Aufbau und Anzahl der geprüften Prüfkörper aufgeführt.



Bild 64 Prüfkörper im Axtversuch zum Nachweis gegen manuellen Angriff nach DIN EN 356. Die Abmessungen betragen 900 mm auf 1.100 mm.

Bild 64 zeigt den eingebauten Prüfkörper mit der angezeichneten Lage der einzubringenden Öffnung von 400 mm auf 400 mm und der Auftreffstellen des Hammers für die Lockerungsschläge.

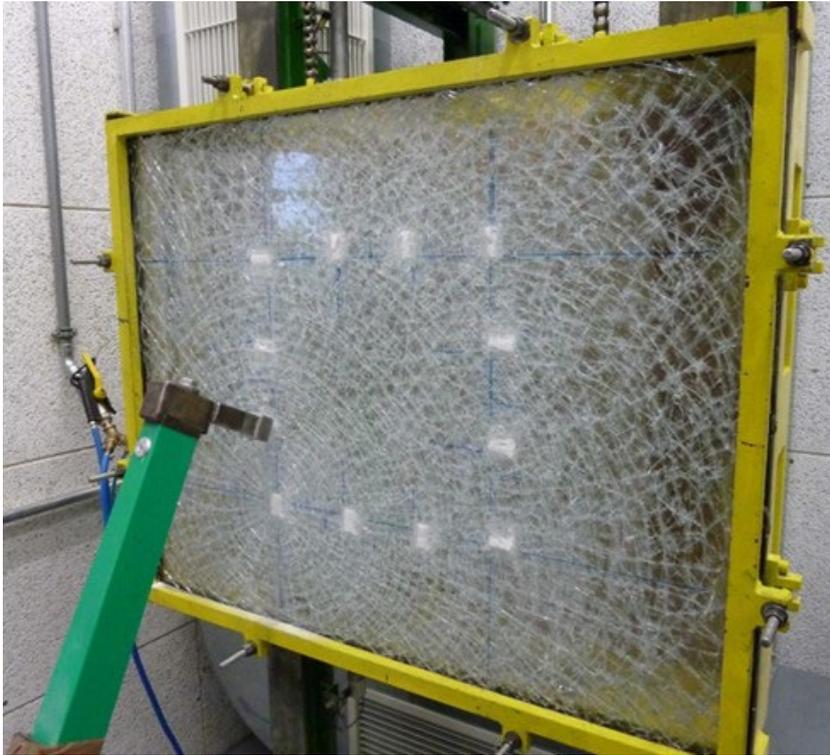


Bild 65 Prüfkörper nach Aufbringen der 12 Lockerungsschläge mit dem Hammer

In Bild 65 erfolgt die Lockerung der Verglasung durch Schläge mit dem mechanisch geführten Hammer, deren Abstand ungefähr 133 mm beträgt.



Bild 66 Prüfkörper nach Durchdringen des ersten Glaspaketes.

Nach der Lockerung des Verbundes durch die Hammerschläge erfolgt das Einbringen der Öffnung durch mechanisch geführte Axtschläge entlang des vorgezeichneten Quadrats gemäß Bild 66. Durch den Scheibenzwischenraum des Vakuum-Isolierglases wird zunächst ein Quadrat aus der Angriffsseite der Verglasung herausgetrennt.



Bild 67 Prüfkörper beim Einbringen der Öffnung in das erste Glaspaket.

Das Herauslösen des Quadrats aus dem ersten Glaspaket des Glasverbundes ermöglicht anschließend die Bearbeitung des zweiten Glaspakets. Bild 67 zeigt das Einbringen der Öffnung in das zweite Glaspaket.

| Prüfkörper | Anzahl Hammerschläge | Anzahl Axtschläge | Gesamtanzahl Schläge | Widerstandsklasse |
|------------|----------------------|-------------------|----------------------|-------------------|
| D1 | 12 | 61 | 73* | P8B |
| D2 | 12 | 60 | 72* | P8B |
| D3 | 12 | 60 | 72* | P8B |
| J1 | 12 | 60 | 72* | P8B |
| J2 | 12 | 60 | 72* | P8B |
| J3 | 12 | 61 | 73 | P8B |

* Abbruch nach Erreichen der höchsten Widerstandsklasse P8B

Tabelle 31 Auswertung der Axtversuche nach DIN EN 356.

Alle Prüfkörper bestehen die Prüfung auf Widerstand gegen manuellen Angriff. Die entwickelten Vakuum-Isoliergläser mit passiven und aktiven Sicherheitsanforderungen erreichen als Variante 1 und Variante 2 die höchste Widerstandsklasse P8B.

5.2.3 Messung des Luftschalldämmmaßes

Lärm stellt in der industrialisierten Welt ein wahrnehmbares Umweltproblem dar. Ein dauerhaft hoher Schallpegel wirkt sich nicht nur ungünstig auf das subjektive Wohlbefinden von Menschen aus, sondern kann auch zu Krankheiten führen. Die Bauakustik stellt ein Teilgebiet der Bauphysik dar und beschäftigt sich mit der Auswirkung von baulichen Anlagen auf die Schallausbreitung zwischen Räumen innerhalb eines Gebäudes sowie zwischen dem Rauminnen und der Außenwelt. Nach physikalischer Definition ist Schall eine durch mechanische Schwingungen hervorgerufene Wellenbewegung in einem elastischen Medium. Der Beginn des menschlichen Hörbereichs liegt bei der Hörschwelle von 16 Hz, das obere Ende entspricht der Schmerzschwelle bei etwa 20.000 Hz.⁵⁷

In der Bauakustik konzentriert sich Schall insbesondere auf einen Bereich zwischen 100 Hz bis 3.150 Hz. Für die Schallübertragung zwischen benachbarten Räumen ergeben sich grundsätzlich zwei Übertragungswege. Der Körperschall definiert die Übertragung von akustischen Schwingungen über Festkörper im Gebäude, wie Decken und Wände. Um Gebäudenutzer vor Störungen durch Körperschall zu schützen, ist zum Beispiel die Schallentkopplung von Verkehrswegen wie Treppen notwendig. Das Übertragungsmedium für den Luftschall ist die Luft, die insbesondere Lärm von Schallquellen außerhalb des Gebäudes ins Innere überträgt. In Deutschland waren 2020 etwa 10 % der Bevölkerung durch Verkehrslärm von mindestens 65 dB (A) belästigt und durch vom Schienenverkehr verursachten Lärm etwa 8 %.⁵⁸ Einen effektiven Beitrag zum Schallschutz einer Gebäudefassade leisten insbesondere die Verglasungen.

Das Schalldämm-Maß R charakterisiert die Luftschalldämmung von Bauteilen und stellt das zehnfache logarithmische Verhältnis der Schalleistungen auf beiden Seiten des Bauelements dar. Der Kennwert gibt an, in welchem Maß ein Bauteil, den Schall zwischen zwei schallführenden Medien dämmt. Das bewertete Schalldämm-Maß R_w wird anschließend durch Vergleich mit einer festgelegten Bezugskurve nach DIN EN ISO 717-1 bestimmt. Das normative Bewertungsverfahren berücksichtigt damit die Empfindlichkeit des menschlichen Gehörs, die bei niedrigeren Frequenzen geringer als bei höheren Frequenzen ist.

⁵⁷ Vergleiche Willems 2013.

⁵⁸ Vergleiche Umweltbundesamt 2020.

Eine Steigerung der Luftschalldämmung einschaliger Bauteile ermöglicht nach dem Berger'schen Massengesetz die Erhöhung der flächenbezogenen Masse sowie eine niedrige Scheibensteifigkeit, die durch weiche Zwischenschichten erreicht wird. Die Untersuchung des Schallschutzes erfolgt nach DIN EN ISO 10140-2 mit anschließender Auswertung der Messungen nach DIN EN ISO 717-1. Die Ergebnisse der Prüfungen ermöglichen eine nachfolgende Klassifizierung, einen Vergleich der Schalldämmeigenschaften von Bauteilen und eine Abschätzung der Leistung im eingebauten Zustand.

Grundlage der Messung ist ein Normprüfstand ohne eine Schallübertragung über Flankenwege. Aus diesem Grund sind die Messungen nicht direkt auf das eingebaute Bauteil zu übertragen ohne im Vorfeld weitere Randbedingungen, die die Schalldämmung beeinflussen, zu berücksichtigen. Grundsätzlich sieht der Versuchsaufbau zur Ermittlung des bewerteten Schalldämm-Maß R_w zwei nebeneinanderliegende Räume mit einem Rauminhalt von mindestens 50 m^3 vor. Der Einbau des Prüfkörpers erfolgt in die Öffnung der Trennwand zwischen den beiden Räumen. Im Senderraum wird mit Hilfe von Lautsprechern ein diffuses Schallfeld erzeugt und sowohl im Sender- als auch Empfängerraum der Schalldruckpegel in einem Frequenzbereich von 100 Hz bis 5.000 Hz aufgezeichnet. Die Messergebnisse werden in ein Frequenz-Schalldämmmaß-Diagramm übertragen und durch Verschiebung der Bezugskurve zur Übereinstimmung gebracht, wobei der Wert der verschobenen Bezugskurve bei 500 Hz das bewertete Schalldämm-Maß R_w abbildet. Bild 68 zeigt den Einbauzustand des Prüfkörpers durch Halteleisten und plastischen Dichtstoff mit Blick vom Empfänger in den Senderraum.



Bild 68 Im Prüfstand eingebauter Prüfkörper zur Ermittlung des bewerteten Schalldämmmaßes mit Blick vom Empfänger- in den Senderraum.

In Tabelle 32 sind Anzahl, Aufbau, Nenndicke und Realdicke der Prüfkörper mit den Abmessungen von 1.230 mm auf 1.480 mm zu den beiden Varianten für die Messung des Schalldämmmaßes angegeben.

| Prüfkörper | Aufbau | Nenn- dicke | Real- dicke |
|------------|--|----------------|----------------|
| E 1 | 2,0 mm DG 2,0 mm PU1 5,0 mm PC 2,0 mm PU1 8,0 mm VIG 2,0 mm PU1 5,0 mm PC 2,0 mm PU1 2,0 mm DG | 30,0 mm | 29,9 mm |
| K 1 | 2,0 mm DG 6,0 mm PU2 8,0 mm VIG 6,0 mm PU2 2,0 mm DG | 24,0 mm | 25,0 mm |

Tabelle 32 Querschnittsaufbau der Prüfkörper für die Ermittlung des bewerteten Schalldämmmaßes für Variante 1 und 2 mit der Zwischenschicht 1 (PU 1) und 2 (PU 2), Polycarbonat (PC), Vakuum-Isolierglas (VIG) sowie Dünnglas (DG).

Das ermittelte bewertete Schalldämmmaß R_w liegt für Variante 1 mit der Zwischenschicht PU 1 und Polycarbonat bei 45,4 dB und für Variante 2 mit der Zwischenschicht PU2 ohne Polycarbonat bei 40,6 dB. Das geringere bewertete Schalldämmmaß von Variante 2 entspricht den Erwartungen durch das geringere Flächengewicht von 42,6 kg/m² im Vergleich zu Variante 1 mit 48,7 kg/m² bei gleichzeitig geringerer Gesamtdicke.

Eine Erhöhung des Schallpegels um 10 dB entspricht dem menschlichen Empfinden nach in etwa einer Verdopplung der Lautstärke. Im Vergleich mit dem Vakuum-Isolierglas Fineo 8 mit einem bewerteten Schalldämm-Maß R_w von 35 dB bedeutet die Erweiterung zu Variante 1 eine deutliche Steigerung des Schalldämmmaßes. Die Verbesserung bei Variante 2 ist etwas geringer, allerdings für das menschliche Gehör noch deutlich wahrnehmbar. Die VDI-Richtlinie 2719 stellt Schallschutzklassen für Fenster entsprechend der Anforderungen an den Schallschutz auf. Allerdings gelten die Grenzwerte in der Richtlinie für einbaufähige Fenster mit Rahmen. Mit entsprechend gleichwertig gewähltem Rahmen erreicht Variante 2 mit einem bewerteten Schalldämmmaß von 40,6 dB die Schallschutzklasse 3. Variante 1 erreicht mit entsprechend gleichwertigem Rahmen mit einem bewerteten Schalldämmmaß von 45,4 dB die Schallschutzklasse 4.⁵⁹

5.2.4 Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten

Anforderungen an den Wärmeschutz von Gebäuden sind heute verpflichtend einzuhalten und nachzuweisen. Grundlagen und gesetzliche Rahmenbedingungen beinhaltet das Gebäudeenergiegesetz (GEG). Wichtige Kenn- und Vergleichsgröße für Gebäudehüllflächen ist der Wärmedurchgangskoeffizient, der die Grundlage zur energetischen Bewertung von Außenbauteilen bildet. Das Gebäudeenergiegesetz legt Grenzwerte des Wärmedurchgangskoeffizienten fest, die von den jeweiligen Bauteilen nicht überschritten werden dürfen. Grundsätzlich hängt der Wärmedurchgangskoeffizient insbesondere von den verwendeten Baumaterialien sowie deren Dicke ab. Verglasungen sind meistens Bestandteil der Gebäudehülle, über die ein Wärmeverlust stattfindet. Der Nachweis des Wärmeschutzes erfordert die Ermittlung des U_g -Wertes als Wärmedurchgangskoeffizient von Verglasungen. Der Wärmedurchgangskoeffizient bildet den Wärmestrom ab, der durch ein Bauteil innerhalb 1 h, bei einer Fläche von 1 m² und einer Temperaturdifferenz von konstant 1 K fließt. Bei Fenstern setzt sich der Wärmedurchgangskoeffizient U_w aus dem Verglasungsanteil U_g , dem Rahmenanteil U_R und dem Randverbundanteil ψ zusammen. Grundsätzlich hat eine Verbesserung des U_g -Wertes den größten Einfluss auf den Wärmedurchgangskoeffizienten des gesamten Fensters, da im Vergleich der Anteil des Rahmens geringer ausfällt.⁶⁰

Rechnerisch erfolgt die Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten durch die Addition der Kehrwerte der Wärmedurchgangswiderstände der einzelnen Schichten. Das Vakuum-Isolierglas Fineo 8 weist laut Hersteller einen Wärmedurchgangskoeffizienten von 0,7 W/(m²K) auf. Damit ist der Wärmeverlust im Vergleich zu einem

⁵⁹ Vergleiche VDI 2719

⁶⁰ Vergleiche DIN EN ISO 10077-1.

Zweischeiben-Isolierglas mit $1,1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ niedriger und liegt bei geringerer Dicke etwa auf bei dem Wert von einem Dreischeiben-Isolierglas. Die Nenndicken und die Wärmeleitfähigkeiten der einzelnen Materialien als Grundlage der wärmeschutztechnischen Berechnungen für Variante 1 und Variante 2 sind in Tabelle 33 aufgeführt.

| Variante 1 | | | |
|-----------------------------------|--|-----------|---|
| Produkt | Hersteller | Nenndicke | Wärmeleitfähigkeit |
| FG Optiwhite | Pilkington Deutschland AG | 2,00 mm | 1,0000 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ |
| Thermoplastisches Polyurethan PU1 | SILATEC Sicherheits- und Laminatglastechnik GmbH | 2,00 mm | 0,2500 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ |
| Polycarbonat Lexan 9030 | Sabic Deutschland GmbH | 5,00 mm | 0,2000 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ |
| Vakuum-Isolierglas Fineo 8 | AGC Glass Europe | 7,7 mm | 0,0062 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ |
| Variante 2 | | | |
| FG Optiwhite | Pilkington Deutschland AG | 2,00 mm | 1,0000 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ |
| Thermoplastisches Polyurethan PU2 | SILATEC Sicherheits- und Laminatglastechnik GmbH | 6,00 mm | 0,2500 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ |
| Vakuum-Isolierglas Fineo 8 | AGC Glass Europe | 7,7 mm | 0,0062 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ |

Tabelle 33 Kennwerte zur Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten für Variante 1 und Variante 2.

Die Wärmeleitfähigkeit des Vakuum-Isolierglases wird auf Grundlage des vom Hersteller angegebenen Wärmedurchgangskoeffizienten als Ersatzwert für eine angenommene homogene Schicht berechnet. Bild 69 zeigt den Wärmedurchgangskoeffizient für Variante 1 und Variante 2 in Abhängigkeit von der Nenndicke des Polycarbonats beziehungsweise der steifen Zwischenschicht.

In der Untersuchung des Wärmedurchgangskoeffizienten sind bei dem Verglasungsaufbau der beiden Varianten die äußeren Dünngläser sowie das innere Vakuum-Isolierglas in der Nenndicke definiert. Die Berechnung erfolgt daher nur mit variabler Nenndicke der Polycarbonatplatte bei Variante 1 sowie der Zwischenschicht aus Polyurethan PU2 für Variante 2. Bild 69 zeigt die berechneten Wärmedurchgangskoeffizienten für die beiden Varianten, die mit zunehmender Nenndicke abnehmen. Der Wärmedurchgangskoeffizient von Variante 1 ist um ungefähr $0,02 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ günstiger als von Variante 2. Dies ist allerdings maßgeblich auf die geringere Gesamtdicke des Verglasungsaufbaus von Variante 2 um 8 mm zurückzuführen. Insgesamt bewirkt die Ergänzung des Vakuum-Isolierglas um die zusätzlichen Schichten

nur eine geringfügige Verringerung des bereits sehr niedrigen Wärmedurchgangskoeffizienten.

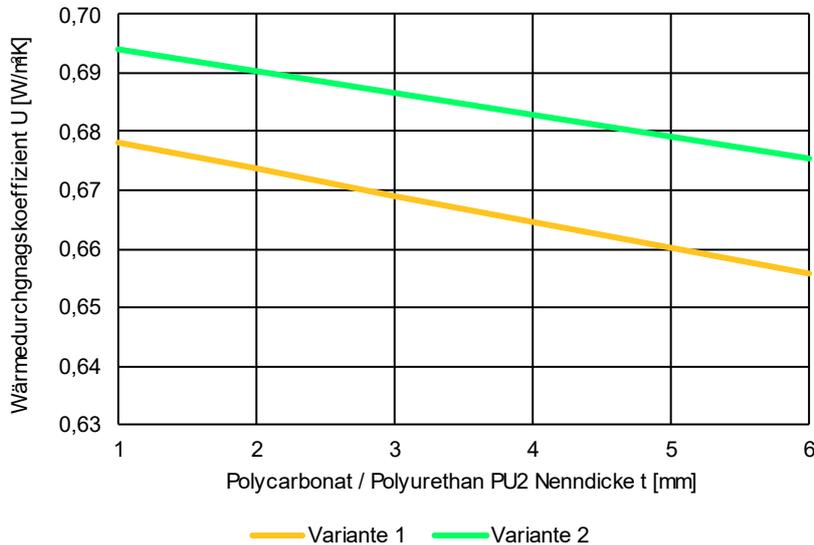
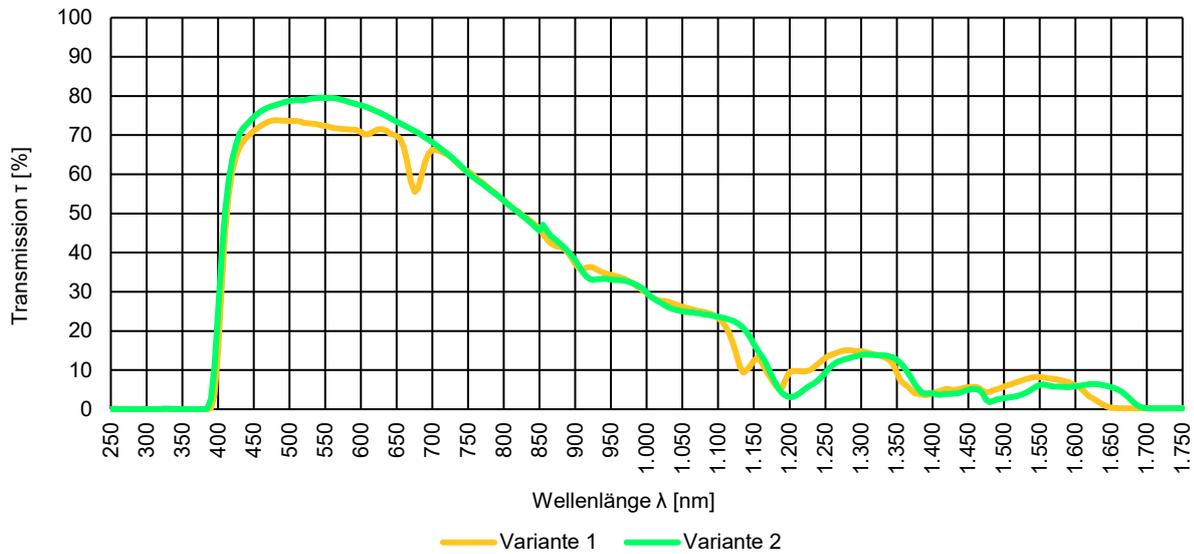


Bild 69 Wärmedurchgangskoeffizient von Variante 1 und Variante 2 in Abhängigkeit von der Dicke des Polycarbonats beziehungsweise der Zwischenschicht PU2.

5.2.5 Messung der spektralen Kenngrößen

Zur Messung der spektralen Kenngrößen steht am Lehrstuhl für Tragkonstruktion der Universität Siegen ein Spektrometer zur Verfügung, der die Bestimmung der spektralen und der lichttechnischen Kenngrößen von Glas und Verglasungen nach DIN EN 410 ermöglicht.⁶¹ Die Kenngrößen bilden die Grundlage für licht-, heizungs- und klimatische Berechnungen. Grundsätzlich wird auf eine Oberfläche auftreffende Strahlung transmittiert, absorbiert und reflektiert. Die Transmission stellt für Verglasungen den größeren Anteil dar. Dabei ist Glas vor allem im ultravioletten, sichtbaren und infraroten Bereich zwischen den beiden Absorptionskanten strahlungsdurchlässig. Die Messung für das Vakuum-Isolierglas mit passiven und aktiven Sicherheitsanforderungen erfolgt daher in einem Wellenlängenbereich von 250 nm bis 2.500 nm unter senkrechtem Strahlungseingang.

61 Vergleiche DIN EN 410



Der Lichttransmissionsgrad gibt den Anteil des sichtbaren Lichts an, der durch die Verglasung transmittiert. Der Lichttransmissionsgrad von Variante 1 liegt bei 72,5 % und von Variante 2 bei 78,5 %. Der Transmissionsgrad von ultravioletter Strahlung ist bei beiden Varianten mit 0,0 % angegeben. Bild 70 zeigt die Anteile transmittierter Strahlung im Bereich der Wellenlänge von 250 bis 1.750 nm. Deutlich erkennbar ist bei beiden Varianten der steile Anstieg der Kurve bei etwa 380 nm als Grenzbereich zwischen ultravioletter und sichtbarer Strahlung. Insbesondere für Variante 1 ist der Schutz vor ultravioletter Strahlung entscheidend, da Polycarbonat einer photooxidativen Alterung unterliegt. Die Untersuchung zeigt, dass die durch strahlungsblokkende Additive modifizierte Zwischenschichten PU1 und PU2 einen ausreichenden Schutz vor ultravioletter Strahlung für das thermoplastische Polyurethan sowie das Polycarbonat bietet. Im sichtbaren Bereich liegt die Transmission für Variante 1 für eine Wellenlänge von 450 nm bis 650 nm bei maximal 74 % und fällt bis zu einer Wellenlänge von 780 nm auf 56 % ab. Variante 2 weist den maximalen Wert der Transmission von 80 % im sichtbaren Bereich bei einer Wellenlänge von 550 nm auf und fällt ebenfalls bei 780 nm auf 56 % ab. Im infraroten Bereich liegt die Transmission unter 50 % und fällt bis zur Wellenlänge von 1.700 nm für beide Varianten auf einen Wert von ungefähr 0 % ab.

Bild 70 Transmission von Variante 1 und Variante 2 über einen Wellenlängenbereich von 250 nm bis 2.500 nm.

Der Gesamtenergiedurchlassgrad ist ein Kennwert für die Energiemenge, die durch eine Verglasung hindurchgelangt. Variante 1 zeigt einen Gesamtenergiedurchlassgrad von 53 % und Variante 2 von 56 %. Die Werte sind damit mit einem üblichen Dreischeiben-Isolierglas vergleichbar, das einen Gesamtenergiedurchlassgrad von ungefähr 55 % aufweist.

5.3 Untersuchung des Tragverhaltens

Das Tragverhalten des Vakuum-Isolierglases mit passiven und aktiven Sicherheitsanforderungen wird im Vierpunkt-Biegeversuch in Anlehnung an das Vierschneiden-Verfahren⁶² untersucht und dient als Grundlage zur Verifikation der Modelle für die numerische Berechnung. Die Abmessungen der Prüfkörper betragen 1.100 mm in der Länge und 360 mm in der Breite. Insgesamt stehen jeweils 3 Prüfkörper für die verschiedenen Varianten zur Verfügung.

| Prüfkörper | Aufbau | Nenn-dicke | Real-dicke |
|------------|--|------------|------------|
| P1 | VIG | 8,0 mm | 7,8 mm |
| P2 | VIG | 8,0 mm | 7,8 mm |
| P3 | VIG | 8,0 mm | 7,9 mm |
| C1 | 2,0 mm DG 2,0 mm PU1 5,0 mm PC 2,0 mm PU1 8,0 mm VIG 2,0 mm PU1 5,0 mm PC 2,0 mm PU1 2,0 mm DG | 30,0 mm | 29,3 mm |
| C2 | 2,0 mm DG 2,0 mm PU1 5,0 mm PC 2,0 mm PU1 8,0 mm VIG 2,0 mm PU1 5,0 mm PC 2,0 mm PU1 2,0 mm DG | 30,0 mm | 29,3 mm |
| C3 | 2,0 mm DG 2,0 mm PU1 5,0 mm PC 2,0 mm PU1 8,0 mm VIG 2,0 mm PU1 5,0 mm PC 2,0 mm PU1 2,0 mm DG | 30,0 mm | 29,1 mm |
| I1 | 2,0 mm DG 6,0 mm PU2 8,0 mm VIG 6,0 mm PU2 2,0 mm DG | 24,0 mm | 25,1 mm |
| I2 | 2,0 mm DG 6,0 mm PU2 8,0 mm VIG 6,0 mm PU2 2,0 mm DG | 24,0 mm | 24,8 mm |
| I3 | 2,0 mm DG 6,0 mm PU2 8,0 mm VIG 6,0 mm PU2 2,0 mm DG | 24,0 mm | 25,0 mm |

Tabelle 34 Querschnittsaufbau der Prüfkörper für die Untersuchung des Tragverhaltens für Variante 1 und 2 mit Zwischenschicht 1 (PU1) und 2 (PU2), Polycarbonat (PC), Vakuum-Isolierglas (VIG) und Dünnglas (DG).

Der Versuchsaufbau ist in Bild 71 dargestellt. Die Beanspruchung erfolgt als Linienlast durch zwei Lastrollen über die kurze Seite. Die Prüfkörper liegen auf zwei Auflagerrollen auf. Der Versuchsaufbau führt zu einer reinen Biegebeanspruchung im Bereich zwischen den beiden Lastrollen.

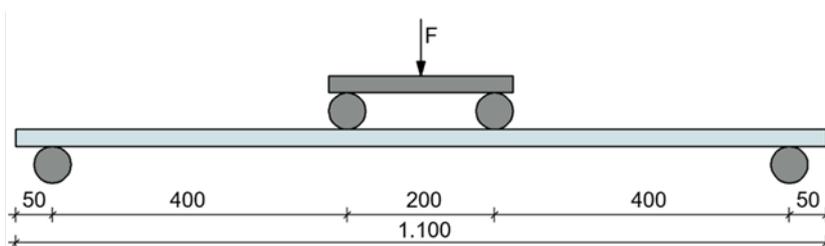


Bild 71 Vierpunkt-Biegeversuch in Anlehnung an das Vierschneiden-Verfahren nach DIN EN 1288-3.

⁶² Vergleiche DIN EN 1288-3.

Die Messung der Dehnungen erfolgt durch zweiaxiale Dehnungsmessstreifen auf der Unterseite der unteren Dünnglastafel, deren Position in Bild 72 dargestellt sind. Die eingeleiteten Kräfte sowie die Verformung wird in Plattenmitte senkrecht zur Querschnittsachse durch die Universalprüfmaschine und durch zwei zusätzliche Laserwegaufnehmer aufgezeichnet.

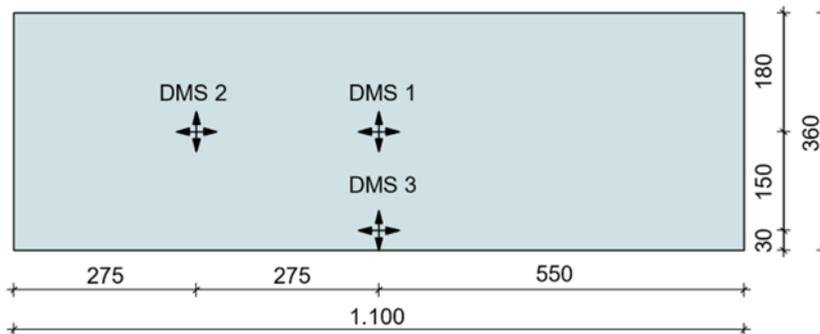


Bild 72 Prüfkörper für den Vierpunkt-Biegeversuch in Anlehnung an das Vierschneiden-Verfahren nach DIN EN 1288-3 mit der Position der Dehnungsmessstreifen.

Die Untersuchung des Tragverhaltens erfolgt weggesteuert. Die erforderliche Kraft, um eine Verformung von 5 mm in den Lasteinleitungspunkten zu erreichen, wird aufgezeichnet. Zur Abschätzung des Elastizitätsmoduls der Zwischenschichten für die numerische Berechnung mit dem Programm Ansys Workbench 2020 R2 ist zunächst die Untersuchung des Vakuum-Isolierglases erforderlich.



Bild 73 Versuchsaufbau für den Vierpunkt-Biegeversuch mit Vakuum-Isolierglas.

Bild 73 zeigt das in den Versuchsaufbau eingebaute Vakuum-Isolierglas mit Dehnungsmessstreifen auf der Unterseite sowie Laserwegaufnehmer zur Aufnahme des Fahrwegs und der Verformung in Prüfkörpermitte auf der Unterseite.

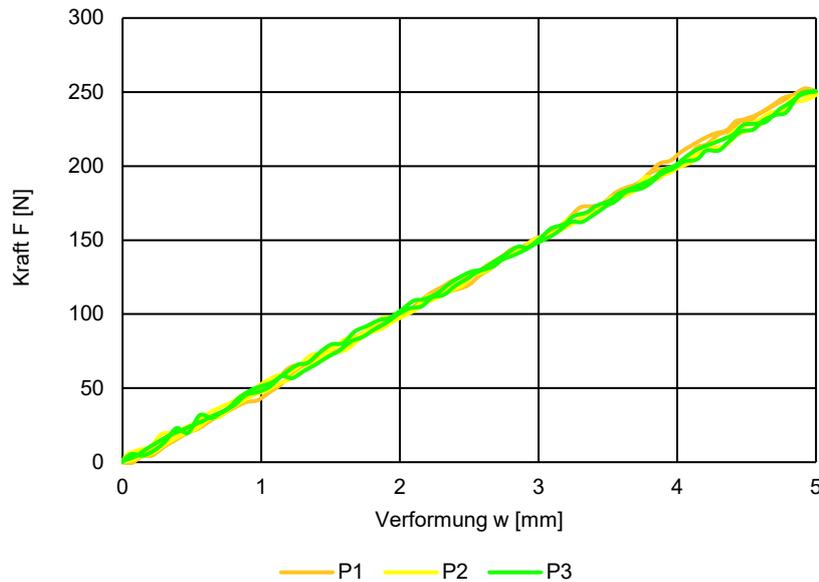


Bild 74 Kraft-Verformungs-Diagramm für das Vakuum-Isolierglas.

Die Ergebnisse der Versuche zeigt das Kraft-Verformungs-Diagramm in Bild 74. Die erforderliche Kraft zum Erreichen der maximalen Verformung liegt bei einem Mittelwert von 250,5 N, der minimale und maximal gemessene Wert weichen dabei um 1,6 % ab. Die Kraft steigt mit der Erhöhung der Verformung linear an. Die Abweichung der Messergebnisse zwischen den Prüfkörpern ist relativ gering. Die Modellierung des Vierpunkt-Biegeversuchs für die numerische Berechnung erfolgt mit dem Programm Ansys Workbench 2020 R2. Der doppel-symmetrische Aufbau ermöglicht die Abbildung als Viertelmodell. Bild 75 zeigt das Viertelmodell in der Ansicht der Symmetrieachse in Längsrichtung.

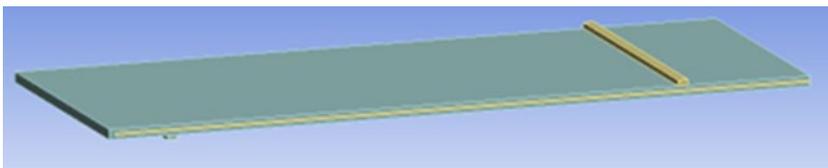


Bild 75 Viertelmodell für den Vierpunkt-Biegeversuch im Programm Ansys Workbench 2020 R2.

Die Position des Prüfkörpers zwischen der Last- und der Auflagerrolle ist durch die Symmetriebedingungen gesichert. Analog zu den Versuchen erfolgt die Belastung weggesteuert sowie eine Ausgabe der Kraftreaktion und der Dehnungen an den definierten Messstellen.

Das vereinfachte numerische Modell des Vakuum-Isolierglases orientiert sich an den vorhandenen geometrischen Randbedingungen. Die Modellierung der Glastafeln und des Randverbundes erfolgt monolithisch. Für den evakuierten Zwischenraum sowie die Abstandhalter wird allerdings eine Zwischenschicht aus einem homogenen Ersatzmaterial angesetzt. Die Nenndicke der außenliegenden Glastafeln liegt im Modell jeweils bei 80 % der tatsächlichen Nenndicke mit einer

entsprechenden Vergrößerung des Scheibenzwischenraums. Ausgehend von dem Elastizitätsmodul von 70.000 N/mm^2 für Glas, der für den Randverbund und die Glastafeln angenommen wird, erfolgt die iterative Ermittlung der Elastizitätsmoduli für Randverbund und Glastafeln sowie das homogene Ersatzmaterial im Scheibenzwischenraum. Die höchste Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung liegt bei einem Elastizitätsmodul für Randverbund und Zwischenschicht von 68.500 N/mm^2 und 150 N/mm^2 für das homogene Ersatzmaterial im Scheibenzwischenraum vor.

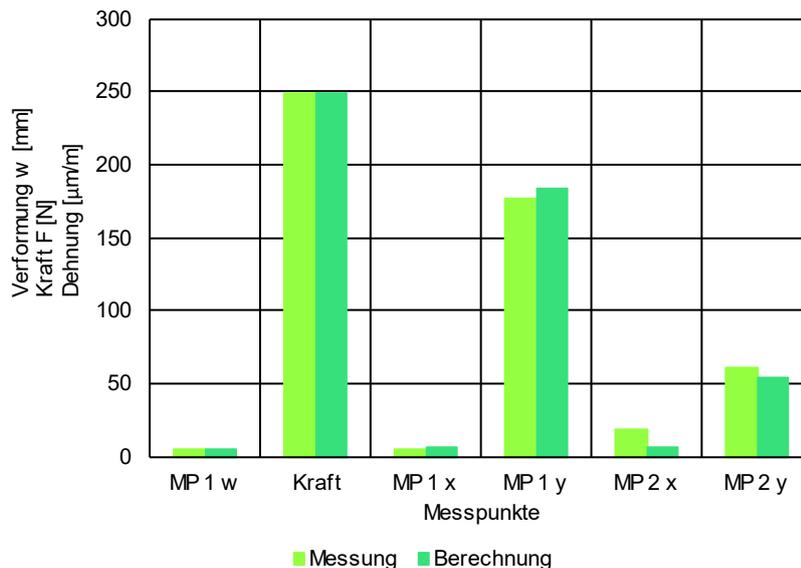


Bild 76 Vergleich der Verformungen, Kräfte und Dehnungen aus der Messung mit der numerischen Berechnung des Vierpunkt-Biegeversuchs für das Vakuum-Isolierglas.

Den Vergleich der Verformungen, der Kräfte und der Dehnungen aus Messung und Berechnung zeigt Bild 76. Die Verformung in der Mitte des Prüfkörpers und die resultierende Kraft werden im Modell exakt abgebildet. Die Dehnungen an Messpunkt 1 in x- und y-Richtung überschätzt das Modell auf der sicheren Seite liegend. An Messpunkt 2 erfolgt in beide Richtungen eine Unterschätzung der Messergebnisse durch die Berechnung. Das numerische Ersatzmodell bildet die Versuchsergebnisse in Bezug auf Kraft und Verformung sowie die Dehnungen an den Messpunkten in der Längsachse ausreichend genau ab. Allerdings kann eine exakte Berücksichtigung des Einflusses vom Randverbund an Messpunkt 3 durch das Modell nicht erfolgen. Informationen zur genauen Zusammensetzung des Randverbundes sowie der Abstandhalter liegen nicht vor. Für die exakte numerische Erfassung des Einflusses durch den Randverbund und die Abstandhalter sind zusätzliche Kennwerte und Untersuchungen erforderlich.

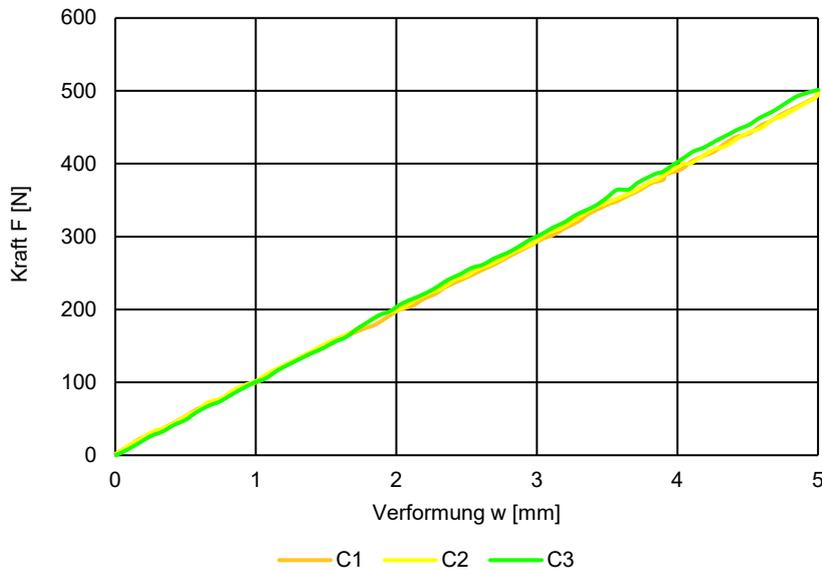


Bild 77 Kraft-Verformungs-Diagramm für Variante 1.

Das Kraft-Verformungs-Diagramm zeigt in Bild 77 für Variante 1 einen linearen Verlauf. Aus der Erweiterung des Vakuum-Isolierglases zu Variante 1 resultiert ungefähr eine Verdopplung der aufnehmbaren Last bei der maximalen Verformung auf 499,2 N als Mittelwert. Die Standardabweichung liegt ungefähr bei 1,0 %.

Das vereinfachte numerische Modell für das Vakuum-Isolierglas dient als Grundlage für die Festlegung des Elastizitätsmoduls der Zwischenschichten im Vierpunkt-Biegeversuch. Ausgehend von dem im Zugversuch bei einer Belastungsdauer von 5 min ermittelten Elastizitätsmodul von $0,59 \text{ N/mm}^2$ erfolgt die Iteration des Wertes in Abhängigkeit der Ergebnisse aus der Berechnung und dem Versuch. Die höchste Übereinstimmung der gemessenen und berechneten Ergebnisse liegt bei einem Elastizitätsmodul der Zwischenschicht PU 1 von $0,6 \text{ N/mm}^2$ mit einer Querdehnzahl von 0,43 vor. Der Elastizitätsmodul liegt zwischen den in den Zugversuchen bestimmten Werten für eine Belastungsdauer von 1 min mit $0,61 \text{ N/mm}^2$ und von 5 min mit $0,59 \text{ N/mm}^2$.

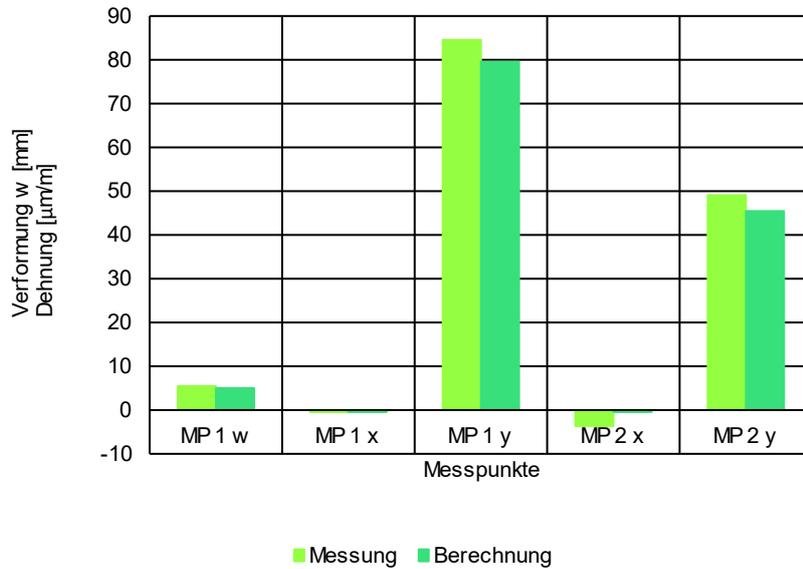


Bild 78 Vergleich der Verformungen und der Dehnungen aus der Messung mit der numerischen Berechnung des Vierpunkt-Biegeversuchs für Variante 1.

Bild 78 zeigt die Ergebnisse für die Verformung in Prüfkörpermitte und die Dehnungen an Messpunkt 1 und 2 im Vergleich zwischen Messung und Berechnung. Die erforderliche Kraft zum Erreichen der Verformung stimmt überein. Die Abweichung bei der resultierenden Verformung ist mit 1 % gering. Die Dehnungen in Längs- beziehungsweise y-Richtung liegen für Messpunkt 1 etwa 6 %, für Messpunkt 2 etwa 7 % unterhalb der gemessenen Werte. Die Dehnungen in Querrichtung liegen in Messung und Berechnung im negativen Bereich mit einer relativ hohen Abweichung von maximal 160 %, die absolute Abweichung beträgt allerdings nur 0,26 $\mu\text{m}/\text{m}$.

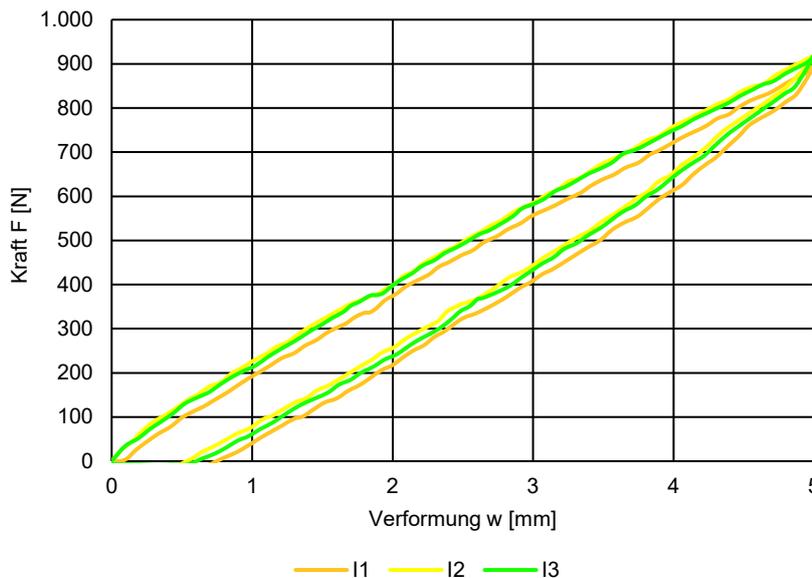


Bild 79 Kraft-Verformungs-Diagramm für Variante 2.

Bild 79 zeigt das Kraft-Verformungs-Diagramm für Variante 2. Die Steigerung der Verformung führt zu einem linearen Anstieg der Last bis zu 909,4 N als Mittelwert bei der maximalen Verformung von 5 mm

und einer Standardabweichung von 2,5 %. Variante 2 weist eine deutliche Hysterese bei der Entlastung der Prüfkörper auf. Unmittelbar nach Beendigung der Prüfungen liegt eine plastische Verformung der Prüfkörper mit einem Mittelwert von 0,6 mm vor.

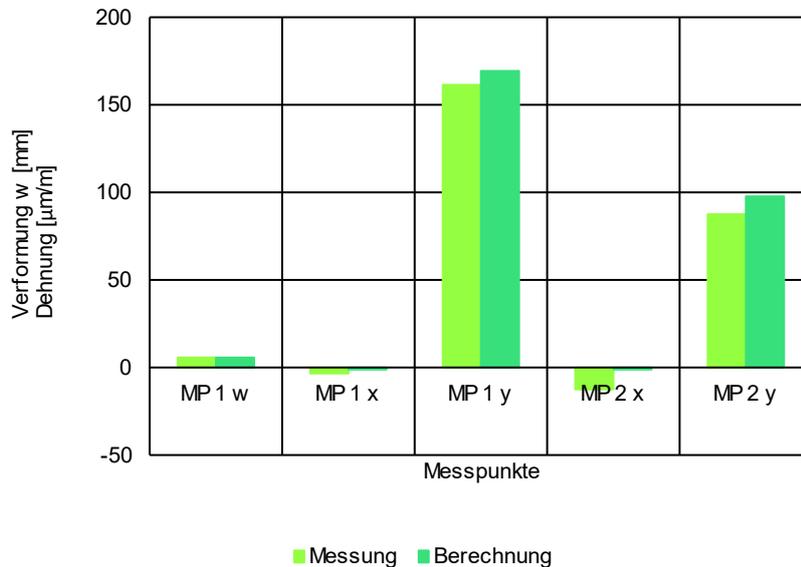


Bild 80 Vergleich der Verformungen und der Dehnungen aus der Messung mit der numerischen Berechnung des Vierpunkt-Biegeversuchs für Variante 2.

Die höchste Übereinstimmung von Messung und Berechnung erzielt das Modell mit der Annahme des Elastizitätsmoduls der Zwischenschicht PU 2 von 5,5 N/mm² mit einer Querdehnzahl von 0,38. Der Elastizitätsmodul liegt mit 7,16 N/mm² unterhalb des Wertes für eine Belastungsdauer von 5 min. Die Ergebnisse aus Messung und Berechnung für Variante 2 im Vergleich zeigt Bild 80. Gemessene und berechnete Kraft und Verformung stimmen überein. Die Dehnungen in Längs- beziehungsweise y-Richtung liegen 5 % für Messpunkt 1 und 11 % für Messpunkt 2 unterhalb der gemessenen Werte. Die Messwerte beider Messpunkte in Querrichtung werden durch das Modell mit einer Abweichung von 97 % unterschätzt. Für eine genauere Abbildung der Spannungen in Querrichtung der Prüfkörper ist die exakte numerische Modellierung des Vakuum-Isolierglases beziehungsweise des Randverbundes erforderlich.

5.4 Untersuchung des Resttragverhaltens

Die Sprödigkeit von Glas erfordert den Nachweis einer ausreichenden Resttragfähigkeit im zerstörten Zustand. Die Definition der Resttragfähigkeit ist die Gewährleistung der Standsicherheit im Fall eines festgelegten Zerstörungszustandes unter definierten äußeren Einwirkungen über einen ausreichenden Zeitraum. Eine ausreichende Resttragfä-

higkeit kann durch das Umsetzen konstruktiver Maßnahmen gewährleistet werden oder durch rechnerische beziehungsweise versuchstechnische Nachweise.⁶³

Das Resttragverhalten des Vakuum-Isolierglases mit passiven und aktiven Sicherheitsanforderungen wird analog zu den Untersuchungen des Tragverhaltens im Vierpunkt-Biegeversuch mit den gleichen Prüfkörpern durchgeführt. Die Abmessungen der Prüfkörper betragen 1.100 mm in der Länge und 360 mm in der Breite. Anschließend werden die Versuche zum Resttragverhalten mit Prüfkörpern der quadratischen Abmessung von 1.000 mm ergänzt. Es stehen für jede Variante jeweils drei Prüfkörper zur Verfügung.

Die Beanspruchung erfolgt für die Versuche im Vierpunkt-Biegeversuch als Linienlast durch zwei Biegerollen über die kurze Seite. Die Prüfkörper liegen auf zwei Auflagerrollen auf. Der Versuchsaufbau führt zu einer reinen Biegebeanspruchung im Bereich zwischen den lasteinleitenden Biegerollen. Die Prüfkörper für den Vierpunkt-Biegeversuch entsprechen den Angaben in Tabelle 34. Die gezielte Zerstörung der Dünnglastafeln für Zustand II erfolgt mit Hammer und Körner an 12 Schlagpunkten. Durch weitere Steigerung der Last wird Zustand III herbeigeführt, da eine gezielte Zerstörung des Vakuum-Isolierglases mit Hammer und Körner durch das Polycarbonat und die Zwischenschicht nicht möglich ist.

Die Messung der Dehnungen ist wegen der zerstörten äußeren Dünnglastafeln nicht möglich. Deshalb werden nur die eingeleiteten Kräfte sowie die Verformung in Plattenmitte senkrecht zur Querschnittsachse durch zwei Laserwegaufnehmer aufgezeichnet.

Es erfolgt die weggesteuerte Belastung der Prüfkörper bis zum Bruch. Bild 81 zeigt exemplarisch die resultierende Kraft auf die Prüfkörper in Abhängigkeit von der Verformung für das Vakuum-Isolierglas ohne weitere Schichten sowie Variante 1 und Variante 2. Das Vakuum-Isolierglas weist die geringste Bruchlast auf. Die Bruchlast des Prüfkörpers liegt bei ungefähr 360 N bei einer Verformung von 25 mm. Der Bruch des Vakuum-Isolierglases tritt schlagartig ein und führt zu einem Zerfall der Glastafel. Das gebrochene Vakuum-Isolierglas besitzt keine Resttragfähigkeit.

⁶³ Vergleiche DIN 18008-1.

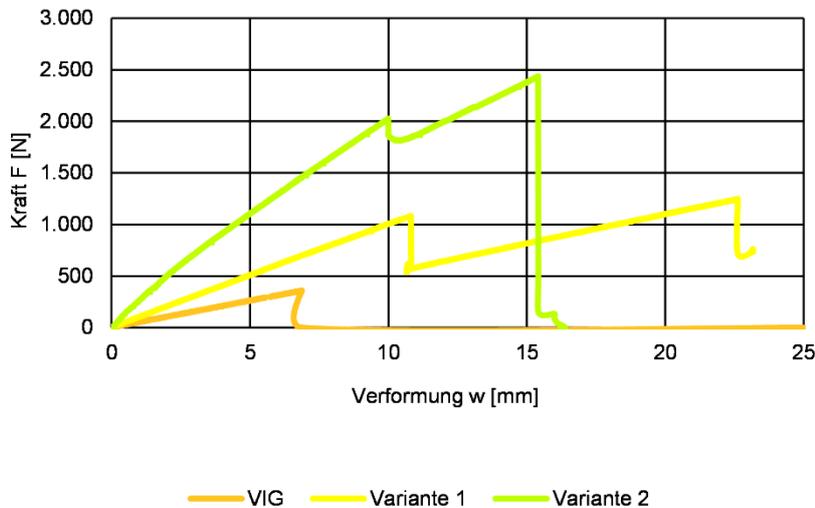


Bild 81 Kraft-Verformungs-Diagramm im Vierpunkt-Biegeversuch. Darstellung der Kraft in Abhängigkeit der Verformung für das Vakuum-Isolierglas sowie Variante 1 und Variante 2.

Bild 82 zeigt das exemplarische Bruchbild eines Prüfkörpers aus Vakuum-Isolierglas. Der Bruchursprung liegt an der Glaskante mittig zwischen der Lasteinleitung durch die beiden Biegerollen. Auf der Oberseite der Glastafel ist eine Splitterschutzfolie aufgebracht, die den vollständigen Verfall des Vakuum-Isolierglas verhindert und eine optische Aufnahme ermöglicht. Die Blasen ergeben sich durch die Splitterschutzfolie.

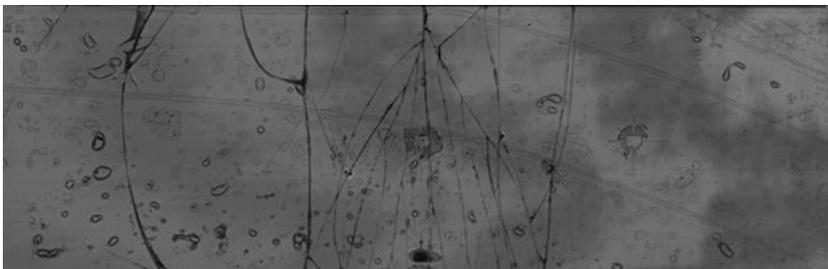


Bild 82 Aufnahmen des Vakuum-Isolierglases nach dem Bruch im Vierpunkt-Biegeversuch.

Einen in der Prüfeinrichtung eingebauten Prüfkörper nach der Belastung bis zum Bruch zeigt Bild 83. Der Prüfkörper liegt mittig auf der Prüfeinrichtung und zeigt keine Resttragfähigkeit.



Bild 83 Vakuum-Isolierglas nach dem Bruch im Vierpunkt-Biegeversuch.

Die Kraft-Verformungs-Kurven von Variante 1 und Variante 2 zeigen jeweils zwei Sprünge. Der erste Abfall der Kraft bildet den Bruch der außenliegenden Dünnglastafel ab, der zweite das Versagen des innenliegenden Vakuum-Isolierglases. Die erste Bruchlast liegt bei Variante 1 mit 1.084 N und einer Verformung von 10,8 mm. Die maximale Bruchlast beträgt ungefähr 1.249 N mit einer Verformung von 23,2

mm. Die Bruchlast von Variante 1 ist ungefähr um den Faktor 3,5 höher als beim Vakuum-Isolierglas.

Eine weitere Steigerung der Bruchlast liegt für Variante 2 vor. Durch die höhere Steifigkeit des Querschnittsaufbaus tritt der Bruch der äußeren Dünnglastafel bei einer Kraft von 2.026 N mit einer Verformung von 10,0 mm auf. Das Vakuum-Isolierglas versagt bei einer Bruchlast von 2.439 N mit einer Verformung von ungefähr 16,4 mm. Die Verformung von Variante 2 ist unter einer doppelten Last im Vergleich zu Variante 1 um ungefähr 30 % geringer.

Die exemplarischen Versuche erfolgen zur Abschätzung der Bruchlast an jeweils einem Prüfkörper zur Festlegung der Beanspruchung in den Versuchen zum Resttragverhalten. Die maximale Last in den Versuchen zum Resttragverhalten wird mit 630 N festgelegt, was etwa 50 % der Bruchlast von Variante 1 entspricht. Die Belastung erfolgt kraftgesteuert und wird innerhalb von 60 s auf den Prüfkörper aufgebracht. Nach einer Belastungsdauer von 60 s erfolgt wieder die Entlastung innerhalb von 60 s.

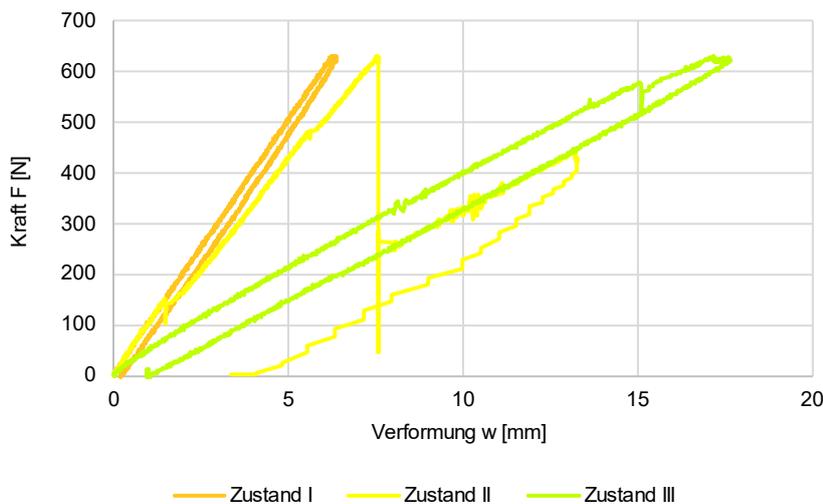


Bild 84 Trag- und Resttragverhalten von Variante 1 im unzerstörten Zustand I, im teilzerstörten Zustand II mit gebrochenen Dünnglastafeln sowie im zerstörten Zustand III mit gebrochenem Vakuum-Isolierglas.

Bild 84 zeigt die Verformung in Abhängigkeit von der aufgetragenen Last für Variante 1 in unzerstörtem Zustand I, mit gebrochenen äußeren Dünnglastafeln im teilzerstörten Zustand II sowie mit dem zusätzlich gebrochenen Vakuum-Isolierglas im zerstörten Zustand III. Die festgelegte Last von 630 N ergibt eine Verformung von 6,2 mm. Nach dem Halten der Last für 60 s liegt die Verformung bei etwa 6,3 mm. Im Kraft-Verformungs-Diagramm tritt für Variante 1 in Zustand I eine leichte Hysterese auf. Nach der Entlastung ergibt sich eine plastische Verformung von 0,2 mm.

Zur Prüfung von Variante 1 mit planmäßig zerstörten äußeren Dünnglastafeln als Zustand II erfolgt die gezielte Zerstörung mit Hammer

und Körner an 12 Schlagpunkten auf der Oberfläche wie in Bild 85 dargestellt.⁶⁴ Die Verformung liegt nach Erreichen der Last von 630 N bei 7,5 mm. Allerdings bricht das Vakuum-Isolierglas während der Belastungsdauer von 60 s und die Verformung steigert sich auf einen Wert von 13 mm. Nach der Entlastung ergibt sich eine bleibende Verformung von 3,4 mm.

Die größte Verformung unter der Last weist der Prüfkörper mit zerstörten äußeren Floatgläsern und gebrochenem Vakuum-Isolierglas als Zustand III auf. Bei Erreichen der Last von 630 N liegt eine Verformung von ungefähr 17,3 mm vor. Nach der Belastungsdauer von 60 s entspricht die Verformung einem Wert von 17,6 mm. Im Vergleich zum Prüfkörper in Zustand I ist die Hysterese deutlich erkennbar. Nach der Entlastung ergibt sich eine plastische Verformung von 1,0 mm.

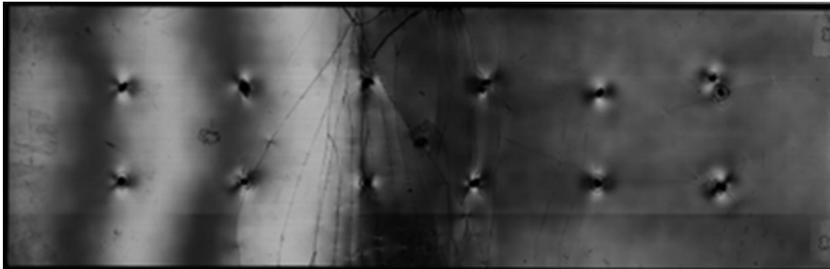


Bild 85 Aufnahme von Variante 1 mit planmäßig durch Hammer und Körner zerstörten äußeren Dünn-
glastafeln als Zustand II.

Bild 86 zeigt das Trag- sowie das Resttragverhalten von Variante 2 im unzerstörten Zustand I, im teilzerstörten Zustand II und im zerstörtem Zustand III. Die Last von 630 N erreicht Variante 2 in Zustand I bei einer Verformung von 2,7 mm. Im Vergleich dazu liegt die Verformung bei Variante 1 um mehr als Faktor 2 höher. Allerdings ist die Hysterese bei Variante 2 deutlich ausgeprägter. Nach der Belastungsdauer von 60 s beträgt die Verformung ungefähr 3,3 mm und ist um 22 % gestiegen. Im Vergleich dazu steigt bei Variante 1 die Verformung nach der Belastungsdauer von 60 s nur um ungefähr 2 % an. Die plastische Verformung bei Variante 2 beträgt nach der Entlastung ungefähr 0,8 mm und liegt damit um Faktor 4 höher als bei Variante 1.

⁶⁴ Vergleiche DIN 18008-1.

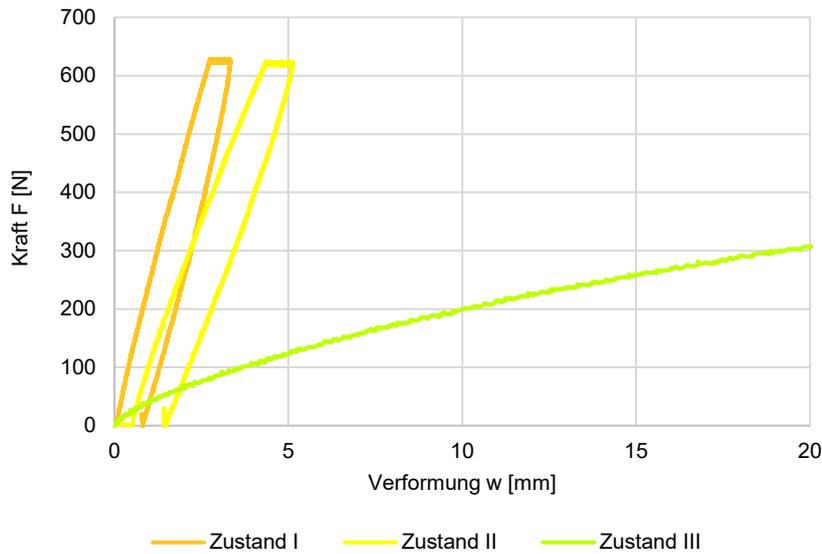


Bild 86 Trag- und Resttragverhalten von Variante 2 im unzerstörten Zustand I, im teilzerstörten Zustand II mit gebrochenen Dünnglastafeln sowie im zerstörten Zustand III mit gebrochenem Vakuum-Isolierglas.

Die Verformung von Variante 2 bei einer Last von 630 N beträgt ungefähr 4,3 mm in Zustand II und entspricht 57 % der Verformung von Variante 1. Nach der Belastungsdauer von 60 s stellt sich eine Verformung von 5,1 mm ein. Die plastische Verformung nach der Entlastung liegt bei 1,4 mm. In Zustand III mit dem zusätzlich zerstörten Vakuum-Isolierglas nimmt das Resttragverhalten deutlich ab. Nach einer Verformung von 20 mm erfolgt der Abbruch des Versuches, da mit etwa 300 N weniger als die Hälfte der angestrebten Last von 630 N erreicht sind. Die Zwischenschichten halten die Bruchstücke der einzelnen Glastafeln zusammen, allerdings ist eine Laststeigerung im Vierpunkt-Biegeversuch mit sehr großen Verformungen verbunden.

Zusätzlich zur Analyse des Resttragverhaltens im Vierpunkt-Biegeversuch erfolgt die Untersuchung der Resttragfähigkeit nach DIN 18008-1, Anhang B. Die Abmessungen der Prüfkörper betragen 1.000 mm auf 1.000 mm. Diese Abmessungen sind für ein durchschnittliches Fenstermaß angenommen. Tabelle 35 definiert die Prüfkörper mit Aufbau, Nenndicke und Realdicke für die Untersuchung der Resttragfähigkeit. Insgesamt stehen jeweils zwei Prüfkörper für die verschiedenen Varianten zur Verfügung.

| Prüfkörper | Aufbau | Nenn- dicke | Real- dicke |
|------------|--|----------------|----------------|
| F1 | 2,0 mm DG 2,0 mm PU1 5,0 mm PC 2,0 mm PU1 8,0 mm VIG 2,0 mm PU1 5,0 mm PC 2,0 mm PU1 2,0 mm DG | 30,0 mm | 29,4 mm |
| F2 | 2,0 mm DG 2,0 mm PU1 5,0 mm PC 2,0 mm PU1 8,0 mm VIG 2,0 mm PU1 5,0 mm PC 2,0 mm PU1 2,0 mm DG | 30,0 mm | 29,3 mm |
| L1 | 2,0 mm DG 6,0 mm PU2 8,0 mm VIG 6,0 mm PU2 2,0 mm DG | 24,0 mm | 24,9 mm |
| L2 | 2,0 mm DG 6,0 mm PU2 8,0 mm VIG 6,0 mm PU2 2,0 mm DG | 24,0 mm | 25,1 mm |

Tabelle 35 Querschnittsaufbau der Prüfkörper für die Untersuchung der Resttragfähigkeit für Variante 1 und 2 mit Zwischenschicht 1 (PU1) und 2 (PU2), Polycarbonat (PC), Vakuum-Isolierglas (VIG) und Dünnglas (FG).

Im Versuch zur Untersuchung der Resttragfähigkeit werden die Prüfkörper mit einer Flächenlast bestehend aus Sandsäcken beansprucht und sind vierseitig linienförmig gelagert. Bild 87 zeigt einen im Prüfstand eingebauten Prüfkörper. Die Auflagertiefe entspricht der bei Si-LATEC Sicherheits- und Laminatglastechnik GmbH für Sicherheits-sonderverglasungen üblichen Mindesteinstandstiefe von 18 mm.

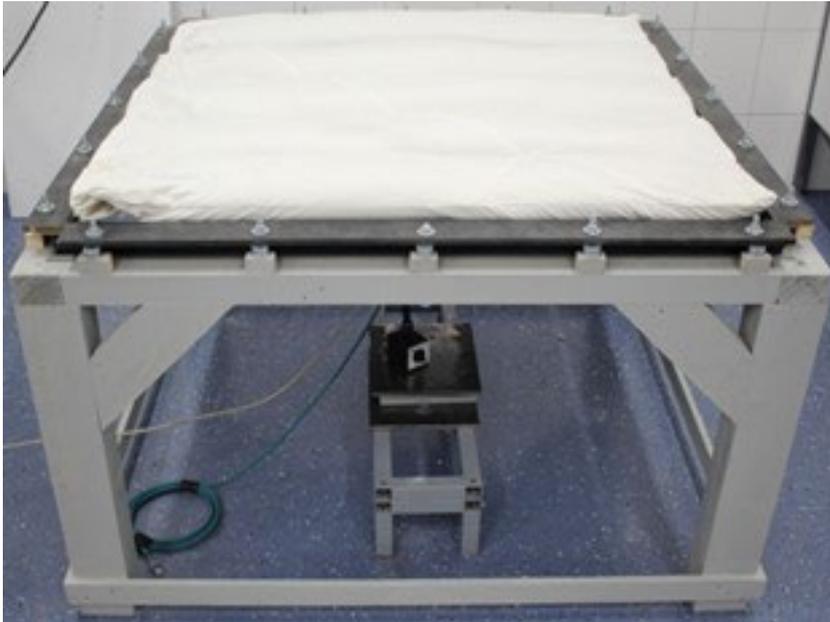


Bild 87 Prüfstand zum Nachweis der Resttragfähigkeit mit eingebautem Prüfkörper und Belastung durch Sandsäcke.

Die planmäßige Zerstörung der beiden äußeren Dünnglastafeln erfolgt mit Hammer und Körner an jeweils neun Schlagpunkten. Die vier Schlagpunkte in den Ecken liegen wie Bild 88 zeigt entlang der Diagonalen des Prüfkörpers bei 1/10 der Diagonalenlänge sowie mit einem weiteren Schlagpunkt im Kreuzungspunkt der Diagonalen. Zusätzlich wird jeweils ein weiterer Schlagpunkt am Rand zwischen den Schlagpunkten in den Ecken angeordnet.⁶⁵

⁶⁵ Vergleiche DIN 18008-1.

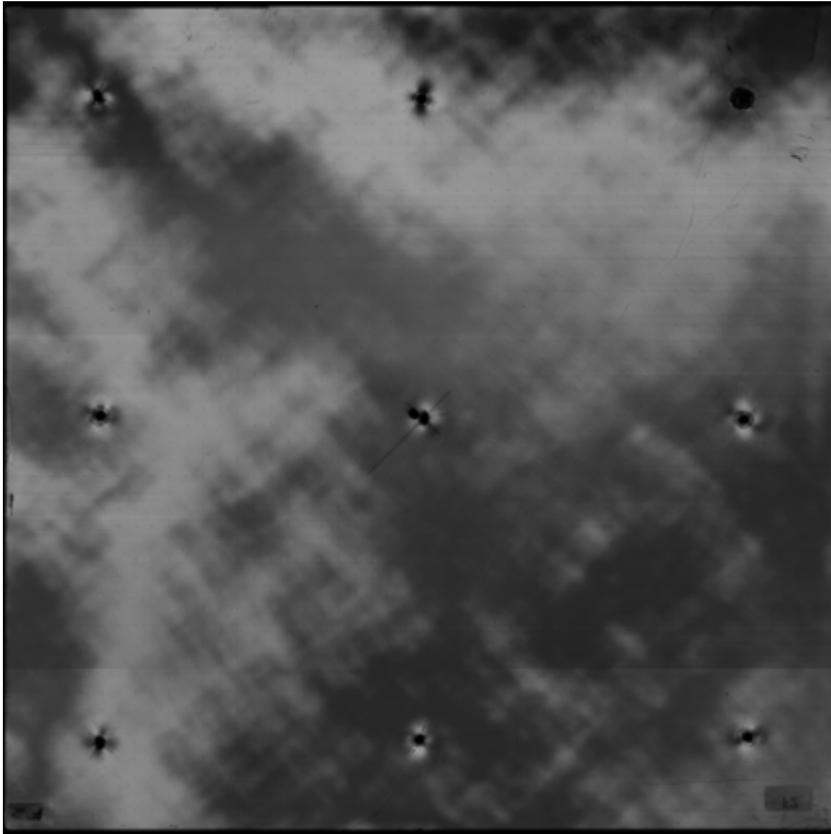


Bild 88 Aufnahme des planmäßig teilzerstörten Prüfkörpers als Zustand II zur Prüfung der Resttragfähigkeit.

Die Belastung beträgt für Vertikalverglasungen gemäß DIN 18008-1 mindestens 20% des charakteristischen Wertes der Windlast als Flächenlast. Die maximale Windlast in Deutschland wird auf den Inseln der Nordsee in Windzone 4 erreicht. Für eine Höhe des Bauwerks von 20 m liegen 20 % der maximalen charakteristischen Windlast bei etwa 0,58 kN. Für das Gewicht der mit Sand gefüllten Belastungskörper werden daher 60 kg angesetzt. Die Einbruchwahrscheinlichkeit ist bei der angenommenen Höhe von 20 m deutlich niedriger als bei geringeren Geschosshöhen, deshalb liegt die angenommene Last auf der sicheren Seite. Die Messung der Verformung in Prüfkörpermitte erfolgt mit einem Laserwegaufnehmer. Der Versuchsaufbau ist in Bild 89 dargestellt.

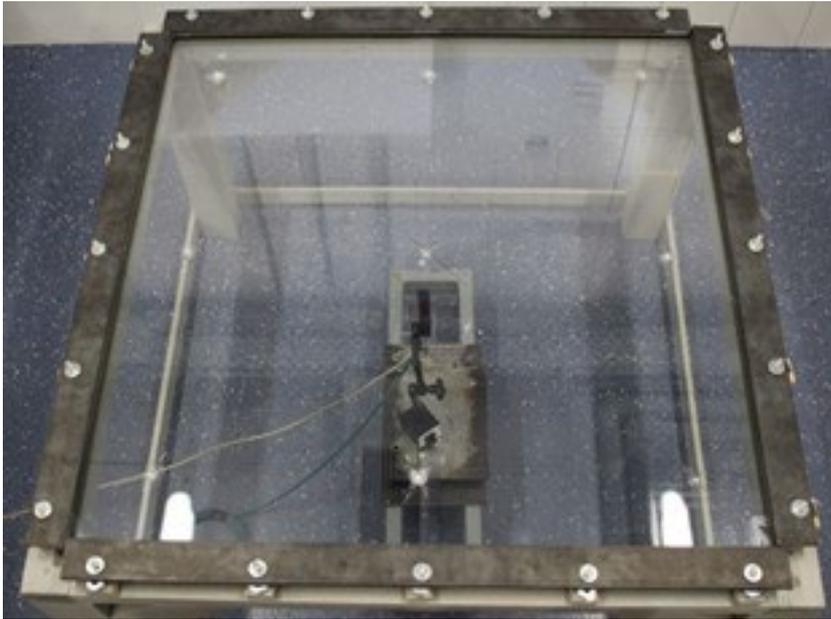


Bild 89 Versuchsaufbau für die
Untersuchung der Resttragfähig-
keit.

Variante 1 hält der Belastung im Versuch für 24 h stand und es fallen keine Bruchstücke herunter. Damit ist eine ausreichende Resttragfähigkeit für die gewählten Randbedingungen nachgewiesen.⁶⁶ Direkt nach der Belastung liegt eine Verformung von etwa 1,0 mm als Mittelwert vor, die innerhalb von 24 h auf 1,1 mm ansteigt. Die Zerstörung der äußeren Glastafeln als Zustand II führt nur zu einer geringen Veränderung im Vergleich zur Tragfähigkeit in Zustand I. Es liegt auch bei Variante 2 eine ausreichende Resttragfähigkeit vor, da innerhalb von 24 h kein Versagen der Prüfkörper auftritt und keine Bruchstücke herunterfallen. Die Verformung steigt von 1,0 mm als Mittelwert zu Beginn der Messung bis 1,5 mm nach der Belastungsdauer von 24 h. Im Vergleich zu Variante 1 ist die Verformung von Variante 2 nach 24 h etwas höher. Die Belastung beider Varianten in Zustand II über 24 h führt nicht zu einem Bruch des inneren Vakuum-Isolierglases. Eine planmäßige Zerstörung des Vakuum-Isolierglases, beispielsweise mit Hammer und Körner, ist wegen der Polycarbonatplatte und der Zwischenschicht nicht möglich.

⁶⁶ Vergleiche DIN 18008-1.

6 Herstellungsverfahren

6.1 Definition der Prozessparameter

Die Eigenschaften des Endprodukts werden maßgeblich von der Qualität der Ausgangsstoffe beeinflusst, insbesondere die Abstimmung der Materialien aufeinander stellt einen entscheidenden Faktor dar. Die Anwendung der ausgewählten Materialien für Polycarbonat sowie Polyurethan erfolgt bereits im Unternehmen SiLATEC Sicherheits- und Laminatglastechnik GmbH und ist daher schon über einen längeren Zeitraum erprobt.

Die Lieferung des Dünnglases Optiwhite mit einer Nenndicke von 2 mm erfolgt über einen Händler des Herstellers. Der nicht vorgespannte Zustand der Dünnglastafeln ermöglicht ein nachträgliches Zuschneiden auf die gewünschten Abmessungen durch das Wasserstrahl- und Laserschneidverfahren oder mit dem üblichen mechanischen Glasschneidverfahren durch den Zulieferer. Das Wasserstrahlschneiden erfolgt mit einem Druck von bis zu 6.200 bar. Bei dem Laserschneiden durchtrennt ein Laserstrahl das Glas. Die herkömmliche Methode des Glasschneidens basiert auf dem Anritzen der Glasoberfläche durch einen mechanischen Glasschneider. Entlang der entstandenen Sollbruchstelle wird anschließend das Brechen der Glastafeln auf das erforderliche Maß möglich. Durch die geringe Dicke des Dünnglases ist eine maschinelle Kantenbearbeitung nicht ohne weiteres umsetzbar und ein manuelles Säumen der Glaskanten zur Vermeidung von Verletzungen und Reduzierung von Kantendefekten durch den Zulieferer erforderlich.

Das Vakuum-Isolierglas Fineo wird von AGC Glass Europe in Belgien in den erforderlichen Abmessungen hergestellt und direkt geliefert. Die außenliegenden Glastafeln schließen einen evakuierten Scheibenzwischenraum der Nenndicke von 0,1 mm ein. Die nachträgliche Bearbeitung des Vakuum-Isolierglases ist dadurch nicht möglich. Die Beschaffung des Polycarbonats Lexan 9030 erfolgt ebenfalls über einen bereits vorhandenen Händler des Herstellers. Die Polycarbonatplatten werden vor der Weiterverarbeitung mit dem Vakuum-Isolierglas mit passiven und aktiven Sicherheitsanforderungen auf die erforderlichen Abmessungen zugeschnitten. Die unterschiedlichen Rohstoffe zur Herstellung der Zwischenschicht aus thermoplastischem Polyurethan werden zunächst als Granulat durch die verschiedenen Hersteller bezogen. Die anschließende Mischung der Rohstoffe zur eigentlichen Zwischenschicht erfolgt durch SiLATEC Sicherheits- und Laminatglastechnik GmbH.

6.2 Entwicklung der Prozesskette

Die Prozesskette zur Herstellung von Vakuum-Isoliergläsern mit passiven und aktiven Sicherheitsanforderungen beschreibt die organisatorische und zeitliche Abfolge. Eine Erweiterung der bestehenden Prozesskette durch die zusätzlichen Prozessparameter erfordern eine maßgebende Definition des Herstellungsablaufs. Die untersuchten Varianten des Vakuum-Isolierglases mit passiven und aktiven Sicherheitsanforderungen bestehen jeweils aus zwei äußeren Dünnglastafeln sowie einem inneren Vakuum-Isolierglas als Halbzeug. Der Verbund erfolgt über die Zwischenschichten aus thermoplastischem Polyurethan. Variante 1 ist zusätzlich um Polycarbonatplatten auf beiden Seiten des Vakuum-Isolierglases ergänzt. Die SiLATEC Sicherheits- und Laminatglasstechnik GmbH besitzt langjährige Erfahrung in der Herstellung von Verbunden aus Glas und Polycarbonat. Bei der Herstellung von Vakuum-Isolierglas mit passiven und aktiven Sicherheitsanforderungen aus Dünnglas und Polycarbonat ergeben sich allerdings Besonderheiten, die in der Prozesskette zu beachten sind.

Der Verbund der einzelnen Schichten des Vakuum-Isolierglases mit passiven und aktiven Sicherheitsanforderungen erfolgt über das im Gießharzverfahren eingebrachte thermoplastische Polyurethan. Die fehlerfreie Haftung der Zwischenschicht auf der Glasoberfläche erfordert eine vorbereitende Reinigung der Glastafeln. In einer Glasreinigungsanlage werden die Oberflächen der Glastafeln mit Isopropanol von unerwünschten Anhaftungen befreit. Die Einstellung der Anlage insbesondere in Bezug auf den Reinigungsdruck erfolgt in Abhängigkeit von der Glasdicke. Aufgrund der geringen Glasdicke von Dünnglas und erforderlichen Mindestdrücken für eine rückstandslose Reinigung empfiehlt sich für Glasdicken unter 2 mm eine Handreinigung. Anschließend werden Butylbänder an die Ränder der Tafel angebracht, die als äußere Begrenzung für die einzubringende Zwischenschicht dienen. Eine Unterbrechung der Butylbänder bilden die Einlaufhülse sowie mehrere Auslaufhülsen. Auf dem Butylband schließt sich die nächste Lage des Verbundes aus Polycarbonat beziehungsweise Vakuum-Isolierglas an. Um einen Glasbruch oder unplanmäßige Verformungen durch die geringe Nenndicke des Dünnglases zu vermeiden, werden die Dünnglastafeln auf einer Zulage aus einem Floatglas mit der Nenndicke von 4 mm flächig aufgelagert. Die obere und untere Schicht sowie das Butylband am Rand umschließen vergleichbar mit einer Schalung das Volumen der Zwischenschicht.

Das Befüllen des Hohlraumes erfolgt unter Druck mit der erforderlichen Menge des flüssigen Polyurethans durch die Einlaufhülse. Die vorhandene Luft entweicht während des Befüllvorgangs durch die Auslaufhülsen. Das Austreten von Material an den Auslaufhülsen beendet den Befüllvorgang und die Ein- sowie die Auslaufhülsen werden

verschlossen. Nach der vollständigen Befüllung der Zwischenschicht erfolgt das Aushärten durch einen chemischen Prozess bei Raumtemperatur, der keine zusätzliche Bestrahlung benötigt. Nach der vollständigen Aushärtung der Zwischenschicht innerhalb von 24 h werden die Ein- sowie die Auslaufhülsen entfernt und die verbleibenden Öffnungen im Butylband verschlossen. Äquivalent zu diesem Vorgehen erfolgt der Aufbau der nächsten Schicht des Verglasungsaufbaus.

Im Zusammenhang mit der Herstellung von Vakuum-Isolierglas mit passiven und aktiven Sicherheitsanforderungen bietet das Gießharzverfahren eindeutige Vorteile. Durch den Kaltverbund der Zwischenschicht aus thermoplastischem Polyurethan bei Raumtemperatur treten keine Zwangsspannungen oder Verformungen im Verglasungsaufbau durch verschiedene thermische Ausdehnungskoeffizienten der Materialien auf. Im Gegensatz dazu sind im herkömmlichen Autoklavverfahren als Warmverbund erhöhte Temperaturen für die Lamination der einzelnen Schichten erforderlich. Zusätzlich können im Gießharzverfahren individuelle Anforderungen und Abmessungen einfacher berücksichtigt und umgesetzt werden.

6.3 Entwicklung eines Rezyklierungsverfahrens

Glas zählt zu den Baustoffen mit den günstigsten Eigenschaften für die Rezyklierung, da es sich beliebig oft einschmelzen und zu neuen Produkten verarbeiten lässt. Entscheidend für eine Wiederverwertung ist die sortenreine Erfassung der Verglasung am Ende der Nutzungsdauer. Derzeit liegen in Deutschland schon Rezyklierungsquoten von bis zu 90 % beim Behälterglas vor, die beim Flachglas aktuell nicht erreicht werden. Insbesondere Eigenscherben aus der Produktion des Herstellers selbst sowie pre-consumer Fremdscherben machen einen Großteil des rezyklierten Materials aus. Post-consumer Fremdscherben, die nach der Nutzung einer Verglasung anfallen, werden allerdings kaum zu neuem Flachglas verarbeitet, da der Grad an Verunreinigungen und Fremdanteilen zu hoch liegt. Zusätzlich ist die genaue Zusammensetzung des Glases aus dem post-consumer Bereich unbekannt, da keine Erfassung getrennt nach Hersteller erfolgt.⁶⁷

Flachglasscherben stellen allerdings einen wichtigen Ausgangsstoff für die Herstellung von Produkten mit geringeren Anforderungen an die Reinheit und die Transparenz dar. Die Verwertung erfolgt in Form der Kaskadennutzung insbesondere bei der Herstellung von Textilglasfasern, Behälterglas, Isolierglasfasern und weiterer Dämmmaterialien aus Glas, wie Schaum- oder Blähglas. Neben der Einsparung von Ressourcen ermöglicht die Nutzung von Flachglasscherben zusätzlich die Reduzierung des Energieverbrauchs, da eine geringere

⁶⁷ Umweltbundesamt 2013

Schmelztemperatur im Vergleich zu unverarbeiteten Rohstoffen erforderlich ist. Der wichtigste Faktor für die richtige Rezyklierung des Flachglases ist die sortenreine Erfassung des Flachglases.

Es ergeben sich für die Verwertung von Kunststoffen grundsätzlich drei mögliche Verfahrenswege. Daraus erfolgt eine Unterscheidung in werkstoffliche, rohstoffliche und energetische Verwertung. Die Problematik der sortenreinen Erfassung liegt ähnlich wie bei Glas auch im Bereich der Kunststoffe vor. Zusätzlich treten Verunreinigungen durch Altkunststoffe auf, die sich durch die Einwirkung von Licht, Verformung und Alterung in verschiedenen Alterungsprozessen befinden. Die werkstoffliche Verwertung erfolgt mit dem Ziel, die Makromoleküle des Kunststoffs zu erhalten und als Sekundärrohstoff zu nutzen. In einem Aufbereitungsprozess wird das Material gereinigt, getrennt und zerkleinert sowie als Granulat in verschiedenen Qualitätsstufen dem Produktionsprozess wieder zugeführt. Insbesondere für diesen Verwertungsprozess sind thermoplastische Kunststoffe in sortenreiner Erfassung geeignet. Eine sortenreine Erfassung ist zum Beispiel bei Produktionsabfällen der Zwischenschichten PU1 und PU2 aus dem thermoplastischen Polyurethan möglich. Grundsätzlich müssen allerdings für eine sinnvolle werkstoffliche Verwertung saubere und sortenreine Altkunststoffe in größerer Menge vorliegen, um den logistischen und finanziellen Aufwand gering zu halten.⁶⁸

Für verunreinigte Kunststoffe stellt die rohstoffliche Verwertung eine günstige Alternative dar. Die Anforderungen an sortenreine und saubere Erfassung sind geringer, allerdings eignen sich die Produkte nicht mehr als Rohstoffe für neue Kunststoffe. Durch den gezielten Abbau von Makromolekülen zu Monomeren oder organischen Zwischenprodukten werden beispielsweise Spaltprodukte, Öle und Wachse gewonnen. Die Nutzung der Produkte erfolgt insbesondere in Raffinerien und chemischen Anlagen.⁶⁹ Die unterste Stufe in der Verwertungshierarchie stellt die energetische Verwertung der Kunststoffabfälle dar. Sehr stark verschmutzte Kunststoffabfälle, deren Sortierung und Reinigung mit hohem Aufwand verbunden ist, besitzen durch ihren Kohlenstoffgehalt einen hohen Brennwert. Durch die Verbrennung liefert das Material elektrische Energie und Wärmeenergie.

Eine wichtige Grundlage bei der Rezyklierung des Vakuum-Isolierglases mit passiven und aktiven Sicherheitsanforderungen beziehungsweise der einzelnen Bestandteile ist die Auftrennung des Verbundes. Eine große Herausforderung stellt die Haftung zwischen den Glastafeln und anderen Bestandteilen dar, die entscheidend für die Beständigkeit in der Nutzungsphase der Verglasung war. Zur Auftrennung

⁶⁸ Vergleiche Engelsmann 2010.

⁶⁹ Vergleiche Hegger 2012.

des Verbundes gibt es beispielsweise rein mechanische Verfahren sowie chemische Verfahren, die die Kunststoffbestandteile lösen.

Das rein mechanische Verfahren übt durch Schredder eine Reißbeanspruchung auf den Verbund aus. Nach dem Prinzip der Aufschlusszerkleinerung treten gleichzeitig Zug-, Biege- und Torsionsbeanspruchungen auf, die Glasbestandteile von den Verbundfolien und Kunststoffen trennen. Bereits mit Beschickung der Anlagen erfolgt eine Auslese grober Fremdstoffe, wie Rahmenteile oder größerer Kunststoff- und Folienstücke. Im Anschluss an die mechanische Trennung sind weitere Zerkleinerungs- und Sortieranlagen nachgeschaltet. Durch die Zerkleinerung findet ein größerer Aufschluss statt und Magnetscheider, ballistische und optische Sortieranlagen trennen weitere metallische und nichtmetallische Störstoffe ab. In Abhängigkeit vom Grad der Verunreinigungen erfolgt die weitere Nutzung des Glasgranulats in Form der Kaskadennutzung. Durch die leichte Verunreinigung mit Metalloxiden, beispielsweise aus dem Abrieb der Maschinen, kann aus dem Granulat hergestelltes Glas eine leichte Grünfärbung aufweisen und wird deshalb meist zu Behälterglas weiterverarbeitet. Bei einem starken Verschmutzungsgrad erfolgt die energetische Verwertung der Kunststoffbestandteile. Eine weitere Möglichkeit stellt das selektive Auslösen bestimmter Kunststoffe mit chemischen Lösungsmitteln dar, allerdings verursacht jeder weitere Verfahrensschritt zusätzliche Kosten, einen gesteigerten Energieverbrauch und einen höheren Zeitaufwand.⁷⁰

Das chemische Auftrennungsverfahren des Verbundes erfolgt ebenfalls zunächst mit einer mechanischen Zerkleinerung der Verbundtafeln, um eine möglichst große Oberfläche zur Reaktion mit den Lösungsmitteln zu schaffen. Zum Lösen der Verbindung zwischen Glas und Kunststoff wird die Trennflüssigkeit nach Zugabe auf +40 °C temperiert und gerührt. Durch das Absieben der Bruchstücke erfolgt die Rückgewinnung der einzelnen Bestandteile. Nach einer Aufbereitung gelangt die Trennflüssigkeit in den Prozess zurück. Über Schwimm-Sink-Sortierverfahren erfolgt die Trennung und die Sortierung der sauberen Bruchstücke. Anschließend ist eine weitere Aufbereitung der Flachglasscherben und Kunststoffbestandteile möglich. Derzeit zielt das Verfahren insbesondere auf die Rezyklierung von Autoglas mit Zwischenschichten als Folie ab. Der Anbieter entwickelt allerdings auch kundenspezifisch speziell auf die verwendeten Materialien abgestimmte Trennmittel.⁷¹

⁷⁰ Vergleiche Pralltec 2023.

⁷¹ Vergleiche Saperatec 2023.

7 Prototyp

7.1 Planung und Konstruktion

Das Vakuum-Isolierglas mit passiven und aktiven Sicherheitsanforderungen soll insbesondere vor unberechtigtem Eindringen in ein Gebäude durch Verglasungen schützen. Gleichzeitig bestehen hohe Anforderungen an den Wärmeschutz bei geringer Gesamtdicke und geringem Eigengewicht, die eine schlanke Dimensionierung von Rahmen und Beschlägen zulassen. Im Vordergrund stehen dabei Verglasungen in Gebäuden, die für das potentielle Eindringen leicht zugänglich sind. Insbesondere stellen vertikale Fensterverglasungen in den unteren bodennahen Etagen eines Bauwerkes günstige Ziele für einen Einbruch dar. Die beiden untersuchten Varianten erreichen die höchste Widerstandsklasse P8B gegen manuellen Angriff. Die hohen Ansprüche an die mechanischen Eigenschaften gewährleisten bei Variante 1 insbesondere die Kombination aus Zwischenschicht PU1 und Polycarbonat sowie bei Variante 2 die Zwischenschicht PU2. Den Wärmeschutz beider Varianten sichert das Vakuum-Isolierglas. Aus den durchgeführten Untersuchungen resultieren Mindestanforderungen, die die Grundlage zur Dimensionierung beider Varianten bei höheren Anforderungen ermöglichen. Die folgenden Mindestanforderungen soll das Vakuum-Isolierglas mit passiven und aktiven Sicherheitsanforderungen erfüllen:

- Nachweis der klimatischen Beständigkeit ohne Fehlstellen (keine Blasen- oder Schleierbildung, Trübung)
- Pendelschlagklasse 2(B)2 oder höher
- Nachweis der mechanischen Beständigkeit (Kugelfallversuch ohne Durchdringung des Fallkörpers)
- Nachweis der Widerstandsklassen P6B und P8B gegen manuellen Angriff
- Wärmedurchgangskoeffizient $U_g < 1,1 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$
- Luftschallschutzdämmmaß $R_w > 36 \text{ dB}$
- Gesamtdicke $t < 50 \text{ mm}$
- Eigengewicht $g < 95 \text{ kg/m}^2$

7.2 Berechnung und Bemessung

Auf Grundlage der numerischen Berechnungen erfolgt zunächst die Dimensionierung der beiden Varianten des Vakuum-Isolierglases mit passiven und aktiven Sicherheitsanforderungen für den Kugelfallversuch, die Prüfung bei hoher Temperatur, in der Feuchte und unter Bestrahlung, den Pendelschlagversuch sowie die Prüfung der Angriffshemmung mit dem Axtversuch. Das Resultat der Untersuchungen stellt einen Mindestquerschnitt dar, der in Abhängigkeit von zusätzli-

chen Anforderungen durch die Anpassung der Nenndicken von Polycarbonat und Vakuum-Isolierglas erweitert werden kann. Die maßgebende Beanspruchung für die Definition eines Mindestquerschnitts ist der Axtversuch zum Nachweis der aktiven Sicherheit. Die Erreichung der Widerstandsklasse P8B erfordert für die beschriebenen Aufbauten als Variante 1 in Kombination mit Polycarbonat und als Variante 2 mit der Zwischenschicht PU2 aus thermoplastischen Polyurethan höherer Steifigkeit eine entsprechende Nenndicke. Die Nenndicken der anderen Schichten aus Dünnglas, Vakuum-Isolierglas und Zwischenschicht PU1 sind für den Mindestquerschnitt konstant. Die Mindestquerschnitte für Variante 1 und 2 zeigt Bild 90.

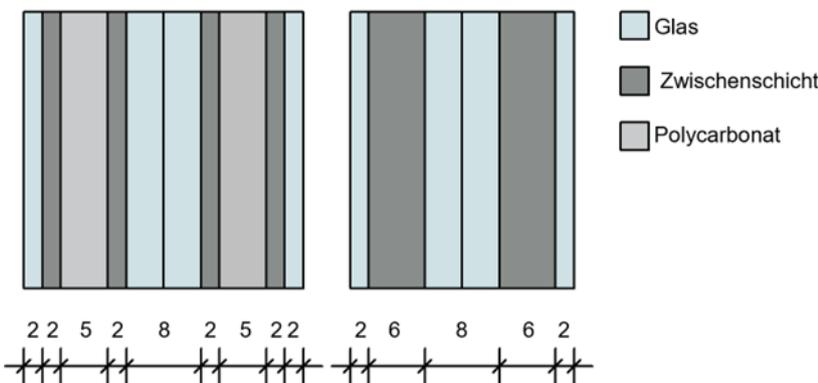


Bild 90 Mindestquerschnitte für das Vakuum-Isolierglas mit passiven und aktiven Sicherheitsanforderungen. Variante 1 (links) mit Dünnglas, Polycarbonat und Zwischenschicht PU1 sowie Variante 2 mit Dünnglas und Zwischenschicht PU2.

Das Vakuum-Isolierglas mit passiven und aktiven Sicherheitsanforderungen erfüllt mit dem Mindestquerschnitt der beiden Varianten für die Widerstandsklassen P8B gegen manuellen Angriff die in 7.1 definierten und in Tabelle 36 aufgeführten Anforderungen.

Entscheidend für die dauerhafte und die nachhaltige Verwendung des Vakuum-Isolierglases ist die klimatische Beständigkeit ohne das Auftreten von Blasen, Schleierbildung oder Trübung, die die Nutzung beeinträchtigen können. Die beiden Varianten bestehen die Prüfungen zur klimatischen Beständigkeit und sind für den dauerhaften Einbau geeignet. Der Pendelschlagversuch erfolgt für alle Fallhöhen an einem Prüfkörper. Bis zur höchsten Fallhöhe von 1.200 mm erfolgt kein Durchdringen des Stoßkörpers durch den Prüfkörper und es lösen sich keine Bruchstücke aus dem Verbund. Das Bruchverhalten beider Varianten entspricht Pendelschlagklasse 1(B)1 und erfüllt damit die höchste Anforderung. Der Wärmedurchgangskoeffizient von Zweischeiben-Isolierglas, der etwa bei $1,1 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ liegt, soll durch das Vakuum-Isolierglas mit passiven und aktiven Sicherheitsanforderungen mindestens erreicht werden. Der Wärmedurchgangskoeffizient beider Varianten liegt unter $0,7 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ und übertrifft die Anforderung. Ziel der Erweiterung des Vakuum-Isolierglases um zusätzliche Schichten ist neben der Optimierung der mechanischen Eigenschaften auch die Erhöhung des Schallschutzes. Variante 1 erreicht ein bewertetes

Schalldämmmaß von 45,4 dB und Variante 2 von 40,6 dB. Die Gesamtdicke mit 50 mm und das Eigengewicht mit 95 kg von Verglasungen mit vergleichbaren Eigenschaften soll unterschritten werden. Variante 1 stellt mit einer Gesamtdicke von 30 mm und einem Eigengewicht von 48,7 kg eine deutliche Reduzierung dar. Variante 2 ist mit einer Gesamtdicke von 23 mm und einem Eigengewicht von 40,6 kg noch schlanker und leichter.

| Anforderung | Variante 1 | Variante 2 |
|--|---|---|
| Nachweis der klimatischen Beständigkeit ohne Fehlstellen | keine Blasen,- Schleierbildung oder Trübung | keine Blasen,- Schleierbildung oder Trübung |
| Pendelschlagklasse 2(B)2 | 1(B)1 | 1(B)1 |
| Kugelfallversuch | kein Durchdringen des Stoßkörpers | kein Durchdringen des Stoßkörpers |
| Nachweis der Widerstandsklassen P6B und P8B gegen manuellen Angriff | P8B | P8B |
| Wärmedurchgangskoeffizient $U_g < 1,1 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ | $< 0,7 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ | $< 0,7 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ |
| Bewertetes Schalldämmmaß $R_w > 36 \text{ dB}$ | 45,4 dB | 40,6 dB |
| Gesamtdicke $t < 50 \text{ mm}$ | 30 mm | 23 mm |
| Eigengewicht $g < 95 \text{ kg/m}^2$ | 48,7 kg | 40,6 kg |

Tabelle 36 Anforderungen für Variante 1 und 2 des Vakuum-Isolierglases mit passiven und aktiven Sicherheitsanforderungen.

Die definierten Mindestquerschnitte übertreffen die angestrebten Mindestanforderungen deutlich. In Abhängigkeit von den Anforderungen und den Einwirkungen ergänzen numerische Untersuchungen zum Tragverhalten bei Bedarf die definierten Mindestquerschnitte und führen unter Berücksichtigung des Bauteilwiderstandes zum anwendungsspezifisch erforderlichen Querschnitt. Zusätzlich erfordern die Herstellerangaben in Abhängigkeit von den Abmessungen der Verglasung die Anpassung der Nenndicke des Vakuum-Isolierglases. Den beiden Prototypen basieren auf den durch Versuche und numerische Berechnung bemessenen Mindestquerschnitte.

7.3 Herstellung und Präsentation

Der Lehrstuhl für Tragkonstruktion an der Universität Siegen nimmt regelmäßig an Ausstellungen sowie Fachtagungen zum Glas im Bauwesen teil. Die Ausstellung des Vakuum-Isolierglases soll in beiden Varianten für die Widerstandsklasse P8B gegen manuellen Angriff auf der Glasstec 2024 erfolgen. Die Ergebnisse werden nach Abschluss des Forschungsprojektes neben dem Forschungsbericht in mindestens einer deutsch- und einer englischsprachigen Fachzeitschrift veröffentlicht.

8 Zusammenfassung

Die beiden entwickelten Varianten von Vakuum-Isolierglas mit passiven und aktiven Sicherheitsanforderungen kombinieren die höchste Widerstandsklasse P8B gegen manuellen Angriff mit günstigen Eigenschaften für den Wärmeschutz in Verbindung mit einem geringen Gesamtdicke sowie einem geringen Eigengewicht.

Grundlage für die Entwicklung der beiden Varianten ist zunächst die umfassende Untersuchung der verwendeten Zwischenschichten PU1 und PU2 zur Bestimmung der erforderlichen Materialeigenschaften. Die Zwischenschicht PU1 weist ein gering ausgeprägtes Relaxationsverhalten auf und zeigt mit einem relativ niedrigen Elastizitätsmodul ein kaum zeitabhängiges Materialverhalten unter quasistatischer Belastung. Das Relaxationsverhalten von Zwischenschicht PU2 ist stärker ausgeprägt. Das Materialverhalten ist bei höherem Elastizitätsmodul unter quasistatischer Belastung stärker zeitabhängig. Entsprechend der Materialeigenschaften erfolgt die Festlegung der Querschnitte von zwei Varianten. Variante 1 kombiniert die beiden äußeren Dünnglastafeln und das innere Vakuum-Isolierglas mit dünneren Zwischenschichten aus PU1 und Polycarbonatplatten, bei Variante 2 ersetzt die dickere Zwischenschicht aus PU2 das Polycarbonat.

Die klimatische Beständigkeit der beiden untersuchten Varianten ist unter hoher Temperatur, in der Feuchte und unter Bestrahlung gegeben. In den Langzeitversuchen entstehen keine optischen Beeinträchtigungen wie die Bildung von Blasen, Schlieren oder Trübungen. Die Untersuchung der spektralen Kenngrößen zeigt eine Undurchlässigkeit für ultraviolette Strahlung, die insbesondere bei Variante 1 ein Vergilben und Verspröden des Polycarbonats effektiv verhindert.

Die Untersuchung der mechanischen Beständigkeit für die beiden Varianten erfolgt im Kugelfall- und Pendelschlagversuch. Eine Durchdringung der Prüfkörper durch den Stoßkörper im Kugelfallversuch sowie im Pendelschlagversuch bestätigen den günstigen Haftverbund der beiden Zwischenschichten. Im Pendelschlagversuch wird über die erreichte Fallhöhe von 1.200 mm die Pendelschlagklasse 1(B)1 erreicht.

Der geringe Wärmedurchgangskoeffizienten von Vakuum-Isolierglas bietet mit $0,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ bereits einen sehr guten Wärmeschutz. Die Ergänzung der zusätzlichen Schichten für die passive und aktive Sicherheit führt zu einer minimalen Verbesserung des Wärmedurchgangskoeffizienten von Variante 1 und Variante 2. Die Klassifizierung als durchbruchhemmende Verglasung mit einer Widerstandsklasse P8B erreicht das Vakuum-Isolierglas als Variante 1 mit der Zwischenschicht PU1 bei einer Gesamtdicke von 30 mm. Die Zwischenschicht

PU2 in Variante 2 reduziert im Verbund die Gesamtdicke der Verglasung mit der Widerstandsklasse P8B auf 23 mm.

Das bewertete Schalldämmmaß der ermittelten Mindestquerschnitte beträgt 45,4 dB für Variante 1 und 40,6 dB für Variante 2. Damit wird der Schallschutz des verwendeten Vakuum-Isolierglases um ungefähr 10 dB bei Variante 1 und ungefähr 5 dB bei Variante 2 verbessert. Für das menschliche Gehör bedeutet eine Steigerung des Schalldruckpegels um 10 dB etwa eine Verdoppelung der Lautstärke. Beide Varianten tragen zu einer Erhöhung des Schallschutzes für das Vakuum-Isolierglas als Halbzeug bei.

Das Tragverhalten von Vakuum-Isolierglas mit passiven und aktiven Sicherheitsanforderungen ist vom Schubverbund der Zwischenschichten abhängig. Die Prüfkörper in den experimentellen Untersuchungen im Vierpunkt-Biegeversuch weisen einen teilweisen Schubverbund der Zwischenschicht auf. Durch numerische Berechnung erfolgt die Anpassung der ermittelten Elastizitätsmodule im Vierpunkt-Biegeversuch. Die Biegesteifigkeit der Polycarbonatplatte für Variante 1 gewährleistet in Verbindung mit den Glasbruchstücken in der Druckzone ein ausreichendes Resttragverhalten im teilzerstörten Zustand II sowie im zerstörten Zustand III. Variante 2 weist für Zustand II ein ausreichendes Resttragverhalten auf. Eine Zerstörung des Vakuum-Isolierglases führt allerdings im Vierpunkt-Biegeversuch zu einer relativ geringen Resttragfähigkeit von Variante 2 in Zustand III. Die Bauteilprüfungen zum Resttragverhalten mit einer vierseitigen linienförmigen Lagerung im zerstörtem Zustand II führt bei beiden Varianten zu einer ausreichenden Resttragfähigkeit über 24 h.

Die entwickelte Variante 1 ist für die höchste Widerstandsklasse P8B gegen manuellen Angriff etwa 35 % dünner und etwa 10 % leichter als konventionelle Sicherheitssonderverglasungen. Bei Variante 2 liegt die Reduzierung der Gesamtdicke bei 50 % und des Eigengewichts bei 25 %. Dies ermöglicht schlankere Rahmensysteme für Verglasungen im Neubau sowie eine nachträgliche Ertüchtigung von Verglasungen im Bestandsbau.

Die Forschungsarbeit wurde von der Forschungsinitiative Zukunft Bau im Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen mit dem Förderkennzeichen SWD-10.08.18.7-21.14 finanziell unterstützt und betreut. Besonderer Dank geht an das beteiligte Unternehmen SiLATEC Sicherheits- und Laminatglastechnik GmbH für die Bereitstellung der zahlreichen Prüfkörper und den engen inhaltlichen Austausch hinsichtlich der Entwicklung der Querschnitte sowie der Prozesskette und der Prozessparameter.

9 Literatur

9.1 Fachbücher und Fachaufsätze

- Blank 1990 Blank, K. et. al.: Contribution to the size effect on the strength of flat glass. Glastechnische Berichte 63, Nr. 5, 1990.
- Engelsmann 2010 Engelsmann, S. et al.: Kunststoffe in Architektur und Konstruktion. Basel: Birkhäuser, 2010
- Grellmann 2015 Grellmann, W. et. al.: Kunststoffprüfung. München: Hanser, 2015.
- Hegger 2012 Hegger, M. et. al.: Baustoff Atlas. Basel: Birkhäuser, 2015
- Langeheinecke 2020 Langeheinecke, K. et. al.: Thermodynamik für Ingenieure. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2020.
- Musgraves 2019 Musgraves, D. et al.: Handbook of Glass. Berlin: Springer, 2019
- Nguyen-Schäfer 2017 Nguyen-Schäfer, H.: Numerische Auslegung von Wälzlagern. Berlin: Springer Vieweg, 2017
- Rösler 2008 Rösler, J. et al.: Mechanisches Verhalten der Werkstoffe. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2008
- Schneider 2016 Schneider, J. et. al.: Glasbau. Berlin: Springer, 2016.
- Schulz 2022 Schulz, I. et. al.: Das mechanische Verhalten von Vakuumisoliergläsern unter Windbelastung. Glasbau 2022. Berlin: Ernst und Sohn, 2022.
- Schuth 2019 Schuth, M.: Handbuch optische Messtechnik. München: Hanser, 2019
- Steinke 2015 Steinke, P.: Finite-Elemente-Methode. Berlin: Springer Vieweg, 2015

Wagner 2020 Wagner, E.: Glasschäden- Oberflächenbe-
schädigungen, Glasbrüche in Theorie und
Praxis. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag,
2020

Willems 2013 Willems, W. et al.: Lehrbuch der Bauphysik.
Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013

9.2 Normen, Richtlinien und Verordnungen

DIN 18008-1 DIN 18008-1: Glas im Bauwesen – Bemes-
sungs- und Konstruktionsregeln – Teil 1: Be-
griffe und allgemeine Grundlagen. Deutsche
Norm. Berlin: Beuth, 2020.

DIN 18008-2 DIN 18008-2: Glas im Bauwesen – Bemes-
sungs- und Konstruktionsregeln – Teil 2: Li-
nienförmig gelagerte Verglasungen. Deut-
sche Norm. Berlin: Beuth, 2020.

DIN 18008-3 DIN 18008-3: Glas im Bauwesen – Bemes-
sungs- und Konstruktionsregeln – Teil 3:
Punkt-förmig gelagerte Verglasungen. Deut-
sche Norm. Berlin: Beuth, 2013.

DIN 18008-4 DIN 18008-4: Glas im Bauwesen – Bemes-
sungs- und Konstruktionsregeln – Teil 4: Zu-
satzanforderungen an absturzsichernde Ver-
glasungen. Deutsche Norm. Berlin: Beuth,
2013.

DIN 18008-5 DIN 18008-5: Glas im Bauwesen – Bemes-
sungs- und Konstruktionsregeln – Teil 5: Zu-
satzanforderungen an begehbare Vergla-
sungen. Deutsche Norm. Berlin: Beuth,
2013.

DIN 18008-6 DIN 18008-6: Glas im Bauwesen – Bemes-
sungs- und Konstruktionsregeln – Teil 6: Zu-
satzanforderungen an zu Instandhaltungs-
maßnahmen betretbare Verglasungen und
an durchsturzsichernde Verglasungen. Deut-
sche Norm. Berlin: Beuth, 2018.

DIN 52338 DIN 52338: Prüfverfahren für Flachglas im
Bauwesen – Kugelfallversuch für Verbund-
glas. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2016.

| | |
|--------------------|--|
| DIN EN 356 | DIN EN 356: Glas im Bauwesen – Sicherheitssonderverglasung, Prüfverfahren und Klasseneinteilung des Widerstandes gegen manuellen Angriff. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2000. |
| DIN EN 410 | DIN EN 410: Glas im Bauwesen - Bestimmung der lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kenngrößen von Verglasungen. Deutsche Fassung. Berlin: Beuth, 2011. |
| DIN EN 572-1 | DIN EN 572-1: Glas im Bauwesen – Basiserzeugnisse aus Kalk-Natronsilicatglas. Teil 1: Definition und allgemeine physikalische und mechanische Eigenschaften. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2012. |
| DIN EN 572-2 | DIN EN 572-2: Glas im Bauwesen – Basiserzeugnisse aus Kalk-Natronsilicatglas. Teil 2: Floatglas. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2012. |
| DIN EN 1288-3 | Glas im Bauwesen – Bestimmung der Biegefestigkeit von Glas – Teil 3: Prüfung von Proben bei zweiseitiger Auflagerung (Vierschneiden-Verfahren). Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2000. |
| DIN EN 1991-1-3 | Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-3: Allgemeine Einwirkungen, Schneelasten. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2010. |
| DIN EN 1991-1-4 | Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen - Windlasten. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2010 |
| DIN EN 1991-1-4/NA | Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen - Windlasten. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2010 |
| DIN EN 12600 | Glas im Bauwesen – Pendelschlagversuch – Verfahren für die Stoßprüfung und Klassifizierung von Flachglas. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2003. |

| | |
|--------------------|---|
| DIN EN 14449 | DIN EN 14449: Glas im Bauwesen – Verbundglas und Verbund-Sicherheitsglas – Konformitätsbewertung/Produktnorm. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2005. |
| DIN EN ISO 291 | DIN EN ISO 291: Kunststoffe – Normalklimate für Konditionierung und Prüfung. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2008. |
| DIN EN ISO 527-3 | Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften – Teil 3: Prüfbedingungen für Folien und Tafeln. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2003. |
| DIN EN ISO 10077-1 | DIN EN ISO 10077-1: Wärmetechnisches Verhalten von Fenstern, Türen und Abschlüssen – Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten - Teil 1: Allgemeines. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2020. |
| DIN EN ISO 11963 | DIN EN ISO 11963: Kunststoffe – Tafeln aus Polycarbonat – Lieferformen, Abmessungen und charakteristische Eigenschaften. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 1995. |
| DIN EN ISO 12543-2 | DIN EN ISO 12543-2: Glas im Bauwesen – Verbundglas und Verbund-Sicherheitsglas. Teil 2: Verbund-Sicherheitsglas. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2022. |
| DIN EN ISO 12543-4 | DIN EN ISO 12543-4: Glas im Bauwesen – Verbundglas und Verbund-Sicherheitsglas. Teil 4: Verfahren zur Prüfung der Beständigkeit. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2022. |
| GEG 2023 | Bundesamt für Justiz- Gesetze im Internet: Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden: https://www.gesetze-im-internet.de/geg/ , 20.07.2023. |
| MBO 2019 | Bauministerkonferenz: Musterbauordnung: https://www.bauministerkonferenz.de/suchen.aspx?id=762&o=7590762&s=musterbauordnung , 05.07.2023. |

VDI 2719 Normenausschuss Akustik, Lärminderung
und Schwingungstechnik (NALS) im DIN
und VDI: Schalldämmung von Fenstern und
deren Zusatzeinrichtungen. Richtlinie. Berlin:
Beuth, 1987.

9.3 Datenblätter

Fineo 2019 Fineo 6, Produktdatenblatt. AGC, 2022.

Huntsman 2017 Kystalfelx PE399. Thermoplastisches Po-
lyurethan: Produktdatenblatt. Huntsman Cor-
poration, 2017.

Lexan 9030 Lexan® 9030: Produktdatenblatt. SABIC In-
novative Plastics, 2014.

Pujol 2016 EVALAM VISUAL. Ethylenvinylacetatfolie.
Produktdatenblatt. Pujol, 2016.

Softsolutions 2019 Linescanner, Produktdatenblatt. Softsoluti-
ons, 2019.

Trosifol® 2017 B100 NR; Polyvinylbutyralfolie: Produktda-
tenblatt. Trosifol®, 2017

9.4 Internet

Bundesregierung 2023 Die Bundesregierung- Energie und Klima-
schutz: Generationenvertrag für das Klima:
[https://www.bundesregierung.de/breg-
de/schwerpunkte/klimaschutz/klimaschutz-
gesetz-2021-1913672](https://www.bundesregierung.de/breg-de/schwerpunkte/klimaschutz/klimaschutz-gesetz-2021-1913672), 05.07.2023.

AGC 2021 AGC-Yourglass: Fineo - Spitzenleistung der
Isolierglastechnologie - Abbildung Fineo:
[https://www.agc-yourglass.com/de-DE/inno-
vationsgeschichten/fineo-spitzenleistung-
der-isolierglastechnologie](https://www.agc-yourglass.com/de-DE/innovationsgeschichten/fineo-spitzenleistung-der-isolierglastechnologie), 05.07.2023.

Pralltec 2023 Pralltec GmbH: Processing of laminated
glass – the Recyglass®: [https://www.prall-
tec.de/en/recyglass-2/](https://www.pralltec.de/en/recyglass-2/), 20.07.2023.

Saperatec 2023 saperatec GmbH: Technik: [https://www.sa-
peratec.de/de/technologie.html](https://www.saperatec.de/de/technologie.html), 20.07.2023.

Umweltbundesamt 2013 Umweltbundesamt: Glas- und Mineralfaser-
industrie: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/industriestrukturen/mineralindustrie/glas-mineralfaserindustrie#struktur-der-glas-und-mineralfaserindustrie>, 05.07.2023.

Umweltbundesamt 2020 Umweltbundesamt: Gesundheitsrisiken
durch Umgebungslärm: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-gesundheit/gesundheitsrisiken-durch-umgebungs-laerm>,
05.07.2023.

Umweltbundesamt 2023 Umweltbundesamt: Energiesparende Ge-
bäude: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/energiesparen/energiesparende-gebäude#gebäude-wichtig-für-den-klimaschutz>, 05.07.2023.