

02

Sebastián Andrés López
Ein Beitrag zur Anwendung von Dünnglas und Polycarbonat im Bauwesen

DISSERTATION

Sebastián Andrés López

**Ein Beitrag zur Anwendung von
Dünnglas und Polycarbonat
im Bauwesen**

Contribution to the Application of
Thin Glass and Polycarbonate
in Structural Engineering

An der Fakultät II: Bildung • Architektur • Künste der Universität Siegen zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.) angenommene Dissertation.

Erster Gutachter	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thorsten Weimar Universität Siegen
Zweiter Gutachter	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jens Schneider Technische Universität Darmstadt
Tag der Disputation	07.09.2023

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

Impressum

Herausgeber
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thorsten Weimar
Lehrstuhl für Tragkonstruktion
Universität Siegen
57068 Siegen

Druck und Bindung
UniPrint, Universität Siegen

Gedruckt auf alterungsbeständigem holz- und säurefreiem Papier.

Siegen 2024
universi – Universitätsverlag Siegen
www.uni-siegen.de/universi

ISBN 978-3-96182-179-2
doi.org/10.25819/ubsi/10527

Diese Publikation erscheint unter der
Creative Common Lizenz CC-BY-SA



Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Tragkonstruktion der Universität Siegen und wurde im Rahmen des Innovationsprogramms »Zukunft Bau« des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) mit zwei Forschungsprojekten finanziell gefördert.

Herrn Professor Thorsten Weimar danke ich für die Möglichkeit am Lehrstuhl für Tragkonstruktion der Universität Siegen unter seiner Leitung zu promovieren. Ich fand ein angenehmes Arbeitsumfeld vor, welches es mir ermöglichte, meine Arbeit zu verwirklichen und fachliche Unterstützung zu erhalten.

Herrn Professor Jens Schneider von der Technischen Universität Darmstadt danke ich für die Übernahme des zweiten Gutachtens sowie die interessanten Diskussionen und fachlichen Anregungen zu meiner Arbeit.

Herrn Christoph Hahn und seinen Mitarbeitenden im Unternehmen SiLATEC Sicherheits- und Laminatglastechnik GmbH danke ich für die Bereitstellung zahlreicher Prüfkörper, insbesondere auch für die Zusammenarbeit in den Forschungsprojekten und der praktischen Arbeit mit Dünnglas.

Weiterhin gilt mein Dank den Unternehmen, die mich mit Material (AGC) und Prüfungen (PerkinElmer LAS GmbH, Brandprüfzentrum der MPA NRW) unterstützen. Dem Lehrstuhl für Massivbau der Universität Siegen möchte ich für die intensive Nutzung der Universalprüfmaschine Delta 6-100 von Form + Test Seidner + Co. GmbH zur Untersuchung der Verbundtafeln im Vierpunkt-Biegeversuch und Herrn Christoph Lison für die Unterstützung bei der fotografischen Dokumentation danken.

Meinen ehemaligen und aktuellen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl für Tragkonstruktion danke ich für die kooperative und hilfsbereite Zusammenarbeit und Unterstützung, insbesondere für die anregenden und fachlichen Diskussionen in Bezug auf meine Forschungsarbeit.

Meiner Familie und meinen Freunden danke ich für die Motivation während der gesamten Zeit.

Theodor Fontane schrieb bereits zu Lebzeiten »[...] *Ich war immer schon der Ansicht, dass es Wichtigeres gibt als Gold. Glas zum Beispiel halte ich für nützlicher.*«

Mein Forschungsinhalt am Lehrstuhl für Tragkonstruktion war stets geprägt vom Maxim eines multifunktionalen, gar polyvalenten, transparenten Verbundes zur optimierten Anwendung des einzigartigen Materials Glas. Diese Arbeit half mir die Faszination und Anwendungsmöglichkeiten des Werkstoffes Glas weit über

die herkömmliche Fensterscheibe hinaus zu erschließen, um dadurch einen Impuls zu Innovation und Technik geben zu können.

Siegen, Juli 2024

Sebastián Andrés López

Kurzfassung

Der Werkstoff Glas erhält in den letzten Jahren einen wachsenden Zuspruch als Konstruktionsmaterial. In der Architektur steht Glas für Leichtigkeit und Modernität, Transparenz und Technologie. In der Gebäudehülle übernehmen Glaslamine zusätzliche Anforderungen über die eigentliche Aufgabe des Raumabschlusses hinaus. Dazu zählen unter anderem die Erfüllung des Wärme-, Sonnen-, Schall-, Witterungs- und Brandschutzes sowie die Gewährleistung eines ausreichenden Trag- und Resttragverhaltens. Zeitgleich steigen in der heutigen Zeit die Anforderungen an die Sicherheit, besonders mit einem Widerstand gegen manuellen Angriff als Einbruchschutz. Allerdings wachsen die Nennstärke und das Eigengewicht mit den Widerstandsklassen an. Dank neuerer Entwicklungen in der Glasherstellung mit einer serienmäßigen Produktion großformatiger Dünnglastafeln mit einer Nennstärke unterhalb von 2 mm ist eine Anwendung auch im Bauwesen denkbar. Erste Möglichkeiten werden in der Forschung und Entwicklung mit experimentellen Fassadenkonzepten oder beweglichen Elementen aus Dünnglas untersucht. In einem Verbundglas bietet sich Dünnglas als Decktafel an, um innere Schichten vor Beschädigung zu schützen. In einem Verbund mit Verglasungsmaterial aus Kunststoff stellt der Materialverbund ein leistungsstarkes Mehrschichtsystem dar.

Diese Arbeit beschreibt den Ansatz der Lamination von Dünnglas mit Polycarbonat über ein Gießharzverfahren im Kaltverbund. Dadurch entsteht eine dünne und leichte Alternative zu herkömmlichem Verbundsicherheitsglas als Sicherheitssonderverglasung mit einem Widerstand gegen manuellen Angriff. Die Verwendung der Verbundtafel als Verbundsicherheitsglas erfordert die experimentellen Untersuchungen der Zwischenschicht gegen klimatische Beständigkeit bei hoher Temperatur, in der Feuchte und unter Bestrahlung. Die mechanische Festigkeit wird im Pendelschlagversuch und der Kugelfallprüfung nachgewiesen.

Die Analyse des Tragverhaltens der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel erfolgt im Kurzzeitversuch Vierpunkt-Biegeversuch. Anschließend sind die Versuche für den zerstörten und planmäßig zerstörten Zustand im Kurzzeit- und Langzeitversuch wiederholt. Die Untersuchungen zeigen die Spannungsverteilung innerhalb des Mehrschichtsystems und liefern Ergebnisse zum Ansatz einer Verbundwirkung der Zwischenschicht.

Zur analytischen Berechnung der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel im Vierpunkt-Biegeversuch wird die Sandwichtheorie auf den fünfschichtigen Aufbau angewendet und eine Näherungslösung zur vereinfachten Spannungs- und Verformungsermittlung hergeleitet. Eine numerische Modellierung erfolgt auf Grundlage der Finite-Elemente-Methode (FEM) mit den Programmen SJ Mepla, RFEM RF-Glas und Ansys. Die Ergebnisse der Berechnung mit statischer Beanspruchung werden mit den experimentellen Messwerten und untereinander verglichen. Bei thermischer Beanspruchung der Verbundtafel entsteht eine zusätzliche Scherung in der Zwischenschicht. Eine Parameterstudie mit Variation der Nenn-

dicke und des Schubverbundes der Zwischenschicht zeigt den Temperatureinfluss und begrenzt die Anwendungsmöglichkeiten der Verbundtafel.

Eine Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel als Verbundsicherheitsglas mit höchsten Anforderungen an den Einbruchschutz führt zu einer Anwendung als Vertikalverglasung. Mit dem Einsatz als Sicherheitssonderverglasung ist der Widerstand gegen manuellen Angriff experimentell im Axtversuch ermittelt und Mindestquerschnittsaufbauten in Abhängigkeit der Widerstandsklasse gegeben. Dabei zeigt sich, dass die Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel als Sicherheitssonderverglasung bis zu 73 % leichter und bis zu 51 % schlanker bei verbessertem Wärmeschutz und gleichbleibendem Schallschutz im Vergleich zu üblichen Verglasungen ausgeführt werden kann. Weitere Zusatzanforderungen der Verbundtafeln zielen auf die Bestimmung der lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kenngrößen, der Wärmedämmeigenschaften, der Ermittlung der Baustoffklasse und des Luftschalldämm-Maßes ab.

Abstract

In recent years, glass has become popular as a construction material. In architecture, glass represents lightness and modernity, transparency, and technology. In the building envelope, laminated glass and laminated safety glass fulfil additional requirements beyond the actual application as room closure. This includes heat, sun, noise, weather, and fire protection as well as ensuring a sufficient load-bearing behaviour and post-breakage behaviour. Additionally, security requirements have increased, especially in terms of a resistance against manual attack as burglary protection. However, the nominal thickness and the dead load of the glass laminates increase with the resistance classes. Recent developments in glass production have enabled the serial production of large-sized thin glass panes with a nominal thickness of less than 2 mm, representing an alternative for glass in the building sector. First implementations are being investigated in research and development for experimental facade concepts or movable elements made of thin glass. Furthermore, laminated glass utilises thin glass as protection cover for inner layers. In a composite panel with plastic glazing material, the resulting laminate forms a powerful multi-layer system.

This thesis focuses on researching the lamination of thin glass and polycarbonate using a cast resin cold lamination process. This creates a slight alternative to common laminated safety glass as security glazing with resistance against manual attack. Experimental research is required to determine the climatic durability at high temperature, in humidity and under radiation of the interlayer in the composite panel. The mechanical strength is determined through the pendulum test and the ball drop test.

The load-bearing behaviour of the thin glass-polycarbonate composite panel is analysed using the four-point bending test in the short-term. The tests for the destroyed state and the planned destroyed state are repeated in a short and long-term test to analyse the post-breakage behaviour. The investigations show the stress distribution in the cross-section of the multi-layer system and provide results on the approach of the shear transfer of the interlayer.

For the analytical calculation of the thin glass-polycarbonate composite panel in the four-point bending test, the sandwich theory is applied and an approximate solution for simplified stress and deformation determination is derived. A numerical model is based on the finite element method (FEM) using numerical programs SJ Mepla, RFEM RF-Glas and Ansys. The results of the calculation are compared with the experimental measurements as well as with each other to examine the quality of the calculation. Thermal loading of the composite panel results in additional shear in the interlayer. A parameter study on the nominal thickness and the shear modulus of the interlayer shows the influence of the temperature and limits the field of application.

A thin glass-polycarbonate composite panel as security glazing with increased requirements for burglary protection results in vertical glazing. When using the composite panel as security glazing, the resistance class against manual attack is determined experimentally in an axe test with minimum cross-sections as a function of the resistance class. This shows that the thin glass-polycarbonate composite panel as security glazing is up to 73 % lighter and up to 51 % slimmer with improved thermal insulation and the same sound insulation as conventional glazing. Additional requirements include the determination of the luminous and solar characteristics, the thermal insulation properties, the fire classification, and the sound insulation.

Inhalt

1	Einleitung	13
1.1	Motivation	13
1.2	Zielsetzung	15
1.3	Abgrenzung	17
2	Materialeigenschaften von Glas	21
2.1	Grundlagen	21
2.2	Flachglas	26
2.3	Festigkeit	28
2.4	Bruchmechanik	37
2.5	Vorspannung	40
3	Anwendungen mit Dünnglas	47
3.1	Grundlagen	47
3.2	Verbund- und Verbundsicherheitsglas mit Dünnglas	49
3.3	Verbund- und Verbundsicherheitsglas mit Dünnglas und weiterem (Verglasungs-)Material	52
4	Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel	55
4.1	Grundlagen	55
4.2	Dünnglas	55
4.3	Polymere	56
4.4	Herstellung	70
5	Beständigkeit	75
5.1	Grundlagen	75
5.2	Klimatische Beanspruchung	75
5.3	Mechanische Beanspruchung	82
5.4	Zusammenfassung	87
6	Tragverhalten	89
6.1	Grundlagen	89
6.2	Versuchsaufbau und Versuchsprogramm	91
6.3	Kurzzeitversuch	97
6.4	Kurzzeitversuch – Bruchverhalten	103
6.5	Zusammenfassung	108
7	Resttragverhalten	111
7.1	Grundlagen	111
7.2	Versuchsaufbau und Versuchsprogramm	112
7.3	Kurzzeitversuch	115
7.4	Langzeitversuch	122
7.5	Zusammenfassung	124

8	Berechnungsmethoden	127
8.1	Grundlagen	127
8.2	Sandwichtheorie	129
8.3	Näherungsverfahren	136
8.4	Numerische Berechnungen	139
8.5	Auswertung	145
8.6	Zusammenfassung	152
9	Zusatzanforderungen	155
9.1	Grundlagen	155
9.2	Angriffshemmung	156
9.3	Lichttechnische und strahlungsphysikalische Kenngrößen	161
9.4	Wärmeschutz	167
9.5	Brandschutz	173
9.6	Schallschutz	178
9.7	Temperaturbeanspruchung	183
9.8	Zusammenfassung	195
10	Zusammenfassung	199
11	Literatur	203
11.1	Bücher und Aufsätze	203
11.2	Normen und Richtlinien	207
11.3	Datenblätter	210
11.4	Internet	211
11.5	Programme	211
12	Bezeichnungen	213
12.1	Formelzeichen	213
12.2	Abkürzungen	215
13	Abbildungsnachweis	217
A	Anhang	219

1 Einleitung

1.1 Motivation

In den letzten Jahrzehnten finden mit vertieftem Verständnis, intensiver Forschung und fortschreitender Entwicklung weitere Hochleistungsmaterialien Einzug in das Bauwesen. Dabei gilt Glas als einer der reizvollsten Baustoffe. Das Material verbindet Innen- und Außenräume mit einer ungeahnten Offenheit durch die Transparenz miteinander und schafft gleichzeitig eine Trennung. Vor allem der vermehrt großflächige Einsatz von Glas in der Gebäudehülle, wie bei dem Kristallpalast aus dem Jahr 1851 von Joseph Paxton, der Vorhangfassade der Faguswerke in Alfeld aus dem Jahr 1914 von Walter Gropius und Adolf Meyer, der Architektur des Bauhausstils beispielsweise mit dem Barcelona-Pavillon von 1929 oder dem Haus Tugendhat aus dem Jahr 1930 von Ludwig Mies van der Rohe oder auch der Nachkriegsarchitektur mit dem Kanzlerbungalow von 1966 von Sep Ruf, zeigt das Potential des Baustoffs Glas in der neueren urbanen Architektur moderner Stadtzentren.¹

Zeitgleich mit den daraus größeren Abmessungen wachsen auch die Anforderungen an transparente Gebäudehüllen. Mike Davies stellt 1981 bereits das Konzept einer transparenten polyvalenten Wand vor. Über ein Zusammenspiel mehrere Funktionsschichten passt sich die Verglasung selbstregulierend den Bedürfnissen und Einflüssen an.² Allerdings erfüllt eine monolithische Glastafel die hohen Anforderungen an den Brand-, Schall-, Sonnen-, Witterungs- und Wärmeschutz sowie an Energie, Gestaltung, Medien und Sicherheit nicht. Mit der Lamination zu einem Verbund- oder Verbundsicherheitsglas sowie der Weiterverarbeitung zu einem Mehrscheiben-Isolierglas wird sich der polyvalenten Wand als multifunktionale Fassade angenähert. Einhergehend mit dem Wunsch nach großformatigen Abmessungen mit hohen Anforderungen im Bereich des Wärme- und Schallschutzes sowie Sicherheit und Transparenz, erhöht sich die Nenndicke und das Eigengewicht der Verglasung. Zusätzliche Anforderungen an die Sicherheit erfordern eine Sicherheitssonderversglasung mit einem Widerstand gegen manuellen Angriff³, Durchschuss⁴ oder Explosion⁵. Konventionelle Sicherheitssonderversglasungen bestehen aus mehreren Glastafeln und lassen in Abhängigkeit der Widerstandsklasse den Querschnitt und das Gewicht weiterwachsen.

¹ Die ikonischen Gebäude mit großen Glasflächen bleiben in Erinnerung, auch wenn im Original die Glaselemente vorwiegend als Monoglas ausgebildet sind und dadurch Nachteile vor allem beim Wärme- und Schallschutz entstehen.

² Vergleiche Davies 1981.

³ Vergleiche DIN EN 356.

⁴ Vergleiche DIN EN 1063.

⁵ Vergleiche DIN EN 13541.

Die kontinuierliche Entwicklung im Bereich von Dünnglas mit Nenndicken unterhalb von 2 mm, insbesondere für tragbare elektronische Geräte wie Mobiltelefone, schafft Voraussetzungen für einen vielfältigen Einsatz. Dünnglas mit chemischer Vorspannung stellt mit einer hohen Oberflächenfestigkeit und einem niedrigen Flächengewicht ein passendes Material für mobile Endgeräte dar. Zeitgleich steigen mit der Entwicklung neuartiger Herstellverfahren die maximalen Abmessungen an. Großformatige Dünnglastafeln werden für zusätzliche Anwendungsgebiete wie das Bauwesen interessant. Allerdings zeigt sich, dass die Dünnglastafel nur eine geringe Querschnittssteifigkeit aufweist und dadurch sehr verformungsempfindlich ist. Als ausfachendes Bauteil in der Gebäudehülle führt diese Eigenschaft zu einer großen Durchbiegung und muss in der Planung berücksichtigt werden.

Eine Möglichkeit zur Reduktion ungewollter Verformungen besteht bei der Anwendung als Verbundglas mit innenliegendem Verglasungsmaterial aus Kunststoff. Die Kombination führt zu einer Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel, die mit dem innenliegenden, schlagzähen Thermoplasten Polycarbonat und den äußeren Dünnglastafeln die Anforderungen an einen Raumabschluss, ein geringes Eigengewicht, eine niedrige Nenndicke erfüllen und zusätzliche Eigenschaften im Bereich der Sicherheit, des Wärmeschutzes und des Schallschutzes erhalten.⁶ Ein Gießharz aus thermoplastischem Polyurethan stellt den Verbund der Dünnglas- und Polycarbonat- tafel als Werkstoffverbund sicher.

Einhergehend mit den deutschen und europäischen Vorschriften darf eine Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel als Verbundsicherheitsglas⁷ eingestuft werden, wenn die Anforderungen an den Verbund zur klimatischen Beständigkeit, mechanischen Festigkeit und zur Beanspruchbarkeit im intakten und zerstörten Zustand erfüllt sind.⁸

Die Verbundtafeln können analog zu Verbund- und Verbundsicherheitsglas im Bauwesen als punkt- oder linienförmig gelagerte Horizontal- und Vertikalverglas-

⁶ Nach DIN EN ISO 12543-1 darf im Bauwesen ein Verbund- und Verbundsicherheitsglas aus Glas und Verglasungsmaterial aus den beiden Kunststoffen Polymethylmethacrylat (PMMA) und Polycarbonat (PC) bestehen. Der Vergleich der Bruchdehnung beider Polymere zeigt eine wesentlich höhere Bruchdehnung von Polycarbonat (PC) als von Polymethylmethacrylat (PMMA). Als Verbundtafel, dass die Eigenschaften eines Verbundsicherheitsglases erfüllen soll, ist der Nachweis der Resttragfähigkeit Bestandteil des Sicherheitskonzepts. Glas als sprödes Material mit geringer Bruchdehnung sollte daher mit duktileren Materialien mit hoher Bruchdehnung wie Polycarbonat (PC) laminiert werden, um den Nachweis zu erfüllen. Vergleiche Kapitel 4 und Kapitel 7.

⁷ Vergleiche DIN EN ISO 12543-1 und DIN EN ISO 12543-2.

⁸ Das Urteil C 100/13 des Europäischen Gerichtshofs (EuGH) vom 16.10.2014 sieht die nationalen Einschränkungen in Deutschland bezüglich der Materialien für Zwischenschichten von Verbund- und Verbundsicherheitsglas gemäß des europarechtlichen Markthinderungsverbot als nicht mehr zulässig an. Neben Polyvinylbutyral (PVB) sind somit weitere Polymere als Zwischenschicht wie Ethylvinylacetat (EVA), SentryGlas (Ionomer) oder thermoplastisches Polyurethan (TPU) möglich. Vergleiche EuGH C-100/13.

ung im Bereich mit erhöhten Anforderungen eingesetzt werden.⁹ Insbesondere im Bereich der Sicherheitssonderverglasungen mit einem Schutz vor manuellem Angriff ist das Mehrschichtsystem mit dem schlagzähem Polycarbonat und oberflächenharten Dünnglas eine leistungsstarke, schlanke und leichte Alternative zum herkömmlichen Verbund- und Verbundsicherheitsglas aus Glas.

1.2 Zielsetzung

Die Kombination der unterschiedlichen Materialien Dünnglas, Polycarbonat und thermoplastisches Polyurethan ergeben einen Werkstoffverbund mit einer mikroskopisch homogenen und makroskopisch heterogenen Struktur.¹⁰ Die Anwendung von Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln als Verbundsicherheitsglas im Bauwesen mit erhöhten Anforderungen an den Widerstand gegen manuellen Angriff erfordert Untersuchungen zur klimatischen und mechanischen Beständigkeit sowie zum Trag- und Resttragverhalten. Hierzu sind experimentelle Nachweise notwendig, die in ein numerisches Modell übertragen werden, um eine ingenieurmäßige Betrachtung zu ermöglichen.

Der Werkstoffverbund ist in einem manuellen Herstellungsverfahren mit einem Gießharz aus Polyurethan sichergestellt. Unter Aushärtung bei Raumtemperatur entsteht der Verbund ohne Zwangsspannungen. Das aufwendigere Herstellverfahren im Vergleich zum Autoklavverfahren eignet sich besonders bei empfindlichen Dünnglastafeln, Materialien mit unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten und komplexen Geometrien.

Die physikalischen und mechanischen Materialeigenschaften von Glas sind bekannt und werden den entsprechenden Normen und Produktdatenblättern entnommen.¹¹ Besonders die chemische Vorspannung von Alumo-Silikatglas bietet die Möglichkeit, die Glastafel auf eine geringe Nenndicke mit sehr hoher Festigkeit zu reduzieren. Allerdings sind die gängigen Prüfverfahren zur Bestimmung der charakteristischen Festigkeit von Glas nicht ohne Weiteres auf chemisch vorgespanntes Dünnglas übertragbar. Bei der Anwendung von chemisch vorgespanntem Dünnglas im Bauwesen in konventionellen Anwendungen bietet sich deshalb eine Begrenzung der Verformung, ohne dass das chemisch vorgespannten Dünnglas aufgrund zu hoher Spannungen versagt, an.

Die Verwendung von Polymerwerkstoffen ist abhängig von der chemischen Zusammensetzung und dem thermomechanischen Verhalten. Grundsätzlich besteht eine Abhängigkeit der Materialeigenschaften von Temperatur, Zeit und Belastungshöhe. Die physikalischen und mechanischen Eigenschaften des verwendeten Polycarbonates sind aus dem Datenblatt des Herstellers ent-

⁹ Vergleiche DIN 18008-2, DIN 18008-3, DIN 18008-4, DIN 18008-5, DIN 18008-6 und Weimar 2021.

¹⁰ Vergleiche Roos 2017, Seite 322.

¹¹ Vergleiche DIN EN 572-1, Pilkington 2021, AGC 2016 und AGC 2020.

nommen.¹² Die Kennwerte beziehen sich auf kurzzeitige Belastungen unter Raumtemperatur und werden zur Auswertung der Versuche zum Trag- und Resttragverhalten und bei den Berechnungsmethoden angenommen. Fehlende thermomechanische Kennwerte des Polycarbonats sind mit eigenen experimentellen Untersuchungen ergänzt.

Die physikalischen und mechanischen Eigenschaften des verwendeten thermoplastischen Polyurethans als Zwischenschicht sind aus vorherigen Untersuchungen bekannt.¹³ Fehlende thermomechanische Kennwerte der Zwischenschicht sind mit eigenen experimentellen Untersuchungen ergänzt.

Die Verbundtafel aus Dünnglas und Polycarbonat über die transparente Zwischenschicht erfordert als Verbundglas experimentelle Nachweise zur Sicherstellung der klimatischen Beständigkeit unter hoher Temperatur, in der Feuchte und unter Bestrahlung.¹⁴ Mit den Nachweisen der mechanische Festigkeit im Pendelschlagversuch und der Kugelfallprüfung wird eine ausreichende Stoßfestigkeit der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel als Verbundsicherheitsglas untersucht.¹⁵

Die Untersuchung zum Tragverhalten im Kurzzeitversuch der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel wird mit unterschiedlichen Verfahren analytisch und numerisch abgebildet. Basierend auf der Sandwichtheorie sind Verformungen und Spannungen der Verbundtafel berechnet und eine Näherungslösung hergeleitet. Anschließend erfolgt eine Modellierung auf Grundlage der Finite-Elemente-Methode (FEM) mit den Programmen SJ Mepla¹⁶, RFEM RF-Glas¹⁷ und Ansys¹⁸. Die Ergebnisse der analytischen und numerischen Berechnung werden mit den experimentellen Ergebnissen und untereinander verglichen. Eine Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung ermöglicht die prinzipielle Übertragung auf weitere Lagerungs- und Belastungssituationen.

Glas und Polycarbonat zeigen einen um den Faktor 7 unterschiedlichen thermischen Längenausdehnungskoeffizienten. Dadurch entstehen im Querschnitt eine zusätzliche Beanspruchung infolge Temperatur, die über die weiche Zwischenschicht sicher aufgenommen und abgetragen werden muss. Zusätzlich verändern sich die Kennwerte der Polymere temperaturabhängig. Eine Parameterstudie untersucht die Auswirkungen unterschiedlicher Temperaturdifferenzen auf die Scherung im thermoplastischen Polyurethan. Die Berechnung der Oberflächentemperaturen in einem Zweischeiben-Isolierglas mit innenliegender oder

¹² Vergleiche Sabic 2018.

¹³ Das verwendete thermoplastische Polyurethan ist eine eigene Entwicklung von SiLATEC Sicherheits- und Laminatglastechnik GmbH. Vergleiche Weimar 2011, Seite 99 ff.

¹⁴ Vergleiche DIN EN ISO 12543-4.

¹⁵ Vergleiche DIN EN 14449 und DIN EN 12600.

¹⁶ Vergleiche SJ Software GmbH 2022.

¹⁷ Vergleiche Dlubal GmbH 2018 und Dlubal GmbH 2019.

¹⁸ Vergleiche Ansys Inc. 2020.

außenliegender Verbundtafel sind mit WinSLT¹⁹ von SommerGlobal durchgeführt. Die Untersuchungen zeigen die Einsetzbarkeit der Verbundtafel im Mehrscheiben-Isolierglas und geben eine Empfehlung zur Lage des Mehrschichtsystems.

Die Interaktion der Schichten untereinander wird im Trag- und Resttragverhalten für verschiedene Querschnitte im Kurzzeit- und Langzeitversuch analysiert. Zusätzliche Anforderungen und Eigenschaften wie die Bestimmung der spektralen Kenngrößen, experimentelle und theoretische Untersuchungen zum Wärme-, Schall- und Brandschutz sowie zur Angriffshemmung zeigen ein breites Anwendungsspektrum des Verbundes und ermöglichen im Nachgang weitere gezielte Querschnittsanpassungen.

Die Arbeit untersucht die Anwendungsmöglichkeiten von Verbundtafeln aus Dünnglas und Polycarbonat als Alternative zu Verbund- und Verbundsicherheitsglas als Sicherheitssonderverglasung im Bauwesen. Dabei werden die geforderten Nachweise zur klimatischen Beständigkeit²⁰ und mechanischen Festigkeit²¹ erbracht und das Tragverhalten sowie das Resttragverhalten in Anlehnung an das Vierschneiden-Verfahren²² untersucht. Die Ergebnisse der Zusatzanforderung zeigen die bauphysikalischen Eigenschaften²³ der Verbundtafel auf. Die Charakterisierung der einzelnen Materialien wird durch grundlegende thermomechanische Untersuchungen zu den verwendeten Polymeren Polycarbonat (PC) und thermoplastischem Polyurethan (TPU) ergänzt. Insgesamt bietet sich die Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel als leistungsstarke Alternative zu herkömmlichen Glas-Verbund mit gleichbleibenden beziehungsweise verbesserten Eigenschaften an.

1.3 Abgrenzung

Diese Arbeit untersucht drei unterschiedliche Dünnglasprodukte im Verbund mit Polycarbonat. Es stehen das nicht vorgespannte Kalk-Natronsilikatglas Optiwhite²⁴ von Pilkington Deutschland AG mit einer Nenndicke von 2,00 mm, das chemisch vorgespannte Alumo-Silikatglas Leoflex²⁵ von Asahi Glass Co., Ltd.

¹⁹ Vergleiche Sommer Informatik GmbH 2021.

²⁰ Vergleiche DIN EN ISO 12543-4.

²¹ Vergleiche DIN EN 14449 und DIN EN 12600.

²² Vergleiche DIN EN 1288-3.

²³ Vergleiche DIN EN 673, DIN EN 410, DIN EN 356, DIN 4102 und DIN EN ISO 10140-2

²⁴ Vergleiche Pilkington 2021.

²⁵ Vergleiche AGC 2016. Das Dünnglas Leoflex wird aus dem asiatischen Raum importiert. Der Anbieter stellt ohne Vorankündigung gegen Ende der Bearbeitungszeit dieser Arbeit die Produktion des Dünnglases ein. Als Alternative ist das Dünnglas Falcon vorgeschlagen. Allerdings sind die physikalischen, mechanischen und thermischen Eigenschaften beider Dünngläser nicht identisch. Dadurch konnten nicht alle Prüfungen wiederholt oder mit denselben Produkten durchgeführt werden.

(AGC) mit 0,85 mm und das chemisch vorgespannte Alumo-Silikatglas Dünnglas Falcon²⁶ von Asahi Glass Co., Ltd. (AGC) mit 0,50 mm zur Verfügung.

Das Polycarbonat Lexan 9030²⁷ von Saudi Basic Industries Corporation (Sabic) bildet in der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel die Kernschicht. Dabei sind die physikalischen und mechanischen Kennwerte ausreichend bekannt. Thermomechanische Kennwerte werden bei Bedarf mit einer dynamisch-thermisch-mechanischen Analyse (DMTA) oder einer Dilatometrie (DIL) ergänzt. Für Polycarbonat darf im Allgemeinen ein linearer Bereich bis zu einer Dehnung von 0,5 % angenommen werden.²⁸

Der Verbund zwischen Polycarbonat und Dünnglas wird mit einem Gießharz sichergestellt, das bei Raumtemperatur aushärtet. Dadurch treten während der Herstellung keine Spannungen durch Temperaturunterschiede im Abkühlprozess auf. Dabei sind die physikalischen und mechanischen Kennwerte ausreichend bekannt. Thermomechanische Kennwerte werden bei Bedarf mit einer dynamisch-thermisch-mechanischen Analyse (DMTA) ergänzt. Die Verbundtafel und das Gießharz werden von SiLATEC Sicherheits- und Laminatglastechnik GmbH in Gelting produziert.

Die Verbundtafeln werden mit den zum Zeitpunkt der Untersuchung gültigen normativen Prüfungen der klimatischen Beständigkeit, der mechanischen Festigkeit wie der Kugelfallprüfung und dem Pendelschlagversuch sowie mit dem Vierpunkt-Biegeversuch zur Klassifizierung eines Verbundsicherheitsglases untersucht. Der Nachweis der Zusatzanforderungen an das Bauprodukt, wie beispielsweise als Sicherheitssonderverglasung mit dem Axtversuch, ist unabhängig der statischen Einwirkungen und erfolgt experimentell.

Die Berechnungsmethoden zu Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel konzentrieren sich auf die statischen Einwirkungen im Vierpunkt-Biegeversuch. Die Verfahren setzen die Steifigkeit der Zwischenschicht analog zum Tragverhalten zu einem bestimmten Zeitpunkt bei Raumtemperatur an und vergleichen die experimentellen mit den analytisch oder numerisch berechneten Werte. Dabei wird auf die Anwendbarkeit der einzelnen Verfahren und Programme zur Berechnung einer Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel geachtet. Die Abbildung eines zeit- und temperaturabhängigen Materialverhaltens kann mit den Programmen nach der Finite-Elemente-Methode (FEM) durchgeführt werden, um eine realitätsnahe Abbildung der Verformung und Spannung bei unterschiedlichen Zeitzuständen zu erreichen.

Die numerische Berechnung der Scherung der Zwischenschicht infolge einer Temperaturdifferenz von ± 40 K geht von einem temperaturabhängigen Elastizitätsmodul und Wärmeausdehnungskoeffizienten der Polymerwerkstoffe Poly-

²⁶ Vergleiche AGC 2020.

²⁷ Vergleiche Sabic 2018.

²⁸ Vergleiche Ehrenstein 2011, Seite 216 und Weimar 2011, Seite 67.

carbonat und thermoplastisches Polyurethan aus. Für die Querdehnzahl ist der Wert konstant gehalten. Die Auswertung erfolgt für Verbundtafeln der Widerstandsklasse P6B gegen manuellen Angriff für Abmessungen von 2.050 mm auf 3.050 mm und zeigt die zusätzliche Scherung der Zwischenschicht infolge Temperaturexpansion der angrenzenden Schichten.

2 Materialeigenschaften von Glas

2.1 Grundlagen

Die physikochemische Betrachtung beschreibt Glas als den eingefrorenen Zustand einer unterkühlten Flüssigkeit, die ohne Kristallisation erstarrt. Dabei werden kristalline Stoffe erst geschmolzen und anschließend rasch abgekühlt. Bei sinkender Temperatur nimmt die Viskosität bis zur Erstarrung der Schmelze zu.²⁹ Diese Auffassung ist allerdings zu allgemein gehalten, da die Zusammensetzung des Glases für Anwendungen im konstruktiven Ingenieurbau nicht eingeschränkt ist. DIN 1259-1 definiert deswegen Glas als eine anorganische, nichtmetallische Mischung, die durch Aufschmelzung der Basisstoffe bei hoher Temperatur erhalten wird. Die homogene Flüssigkeit kühlt anschließend bis zum festen Zustand ohne Kristallisation ab. Der Abkühlvorgang erfolgt nicht bei einer eindeutig bestimmten Temperatur, vielmehr gelangt das Glas vom flüssigen über einen plastisch-viskoelastischen bis in den festen Zustand³⁰. Dabei zeigt Glas im erstarrten Zustand eine amorphe³¹ Isotropie.

Das Eigenschafts-Temperatur-Diagramm Bild 1 gibt die Abhängigkeit einer Eigenschaft von der Materialtemperatur qualitativ wieder. Ein kristallines Material zeigt einen typischen Eigenschaftssprung bei der Schmelztemperatur T_S , während die Temperatur-Eigenschaftskurve des Glases kontinuierlich verläuft. Die Änderung der meisten Glaseigenschaften ist bis zur Temperatur T_1 und ab der Temperatur T_2 annähernd linear. Zwischen beiden Temperaturen befindet sich ein nichtlinearer Bereich, der Glasübergangsbereich. Unterhalb der Temperatur T_1 ist das Material spröde, oberhalb von T_2 plastisch-viskos. Zur Einordnung unterschiedlicher Glassorten definiert die Glasübergangstemperatur T_g den Schnittpunkt der linearen Geraden im Bereich unterhalb T_1 und der linearen Geraden oberhalb T_2 . Der umgebende Übergangsbereich liegt unabhängig der chemischen Zusammensetzung bei einer Viskosität von etwa 10^{13} dPa·s und einer Temperatur von etwa $+500$ °C bis $+600$ °C.³²

²⁹ Vergleiche Tammann 1933, Seite 7.

³⁰ Bei Glas wird vereinfacht von einem Festkörper gesprochen, solange die Viskosität oberhalb der Viskosität des Glasübergangsbereiches liegt.

³¹ Unter amorph wird ein Strukturzustand der mittleren Ordnung verstanden, bei dem der molekulare Aufbau eines Körpers einer Nah- aber keiner Fernordnung entspricht. Vergleiche Bild 2.

³² Je höher die Viskosität, desto weniger fließfähig ist der Werkstoff. Die Viskosität von Glas liegt bei 10^{19} dPa·s, die Viskosität von Honig bei 10^4 dPa·s. Vergleiche auch Petzold 1990, Seite 31 f. und Scholze 1988, Seite 4 f.

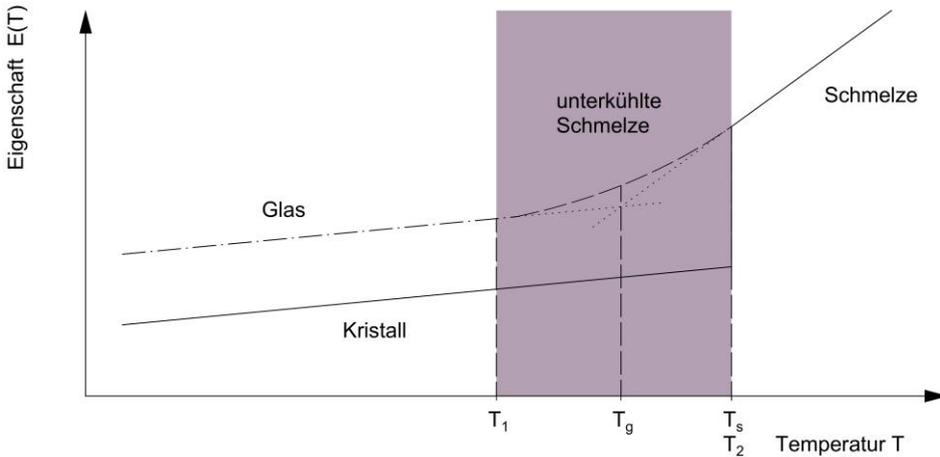


Bild 1

Qualitative Darstellung der Eigenschaftsänderung von kristallinen und Materialien in Abhängigkeit der Temperatur nach Petzold 1990.

T_g : Glasübergangstemperatur | T_s : Schmelztemperatur | T_1, T_2 : Glasübergangsbereich

Mit dem Modell von Zachariasen³³ zur Netzwerkhypothese und Atomstruktur sind zahlreiche Eigenschaften des Glases erklärbar. Während sich bei einem langsamen Übergang von einer Flüssigkeit zu einem Festkörper ein regelmäßiges räumliches kristallines SiO_4 -Tetraedergerüst bilden kann, bleibt bei einer unterkühlten Schmelze die ungeordnete Atomstruktur vorhanden. In einem Kristall und einer unterkühlten Schmelze liegen dieselben Bindungsverhältnisse bei unterschiedlichem atomaren Aufbau vor. Bild 2 vergleicht die Struktur eines kristallinen Quarzglas mit geordneter Atomstruktur mit einem amorphen Quarzglas mit ungeordneter Atomstruktur und mit einem Alkali-Silikatglas, einem Quarzglas unter Beimischung von Alkalien und Erdalkalien, die sich in die ungeordnete Atomstruktur setzen und unterschiedlich starke Bindungen zum Silicium (Si) ausbilden. Während des Schmelzvorgangs werden die schwächeren Bindungen zuerst getrennt bevor schrittweise die stärkeren Bindungen aufbrechen. Der Glasübergangsbereich bildet sich aus.³⁴

³³ Vergleiche Zachariasen 1932.

³⁴ Vergleiche Scholze 1988, Seite 5 ff. und Petzold 1990, Seite 33 f.

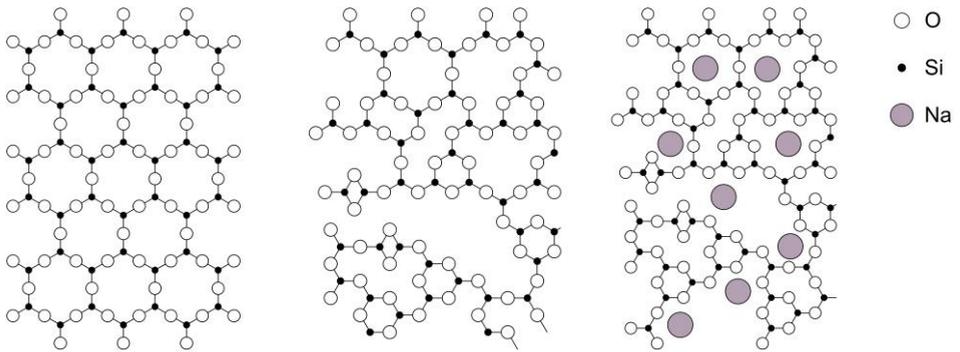


Bild 2

Vereinfachte Darstellung eines kristallinen Quarzglas (SiO_2 , links), eines amorphen Quarzglas (SiO_2 , mittig) und eines Alkali-Silikatglas (SiO_2 und Na, rechts) nach Petzold 1990 und Zachariasen 1932. Die vierten Valenzen ragen nach oben oder unten aus der Zeichenebene heraus.

Im Bauwesen sind vor allem die silikathaltigen Glassorten mit Zugabe von Alkalien und Erdalkalien weit verbreitet. Die silikatischen Komponenten begünstigen Härte und Festigkeit, aber auch die unerwünschte Sprödigkeit. Ohne eine Zugabe von Netzwerkwandlern ist der Energieeinsatz bis zum Schmelzpunkt von Quarzsand (SiO_2) bei etwa $+2.000\text{ }^\circ\text{C}$ sehr hoch. Die Beimischung von Soda (Na_2CO_3) als Netzwerkwandler senkt die Schmelztemperatur. Stabilisatoren erhöhen die Widerstandsfähigkeit gegenüber einem chemischen oder mechanischen Angriff. Kalk (CaCO_3) beeinflusst somit die Glashärte und verbessert zusätzlich den Wasser- und Säurewiderstand sowie die Zug- und Biegezugfestigkeit. Der Schmelzpunkt der Gemenge liegt bei etwa $+1.400\text{ }^\circ\text{C}$ bis $+1.600\text{ }^\circ\text{C}$. Kalk-Natronsilikatglas³⁵ ist dabei die übliche Glassorte für Flachglas im Bauwesen.

Borosilikatglas³⁶ besitzt im Vergleich zu Kalk-Natronsilikatglas einen deutlich geringeren Temperaturexpansionskoeffizienten verbunden mit einer höheren Temperaturwechselbeständigkeit. Anstelle von Kalk (CaCO_3) wird Bortrioxid (B_2O_3) beigemischt, um dadurch diese Eigenschaften zu erhalten. Damit verbessern sich zusätzlich die Schmelzbarkeit und chemische Widerstandsfähigkeit. Somit ist eine Verwendung im Bauwesen, beispielsweise als Brandschutzverglasung, möglich.

Bei Spezialanwendungen, wie beispielhaft in Schiffverglasungen oder Glaselemente in der Luft- und Raumfahrt, können weitere Silikatglassorten verwendet werden. In Alumo-Silikatglas³⁷ übernimmt Aluminiumoxid (Al_2O_3) die Aufgaben eines Netzwerkbildners und eines Stabilisators. Durch die veränderte Zusammensetzung folgen spezielle Glaseigenschaften. Dazu zählen unter anderem ein

³⁵ Vergleiche DIN EN 572-1.

³⁶ Vergleiche DIN EN 1748-1-1.

³⁷ Vergleiche DIN EN 15681-1.

niedrigeres spezifisches Gewicht sowie eine erhöhte Glasübergangstemperatur im Vergleich zu Kalk-Natronsilikatglas. Ähnlich zu Borosilikatglas besitzt Alumo-Silikatglas einen niedrigeren Wärmeausdehnungskoeffizienten und eine im Vergleich zu Kalk-Natronsilikatglas verbesserte Temperaturwechselbeständigkeit. Zusätzlich weist Alumo-Silikatglas einen niedrigen Härtegrad und erhöhte chemische Widerstandsfähigkeit auf. Die Glassorte wird vorwiegend als Dünnglas im Bauwesen verwendet und chemisch vorgespannt.³⁸

Die charakteristischen Materialeigenschaften basieren auf den physikochemischen Eigenheiten der molekularen Verbindungen. Ausgehend von der Netzwerkhypothese liegen im Glaszustand verschieden starke Bindungsarten vor, die sowohl die Materialeigenschaften als auch den Glasübergangsbereich beeinflussen. Bei einer ungeordneten Struktur sind die ermittelten Eigenschaften richtungsunabhängig. Um Aussagen über die makroskopischen Eigenschaften zu treffen, werden häufig statistische Auswertungen vorgenommen. Viele Materialkennwerte entsprechen dem Mittelwert der mikroskopischen Glaseigenschaften. Die Festigkeit wird hingegen als 5 %-Fraktilwert mit einer Aussagewahrscheinlichkeit von 95 % bestimmt. Das fehlende Kristallgitter führt bei Glas zu einem amorphen, isotropen Festkörper mit einem linear-elastischen Werkstoffverhalten.³⁹

Als besondere Eigenschaft zählt die Transparenz. Auftreffende Strahlung wird durch Absorption im Glas gehalten, durch Reflektion an der Oberfläche zurückgeworfen oder mittels Transmission durch das Material geleitet. Eine Absorptionskante von Glas liegt bei etwa 150 nm bis 250 nm, unterhalb dieser Wellenlänge Glas durch eine Wechselwirkung zwischen Sauerstoffionen und einfallender Strahlung strahlungsundurchlässig ist. Im sichtbaren Bereich von 380 nm bis 780 nm zeigt der Werkstoff hingegen eine hohe Transmission. Eine weitere Absorptionskante im Infrarotbereich bei etwa 2.500 nm verhindert einen Eintrag von langwelliger Wärmestrahlung aufgrund der durch die Strahlung angeregten Eigenschwingung der Siliciumoxidgruppen. Gleichzeitig begünstigt sich dadurch der Treibhauseffekt, da kurzwellige Infrarotstrahlung durch das Glas hindurch gelangt, von dahinterliegenden Körpern aufgenommen und als langwellige Strahlung reflektiert, vom Glas allerdings nicht mehr transmittiert wird. Eine gezielte Beeinflussung des Absorptions- und Reflexionsvermögens kann durch eine spezielle Zusammensetzung des Glases oder mittels Beschichtungen erfolgen.

Thermische Energie regt ebenfalls die Atome in der Glasstruktur zum Schwingen an. Bei steigender Temperatur wird dabei die Schwingungsamplitude größer. Zwei miteinander verbundene Atome vergrößern den Abstand, das Material dehnt sich aus. Der thermische Wärmeausdehnungskoeffizient gibt an, in welchem Verhältnis zur Gesamtlänge sich ein Material bei einer Temperaturänderung von 1 K verändert. Für Quarzglas liegt der Ausdehnungskoeffizienten bei

³⁸ Vergleiche Stacherl 2015, Seite 19 ff.

³⁹ Vergleiche Petzold 1990, Seite 31 f.

etwa $0,5 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$, bei Kalk-Natronsilikatglas bei $70 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$. Die Beimischung von Alkalien und Erdalkalien verändern die Struktur innerhalb des Glases und führen zu schwächeren atomaren Bindungen. Gleichzeitig erhöht sich der Ausdehnungskoeffizient, da sich die Schwingung der Atome verstärkt. Neben der Längenausdehnung findet unter Wärmebeanspruchung auch ein Wärmefluss in Richtung der geringeren Temperatur statt. Der Wärmefluss ist in Abhängigkeit des Materials unterschiedlich und mit der spezifischen Wärmeleitfähigkeit beschrieben. Die Wärmeleitfähigkeit entspricht dem Wärmestrom, der bei einer Temperaturdifferenz von 1 K durch eine 1 m^2 große Schicht der Dicke 1 m gelangt. Je kleiner der Wert, desto weniger Wärme dringt durch einen Stoff. Glas besitzt eine Wärmeleitfähigkeit von etwa $1 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, Beton von etwa $2 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ und Stahl von etwa $50 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$.⁴⁰ Aufgrund der großformatigen und dünnen Verglasungen in der Gebäudehülle ist der Wärmedurchgang des Glases entscheidend und verantwortlich für einen hohen Wärmeverlust eines Gebäudes. Ohne weitere Maßnahmen eignet sich Glas somit nicht zur Wärmedämmung.

Glas ist gegenüber den meisten Säuren und Laugen resistent. Bei Kontakt mit Flusssäure (HF) tritt eine chemische Reaktion mit einem Auflösen der Glasstruktur an der Oberfläche ein. Bei längerer Lagerung von Glas in einem wässrigen Medium besteht die Möglichkeit, dass das Glas mit den im verunreinigten Wasser enthaltenen, alkalischen Ionen reagiert und sich auf der Glasoberfläche eine gelartige Schicht bildet.

Tabelle 1 zeigt die mit Produktnormen geregelten Materialeigenschaften für Kalk-Natronsilikatglas, Borosilikatglas und Alumo-Silikatglas. Je nach prozentualer Zusammensetzung der Bestandteile des Borosilikatglases und des Alumo-Silikatglases variieren die Kennwerte.

⁴⁰ Vergleiche Albert 2020, Seite 10.43 und Seite 10.51.

Tabelle 1

Allgemein anerkannte Materialkennwerte von Kalk-Natronsilikatglas, Borosilikatglas und Alumo-Silikatglas.

Eigenschaft	Kalk-Natronsilikatglas	Borosilikatglas	Alumo-Silikatglas
Norm	DIN EN 572-1	DIN EN 1748-1-1	DIN EN 15681-1
Dichte	2,5 g/cm ³	2,2 g/cm ³ bis 2,5 g/cm ³	2,3 g/cm ³ bis 2,6 g/cm ³
Elastizitätsmodul	70.000 N/mm ²	60.000 N/mm ² bis 70.000 N/mm ² *)	70.000 N/mm ² bis 90.000 N/mm ²
Querdehnzahl	0,20**)	0,20	0,20 bis 0,25
Mittlerer thermischer Ausdehnungskoeffizient	9,0 · 10 ⁻⁶ 1/K	3,1 · 10 ⁻⁶ 1/K bis 6,0 · 10 ⁻⁶ 1/K	3,5 · 10 ⁻⁶ 1/K bis 9,8 · 10 ⁻⁶ 1/K
Beständigkeit gegen Temperaturunterschiede	40 K***)	80 K***)	60 K***)
Wärmeleitfähigkeit	1,0 W/(m·K)	1,0 W/(m·K)	0,8 W/(m·K) bis 1,7 W/(m·K)
Mittlerer Brechungsindex	1,50 (bei 589,3 nm)	1,50 (bei 589,3 nm)	1,50 bis 1,55 (bei 589,3 nm)
*) DIN 18008-1 legt den Elastizitätsmodul von Borosilikatglas auf 60.000 N/mm ² fest. **) DIN 18008-1 legt die Querdehnzahl von Kalk-Natronsilikatglas auf 0,23 fest. ***) Allgemein anerkannter Wert, der von der Kantenqualität beeinflusst wird.			

2.2 Flachglas

Die Anwendung von Glas weist eine lange Tradition auf. Natürliches Glas wird früher zur Bearbeitung von Werkzeugen verwendet. Bereits im 5. Jahrtausend vor Christus ist die Glasherstellung vermutlich als zufälliges Nebenprodukt bei der Verhüttung von Kupfer oder beim Brennen von Ton in Mesopotamien entdeckt worden. Seit dem 3. Jahrtausend vor Christus stellen Ägypter und Syrer gezielt Glasschmuck her. Die erste Glasrezeptur⁴¹ und die spätere Erfindung der syrischen Glasmacherpfeife im 1. Jahrhundert vor Christus ermöglichen bereits die Produktion einer Vielzahl von Formen und Gefäßen. Bei römischen Villen in Pompeji und Herculaneum finden Archäologen die ersten Gläser als Raumabschluss mit Abmessungen von bis zu 800 mm auf 800 mm bei geringer Dicke. Verunreinigungen verfärben das Glas teilweise so stark, dass das Material nur wenig transparent erscheint. Aufwendig gestaltete Glasfenster im Mittelalter gehören zu den ausdrucksvollsten und kostbarsten architektonischen Glaselementen und verziern vor allem sakrale Gebäude. Ab etwa dem 17. Jahrhundert ist

⁴¹ Eines der ersten überlieferten Glasrezepturen von etwa 658 vor Christus aus der Tontafelbibliothek des assyrischen Königs Assurbanipal gibt eine Zusammensetzung von 60 Teilen Sand, 180 Teilen Asche aus Meerespflanzen und 5 Teilen Kreide für Glas an.

das Fensterglas im heutigen Sinne bekannt und findet universellen Einsatz in geistlichen und weltlichen Gebäuden. Der wachsende Glasbedarf und die veränderten Anforderungen fordern eine Entwicklung neuartiger Produktionsverfahren. Mit dem Ziehverfahren sowie der kontinuierlichen Weiterentwicklung des Gussglasverfahrens kann hochwertiges verzerrungsfreies Glas für den breiten Einsatz im Bauwesen zur Verfügung gestellt werden. Das seit 1959 eingeführte Floatglasverfahren⁴² automatisiert die Glasherstellung bei gleichbleibender Qualität und planparallelen Oberflächen vollends. Das Verfahren nutzt den physikalischen Effekt der Trennung von zwei untereinander nicht mischbaren Flüssigkeiten mit unterschiedlichem spezifischem Gewicht. Davon ausgehend werden die Basisrohstoffe bei etwa $+1.400\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $+1.600\text{ }^{\circ}\text{C}$ geschmolzen und homogenisiert, bevor das Gemisch weiterverarbeitet wird. Die Glasschmelze fließt in einer Schutzgasatmosphäre auf das flüssige Zinn und schwimmt an der Oberfläche. Zwischen beiden Stoffen bildet sich eine glatte Oberfläche. Sobald die Glasterperatur unterhalb der Glasübergangstemperatur fällt, wird die erstarrte Schmelze vom noch flüssigen Zinn abgezogen und anschließend zur Vermeidung von inneren Spannungen langsam abgekühlt. Anschließend sind ein Zuschnitt und eine Weiterverarbeitung möglich. Das Glas besitzt dabei herstellungsbedingt unterschiedliche Oberflächen. Die Zinnseite ist vollständig glatt, wird aber im Kühlkanal durch die Transportrollen mechanisch beansprucht. Dadurch entstehen Oberflächenschäden im Mikrobereich. Die Anlagengeschwindigkeit beeinflusst die Glasdicke. Ein aufwendiges Schleifen und nachträgliches Polieren wie beim Gussglasverfahren ist nicht mehr nötig. Das Floatverfahren führt zu einer Flachglasherstellung mit geringen Kosten. Moderne Anlagen produzieren mehrere hundert Tonnen Flachglas pro Tag.⁴³ Bild 3 skizziert vereinfacht das Herstellverfahren im Floatprozess.

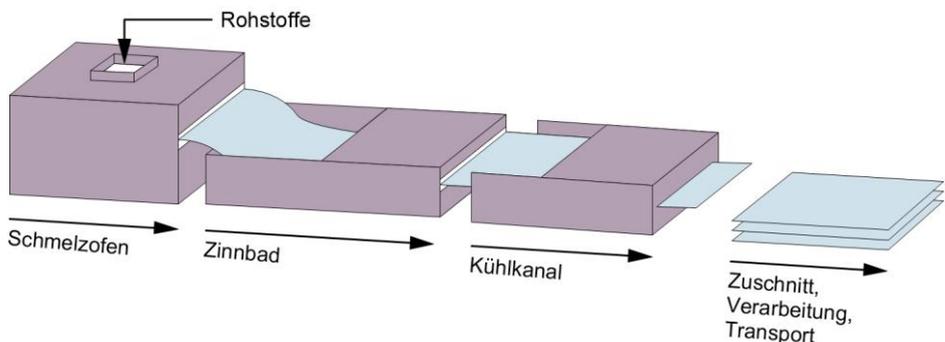


Bild 3

Vereinfachte Darstellung des Floatverfahrens zur Herstellung von Flachglas nach Sedlacek 1999.

⁴² Das Floatverfahren geht aus dem englischen Verb »(to) float« für schwimmen hervor.

⁴³ Vergleiche Schittich 2006, Seite 10 ff.

Das Bauwesen ist, bezogen auf die Anteile am Produktionswert, mit 49,3 % im Jahr 2020 der größte Abnehmer für Glasprodukte in Deutschland.⁴⁴ Floatglas aus Kalk-Natronsilikatglas bildet dabei die Standardglassorte, Floatglas aus Borosilikatglas oder Alumo-Silikatglas werden bei Spezialanwendungen wie Brandschutzverglasungen oder in Kombination mit chemischer Vorspannung eingesetzt. Das Standardformat von Floatglas ist 3.210 mm auf 6.000 mm mit Nenndicken von 2 mm bis 25 mm. Floatglas wird unter anderem bei Fenstern, Schau fenstern, Fassaden, Möbeln oder Spiegeln mit Silberbeschichtungen verwendet. Gleichzeitig dient das Material als Ausgangsprodukt für Weiterverarbeitungen, wie beispielsweise zu vorgespanntem Glas, Verbundsicherheitsglas oder Mehrscheiben-Isolierglas.

Die stetige Entwicklung der Herstellverfahren von Dünnglas mit Nenndicken unterhalb von 2 mm schafft die Voraussetzung für zusätzliche Einsatzgebiete über den bisherigen Verwendungsbereich der Sonderverglasungen hinaus.⁴⁵ Üblicherweise wird Dünnglas als Schutzschicht von Telefonen und Tablets oder als Abdeckung für mikroskopische Untersuchungen verwendet. Die Vorteile liegen vor allem im niedrigen Flächengewicht verbunden mit verbesserten optischen und mechanischen Eigenschaften. Neben dem Microfloat-Verfahren⁴⁶ existieren alternative Herstellverfahren wie das Overflow-Fusion-Verfahren oder das Down-Draw-Verfahren. Beim Overflow-Fusion-Verfahren wird die flüssige Schmelze in eine Rinne gegossen und über die Längsseite beidseitig zum Überlaufen gebracht. Die Glasschmelze läuft an den glatten Außenflächen herunter und verbindet sich zu einem homogenen Glasband, das unten abgezogen wird und senkrecht ohne weitere Beanspruchung auskühlt. Beide Oberflächen des Glases sind ohne nachträgliche mechanische Beanspruchung mit einer hohen Oberflächengüte ausgestattet. Das Down-Draw-Verfahren ermöglicht ebenfalls die direkte Herstellung von Dünnglas mit niedrigen Toleranzgrenzen. Die Schmelze wird über eine Auslaufdüse aus dem Schmelzofen nach unten abgezogen und über mehrere Rollen und einem Kühlkanal auf die gewünschte Dicke gebracht. Unterschiedliche Glastypen und Glasdicken sind bei hoher Materialhomogenität schnell einstellbar. Mit beiden Verfahren lassen sich Gläser ab einer Nenndicke $25 \cdot 10^{-3}$ mm herstellen.⁴⁷

2.3 Festigkeit

Bei der Anwendung eines Werkstoffes im Bauwesen ist die Kenntnis der Bruchfestigkeit entscheidend. Der Materialkennwert beschreibt den Widerstand eines Körpers gegen mechanische Beanspruchung. Dabei wird üblicherweise zwischen theoretischer und praktischer Festigkeit sowie nach Beanspruchungsart in Druck-, Zug- oder Biegezugfestigkeit unterschieden. Als flächiges Bauteil, haupt-

⁴⁴ Vergleiche BV Glas 2020, Seite 18.

⁴⁵ Vergleiche Neugebauer 2017.

⁴⁶ Das Microfloat-Verfahren zur Herstellung von Dünnglas basiert auf dem Floatverfahren.

⁴⁷ Vergleiche Albus 2015.

sächlich unter Biegebeanspruchung entspricht die Biegezugfestigkeit der maßgebenden Festigkeit. Die Kerbempfindlichkeit der zugbeanspruchten Oberfläche beeinflusst den Kennwert. Bedingt durch strukturelle Fehler oder Oberflächendefekte, die während der Herstellung, der nachträglichen Behandlung und während der Verwendung auftreten, reduziert sich die praktische Festigkeit im Vergleich zum theoretischen Wert um ein Vielfaches. Bereits vor dem Bruch findet bei nicht vorgespanntem Flachglas ein subkritisches Risswachstum als Reaktion der atomaren Struktur auf die Einwirkung unterhalb der Festigkeit oder der Umgebungsfuchte ohne Glasbruch statt. Der Riss weitet sich auf. Schließlich tritt sprödes Materialversagen bei geringfügiger Überschreitung der elastischen Grenzverformung schlagartig ohne Vorankündigung auf. Der Bruch wird dabei mit der linear-elastischen Bruchmechanik erklärt.

Die theoretische Festigkeit ergibt sich aus den Bindungskräften zwischen den einzelnen Atomen. Bei der Berechnung liegen keine Oberflächendefekte vor. Der Kennwert wird meistens über die benötigte Arbeit betrachtet, um die beim Bruch entstehende neue Oberfläche zu schaffen. Die Ergebnisse zur Berechnung der theoretischen Festigkeit schwanken, da entweder die Materialeigenschaften nicht genügend bekannt sind oder nur grobe Näherungen verwendet werden, sodass auch die theoretische Festigkeit nur eine Näherung darstellt. Mit dem Ansatz von Orowan wird die theoretische Zugfestigkeit über die atomaren Bindefestigigkeiten ermittelt. Die Festigkeit entspricht der Kraft, die notwendig ist, um entlang einer definierten Fläche die Bindungen aus Silicium (Si) und Sauerstoff (O) im Glas zu zerstören. Damit folgt die nach Gleichung 1 ermittelte Festigkeit von 10.247 N/mm² für reines Quarzglas.⁴⁸

$$\sigma_{th} = \sqrt{\frac{E_G \cdot \gamma_0}{d_0}} = \sqrt{\frac{70.000 \text{ N/mm}^2 \cdot 0,3 \cdot 10^{-6} \text{ Nm/mm}^2}{2 \cdot 10^{-10} \text{ m}}} \\ = 10.247 \text{ N/mm}^2$$

Gleichung 1

Alternativ wird unter Annahme eines ebenen Spannungszustandes mit der Griffith'schen Gleichung die erforderliche Arbeit betrachtet, um eine nach dem Bruch entstehende neue Oberfläche zu bilden.⁴⁹ Ausgangspunkt ist die Annahme, dass im unendlich ausgedehnten Glas mikroskopisch kleine Risse vorhanden sind. Am Rissgrund bilden sich Spannungsspitzen. Bei einem vom Rissgrund ausgehenden Bruch entspricht die dort wirkende Spannung der theoretischen Festigkeit. Zur Berechnung der Maximalspannung wird die Rissbreite dem Ionenabstand gleichgesetzt. Die theoretische Festigkeit beträgt etwa 11.562 N/mm² nach Gleichung 2.

⁴⁸ Vergleiche Orowan 1934 und Petzold 1990, Seite 35.

⁴⁹ Vergleiche Griffith 1921.

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{th}} &= \sqrt{\frac{4 \cdot E_G \cdot \gamma_0}{\pi \cdot d_0}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 70.000 \text{ N/mm}^2 \cdot 0,3 \cdot 10^{-6} \text{ Nm/mm}^2}{\pi \cdot 2 \cdot 10^{-10} \text{ m}}} \\ &= 11.562 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

Gleichung 2

Zusätzliche Komponenten im Quarzglas reduzieren die Festigkeit, da Verbindungen vorliegen, die bei geringerer Beanspruchung bereits zerstört werden. Silikatglas oder Mehrkomponentenglas besitzen durch Einlagerungen mit geringeren Bindekräften niedrigere theoretische Festigkeiten.

Strukturelle Fehler im Material, produktionsbedingte Oberflächenbearbeitung und mechanische Einwirkungen schädigen die Glasoberfläche. Dadurch bilden sich Defekte, Risse und Kerben an der Oberfläche aus, die die Struktur schwächen. Zugspannungen führen am Rissgrund zu Spannungsspitzen und zur Ausbreitung des Risses bis zum schlagartigen Versagen, dem Bruch.

Bei gewöhnlichen Bedingungen liegt die praktische Festigkeit von Floatglas zwischen 30 N/mm^2 und 100 N/mm^2 . Die Ergebnisse zur Prüfung der charakteristischen Glasfestigkeit geben somit eine Aussage zur Schwäche der Oberfläche.⁵⁰ Bei der Festigkeitsbestimmung wird der eigentliche Wert nicht bestimmt, sondern die Oberflächendefekte, die schwerwiegender als innenliegende Defekte sind, untersucht. Dabei nimmt die Festigkeit bei abnehmenden Abmessungen zu und nähert sich der theoretischen Festigkeit an. Insgesamt befinden sich bis zu 50.000 Fehlstellen pro cm^2 .⁵¹ Bild 4 zeigt die Zugfestigkeit von Glas in Abhängigkeit der wirksamen Risstiefe.

⁵⁰ Vergleiche Littleton 1923.

⁵¹ Vergleiche Scholze 1988, Seite 243.

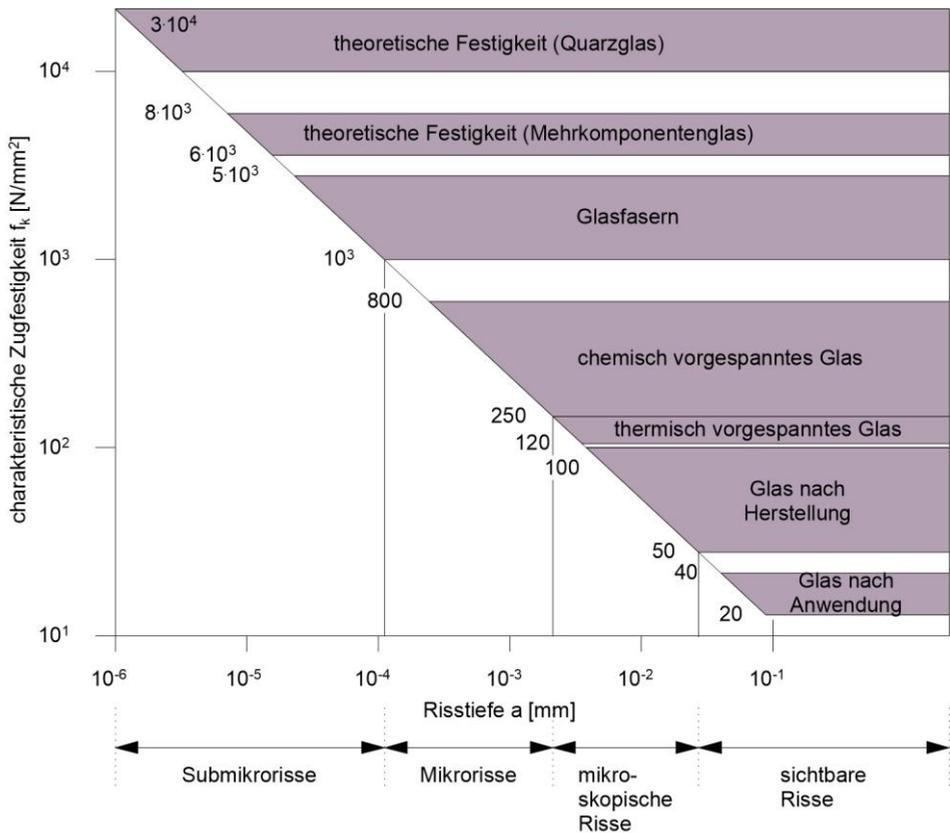


Bild 4

Zugfestigkeit von Glas in Abhängigkeit der wirksamen Risstiefe nach Petzold 1990.

Die charakteristische Festigkeit wird mit normativen Prüfverfahren ermittelt. DIN EN 1288-3 stellt für Glas im Bauwesen ein Prüfverfahren zur Ermittlung der einachsialen Biegezugfestigkeit zur Verfügung. Das Vierschneiden-Verfahren berücksichtigt die niedrigere Glaskantenfestigkeit und ist eine Prüfung im einachsialen Spannungszustand. Der Versuch sieht einen breiten Balken vor, der im Mittelbereich in einer Richtung gleichförmig beansprucht ist und bei dem sowohl die Fläche als auch die Kanten unter maximaler Spannung stehen. Der 1.100 mm lange und 360 mm breite Prüfkörper liegt mittig auf zwei Auflagerrollen auf und wird symmetrisch zur Mittelachse mit einer Kraft bei einer Geschwindigkeit von 2 N/(mm²·s) belastet. Dadurch entsteht ein konstantes Biegemoment zwischen den Biegerollen und erzeugt an der Glasunterseite eine Biegezugspannung. Eine Klebefolie zur Ermittlung des Bruchsprungs ist auf der den Biegerollen zugewandten Seiten aufgebracht. Bild 5 zeigt den Versuchsaufbau.

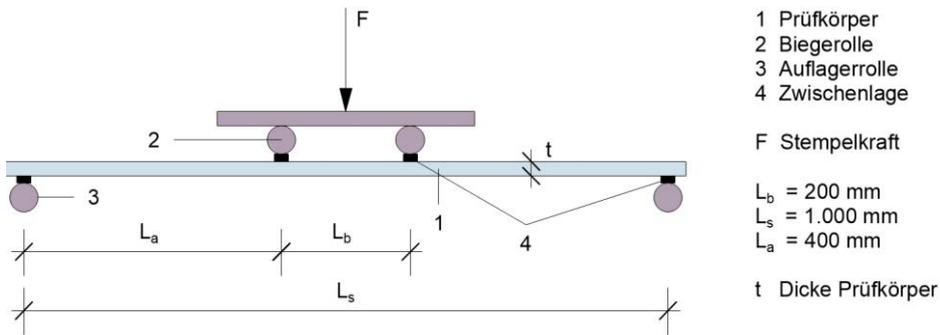


Bild 5

Vierschneiden-Verfahren nach DIN EN 1288-3.

Ein Versagen tritt theoretisch im Bereich der größten Biegezugspannung auf, kann aber auch außerhalb des Bereichs zwischen den Biegerollen durch kritische Oberflächendefekte entstehen. Für eine Auswertung muss der Bruchsprung allerdings zwischen den Biegerollen liegen. Die Ergebnisse lassen sich für Prüfkörper mit Verformungen kleiner als die Realdicke annähernd mit der linearen Biegetheorie nach Bernoulli berechnen. Bei schmalen Balken treten senkrecht zur Längsachse keine Spannungen auf. Für breite Balken gilt diese Annahme nicht und der Poisson-Effekt⁵², mit dem ein zusätzliches Spannungsfeld senkrecht zur Längsrichtung entsteht, ist zu berücksichtigen. Dadurch bildet sich eine Gegenbiegung des Balkens, die Spannungen verlaufen nicht mehr gleichförmig über die Breite. Infolgedessen erhöhen sich die Kantenspannungen und die Spannungen in der Mittelachse verringern sich.⁵³ Liegt eine Kenntnis über die genaue Lage des Bruchsprungs vor, so wird die dazugehörige lokale Biegezugspannung analytisch als gewichteter Mittelwert in Abhängigkeit der Durchbiegung in Plattenmitte bestimmt.

Der Doppelring-Biegeversuch mit großen Prüfflächen oder mit kleinen Prüfflächen beschreibt die Festigkeitsermittlung bei einem zweiachsialen Spannungszustand ohne Kanteneinfluss. Dabei steht eine allseitig linienförmig gelagerte, kreisförmige Fläche unter einer hohen Biegebeanspruchung. Ein Kanteneinfluss auf die Festigkeit ist aufgrund der konzentrischen Versuchsanordnung nicht gegeben. DIN EN 1288-2 beschreibt den Doppelring-Biegeversuch für große Prüfflächen mit einem Radius von 300 mm. Ein quadratischer Prüfkörper mit der Kantenlänge von 1.000 mm und einer Mindestnennstärke von 3 mm wird dazu mit einem zum Stützring konzentrisch angebrachten Lastring belastet. Ein im Verhältnis zur Prüfkraft stehender Gasdruck beansprucht zusätzlich die durch den Lastring begrenzte Fläche. Die Belastungsgeschwindigkeit beträgt $2 \text{ N}/(\text{mm}^2 \cdot \text{s})$. Dadurch entsteht ein hinreichend homogenes Zugspannungsfeld an der konvex gebogenen Oberfläche innerhalb des Lastringes. Die Richtung möglicher Ober-

⁵² Beim Poisson-Effekt entsteht über die Querkontraktion eine Veränderung der Dehnung quer zur Belastungsrichtung.

⁵³ Vergleiche Blank 1993.

flächendefekte beeinflussen somit nicht das Ergebnis. Bild 6 zeigt den Doppelring-Biegeversuch mit großer Prüffläche und einer Belastung aus der Ringlast mit zusätzlichem Gasdruck.

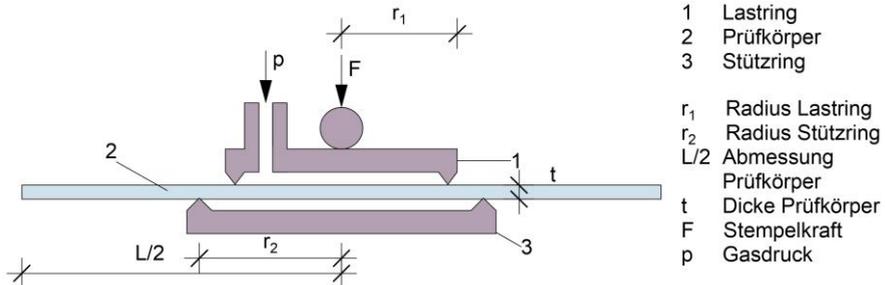


Bild 6
Doppelring-Biegeversuch mit großer Prüffläche nach DIN EN 1288-2.

DIN EN 1288-5 gibt mit dem Doppelring-Biegeversuch mit kleinen Prüfflächen ein alternatives Verfahren für die Bestimmung der Biegefestigkeit an. Hierzu unterliegt ebenfalls ein kreisförmig begrenztes Flächenstück des Prüfkörpers einer maximalen Beanspruchung. Im Gegensatz zu dem Verfahren mit großer Prüffläche ist kein zusätzlicher Gasdruck notwendig, um einen ausreichend homogenen zweiachsialen Spannungszustand zu erzeugen. Bild 7 zeigt den Versuchsaufbau.

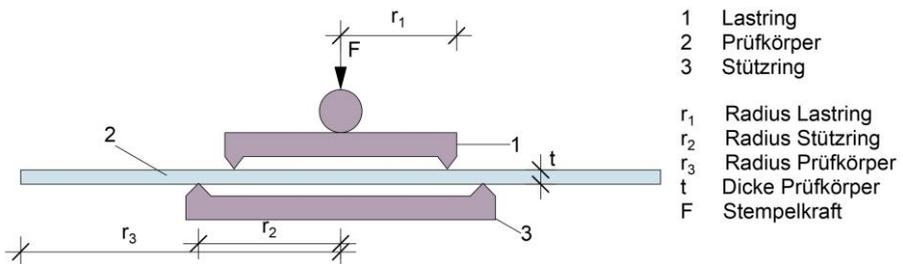


Bild 7
Doppelring-Biegeversuch mit kleiner Prüffläche nach DIN EN 1288-5.

In Abhängigkeit der Glassorte ergeben sich mit den Prüfmethode der DIN EN 1288 die in Tabelle 2 angegebenen charakteristischen Biegezugfestigkeiten für Kalk-Natronsilikatglas, Borosilikatglas und Alumo-Silikatglas als Floatglas. Nach der Herstellung zeigen die Glassorten die gleiche Festigkeit. Unterschiede in der Festigkeit ergeben sich erst nach einer weiteren Bearbeitung wie beispielsweise einer Vorspannung.

Tabelle 2

Charakteristische Biegezugfestigkeiten unterschiedlicher Glassorten für herkömmliches Flachglas.

Glassorte	Norm	Charakteristische Biegezugfestigkeit
Kalk-Natronsilikatglas	DIN EN 572-1	45 N/mm ²
Borosilikatglas	DIN EN 1748-1-1	45 N/mm ²
Alumo-Silikatglas	DIN EN 15681-1	45 N/mm ²

Bei einer Anwendung des Vierschneiden-Verfahrens zur Bestimmung der einachsialen Biegezugfestigkeit von Dünnglas treten große Verformungen des Prüfkörpers in Plattenmitte auf. Dadurch entstehen neben Vertikal- auch Horizontalkräfte, die vor allem das Biegemoment und somit die Biegezugspannung in Plattenmitte beeinflussen. Die Auswertung nach DIN EN 1288-3 basiert auf einem analytisch-linearen Zusammenhang. Bereits bei Glastafeln mit einer Nenndicke von 2,00 mm beziehungsweise 0,85 mm zeigen sich unter Eigenlast im Einbauzustand resultierende Durchbiegungen größer als die Glasdicke. Dadurch tritt ein geometrisch nichtlineares Tragverhalten auf. Große Verformungen und Verdrehungen bei kleinen Dehnungen zeigen einen Einfluss auf das Trag- und Verformungsverhalten. Eine zusätzliche Belastung im in Bild 8 dargestellten System erhöht die Verformung und den geometrisch nichtlinearen Traganteil.

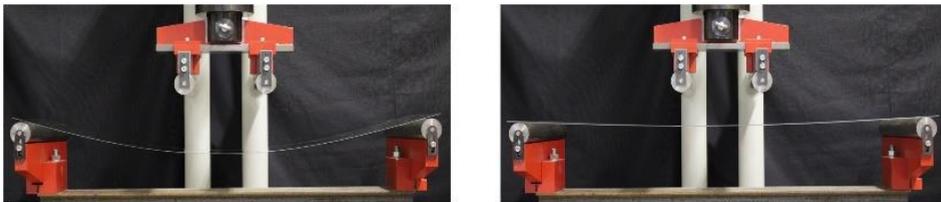


Bild 8

Durchbiegung einer monolithischen Dünnglastafel mit einer Spannweite von 1.000 mm infolge Eigenlast. Die Nenndicke beträgt 0,85 mm (links) und 2,00 mm (rechts).

Analog zur einachsialen Prüfung der Biegezugfestigkeit ergeben sich für Dünnglas bei den zweiachsialen Prüfmethoden große Verformungen und somit geometrisch nichtlineares Tragverhalten. Im Doppelring-Biegeversuch treten mit wachsenden Durchbiegungen Spannungsspitzen unter dem Lastring und große Verformungen sowie Membranspannungen auf. Der geometrisch nichtlineare Effekt bestimmt das Tragverhalten.⁵⁴

Auftretende große Verformungen ermöglichen keine Bestimmung der ein- und zweiachsialen Dünnglasfestigkeit mit den gängigen Verfahren, insbesondere bei einer chemischen Vorspannung.⁵⁵ Alternative Prüfmethoden werden zurzeit erforscht. Vielversprechende Ansätze sind mit der Bestimmung der einachsialen

⁵⁴ Vergleiche Wilcox 2013 und Neugebauer 2018.

⁵⁵ Bei einer chemischen Vorspannung wird über einen Ionenaustausch oberflächennaher Atome eine hohe Oberflächendruckspannung aufgebaut. Vergleiche Kapitel 2.5.

Biegezugfestigkeit bereits veröffentlicht. Der Vierpunkt-Biegeversuch mit reduzierten Abmessungen ist bei einer Spannweite von 800 mm für 2,0 mm bis 2,5 mm dünnes Glas anwendbar. Je dünner die Glasnennstärke, desto geringer die Spannweite. Die Herstellung kleiner Prüfkörper, der Aufbau der Prüfeinrichtung sowie die Durchführung der Prüfungen sind dadurch nur bedingt umsetzbar.⁵⁶ Ein multipler Vierpunkt-Biegeversuch ergänzt bei der Standardgeometrie des Prüfkörpers weitere Biege- und Auflagerrollen. Dadurch entsteht eine große unter Zugspannung stehende Glasoberfläche. Die Biegezugspannungen treten allerdings sowohl auf der oberen als auch auf der unteren Glasoberfläche mit einem Spannungswechsel zwischen Auflager- und Lastrolle auf.⁵⁷ Beim Druckversuch mit gelenkiger Lagerung analog zu Eulerfall 2 wird der Prüfkörper bis zum Bruch belastet und durch die auftretende Exzentrizität das resultierende Biegemoment analytisch berechnet. Experimentelle Untersuchungen zeigen allerdings ein unterschiedliches Spannungsniveau entlang der Mittelachse. Dadurch ist der homogene Bereich nicht eindeutig bestimmbar und die Festigkeit nur lokal auswertbar. Zusätzlich hängt das Ergebnis stark von der Messung der Verformung und den Materialeigenschaften ab.⁵⁸ Weitere Prüfverfahren wie ein Vierpunkt-Biegeversuch mit Biegung um die starke Achse untersucht die Kantenfestigkeit einer Dünnglastafel. Allerdings erschweren Effekte wie eine Instabilität infolge Beulen und eine aufwendigere numerische Modellierung die Auswertung. In einem Zugversuch ist der Prüfkörper über eine Klebefuge mit Metallplatten verbunden, die den Anschluss zur Prüfmaschine sicherstellen. Vorteilhaft sind der geringe Einfluss der Nennstärke auf das Verfahren, der große Anteil der unter Zug stehenden Fläche, ein lineareres Tragverhalten und über die Klebeverbindung eine homogene Belastungsübertragung. Allerdings sind weitere Untersuchungen und Validierungen auch in Hinblick auf die Kraftübertragung sowie die Wahl und Nichtlinearität des Klebstoffes notwendig.⁵⁹ Die Lastaufbringung im Biegeversuch wird mit einem an zwei gegenüberliegenden Seiten entgegengesetzt drehenden Biegemoment direkt im Auflager aufgebracht. Bei gleichzeitiger kontinuierlicher Verringerung des Auflagerabstandes entsteht eine reine Biegebeanspruchung mit konstanter Spannungsverteilung auf nahezu der gesamten Glasoberfläche. Im Auflagerbereich besteht die Möglichkeit von Spannungskonzentrationen, die bruchauslösend sein können. Der Festigkeitswert stellt dadurch eine untere Grenze der Glasfestigkeit dar.⁶⁰ Mit einer Stufenwalze ist eine Vorrichtung zur Bestimmung der Bruchfestigkeit des Glasrandes dünner Glastafeln bis zu einer Nennstärke von 1 mm patentiert. Dabei besteht die Stufenwalze aus unterschiedlich großen Walzen mit definierter Krümmung und Radius. Die Glastafel wird ausgehend vom größten Radius Stufe für Stufe an die Walze bis zum Bruch gebogen. Dadurch entsteht eine Biegung entlang eines freien Randes, der in Abhängigkeit des Biegeradius einer definierten Zugspannung entspricht.⁶¹

⁵⁶ Vergleiche Siebert 2013 und Maniatis 2016.

⁵⁷ Vergleiche Siebert 2013.

⁵⁸ Vergleiche Neugebauer 2018 und Maniatis 2016.

⁵⁹ Vergleiche Oliveira Santos 2018.

⁶⁰ Vergleiche Neugebauer 2016, Neugebauer 2018 und Oliveira Santos 2018.

⁶¹ Vergleiche Heiß-Choquet 2016.

Eine Möglichkeit zur Bestimmung der Biegefestigkeit von Dünnglastafeln unter Berücksichtigung der Glaskante ist der Klemmbieger. Dabei erfährt eine an beiden kurzen Seiten eingeklemmte, rechteckige Glastafel eine zunehmende Krümmung bis zum Bruch. Die Krümmung ist entlang der langen Seite konstant. Anschließend wird die Biegefestigkeit über den Krümmungsradius berechnet. In einem Ringversuch mit unterschiedlich entwickelten Prüfgeräten bei gleicher Prüfkörpergeometrie und Nenndicke ist eine zufriedenstellende Übereinstimmung der Ergebnisse nachgewiesen. Allerdings erfordert das neue Prüfverfahren weitere Diskussion und Forschung über unterschiedliche Prüfkörpergeometrie, um eine statistische Verteilung über den Einfluss der Oberflächendefekte zu erhalten, und den Poisson-Effekt über numerischer Simulation und experimenteller Bestimmung zu berücksichtigen.⁶²

Alternative Prüfmethode zur zweiachsialen Biegung von Dünnglas auch mit chemischer Vorspannung zur Bestimmung der charakteristischen Festigkeit werden zurzeit erforscht, sind aber noch nicht abschließend geklärt. In Anlehnung an den Doppelring-Biegeversuch wird die Lasteinleitung nicht mehr über den Lastring, sondern ein Druckkissen aus weichem Elastomer auf den Prüfkörper aufgebracht. In der numerischen Simulation bildet sich ein konstanter Spannungsverlauf unterhalb des Druckkissens aus, der allerdings abhängig vom physikalisch nichtlinearem Materialverhalten des Elastomers ist.⁶³ Ein alternatives Prüfverfahren zur Bestimmung der Biegezugfestigkeit von Dünnglas basiert auf dem Vier-Kugelversuch. Ursprünglich für Untersuchungen an Hochleistungskeramiken entwickelt, zeigt sich auch die grundsätzliche Übertragung auf Glas.⁶⁴ Am Lehrstuhl für Tragkonstruktion der Universität Siegen wird die Bestimmung der zweiachsialen Dünnglasfestigkeit mit dem Vier-Kugelversuch betrachtet.

Zur Bestimmung der einachsialen Biegezugfestigkeit von Dünnglas auch mit chemischer Vorspannung stehen mit einem Stufenwalzen-Biegeversuch und einem Klemmbieger unterschiedliche Verfahren zur Bestimmung der charakteristischen Festigkeit zur Verfügung. Die Ermittlung der zweiachsialen Biegezugfestigkeit von Dünnglas zeigt innovative und vielversprechende Ansätze, ist aber zurzeit nicht abschließend betrachtet. Die charakteristische Festigkeit von Dünnglas wird bei dem Spannungsnachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) benötigt. Neben dem Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) erfolgt eine Beschränkung der Verformung über den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZT). In der Regel ist im Glasbau eine Begrenzung der Verformung auf 1/100 der maßgebenden Spannweite vorgegeben. Chemisch vorgespanntes Dünnglas weist eine geringe Querschnittsteifigkeit mit großen Verformungen bei geringer Last auf, gleichzeitig aber auch eine hohe charakteristische Festigkeit. Dadurch wird bei einer Bemessung die Verformungsbegrenzung entscheidend. Die vorhandene Durchbiegung mit der Querschnittsteifigkeit begrenzt die Spannweite, Glasnenndicke und

⁶² Vergleiche Zaccaria 2022.

⁶³ Vergleiche Blaumeiser 2016 und Neugebauer 2018.

⁶⁴ Vergleiche Danzer 2002 und Danzer 2009.

die Anwendung von Dünnglas. Die Spannung in einer chemisch vorgespannten Glastafel spielt daher zunächst eine untergeordnete Rolle.

2.4 Bruchmechanik

Risse, Fehlstellen und Defekte in der unter Zug stehenden Oberfläche, hervorgerufen durch Bearbeitung, Herstellung oder Beanspruchung, prägen die Glasfestigkeit. Diese ziehen häufig ein vorzeitiges schlagartiges Versagen vor Erreichen der theoretischen Festigkeit nach sich. Spannungsspitzen können über plastische Umverteilung wegen der geringen Bruchdehnung von 0,1 % nicht abgebaut werden.⁶⁵

Bild 9 zeigt das Spannungs-Dehnungs-Diagramm von Glas im Vergleich zum Baustoff Stahl. Während sich bei dem Metall vor dem Versagen ein plastisches Verhalten ausbildet, bricht das Glas, ohne dass das Versagen sich durch eine Dehnungszunahme bei gleichbleibender Belastung ankündigt, spontan. Die Bruchmechanik behandelt das Versagen rissbehafteter Werkstoffe und beschreibt quantitativ die Rissausbreitung sowie den Rissfortschritt. Speziell die linear-elastische Bruchmechanik gibt für spröde Werkstoffe mit linear-elastischem Materialverhalten wie für Glas eine Berechnungsmethode im Risszustand.

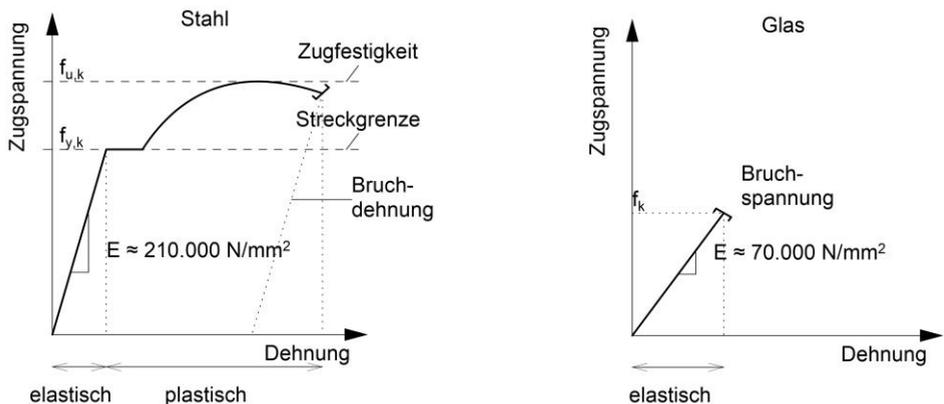


Bild 9

Qualitativer Verlauf des Spannungs-Dehnungs-Diagramms von Stahl im Vergleich zu Glas.

Ein Riss ist normalerweise ein komplexer Vorgang. Allerdings lässt sich ein Riss grundsätzlich aus der Überlagerung dreier Modi wie in Bild 10 beschreiben. In Modus I tritt die größte Normalspannung senkrecht zu den Rissflächen auf. Dabei schließen Druckspannungen den Riss, eine Kraftübertragung erfolgt weiterhin. Zugspannungen öffnen den Riss, die Rissflanken entfernen sich voneinander. Modus II und Modus III spielen bei biegebeanspruchtem Glas eine

⁶⁵ Vergleiche Petzold 1990, Seite 35.

untergeordnete Rolle. Beide Modi beschreiben unterschiedlich orientierte Schubbeanspruchungen, ohne den Riss durch Öffnung zu vergrößern. Unabhängig der Rissöffnungsart richtet sich der Riss immer senkrecht zur größten Hauptzugspannung nach Modus I aus. Somit werden die im Flachglas vorliegenden Spannungszustände mit Modus I ausreichend genau beschrieben.⁶⁶

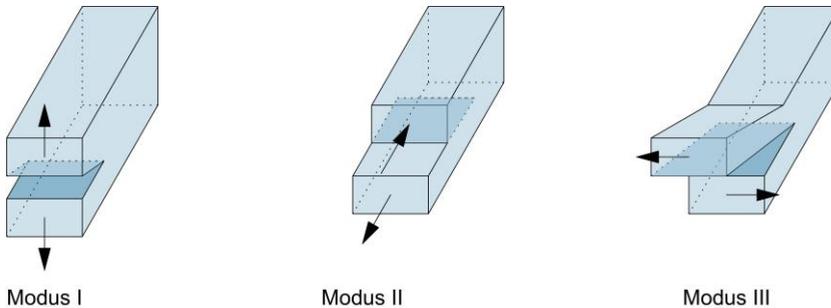


Bild 10

Rissöffnungsarten für Glas nach Schneider 2016.

Modus I Normalbeanspruchung; symmetrische Rissöffnung senkrecht zu den Rissoberflächen

Modus II Längsscherbeanspruchung; asymmetrische Rissöffnung

Modus III Querscherbeanspruchung; asymmetrische Rissöffnung

Inglis beschreibt 1913 die Spannungskonzentration von gleichförmig belasteten Glastafeln.⁶⁷ Bei einem innenliegenden elliptischen Riss in einer unendlich ausgedehnten Scheibe nach Bild 11 tritt die maximale Spannungskonzentration unter einer gleichförmig verteilten Belastung am Ende der längeren Ellipsenachse nach Gleichung 3 auf. Dabei ist vorausgesetzt, dass das Halbachsenverhältnis d/a mit $d \ll a$ sehr klein und die Ellipse eng ist. Die Bruchspannung ergibt sich, wenn die theoretische Festigkeit des Materials erreicht ist und dabei der Grenzfall $d \rightarrow 0$ eintritt.⁶⁸ Die Ellipse wandelt sich in einen Riss der Länge $2a$, die Spannung am Rissgrund wächst ins Unendliche an.

⁶⁶ Vergleiche Gross 2016, Seite 69.

⁶⁷ Vergleiche Inglis 1913.

⁶⁸ Der Grenzfall $d \rightarrow 0$ ist eine theoretische Annahme und wird nie erreicht. Der minimale Wert liegt beim kleinsten Atomradius.

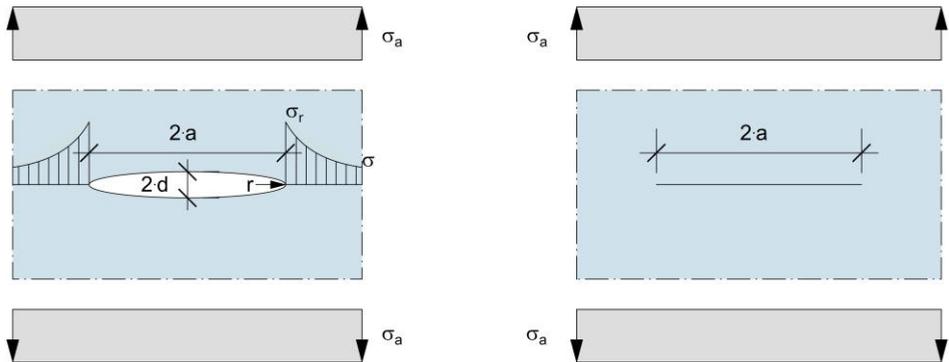


Bild 11

Elliptischer Riss mit quantitativem Spannungsverlauf (links) und ein Riss der Länge $2a$ (rechts) in einer unendlich ausgedehnten Scheibe unter Zugbelastung nach Schneider 2016.

$$\frac{\sigma_r}{\sigma_a} = 2 \cdot \sqrt{\frac{a}{r}}$$

Gleichung 3

$$\frac{\sigma_{th}}{\sigma_f} = 2 \cdot \sqrt{\frac{a}{r_{max}}} \quad \text{oder} \quad \sigma_f = \frac{\sigma_{th}}{2} \cdot \sqrt{\frac{r_{max}}{a}}$$

Gleichung 4

Nach Inglis ist für die Festigkeit die Defektgröße entscheidend. Griffith entwickelt auf Basis einer Energiebilanz das Bruchkriterium von Glas.⁶⁹ Mit Irwin und der Einführung des K-Konzeptes bietet sich eine Anwendung an.⁷⁰ Die Spannungsintensität K beschreibt den Zustand an der Risspitze als Maß für die Belastung. Für spröde Materialien lässt sich das Versagen nach der Hauptspannungshypothese ermitteln. Der Bruch entsteht, wenn die Spannungsintensität einen kritischen Wert einnimmt. Das Risswachstum tritt dann ohne zusätzliche äußere Spannungen mit maximaler Bruchgeschwindigkeit auf. In Abhängigkeit der Rissöffnungsart stellt sich der kritische Spannungsintensitätsfaktor ein, der experimentell bestimmt wird und als Bruchzähigkeit einen materialspezifischen Grenzwert darstellt.

In einem unendlich ausgedehnten Material befindet sich nach Bild 11 (rechts) ein innenliegender Riss der Länge $2a$ unter einer Beanspruchung in Modus I. Für die Spannungsintensität wird ein Riss am halbusendlichen Körper betrachtet. Dadurch entsteht ein Riss der Tiefe a . Mit Bild 12 stellt sich somit für eine konstante Beanspruchung in inerter Umgebungsbedingung mit einer Risstiefe kleiner als die Bauteilabmessungen ein Spannungsintensitätsfaktor nach Gleichung 5 ein. In Abhängigkeit der Geometrie müssen unterschiedliche Korrekturfaktoren berücksichtigt werden.

⁶⁹ Vergleiche Griffith 1921.

⁷⁰ Vergleiche Irwin 1957.

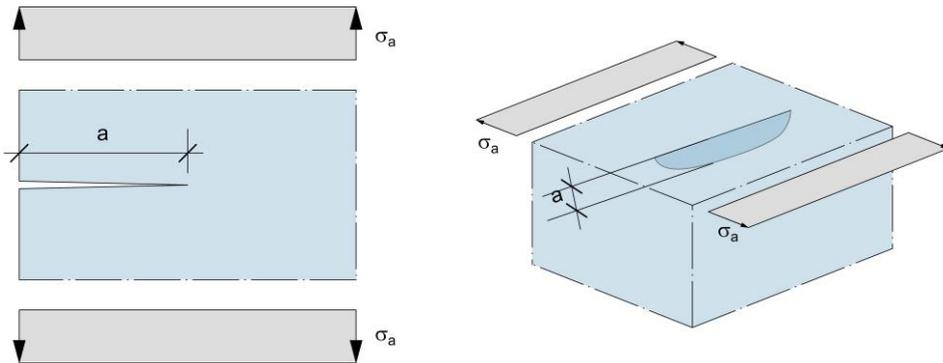


Bild 12

Langer Oberflächenriss am halbrunden Körper mit einer Beanspruchung im Modus I nach Schneider 2016.

$$K_I = \sigma_a \cdot Y \cdot \sqrt{\pi \cdot a}$$

Gleichung 5

Der übliche Riss im Glasbau als langer Oberflächenriss am halbrunden Körper unter gleichmäßiger Belastung zeigt einen Geometriefaktor von 1,1215.⁷¹ Im Bruchfall wird der Spannungsintensitätsfaktor K_I zur Bruchzähigkeit K_{Ic} für Modus I. Die Einwirkung entspricht dann exakt der Glasfestigkeit und der Riss breitet sich bei Überschreitung aus. Die Bruchzähigkeit für Kalk-Natronsilikatglas im Modus I wird mit Werten zwischen $0,72 \text{ Nmm}^{-2}\text{m}^{1/2}$ bis $0,82 \text{ Nmm}^{-2}\text{m}^{1/2}$ angegeben.⁷²

2.5 Vorspannung

Zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften, besonders der Festigkeit, stehen der Glasindustrie unterschiedliche Ansätze zur Verfügung. Beispielsweise kann die Glasschmelze durch ein Glas mit niedrigem Ausdehnungskoeffizienten in dünner Schicht übergossen oder mit dem Auftragen siliciumorganischer Verbindungen gehärtet werden. Üblicherweise wird allerdings ein thermischer oder chemischer Vorspannprozess durchgeführt.

Bereits seit den 1930er Jahren wird Glas planmäßig thermisch vorgespannt und im Fahrzeugbau verwendet. Im vorgespannten Glas treten an der Glasoberfläche künstlich erzeugte Druckspannungen und aus Gleichgewichtsgründen entsprechend Zugspannungen im Glaskern auf.⁷³ Sowohl der chemische als auch der thermische Vorspannprozess verbessern die mechanische Festigkeit ebenso wie die Temperaturwechselbeständigkeit. Mögliche Oberflächendefekte werden dabei überdrückt. Erst nach dem Abbau der Druckspannungen wandelt sich das

⁷¹ Weitere Geometriefaktoren sind in Seidel 2018, Seite 394 ff. zu finden.

⁷² Vergleiche Schneider 2016, Seite 34.

⁷³ Vergleiche DIN 1259-1.

subkritischen Risswachstum in ein kritisches Risswachstum und das Glas bricht. Die Vorspanntiefe und der Eigenspannungszustand sind abhängig vom Vorspannverfahren. Bei chemisch vorgespanntem Glas beträgt die Vorspanntiefe bis zu 0,1 mm, bei thermisch vorgespanntem Glas bis zu etwa 20 % der Glasdicke.

Bild 13 zeigt die prinzipielle Wirkung der Druckvorspannung im Vergleich zu nicht vorgespanntem Glas. Im unbelasteten Zustand befinden sich mikroskopische Oberflächenschäden im Glas. Wird eine Glastafel auf Biegung durch ein positives Biegemoment belastet, entstehen Druckspannungen an der Oberseite und Zugspannungen an der Unterseite. Beide Spannungen wirken senkrecht zum Riss. Druckspannungen schließen und Zugspannungen öffnen den Riss. Infolge einer Vorspannung bilden sich Druckspannungen an beiden Oberflächen, die den Defekt überdrücken. Bei Beanspruchung durch ein Biegemoment wird zuerst die an der Oberfläche aufgebrachte Druckspannung abgebaut, bevor Zugspannungen den Riss anwachsen lassen.

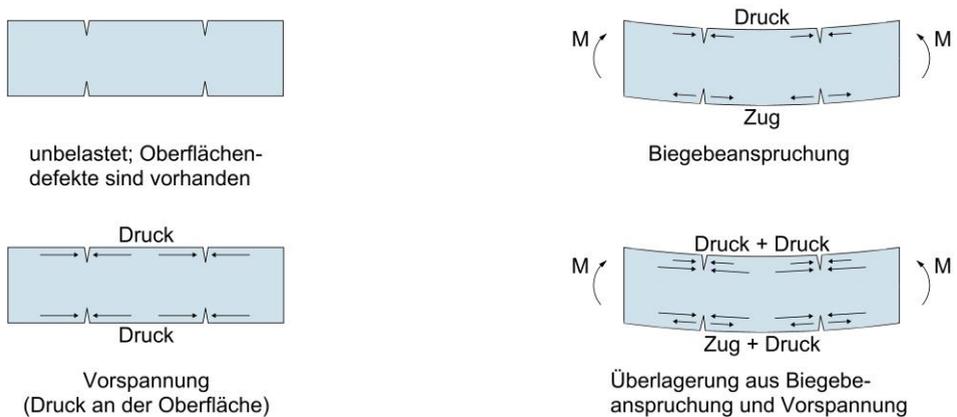


Bild 13
Prinzip der Druckvorspannung an der Glasoberfläche.

Bei der thermischen Vorspannung wird das Flachglas auf eine festgelegte Temperatur etwa $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$ über der Glasübergangstemperatur erhitzt. Dabei befindet sich der gesamte Querschnitt in einem niedrigviskosen Zustand. Bei der anschließenden schlagartigen Abkühlung auf Raumtemperatur erstarrt der oberflächennahe Bereich zuerst. Durch die unterschiedlichen thermischen Ausdehnungen bilden sich im Kern Zugspannungen und an der Oberfläche Druckspannungen. Ein über die Querschnittsdicke nahezu parabelförmiger Spannungsverlauf entsteht. Die Abkühlgeschwindigkeit und der Wärmeübergangskoeffizient zwischen Glas und abkühlendem Medium beeinflussen maßgeblich die Höhe der Vorspannung. Eine nachträgliche Bearbeitung ist nach dem Vorspannen nicht mehr möglich. Eine Berücksichtigung von Bohrungen, Kantenbearbeitungen und Zuschnitt sollte im Vorfeld erfolgen. Thermisch vorgespanntes Glas lässt sich in Abhängigkeit des Vorspanngrades in teilvorgespanntes Glas und Einscheibensicherheits-

glas unterschieden. Einscheibensicherheitsglas⁷⁴ ist ein thermisch voll vorgespanntes Flachglas. Floatglas wird nach der Herstellung erneut erhitzt und anschließend schnell abgekühlt. Dadurch erreicht Einscheibensicherheitsglas bis um das Dreifache verbesserte Festigkeitswerte im Vergleich zu Floatglas. Teilvorgespanntes Glas⁷⁵ ist ebenfalls ein thermisch vorgespanntes Flachglas. Dadurch erhöht sich die Festigkeit über die von Floatglas, aber unterhalb der von Einscheibensicherheitsglas. Der Begriff »teilvorgespannt« kann verwirrend sein, da die gesamte Tafel und nicht nur Teile vorgespannt sind. Deshalb etabliert sich neben dem normativen Begriff auch der Name »thermisch verfestigtes Glas«. Die Abkühlgeschwindigkeit erfolgt dabei wesentlich langsamer als bei Einscheibensicherheitsglas.

Die chemische Vorspannung erzeugt ebenfalls eine oberflächennahe Druckspannung und im Kern eine Zugspannung. Der Spannungsaufbau resultiert aus einem Ionenaustausch der an der Glasoberfläche befindlichen Alkali-Ionen. Bei etwa +450 °C wird das Flachglas in ein Salzbad gelegt. Die kleineren Natriumionen im Glas werden durch größere Ionen, beispielsweise durch Kaliumionen, ersetzt. Bild 14 zeigt das Prinzip des temperatur- und zeitabhängigen chemischen Vorspannprozesses für Kalk-Natronsilikatglas. Mit zunehmender Verweildauer in der Salzschmelze nehmen die Oberflächendruckspannungen ab und die Druckzone zu. Das Ausgangsprodukt darf während des Vorspannprozesses nicht in den viskosen Zustand gelangen, da sonst kein Spannungsaufbau stattfinden kann.

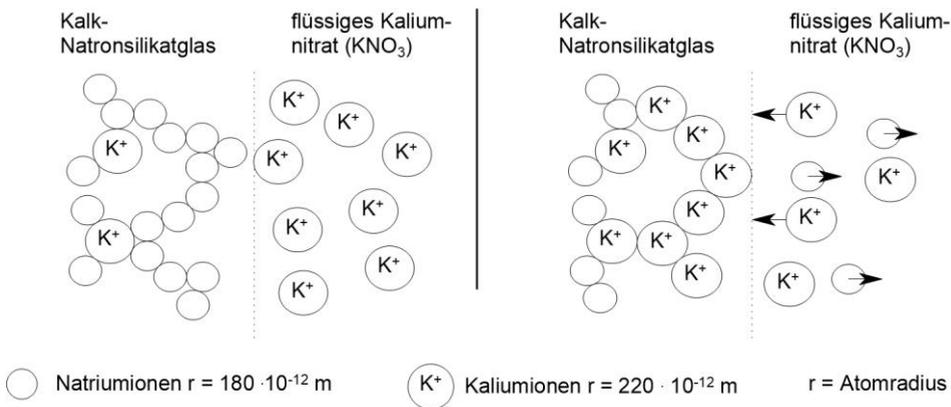


Bild 14
Prinzipielle Darstellung des Ionenaustausches bei chemisch vorgespanntem Kalk-Natronsilikatglas.

Aufgrund der größeren Differenz des Ionenradius von Lithium zu Kalium als von Natrium zu Kalium eignet sich Alumo-Silikatglas besonders für ein chemisches

⁷⁴ Vergleiche DIN EN 12150-1.

⁷⁵ Vergleiche DIN EN 1863-1.

Vorspannen.⁷⁶ Chemisch vorgespanntes Alumo-Silikatglas weist eine hohe Widerstandsfähigkeit gegenüber mechanischen und chemischen Beanspruchungen auf. Die Spezialgläser erhalten über die chemische Vorspannung eine sehr hohe Schlag- und Stoßfestigkeit sowie Temperaturwechselbeständigkeit. Allerdings besteht die Gefahr, dass tiefe Oberflächendefekte die Biegefestigkeit negativ beeinflussen und die chemische Vorspannung auch wegen der geringen Vorspanntiefe nicht den gesamten Riss überdrücken kann. Dadurch gelangt trotz chemischer Vorspannung der Oberflächenriss in den innenliegenden Zugbereich und die Vorspannungswirkung entfällt. Während der Herstellung einer chemischen Vorspannung muss zwangsläufig eine hohe Oberflächengüte vorliegen. Eine chemische Vorspannung wird in üblichen Anwendungen im Bauwesen aufgrund der aufwendigen und nicht automatisierten Herstellung sowie geringen Vorspanntiefe kaum verwendet. Bisherige Anwendungsmöglichkeiten von chemisch vorgespanntem Glas als Verglasungselement liegen im Bereich der Informationstechnologie, dem Schiffsbau und in der Luft- und Raumfahrt. Erst mit der Entwicklung der Herstellprozesse für großformatige Dünnglastafeln findet die chemische Vorspannung eine verbreitete Anwendung im Bauwesen, ist allerdings noch auf Sonderverglasungen wegen hoher Produktionskosten beschränkt.

Bild 15 zeigt qualitativ den unterschiedlichen Eigenspannungszustand einer thermischen und chemischen Vorspannung unter Biegebeanspruchung. Thermische Vorspannverfahren werden ab einer Nenndicke von 2 mm bis 3 mm angewendet, da zum Aufbau des Eigenspannungszustandes beidseitig zur Oberfläche jeweils 20 % der Nenndicke benötigt wird. Bei geringeren Nenndicken erreicht die thermische Vorspannung nicht die gewünschten Festigkeitswerte. Die Abkühlung erfolgt zu schnell, der Gradient zum Erreichen der gewünschten Biegezugfestigkeiten lässt sich nicht einstellen. Die chemische Vorspannung bietet sich als eine Alternative zur Erhöhung der Festigkeit von Dünnglastafeln an. Der Eigenspannungszustand zeigt einen deutlich vergrößerten Zug- und verringerten Druckbereich.

⁷⁶ In Alumo-Silikat liegt bis zu 3,7 % Lithium und bis zu 10,5 % Natrium vor, im Kalk-Natronsilikatglas lediglich Natrium zwischen 7,4 % und 11,9 % vorliegt. Vergleiche DIN EN 572-1 und DIN EN 15681-1.

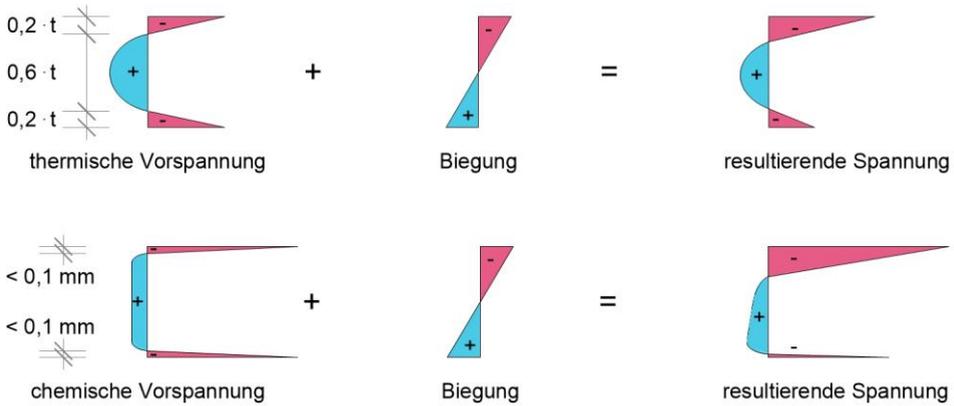


Bild 15

Qualitativ resultierender Spannungszustand einer thermischen Vorspannung (oben) und chemischen Vorspannung (unten) mit Überlagerung aus einer Biegebeanspruchung.

Neben der Erhöhung der Festigkeit beeinflusst eine Vorspannung das Bruchbild der monolithischen Glastafel. Große, scharfkantige Bruchstücke weisen eine hohe Verletzungsgefahr auf. Die stumpfen, kleinteiligen Bruchkrümel von Einscheibensicherheitsglas sind in Bezug auf Stich- und Schnittverletzungen ungefährlicher. Das Bruchbild von chemisch vorgespanntem Glas in Bild 16 ähnelt dem von nicht vorgespanntem Glas beziehungsweise teilvorgespanntem Glas mit größeren Bruchstücken.⁷⁷

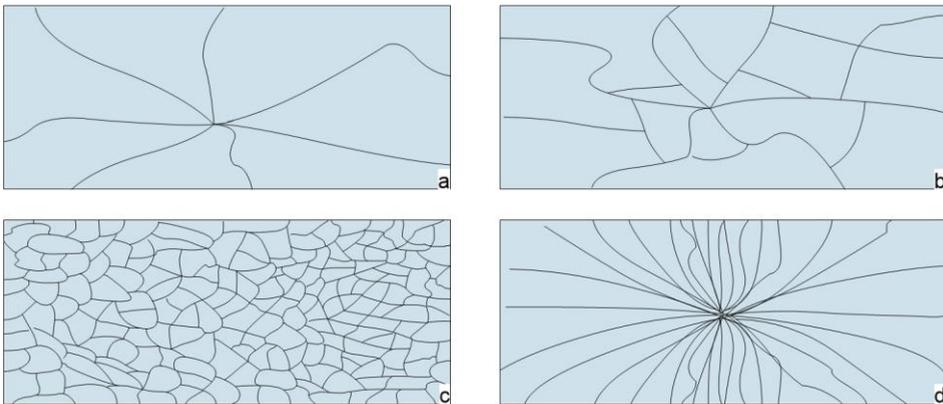


Bild 16

Qualitatives Bruchbild von nicht vorgespanntem Flachglas (a), teilvorgespanntem Glas (b), Einscheibensicherheitsglas (c) und chemisch vorgespanntem Glas (d).

⁷⁷ In einem Verbundsicherheitsglas ist die Größe und die Beschaffenheit der Glasbruchstücke für die Sicherstellung einer Tragfähigkeit im zerstörten Zustand als Resttragfähigkeit entscheidend. Vergleiche Kapitel 7.

Tabelle 3 beschreibt für Kalk-Natronsilikatglas bei unterschiedlichen Vorspannungsarten die veränderten Materialeigenschaften. Vorgespanntes Glas kann nach der Herstellung allerdings nicht mehr mechanisch geschnitten werden. Mit dem Laserschneideverfahren unter Verlust der Kantenqualität oder durch sorgfältiges Polieren und Schleifen besteht vereinzelt die Möglichkeit einer Nachbearbeitung. Dabei verändert sich der Vorspannungsverlauf im Kantenbereich.⁷⁸

Die charakteristische Biegezugfestigkeit stellt allgemein anerkannte Mindestfestigkeiten zur Bemessung und Konstruktion von Glas im Bauwesen dar. Für Kalk-Natronsilikatglas liegen für unterschiedliche Vorspannarten Produktnormen vor. Borosilikatglas und Alumo-Silikatglas sind nur als Floatglas geregelt. In Abhängigkeit der unterschiedlichen Glassorten, Herstell- und Vorspannverfahren liegen die praktischen Festigkeiten höher als die normative charakteristische Festigkeit. DIN EN 12337-1 gibt für chemisch vorgespanntes Dünnglas aus Kalk-Natronsilikatglas einen allgemein gebräuchlichen Wert der Festigkeit als 5 %-Fraktilwert mit einer Aussagewahrscheinlichkeit von 95 % an. Die Festigkeit wird an mindestens 10 Prüfkörpern nach DIN EN 1288-3 ermittelt. Die chemische Vorspannung erzeugt oberflächennahe Druckspannungen bis zu 100 µm. Typischerweise liegt die Vorspanntiefe bei etwa 40 µm. Oberflächendefekte entstehen durch Transport, Einbau und Weiterverarbeitung. Daher ist eine zielgerichtete Vorspannung der Festigkeit von chemisch vorgespanntem Dünnglas normativ zwar mit 150 N/mm² angegeben, sollte allerdings nicht unreflektiert auf das verwendete Dünnglas übertragen werden, da die Festigkeit einer höheren Streuung unterliegt als für Glas mit herkömmlicher Nennstärke.

Tabelle 3

Eigenschaften von Flachglas aus Kalk-Natronsilikatglas mit und ohne thermischer oder chemischer Vorspannung.

Glasprodukt	FG	TVG	ESG	CVG
Produktnorm	DIN EN 572-1	DIN EN 1863-1	DIN EN 12150-1	DIN EN 12337-1
Vorspannung	keine	thermisch	thermisch	chemisch
Temperaturwechselbeständigkeit	40 K ¹⁾	100 K ¹⁾	200 K ¹⁾	100 K bis 200 K ¹⁾
Charakteristische Biegezugfestigkeit	45 N/mm ²	70 N/mm ²	120 N/mm ²	150 N/mm ² ²⁾
Schneidfähigkeit	ja	nein	nein	nein
Bruchbild	vom Bruchzentrum ausgehende Risse	vom Bruchzentrum ausgehende Risse	kleine stumpfkantige Bruchkrümel	vom Bruchzentrum ausgehende Risse
¹⁾ Allgemein anerkannter Wert, der von der Kantenqualität beeinflusst wird. ²⁾ Vorgegebener normativer Wert, schwankt allerdings je nach Hersteller.				

⁷⁸ Vergleiche Weimar 2018a, Seite 65 ff., Pennetier 2019 und Lohr 2020.

3 Anwendungen mit Dünnglas

3.1 Grundlagen

Das Anwendungsgebiet von Dünnglas im Bauwesen orientiert sich an den Aufgaben und Anforderungen von Glastafeln mit herkömmlicher Glasnenndicke als Mono-, Verbund- oder Verbundsicherheitsglas. Allerdings müssen zur praktischen Anwendung von Dünnglas im Bauwesen konventionelle Anwendungen neu gedacht werden, um mit großen Verformungen bei geringer Belastung wie in Bild 17 umzugehen.⁷⁹

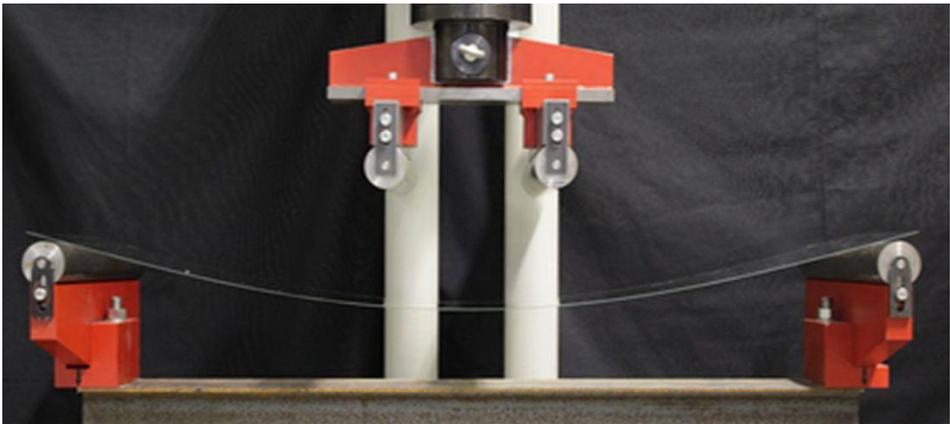


Bild 17

Resultierende Verformung einer monolithischen Dünnglastafel der Nenndicke 0,85 mm über eine Spannweite von 1.000 mm unter Eigenlast.

Dünnglas kann aktuell auf unterschiedliche Weise eingesetzt werden. Im Drei- oder Vierscheiben-Isolierglas übernehmen monolithische Dünnglastafeln innenliegende Glaspakete. Das Eigengewicht und die Nenndicke des Mehrscheiben-Isolierglases reduzieren sich, gleichzeitig bleiben der Schall- und Wärmeschutz vorhanden.⁸⁰

Infolge der geringen Querschnittsteifigkeit treten große Verformungen auf. Dies erfordert innovative Anwendungsmöglichkeiten, die die Flexibilität gezielt ausnutzen und mit einer qualitativ hochwertigen Optik und hoher Transparenz Ideen für die Baupraxis aufzeigen. Ein Prototyp mit einer 0,2 mm dicken monolithischen Dünnglastafeln zeigt eine Anwendung in Skulpturen und Kunstwerken. Eine itera-

⁷⁹ Weitere Anwendungsgebiete von Dünnglas finden sich im Automotivbereich, beispielsweise als Oberflächen im Armaturenbereich, bei Konsumgütern wie Displays von Mobiltelefonen oder Tablets, in der Medizin als Deckglas bei Objektträgern oder als Objektive und Linsen in der Physik.

⁸⁰ Vergleiche Sack 2013, Seite 14 ff. und Weimar 2018b, Seite 21.

tive Analyse der Geometrie über den Kräfteverlauf führt zu der in Bild 18 gezeigten freiskalierten Skulptur.⁸¹

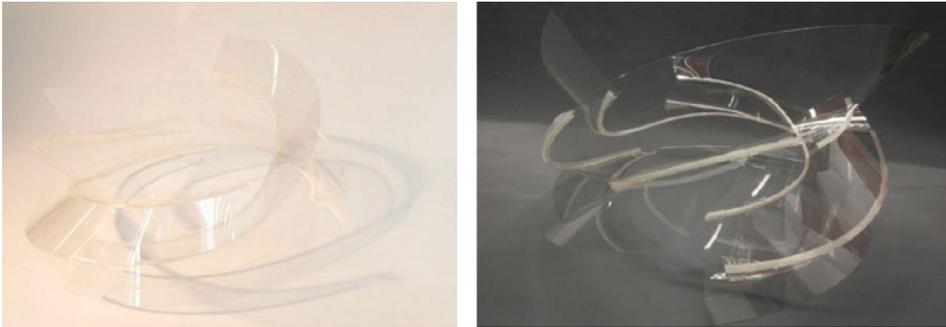


Bild 18
Glasskulptur aus monolithischem Dünnglas nach Pennetier 2020.

Weitere Anwendungsmöglichkeiten ergeben sich in der Konzeption beweglicher Glasfassaden, die als Reaktion auf einen äußeren Umwelteinfluss selbstständig die Form anpassen und über Linearführungen oder Drahteinlagen mit Formgedächtnislegierung einen Ansatz zur Belüftung und Versteifung bieten. Prototypen der Fassadenelemente zeigt Bild 19.⁸²



Bild 19
Fassadensysteme zur Belüftung und Versteifung der Verglasung nach Louter 2020.

Über die chemische Vorspannung weisen Dünngläser zusätzlich eine hohe Festigkeit auf und versagen selbst bei großen Verformungen und geringen Biegeradien nicht. Eine monolithische Glastafel besitzt allerdings keine Resttragfähigkeit und Redundanz. Daher bietet sich eine Anwendung von Dünnglas im Bauwesen

⁸¹ Vergleiche Pennetier 2019.

⁸² Vergleiche Ribeiro Silveira 2018 und Louter 2019.

im Verbund mit einer weiteren Glastafel oder mit Verglasungsmaterial aus Kunststoff an.

3.2 Verbund- und Verbundsicherheitsglas mit Dünnglas

Ein Verbundglas besteht in der Regel aus mindestens zwei Glastafeln, laminiert mit einer Zwischenschicht aus Gießharzen oder Folien.⁸³ In Abhängigkeit des jeweiligen Einsatzes werden gezielt Zwischenschichten mit Veränderungen in Hinblick auf die Eigenschaften wie Sicherheit, Schallschutz und Schubverbund ausgewählt. Verbundglas weist strenge Anforderungen an optische Eigenschaften bei unterschiedlichen Umwelteinflüssen auf. DIN EN ISO 12543-4 beschreibt drei notwendige Verfahren zur Prüfung der Beständigkeit der Zwischenschicht im Verbund bei hoher Temperatur, in der Feuchte und unter Bestrahlung.

Verbundsicherheitsglas ist ein Verbundglas mit erhöhten Anforderungen hinsichtlich der Sicherheit und Resttragfähigkeit.⁸⁴ Die Resttragfähigkeit stellt die Tragfähigkeit des Werkstoffverbundes nach Glasbruch sicher. Im Bruchfall haften die Glassplitter an der Zwischenschicht, verkanten sich in der Druckzone und leiten die auftretenden Spannungen über Kontakt ab. In der Zugzone beteiligen sich die Glasbruchstücke nicht am Lastabtrag, so dass die Zugkräfte über die polymere Zwischenschicht abgetragen werden. Im Gegensatz zu kleinteiligen Bruchkrümeln wirken sich große Bruchinseln günstiger auf die Resttragfähigkeit aus. Weiterhin sind im Verbundsicherheitsglas die Öffnungsgröße begrenzt und das Risiko von Verletzungen durch die Splitterbindung an der Zwischenschicht verringert. Verbundsicherheitsglas wird bei einer Horizontalverglasung, insbesondere als Überkopfverglasung, wegen der Resttragfähigkeit und der Reduzierung des Verletzungsrisikos durch herabfallende Glasbruchstücke der darunterliegenden Verkehrsfläche erforderlich. Dabei besteht der Verbund aus Gründen der erhöhten Resttragfähigkeit in der Regel aus grobbrechendem Glas wie Floatglas oder teilvorgespanntem Glas. Bei Verwendung von Verbundsicherheitsglas als Vertikalverglasung fließen Anforderungen an die Absturzsicherung in den Querschnittsaufbau mit ein. Die Prüfung der mechanischen Festigkeit des Verbundsicherheitsglases wird beispielsweise mit der Kugelfallprüfung und dem Pendelschlagversuch nachgewiesen.⁸⁵

Das Herstellverfahren für Verbund- und Verbundsicherheitsglas unterscheidet sich in ein nahezu vollautomatisiertes Verfahren mit einer Folie als Zwischenschicht und in ein weitestgehend manuelles Verfahren mit einem Gießharz. Das zweistufige Verfahren mit einer Folie im Autoklav skizziert Bild 20. Nach der Reinigung der Glastafeln wird das zu laminierende Mehrschichtsystem entsprechend den einzelnen Schichten lose aufeinandergelegt. Im Vorverbund drücken

⁸³ Vergleiche DIN EN ISO 12543-1 und DIN EN ISO 12543-3.

⁸⁴ Vergleiche DIN EN ISO 12543-1 und DIN EN ISO 12543-2.

⁸⁵ Vergleiche DIN EN 14449.

bis zu +70 °C beheizte Walzen das Glas-Folie-Sandwich zusammen. Aus dem milchig, trüben Verbund entsteht in einem weiteren Schritt bei einem Druck von 12 bar bis 14 bar, einer Temperatur von etwa +120 °C bis +140 °C und innerhalb von 6 h bis 8 h im Autoklav ein dauerhafter Verbund. Die Aufheiz- und Abkühltemperaturen beeinflussen maßgeblich die Qualität des Verbundes. Zu hohe Temperaturen führen zu Verfärbungen, bei zu niedrigen Temperaturen bilden sich Blasen oder ein unzureichender Verbund. Mit der automatisierten Herstellung sind große Stückzahlen bei niedrigen Kosten produzierbar. Üblicherweise wird die Zwischenschicht aus Polyvinylbutyral (PVB) hergestellt. Darüber hinaus besteht unter Berücksichtigung weiterer Anforderungen an die mechanischen Eigenschaften der Folie eine Anwendung von Ethylvinylacetat (EVA), Polyurethan (PUR) und SentryGlas (SG). Das Herstellverfahren im Autoklav unterscheidet sich je nach Polymer hinsichtlich der Temperatur, des Drucks und der Haltezeit.⁸⁶

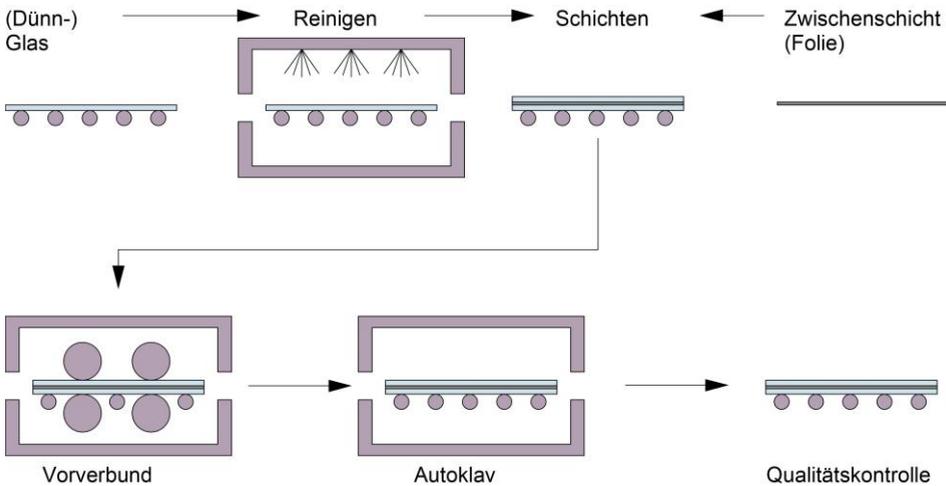


Bild 20

Schematische Darstellung des Herstellverfahrens für Verbundglas im Autoklav nach Schneider 2016.

Der Vorverbund kann alternativ im Vakuum-Verfahren erzeugt werden. Beim Vakuum-Ring-Verfahren zieht ein um die Schichten liegender Schlauch die Luft heraus, während beim Vakuum-Sack-Verfahren eine luftundurchlässige Membran das Sandwich umschließt. Im Vorverbund entweichen bei der Bildung eines Vakuums vorhandene Luft- und Wassereinschlüsse aus dem Querschnitt. Einstufige, automatisierte Verfahren werden hinsichtlich Prozessparameter und Produktqualität untersucht und ausgewertet.⁸⁷

⁸⁶ Vergleiche Schneider 2016, Seite 190 ff.

⁸⁷ Vergleiche Weimar 2019.

Gießharze liegen nicht als Folie vor, sondern werden in flüssiger Form in den Spalt zwischen zwei Scheiben eingefüllt. Zur Herstellung sind die Glasscheiben übereinandergelegt, leicht gekippt und umlaufend abgedichtet. Das flüssige Harz wird eingebracht. Einkomponentige Klebstoffe erhärten durch ultraviolette Bestrahlung. Mehrkomponentiges Gießharz verfestigt sich durch eine chemische Reaktion der Einzelbestandteile und Katalysatoren. Je nach Einsatzgebiet existieren unterschiedliche Mischungen auf Kunst- oder Naturharzbasis.

Die Weiterverarbeitung von Dünnglastafeln zu Verbund- und Verbundsicherheitsglas erfüllt die notwendigen Anforderungen an die Redundanz, Resttragfähigkeit und Splitterbindung. Gleichzeitig kann der Verbund ohne Bruch verformt werden. Die auf der Glasstec 2014 vorgestellte Überdachung zeigt ein Potential von Dünnglastafeln als Verbundsicherheitsglas mit dem Konzept der Versteifung durch Verformung. In Analogie zu einer Papierlaterne öffnet und schließt sich die Überdachung. Der Bogen steift über die erzwungene, gekrümmte Geometrie des Dünnglases aus. Bild 21 zeigt die bewegliche Überdachung im geschlossenen Zustand am Josef-Ressel-Zentrum in Graz.⁸⁸



Bild 21

Bewegliche Überdachung am Josef-Ressel-Zentrum in Graz nach Neugebauer 2015.

Ein weiterer Ansatz zur Anwendung von Dünnglas bietet die außenliegende Schutzschicht für Sonderkonstruktionen wie Glasschwerter, -träger oder -stützen

⁸⁸ Die Quelle verwendet den Begriff »laminated safety glass«, der mit Verbundsicherheitsglas übersetzt wird. Allerdings wird nicht weiter auf die Eigenschaften des Glaslaminats, insbesondere auf den Nachweis einer ausreichenden Resttragfähigkeit aus zwei Dünnglastafeln der Nennstärke 0,7 mm eingegangen. Vergleiche Neugebauer 2015.

aus Verbundsicherheitsglas. Dabei werden die Dünnglastafeln an den tragenden Glaskern als Schutz- und Opferschicht laminiert.⁸⁹

3.3 Verbund- und Verbundsicherheitsglas mit Dünnglas und weiterem (Verglasungs-)Material

Unterschiedliche Materialkombinationen mit Dünnglas und opaken oder transparenten Materialien führen zu Sandwichkonstruktionen mit flächigem oder wabenförmigem Kern. Obwohl ein Verbund aus Glas mit weiteren Werkstoffen nicht zwangsläufig einem Verbund- oder Verbundsicherheitsglas entspricht, werden Untersuchungen insbesondere mit innovativen Baumaterialien wie Papier oder dreidimensional gedrucktem Polymerkern als Mehrschichtsystem durchgeführt.

Der Verbund einer thermisch vorgespanntem Dünnglastafel mit einer Wabenpappe zeigt in Bild 22 eine in zwei Richtungen gekrümmte, skulpturale Tragstruktur mit einer Höhe von etwa 2.500 mm. Auf der Glasstec 2018 wird der Verbund erstmalig ausgestellt.⁹⁰



Bild 22
siNeFINITY-Pavillon der TU Darmstadt auf der Glasstec 2018.

Anstelle von Wabenpappe zwischen den Glastafeln ist auch ein dreidimensional gedrucktes Kernmaterial in Bild 23 zur Versteifung der beiden außenliegenden

⁸⁹ Vergleiche Lambert 2013 und Overend 2014.

⁹⁰ Vergleiche Horn 2018, Seite 120.

Dünnlastafeln genutzt. Das Druckmuster der innenliegenden Kunststoffschicht kann auf ein gewünschtes Design eingestellt und an die Tragwirkung der Verbundtafeln optimiert werden. In einem ersten Schritt erfolgt der Druck des Kerns als dreidimensionale Struktur aus Polyethylenterephthalat-Glycol (PETG). Anschließend verbindet ein zweikomponentiger Epoxidkleber das Kernmaterial mit den außenliegenden, chemisch vorgespannten Dünnlastafeln.⁹¹

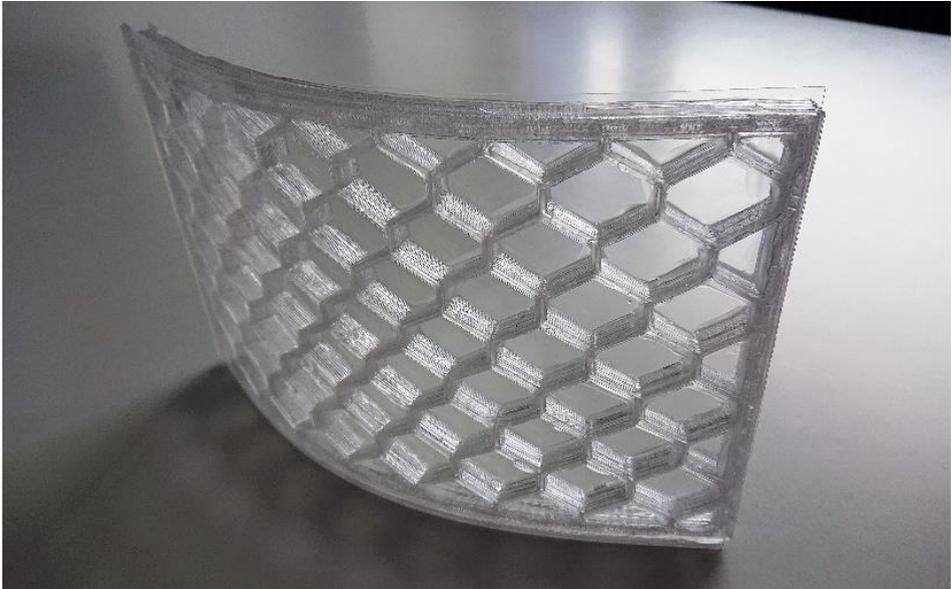


Bild 23

Dünnlastglas-Verbund mit einem dreidimensional gedruckten Wabenkern nach Louter 2020.

Nach DIN EN ISO 12543-1 ist als Verglasungsmaterial in Verbund- und Verbundsicherheitsglas neben Glas auch Kunststoffmaterial aus Polycarbonat oder Acryl zulässig. Der Verbund von Polymethylmethacrylat (PMMA) mit Dünnlastglas in Bild 24 erzeugt einen nahezu vollen Verbund. Das Mehrschichtsystem bietet sich als leichte Alternative zu herkömmlichem Verbundglas an. Allerdings ist der Verbund nicht verkehrssicher, da nur die Eigenschaften als Verbundglas nachgewiesen sind. Für den Verbund aus Dünnlastglas mit Polymethylmethacrylat (PMMA) ist eine Resttragfähigkeit und Splitterbindung nicht gegeben.⁹²

⁹¹ Vergleiche Louter 2019.

⁹² Vergleiche Brammer 2016 und Hänig 2019.



Bild 24

Neeroglas als Verbund aus Dünnglas und Polymethylmethacrylat (PMMA) in verschiedenen Farben nach KRD Coatings GmbH 2022.

4 Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel

4.1 Grundlagen

Eine Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel beschreibt ein Mehrschichtsystem mit zwei äußeren Dünnglastafeln und mindestens einer innenliegenden Polycarbonatplatte, die über eine polymere Zwischenschicht miteinander verbunden sind.⁹³ Der Verbund aus Dünnglas und Polycarbonat ermöglicht die Querschnittsversteifung der Dünnglastafeln unter Beibehaltung der Transparenz und des niedrigen Flächengewichts. Bild 25 zeigt den prinzipiellen Aufbau der Verbundtafel bestehend aus zwei außenliegenden Dünnglastafeln, einer innenliegenden Polycarbonatplatte und zwei transparente Zwischenschichten. Die Nennstärke der Glastafeln variieren von 0,5 mm bis 2,0 mm.

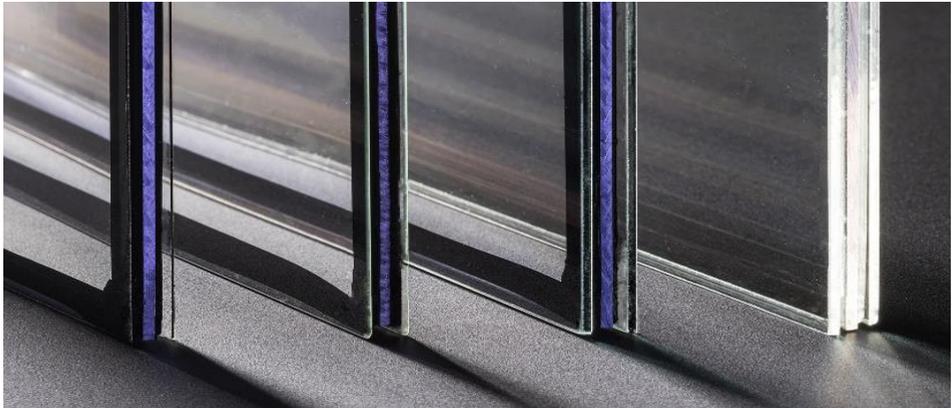


Bild 25

Beispiele von Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit außenliegenden Dünnglastafeln der Nennstärke 0,50 mm, 0,85 mm, 2,00 mm und 2,00 mm (von links nach rechts).

4.2 Dünnglas

Für die Untersuchungen zur Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel stehen insgesamt drei Dünngläser zur Verfügung. Die Auswahl erfolgt in Abhängigkeit der Verfügbarkeit, der Wirtschaftlichkeit und der Abmessungen der Dünnglastafeln. Damit ergeben sich die in Tabelle 4 angegebenen Materialeigenschaften der chemisch vorgespannten Dünngläser Falcon und Leoflex sowie des nicht vorgespannten Dünnglases Optiwhite.

⁹³ Die Definition einer Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel ergibt sich analog zur Beschreibung einer Glas-Polycarbonat-Verbundtafel aus Weimar 2011, Seite 25.

Tabelle 4

Physikalische, mechanische und thermische Eigenschaften der Dünngläser Falcon, Leoflex und Optiwhite.

Eigenschaft	Falcon	Leoflex	Optiwhite
Hersteller	Asahi Glass Co., Ltd.	Asahi Glass Co., Ltd.	Pilkington Deutschland AG
Glasart	Alumo-Silikatglas	Alumo-Silikatglas	Kalk-Natronsilikatglas
Herstellverfahren	Floatverfahren	(Micro-)Floatverfahren	Floatverfahren
Dichte	2,48 g/cm ³	2,48 g/cm ³	2,50 g/cm ³
Vorspannung	chemisch	chemisch	keine
Biegezugfestigkeit	keine Angabe	260 N/mm ²	45 N/mm ²
Maximale Abmessung	1.245 mm x 3.210 mm ¹⁾	2.070 mm x 1.650 mm	6.000 mm x 3.210 mm
Dicke	0,5 mm bis 4,0 mm	0,5 mm bis 2,0 mm	2,0 mm bis 1,0 mm
Querdehnzahl	0,21	0,23	0,23
Elastizitätsmodul	70.000 N/mm ²	74.000 N/mm ²	70.000 N/mm ²
Transmissionsgrad	92,1 % bei t = 0,50 mm	91,7 % bei t = 0,85 mm	92,0 % bei t = 2,00 mm
Wärmeausdehnungskoeffizient	9,0 · 10 ⁻⁶ 1/K	9,8 · 10 ⁻⁶ 1/K	9,0 · 10 ⁻⁶ 1/K
Wärmeleitfähigkeit	1,19 W/(m·K)	1,04 W/(m·K)	1,00 W/(m·K)
Glasübergangstemperatur	+575 °C	+604 °C	+530 °C
¹⁾ Die Abmessung gilt für einen Nenndicke von 0,5 mm. In Abhängigkeit der Nenndicke variieren die Abmessungen.			

4.3 Polymere

Die innenliegenden Schichten der Verbundtafel bestehen aus polymeren Werkstoffen, deren mechanisches Verhalten von der Belastungsdauer, der Belastungshöhe und der Temperatur abhängt. Die Kenntnis über die thermomechanischen Eigenschaften eines Polymers sind für eine ingenieurmäßige Betrachtung von hoher Bedeutung. Polymere lassen sich über die Polymerstruktur mit der Art und dem Grad der Vernetzung hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften einteilen. Für die Anwendungen eines Kunststoffes kann eine Klassifizierung nach der molekularen Struktur und dem thermomechanischen Verhalten in die Monomere Thermoplast, Elastomer und Duroplast sowie eine Mischung aus mindestens zwei Monomeren erfolgen. Bild 26 skizziert die Einteilung der Polymere nach der molekularen Struktur.

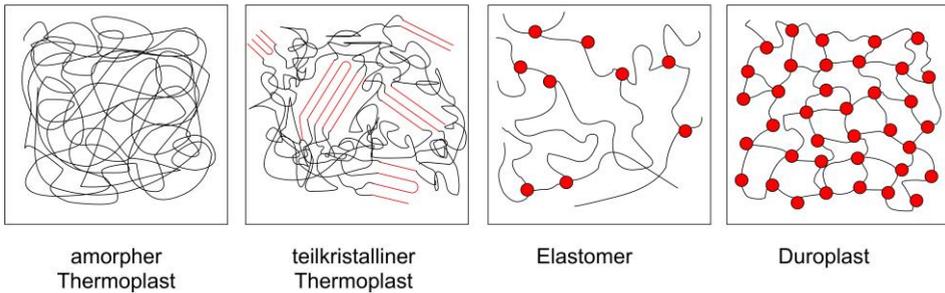


Bild 26

Schematische Darstellung der molekularen Struktur unterschiedlicher Polymere nach Kuntsche 2015.

Ein Thermoplast zeigt lineare, unvernetzte und lange Makromoleküle, die über schwächere Van-der-Waals-Kräfte zusammengehalten werden, bei steigender Temperatur zu schwingen anfangen, den Abstand untereinander vergrößern und sich dadurch verformen lassen. Der Vorgang ist dabei reversibel, bei Erwärmung wird der Thermoplast plastisch formbar, beim Abkühlen auf Raumtemperatur wieder hart. Das Polymer verhält sich im Gebrauchstemperaturbereich vorwiegend energieelastisch⁹⁴. Ein Thermoplast kann amorph oder teilkristallin sein. Die Kristallinität wirkt sich auf die mechanischen Eigenschaften aus. Während bei amorphen Thermoplasten als Verbundfolie im Glasbau ein Steifigkeitsverlust bei einer Glasübergangstemperatur zwischen +10 °C und +20 °C auftritt, findet bei teilkristallinen Thermoplasten ein zweiter Steifigkeitsabfall bei höherer Temperatur statt.⁹⁵ Elastomere gelten als weitmaschig, dreidimensional chemisch vernetzte Polymere und liegen nur amorph im entropieelastischen Zustandsbereich⁹⁶ vor. Der Glasübergang befindet sich weit unterhalb von ± 0 °C. Dadurch tritt bei einer Zugbeanspruchung eine gummielastische Verformung auf. Bei weiterer Abkühlung unterhalb von T_g wird das Elastomer hart und spröde sowie als Gummiwerkstoff unbrauchbar. Im Gegensatz zu einem Thermoplast lässt sich in Elastomer nicht warmverformen. Der Einsatz bei hohen Temperaturen ist mit der Zersetzungstemperatur und dem beginnenden Abbau von Makromolekülen begrenzt.⁹⁷ Ein Duroplast verformt sich nach der Aushärtung nicht mehr, da sich im engmaschig dreidimensional, langkettigen vernetztem Kunststoff kovalente Bindung-

⁹⁴ Der energieelastische, glasartige Zustandsbereich beruht auf reversibler Verformung durch Belastung. Thermoplaste liegen bei Raumtemperatur meist im energieelastischen Bereich vor, sind hart bis glasartig spröde und zeigen einen Widerstand gegen Verformung mit hohem Elastizitätsmodul. Vergleiche Bild 26 und Bild 28.

⁹⁵ Beispiele für Thermoplaste sind Polyethylen (PE), Polyamid (PA) und Polycarbonat (PC).

⁹⁶ Der entropieelastische, gummielastische Zustandsbereich liegt zwischen dem Glasübergangs- und dem Fließbereich. Beim entropieelastischen Bereich lassen sich die Polymerketten gegeneinander verschieben sowie strecken und verknäulen sich bei Entlastung wieder. Vergleiche Bild 26 und Bild 28.

⁹⁷ Beispiele für Elastomere sind Dienkautschuk (EPDM) oder Polyurethan (PU).

en⁹⁸ mit energieelastischem Verhalten bei Gebrauchstemperatur einstellen. Daher sind Duroplaste in der Regel harte, formstabile, amorphe Polymere mit sprödem Bruchverhalten. Ein Einschmelzen ist nicht möglich, da die Schmelztemperatur in der Regel über der Zersetzungstemperatur liegt. Die Materialeigenschaften verändern sich bei hoher Temperatur erst ab der Zersetzungstemperatur mit einem chemischen Abbau der Makromoleküle.^{99 100}

Die Untersuchung der linear-viskoelastischen Eigenschaften von Kunststoffen kann mit einer dynamisch-mechanisch-thermischen Analyse (DMTA) erfolgen. Dazu wird eine Probe periodisch, sinusförmig mechanisch mit einer Spannung σ in der Frequenz f belastet und damit eine Dehnung ε nach Bild 27 erzeugt. Bei ideal-elastischem Materialverhalten stimmt das zeitliche Auftreten der Einwirkung und der Auswirkung überein, bei ideal-viskosem Material stellt sich die Auswirkung zeitverzögert mit einer maximalen Auswirkung bei dem Wegfall der Einwirkung ein. Häufig reagiert das Material wegen der periodisch erzwungenen Schwingung allerdings zeitverzögert, sodass die Anregung und die Antwort phasenverschoben und hinsichtlich Phasenversatz und Amplitudenschwingung bei unterschiedlicher Temperatur auswertbar sind.

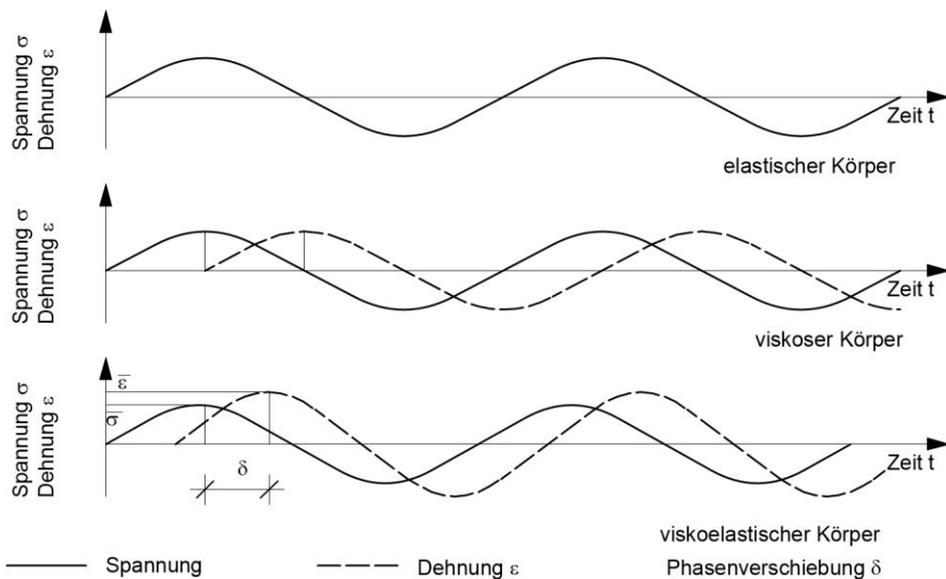


Bild 27 Spannungs- und Verformungsverhalten von elastischen, viskosen und viskoelastischen Körpern nach Habenicht 2009.

⁹⁸ Eine kovalente Bindung ist eine Atombindung oder Elektronenpaarbindung, die einen festen Zusammenhalt in der molekularen Struktur aufweist. Eine reversible Lösung durch Wärmezufuhr ist nicht möglich.

⁹⁹ Beispiele für Duroplaste sind ausgehärtete Epoxidpolymere oder Polyimide (PA).

¹⁰⁰ Vergleiche Schneider 2016, Seite 82 ff. und Kaiser 2021, Seite 117 ff.

Der Spannungs-Dehnungs-Zusammenhang ist infolge der Phasenverschiebung bei einem linear-viskoelastischem Material als komplexe Größe E^* angegeben. Der komplexe Modul E^* setzt sich aus dem Speichermodul E' , der die elastischen Eigenschaften als gespeicherte Energie darstellt, und einem Verlustmodul E'' , der die viskosen Eigenschaften als dissipierte Energie beschreibt, sowie der imaginären Zahl i nach Gleichung 6 zusammen. Das Verhältnis aus dissipierter Energie E'' zu gespeicherter Energie E' wird in Gleichung 7 als Verlustfaktor $\tan\delta$ bezeichnet.¹⁰¹

$$E^* = E' + i \cdot E'' \quad \text{Gleichung 6}$$

mit

$$E' = |E^*| \cdot \cos\delta \quad \text{Gleichung 7}$$

$$E'' = |E^*| \cdot \sin\delta$$

$$\tan\delta = \frac{E''}{E'}$$

Je größer der Speichermodul E' , desto elastischer der Körper und die Rückgewinnung der eingebrachten Energie. Bei steigendem Verlustmodul E'' wird die eingebrachte Energie irreversibel in Wärme umgewandelt, der viskose Anteil nimmt zu.¹⁰²

Anschließend sind die Kurven von E' , E'' und $\tan\delta$ für Materialien, die einen Glasübergang durchlaufen, in ein temperaturabhängiges Diagramm übertragen und zeigen dabei einen typischen Verlauf. Bild 28 beschreibt qualitativ den Verlauf des Speichermoduls E' , des Verlustmoduls E'' und des Verlustfaktors $\tan\delta$ in Abhängigkeit der Temperatur. Dabei ist ersichtlich, dass im Glasübergangsbereich um die Glasübergangstemperatur T_g der Speichermodul schlagartig abfällt. Zur Bestimmung der Glasübergangstemperatur T_g liegen unterschiedliche Ansätze vor, die zu Abweichungen in den Ergebnissen führen. Die Glasübergangstemperatur lässt sich auf Grundlage des stufenförmigen Modulverlusts als Stufenauswertung mit einer dynamisch-mechanischen-thermischen Analyse (DMTA) analog zur Auswertung bei Kurven der dynamischen Differenzkalorimetrie (DSC) bei Beginn, der halben Stufenhöhe und Ende des Glasübergangs, über die Wendepunktmethode des Speichermoduls E' , die Tangentenmethode oder die 2 %-Methode bestimmen. Mit der Betrachtung der Kurvenmaxima des Verlustmoduls und Verlustfaktor sind weitere Auswertungsmethoden bekannt. Neben der

¹⁰¹ Neben der Messung des komplexen Elastizitätsmoduls kann auch der komplexe Schubmodul analog bestimmt werden, um viskoelastische Eigenschaften zu charakterisieren. Anstatt eines Zugversuches ist das Verhalten der viskoelastischen Probe mit einem Scherversuch analysiert. Der Analysator DMA 242 E Artemis von Netzsch Gerätebau GmbH steht am Lehrstuhl für Tragkonstruktion zur Verfügung. Die Versuche finden im Zugmodus zur Bestimmung des komplexen Elastizitätsmoduls statt.

¹⁰² Der Speichermodul E' entspricht bei einer einmaligen, zügigen und niedrigen Belastung bei reversibler Verformung ungefähr dem Elastizitätsmodul. Vergleiche Ehrenstein 2011, Seite 182.

Angabe der Glasübergangstemperatur T_g ist somit eine Angabe der Nennung des Auswertungsverfahrens und der Auswertefrequenz erforderlich.¹⁰³

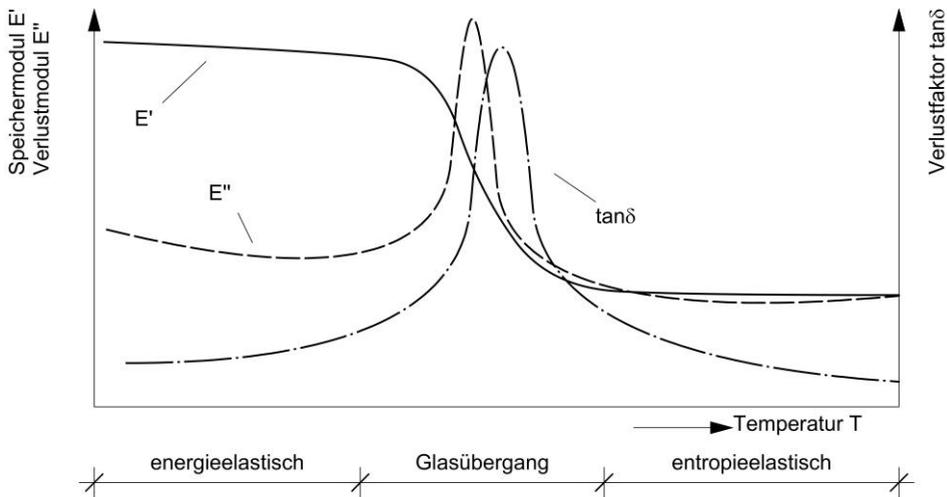


Bild 28

Qualitativer Verlauf des Speichermoduls E' , des Verlustmoduls E'' und des Verlustfaktors $\tan \delta$ in Abhängigkeit der Temperatur T sowie Einteilung in energieelastischen und entropieelastischen Zustandsbereich.

Mit den Messungen bei unterschiedlicher Temperatur kann eine Masterkurve zu jedem Polymer erstellt werden, um Aussagen über Belastungsdauern zu treffen, die zeitlich nur sehr aufwendig messbar sind. Dazu wird das Zeit-Temperatur-Verschiebungsprinzip (ZTV) angewendet. Es zeigt eine große praktische Bedeutung für die Beurteilung des Langzeitverhaltens von thermorheologisch einfachen Kunststoffen¹⁰⁴. Eine Temperaturerhöhung bewirkt einen Steifigkeitsverlust und ist vergleichbar mit einer längeren Belastungsdauer. Eine Temperaturerhöhung entspricht somit einer Reduktion der Relaxationszeiten des viskoelastischen Materials und ist einer horizontalen Verschiebung der Relaxationsfunktion auf der Zeitachse, um einen Verschiebungsfaktor gleichzusetzen.¹⁰⁵ Zur Erstellung einer Masterkurve wird der bei unterschiedlicher Temperatur gemessene, frequenzabhängige Modulwert mit einem Verschiebungsfaktor multipliziert. Die Verschieb-

¹⁰³ Vergleiche Ehrenstein 2003, Seite 269.

¹⁰⁴ Bei thermorheologisch einfachen Kunststoffen entsteht die Masterkurve ausschließlich durch eine horizontale Verschiebung der individuellen Kurven bei unterschiedlicher Temperatur. Ein Kunststoff gilt als thermorheologisch einfach, wenn das Col-Cole- und das van-Gurp-Palmen Diagramm einen stetigen Verlauf zeigen. Vergleiche Schuster 2022, Seite 173.

¹⁰⁵ Zeit und Temperatur sind gegenläufig äquivalent. Eine schnelle Belastung bei einer Temperatur entspricht einer langsamen Belastung bei niedrigeren Temperaturen. Dadurch ist über eine Messung in einem kleinen Frequenzbereich bei unterschiedlicher Temperatur eine Aussage über einen großen Bereich möglich.

ungsfunktion ist temperaturabhängig und kann im Bereich um den Glasübergang bis in den entropieelastischen Bereich nach dem empirisch abgeleiteten Verschiebungsansatz nach William, Landel und Ferry (WLF) mit Gleichung 8 beschrieben werden. Die Parameter C_1 und C_2 müssen experimentell ermittelt werden, die Temperatur T ist die betrachtete Temperatur und T_0 die Referenztemperatur. Beide Parameter C_1 und C_2 hängen von der Wahl von T_0 ab.¹⁰⁶

$$\log \alpha_T = - \frac{C_1 \cdot (T - T_0)}{C_2 + (T - T_0)} \quad \text{Gleichung 8}$$

Im energieelastischen Bereich unterhalb des Glasübergangs wird davon ausgegangen, dass eine Aktivierungsenergie E_A benötigt wird, um Seitenkettenbewegungen zu erzeugen und den Relaxationsprozess zu starten. Daraus bestimmt sich der Verschiebungsfaktor α_T nach dem Arrhenius-Ansatz in Gleichung 9.¹⁰⁷

$$\log \alpha_T = - \frac{E_a}{2,303 \cdot R} \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \quad \text{Gleichung 9}$$

Die Masterkurve zeigt den Verlauf einer Modulfunktion, wie beispielsweise dem Speicher- oder Verlustmodul, in einem großen Frequenzbereich. Über eine Anpassung von experimentellen bestimmten Daten an das Materialmodell sind Eingabeparameter für eine nichtlineare Materialbeschreibungen in numerischen Simulationen nach der Finite-Elemente-Methode (FEM) möglich, um das Polymer ingenieurmäßig abbilden zu können.

Die Kenntnis über die thermomechanischen Materialeigenschaften der verwendeten Materialien Polycarbonat und Zwischenschicht aus thermoplastischem Polyurethan liegen bisher nicht vor. Daher ist es notwendig neben den allgemeinen Eigenschaften beider Kunststoffe zusätzlich die viskoelastischen Eigenschaften und die Masterkurve mit den thermomechanischen Eigenschaften zu bestimmen.

Der innenliegende Kern der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel besteht aus Polycarbonat. Die großtechnische Produktion von Polycarbonat beginnt 1958 mit Makrolon von Bayer AG. 1973 folgt Lexan von General Electric, heute zu Saudi Basic Industries Corporation (Sabic) gehörend. Es existieren neben den beiden Produkten weitere Alternativen auf dem Markt.¹⁰⁸ Die Anwendung von Polycarbonat erstreckt sich von optischen Speichermedien wie Compact Discs (CDs), Digital Video Discs (DVDs) oder Blue Rays über Formteile und Gehäuse der Elektrotechnik und Elektronik bis in die Medizintechnik und Automobilindustrie.

¹⁰⁶ Vergleiche Schwarzl 1990, Seite 202 ff., Grellmann 2015, Seite 92 f., Kuntsche 2015, Seite 54 ff. und Schneider 2016, Seite 89 ff.

¹⁰⁷ Vergleiche Schuster 2022, Seite 75 ff.

¹⁰⁸ Makrolon, heute bekannt als Exolon von Exolon Group GmbH, und Lexan von Saudi Basic Industries Corporation (Sabic) sind die in Deutschland vorhandenen Standardprodukte. Es existieren weitere vergleichbare Produkte wie Marlon von Brett Martin Ltd. oder Palsun von Palram Germany GmbH auf dem Markt.

Im Bauwesen wird der Werkstoff unter anderem als Abdeckungen für Stadien und Bahnhöfe oder in Wintergärten und Gewächshäuser verwendet.

Der amorphe Werkstoff Polycarbonat zählt als linearer Polyester zu den technischen Thermoplasten. Bisphenol A reagiert im Schmelzeumesterungsverfahren durch Umesterung bei hohen Temperaturen mit Diphenylcarbonat unter Abspaltung von Phenol, im Lösungsverfahren durch Lösen von Pyridin und Phosgen beziehungsweise im Phasengrenzflächenverfahren durch das Lösen von Phosgen in Natronlauge bei chlororganischen Lösemitteln.¹⁰⁹ Aus zahlreichen Polycarbonaten zeigt das Bisphenol-A-Polycarbonat in Bild 29 technisch günstigere Eigenschaften in Hinblick auf mögliche Anwendungen.

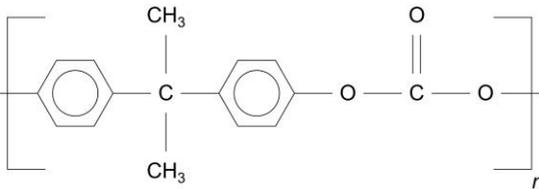


Bild 29

Chemische Zusammensetzung von Polycarbonat nach Seidel 2018.

Die Materialeigenschaften von Polycarbonat sind weitreichend erforscht. Aufgrund der vielseitigen Anwendbarkeit können die Eigenschaften durch eine Ergänzung von Additiven im Coextrusionsverfahren¹¹⁰ oder mit nachträglicher Lackierungen gezielt verändert und angepasst werden. Der amorphe Kunststoff¹¹¹ weist grundsätzlich eine hohe Transparenz verbunden mit hohem Oberflächen-glanz und Maßhaltigkeit wegen geringen Schwindens, hoher Schlagzähigkeit, Festigkeit sowie Steifigkeit im Temperaturbereich von etwa -150 °C bis +135 °C auf. Polycarbonat besitzt zusätzlich eine hohe Witterungsbeständigkeit, geringe Wasseraufnahme und eine Beständigkeit gegen verdünnte Säuren, Fette, Öle sowie Ethanol und ist nach Entfernen der Zündquelle selbstverlöschend. Allerdings ist ein Schutz vor Chemikalien, insbesondere vor Basen, aromatischen und halogenierten Kohlenwasserstoffen, Ketonen und Estern, nötig, da es zur Spannungsrisssbildung kommen kann. Im Gegensatz dazu ist Polycarbonat kerb-, kratz- und abriebempfindlich. Ultraviolette Strahlung beeinträchtigt und verändert die Eigenschaften, daher sollte eine direkte Bestrahlung möglichst vermieden werden.¹¹²

¹⁰⁹ Vergleiche Dominginghaus 2012, Seite 715.

¹¹⁰ Die Coextrusion fördert zwei Materialien durch das gleiche Extrusionswerkzeug und vereint beide Materialien zur Herstellung eines Polymers mit gewünscht veränderten Eigenschaften.

¹¹¹ Trotz des regelmäßigen Aufbaus tritt keine Kristallinität innerhalb der molekularen Struktur auf. Der amorphe Aufbau begünstigt im Gegensatz zu kristallinem Polycarbonat die hohe Zähigkeit. Vergleiche Dominginghaus 2012, Seite 717.

¹¹² Vergleiche Dominginghaus 2012, Seite 733 ff., Herrlich 1999, Teil 7, Kapitel 7.2.3, Seite 1 ff. und Abts 2020, Seite 129 ff.

Die im Bauwesen maßgebenden Eigenschaften von Polycarbonat sind für Lexan 9030 und Exolon GP in Tabelle 5 angegeben. Dabei unterscheiden sich die einzelnen Kennwerte nur gering. Die Materialauswahl erfolgt über die Verfügbarkeit und Wirtschaftlichkeit. Für die Untersuchungen der Verbundtafel aus Dünnglas und Polycarbonat wird Lexan 9030 verwendet.

Tabelle 5

Physikalische, mechanische und thermische Eigenschaften von Lexan 9030 und Exolon GP bei Raumtemperatur.

Eigenschaft	Lexan 9030	Exolon GP
Hersteller	Sabic Deutschland GmbH	Exolon Group GmbH
Dichte	1,2 g/cm ³	1,2 g/cm ³
Elastizitätsmodul	2.300 N/mm ²	2.350 N/mm ²
Biegefestigkeit	90 N/mm ²	90 N/mm ²
Bruchdehnung	> 100 %	> 50 %
Querdehnzahl	0,36	0,40
Mittlerer thermischer Ausdehnungskoeffizient	70 · 10 ⁻⁶ 1/K	65 · 10 ⁻⁶ 1/K
Wärmeleitfähigkeit	0,2 W/(mK)	0,2 W/(mK)
Lichtdurchlässigkeit	89 % (bei t = 3 mm)	88 % (bei t = 3 mm)

Im Allgemeinen entsprechen die mechanischen Eigenschaften des Datenblatts den Kennwerten bei Raumtemperatur von +23 °C bis +55 °C. Die ingenieurmäßige Betrachtung erfordert allerdings eine erweiterte Kenntnis des Verhaltens des Polymers bei unterschiedlicher Temperatur, Belastungshöhe und Belastungsdauer. Die Zustandsbereiche von Polycarbonat sind daher mit einer dynamisch-mechanisch-thermischen Analyse (DMTA) in einem Temperaturbereich von -60 °C bis +170 °C bei einer Heizrate von +2 K/min im Zugversuch bestimmt. Die Proben werden bei einer konstanten Frequenz von 1 Hz, 2 Hz, 5 Hz, und 10 Hz mit einer sinusförmigen Zugbeanspruchung belastet. Bild 30 zeigt den Speichermodul E' , den Verlustmodul E'' und den Verlustfaktor $\tan\delta$ in Abhängigkeit der Temperatur und der Erregerfrequenz. Der temperaturabhängige Verlauf des Speichermoduls bestätigt die Einordnung des Polycarbonates als Thermoplasten. Im baurelevanten Temperaturbereich von etwa -20 °C bis +60 °C liegt für Polycarbonat ein energieelastischer Zustandsbereich vor. Bis in den Bereich des Glasübergangs verhält sich das Polycarbonat nahezu frequenzunabhängig und fällt linear ab. Der Glasübergangsbereich schließt sich dem energieelastischen Bereich an, beginnt bei etwa +147,7 °C und endet bei +157,7 °C.¹¹³ Diese Werte liegen außerhalb der üblichen Anwendungstemperaturen im Bauwesen. Der Glasübergang von Polycarbonat spielt für die Betrachtung der Anwendung einer Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel daher eine untergeordnete Rolle.

¹¹³ Der Beginn des Glasübergangsbereich ist durch die Tangentenmethode zur Auswertung der Glasübergangstemperatur und das Ende des Glasübergangsbereiches durch die Angabe der Temperatur des Maximalwertes des Verlustfaktors $\tan\delta$ gekennzeichnet. Vergleiche Ehrenstein 2003, Seite 264 ff.

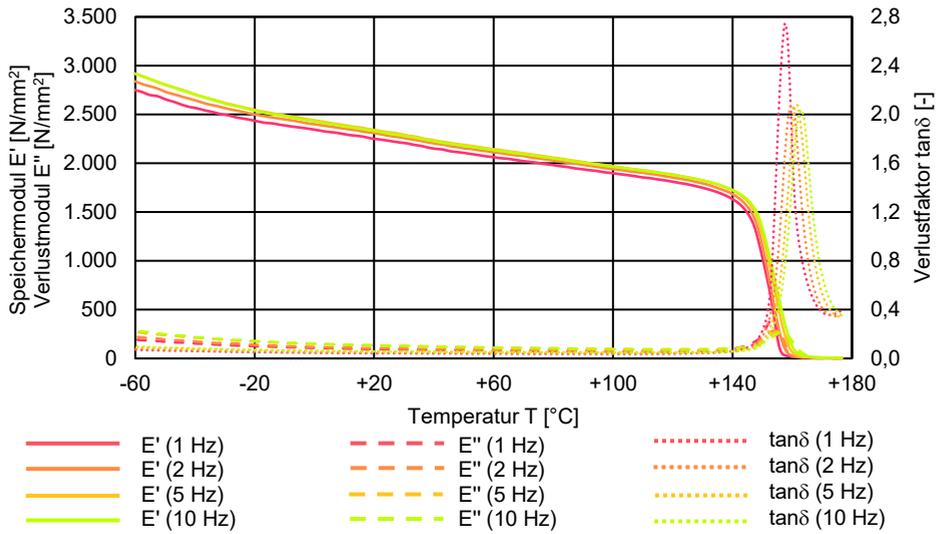


Bild 30

Speichermodul E' , Verlustmodul E'' und Verlustfaktor $\tan\delta$ in Abhängigkeit der Temperatur T und der Frequenz f für Polycarbonat im Zugversuch mit einer dynamisch-mechanisch-thermischen Analyse (DMTA).

Bild 31 zeigt den Ausschnitt des Verlaufs des Speichermoduls E' , des Verlustmoduls E'' und des Verlustfaktors $\tan\delta$ in einem Bereich von +140 °C bis +170 °C bei einer Frequenz von 1 Hz mit dem Wechsel der Zustandsbereiche über den energieelastischen Bereich und den Glasübergang bis entropieelastischen Bereich.

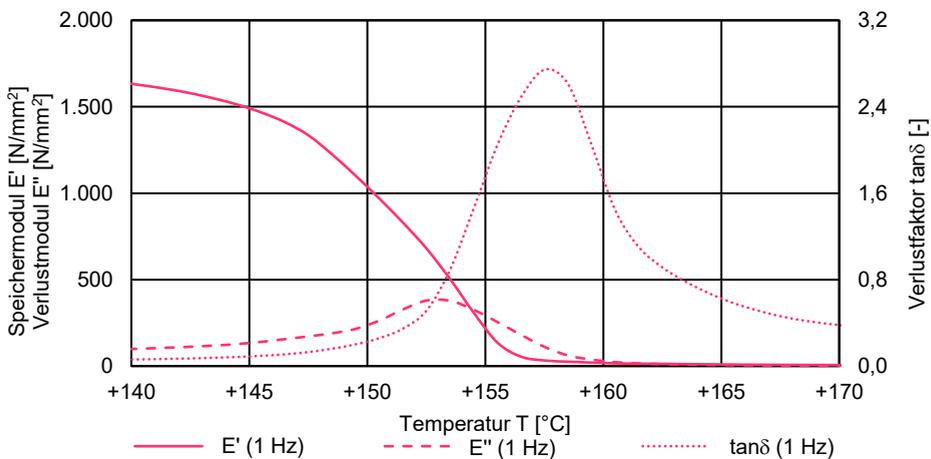


Bild 31

Speichermodul E' , Verlustmodul E'' und Verlustfaktor $\tan\delta$ in einem Temperaturbereich von +140 °C bis +170 °C bei einer Frequenz von 1 Hz für Polycarbonat im Zugversuch mit einer dynamisch-mechanisch-thermischen Analyse (DMTA).

Mit den temperaturabhängigen Messungen der viskoelastischen Eigenschaften bei unterschiedlicher Frequenz ist über die Anwendung des Zeit-Temperatur-Verschiebungsprinzips (ZTV) die Entwicklung einer Masterkurve für eine Referenztemperatur T_0 am Speichermodul E' zur Abschätzung des viskoelastischen Verhaltens möglich. Dabei ist die Glasübergangstemperatur nach vier unterschiedlichen Methoden ausgewertet. Tabelle 6 zeigt die zur Erstellung der Masterkurve benötigten universellen Konstanten C_1 und C_2 der Williams-Landel-Ferry-Gleichung (WLF) zur Beschreibung der Verschiebungsfunktion und Bild 32 die grafische Darstellung der Masterkurven für die jeweilige Referenztemperaturen T_0 . Die Angabe der Glasübergangstemperatur wird in Anlehnung an ISO 6721-11 als Maximalwert des Verlustfaktors $\tan\delta$ mit $+157,7$ °C angegeben.

Die Auswertung über das Tangentenverfahren zeigt eine starke Nutzerabhängigkeit auf, da die Wahl der Tangenten zur Bestimmung der Glasübergangstemperatur individuell steuerbar ist. Eine Anwendung des Verfahrens mit der Wendepunktmethode des Speichermoduls E' hängt von der Auswertung ab. Die Kurve des Speichermoduls kann direkt gemessen werden, allerdings benötigt die Bestimmung des Wendepunktes eine mathematische Funktion. Messunsicherheiten und Messungenauigkeiten führen somit zu leicht veränderten Werten. Die Auswertung über den Maximalwert des Verlustmoduls E'' zeigt eine gute Übereinstimmung mit der Auswertung der Glasübergangstemperatur mit dynamischen Differenzkalorimetrie (DSC). Allerdings wird häufig die Masterkurve an der Glasübergangstemperatur aus dem Maximalwert des Verlustfaktors gewählt.¹¹⁴ Im Vergleich mit Masterkurven der anderen Auswerteverfahren zeigt sich, dass die Auswertung der Masterkurve mit der Referenztemperatur als Glasübergangstemperatur am Maximalwert des Verlustfaktors zu konservativeren Werten führt. Es wird daher für weitere Betrachtungen die Masterkurve nach diesem Auswerteverfahren empfohlen.

Tabelle 6

Referenztemperatur T_0 als Glasübergangstemperatur T_g mit universellen Konstanten C_1 und C_2 der Williams-Landel-Ferry-Gleichung (WLF) und der Aktivierungsenergie E_a des Arrhenius-Ansatzes zur Bestimmung der horizontalen Verschiebungskomponente α_T von Polycarbonat.

Methode	Glasübergangstemperatur T_g	Universelle Konstanten C_1 und C_2 Aktivierungsenergie E_a
Tangentenverfahren	$+147,4$ °C	$C_1 = 70,5$ $C_2 = 214,5$ K $29.509,481$ kJ/mol
Wendepunkt Speichermodul E'	$+153,7$ °C	$C_1 = 95,4$ $C_2 = 315,5$ K $80.395,685$ kJ/mol
Maximalwert Verlustmodul E''	$+153,1$ °C	$C_1 = 95,4$ $C_2 = 316,5$ K $142.810,585$ kJ/mol
Maximalwert Verlustfaktor $\tan\delta$	$+157,7$ °C	$C_1 = 13,3$ $C_2 = 45,0$ K $21.102,303$ kJ/mol

¹¹⁴ Vergleiche Ehrenstein 2003, Seite 267 ff., Kuntsche 2015, Seite 116 und Schuster 2022, Seite 100 und Seite 312.

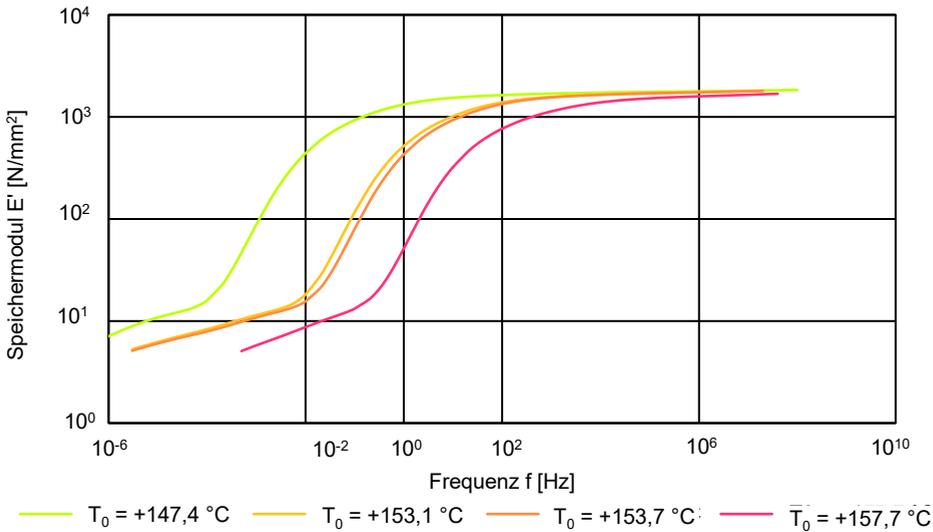


Bild 32

Masterkurve des Speichermoduls E' des Polycarbonats mit unterschiedlichen Auswertungsmethoden der Glasübergangstemperatur T_0 .

Zur Sicherstellung des flächigen Verbundes zwischen der Polycarbonattafel und der Dünnglastafel wird ein flüssiges Gießharz als thermoplastisches Polyurethan eingebracht, das nach einer Aushärtung bei Raumtemperatur innerhalb von 24 h vernetzt und den Verbund sicherstellt. Das Gießharz entsteht durch das Verfahren der Polyaddition von Monomeren mit mehreren Hydroxylgruppen sowie Isocyanatgruppen. Dabei bestimmen die verwendeten Alkohole und Isocyanate die Eigenschaften des Polyurethans. Das Gießharz kann damit von hart bis hochelastisch hergestellt werden. Das thermoplastische Polyurethan weist nach der Aushärtung eine hohe Elastizität auf und ermöglicht einen effektiven Ausgleich der unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten von Dünnglas und Polycarbonat. Die weichmacherfreie Zwischenschicht verhindert eine chemische Reaktion des Polycarbonats und der einhergehenden Veränderung mechanischer Kennwerte. Analog werden Additive als Blocker vor ultravioletter Strahlung hinzugegeben, um das innenliegende Polycarbonat vor Versprödung und mechanischer Eigenschaftsänderung zu schützen.

In Tabelle 7 sind die maßgebenden Materialeigenschaften des thermoplastischen Polyurethans als Zwischenschicht angegeben. Die Kennwerte sind mit physikalischen und mechanischen Versuchen bestimmt. ¹¹⁵

¹¹⁵ Die Zusammensetzung des thermoplastischen Polyurethans zwischen den Untersuchungen aus Weimar 2011, Seite 99 ff. und der in dieser Arbeit verwendeten Zwischenschicht ist unverändert.

Tabelle 7

Physikalische und mechanische Eigenschaften des thermoplastischen Polyurethans bei einer Temperatur von +25 °C.

Eigenschaft	Kennwert
Dichte	1,035 g/cm ³
Bruchspannung	0,39 N/mm ²
Bruchdehnung	110 %
Elastizitätsmodul	0,76 N/mm ²
Querdehnzahl	0,40

Im Allgemeinen entsprechen die mechanischen Eigenschaften den Kennwerten bei Temperatur von +25 °C. Die ingenieurmäßige Betrachtung erfordert allerdings eine erweiterte Kenntnis des Verhaltens des Polymers bei unterschiedlicher Temperatur, Belastungshöhe und Belastungsdauer. Die Zustandsbereiche des thermoplastischen Polyurethans sind mit einer dynamisch-mechanisch-thermischen Analyse (DMTA) in einem Temperaturbereich von -80 °C bis +80 °C bei einer Heizrate von +2 K/min im Zugversuch bestimmt. Die Proben werden in Bild 33 mit einer konstanten Frequenz von 1 Hz, 2 Hz, 5 Hz und 10 Hz mit einer sinusförmigen Zugbeanspruchung belastet. Der energieelastische Bereich liegt unterhalb der Temperatur von etwa -58,7 °C, der Glasübergangsbereich befindet sich zwischen -57,1 °C und -41,3 °C. Ab etwa -41,3 °C beginnt ein nahezu konstanter entropieelastischer Bereich bis zum Beginn des Schmelzbereiches bei +95 °C. Mit einer Glasübergangstemperatur unterhalb von ±0 °C ist das Zwischenschichtmaterial den thermoplastischen Elastomeren zugeordnet.¹¹⁶ Die Dehnung der Zwischenschicht oberhalb des Glasübergangsbereichs verhält sich überwiegend elastisch und zeigt einen geringen viskosen Anteil.

¹¹⁶ In Weimar 2011, Seite 101 f. wird die Glasübergangstemperatur bei einer Frequenz von 0,5 Hz über den Mittenpunkt der Wendetangenten mit -52 °C und die Schmelztemperatur bei etwa +95 °C bestimmt.

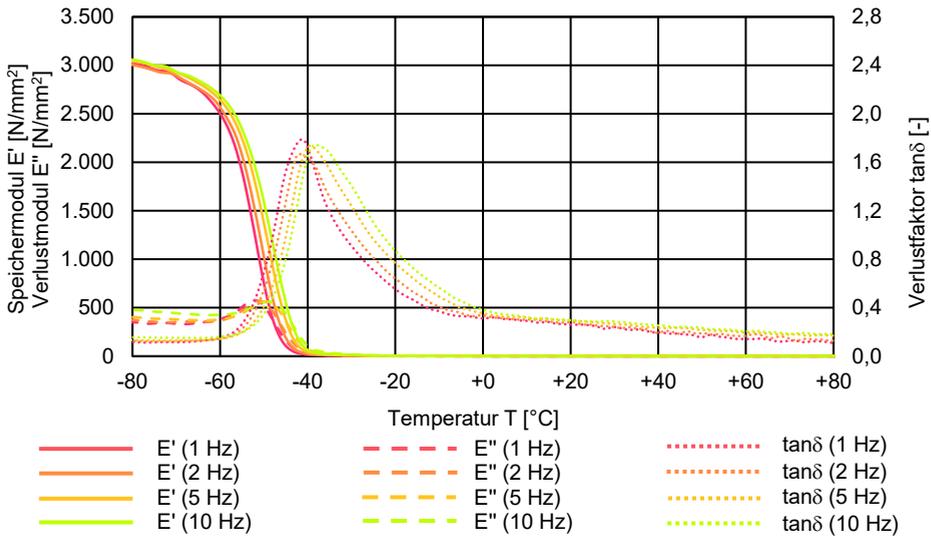


Bild 33

Speichermodul E' , Verlustmodul E'' und Verlustfaktor $\tan\delta$ in Abhängigkeit der Temperatur T und der Frequenz f für thermoplastisches Polyurethan im Zugversuch mit einer dynamisch-mechanisch-thermischen Analyse (DMTA).

Bild 34 zeigt den Ausschnitt des Verlaufs des Speichermoduls E' , des Verlustmoduls E'' und des Verlustfaktor $\tan\delta$ in einem Bereich von -80 °C bis -20 °C mit einem Wechsel der Zustandsbereiche über den energieelastischen Bereich und den Glasübergang bis entropieelastischen Bereich.

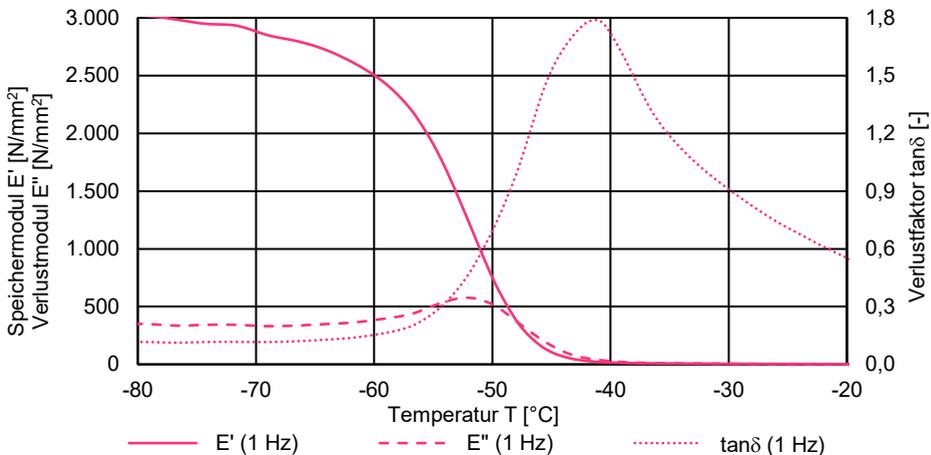


Bild 34

Speichermodul E' , Verlustmodul E'' und Verlustfaktor $\tan\delta$ in einem Temperaturbereich von -80 °C bis -20 °C bei einer Frequenz von 1 Hz für thermoplastisches Polyurethan im Zugversuch mit einer dynamisch-mechanisch-thermischen Analyse (DMTA).

Mit den temperaturabhängigen Messungen der viskoelastischen Eigenschaften bei unterschiedlicher Frequenz ist über die Anwendung des Zeit-Temperatur-Verschiebungsprinzips (ZTV) die Entwicklung einer Masterkurve für eine Referenztemperatur T_0 am Speichermodul zur Abschätzung des viskoelastischen Verhaltens möglich. Dabei ist die Glasübergangstemperatur T_g nach vier unterschiedlichen Methoden ausgewertet. Tabelle 8 zeigt die zur Erstellung der Masterkurve benötigten universellen Konstanten C_1 und C_2 der Williams-Landel-Ferry-Gleichung (WLF) zur Beschreibung der Verschiebungsfunktion und Bild 35 die grafische Darstellung der Masterkurven für die jeweilige Referenztemperaturen T_0 . Die Angabe der Glasübergangstemperatur wird in Anlehnung an ISO 6721-11 als Maximalwert des Verlustfaktors $\tan\delta$ mit $-58,7\text{ °C}$ angegeben.

Die Auswertung über das Tangentenverfahren zeigt eine starke Nutzerabhängigkeit auf, da die Wahl der Tangenten zur Bestimmung der Glasübergangstemperatur individuell steuerbar ist. Eine Anwendung des Verfahrens mit der Wendepunktmethode des Speichermoduls E' hängt von der Auswertung ab. Die Kurve des Speichermoduls kann direkt gemessen werden, allerdings benötigt die Bestimmung des Wendepunktes eine mathematische Funktion. Messunsicherheiten und Messungenauigkeiten führen somit zu leicht veränderten Werten. Die Auswertung über den Maximalwert des Verlustmoduls E'' zeigt eine gute Übereinstimmung mit der Auswertung der Glasübergangstemperatur mit dynamischen Differenzkalorimetrie (DSC). Allerdings wird häufig die Masterkurve an der Glasübergangstemperatur aus dem Maximalwert des Verlustfaktor gewählt.¹¹⁷ Im Vergleich mit Masterkurven der anderen Auswerteverfahren zeigt sich, dass die Auswertung der Masterkurve mit der Referenztemperatur als Glasübergangstemperatur am Maximalwert des Verlustfaktors zu konservativeren Werten führt. Es wird daher für weitere Betrachtungen die Masterkurve nach diesem Auswerteverfahren empfohlen.

Tabelle 8

Referenztemperatur T_0 als Glasübergangstemperatur T_g mit universellen Konstanten C_1 und C_2 der Williams-Landel-Ferry-Gleichung (WLF) und der Aktivierungsenergie E_a des Arrhenius-Ansatzes zur Bestimmung der horizontalen Verschiebungskomponente α_T des thermoplastischen Polyurethans.

Methode	Glasübergangstemperatur T_g	Universelle Konstanten C_1 und C_2 Aktivierungsenergie E_a
Tangentenverfahren	$-41,3\text{ °C}$	$C_1 = 45,5 \mid C_2 = 184,0\text{ K}$ $680,546\text{ kJ/mol}$
Wendepunkt Speichermodul E'	$-51,8\text{ °C}$	$C_1 = 89,5 \mid C_2 = 328,0\text{ K}$ $-10.437,652\text{ kJ/mol}$
Maximalwert Verlustmodul E''	$-52,2\text{ °C}$	$C_1 = 92,6 \mid C_2 = 338,5\text{ K}$ $-10.286,559\text{ kJ/mol}$
Maximalwert Verlustfaktor $\tan\delta$	$-58,7\text{ °C}$	$C_1 = 97,5 \mid C_2 = 343,5\text{ K}$ $-12,794\text{ kJ/mol}$

¹¹⁷ Vergleiche Ehrenstein 2003, 267 ff., Kuntsche 2015, Seite 116 und Schuster 2022, Seite 100 und Seite 312.

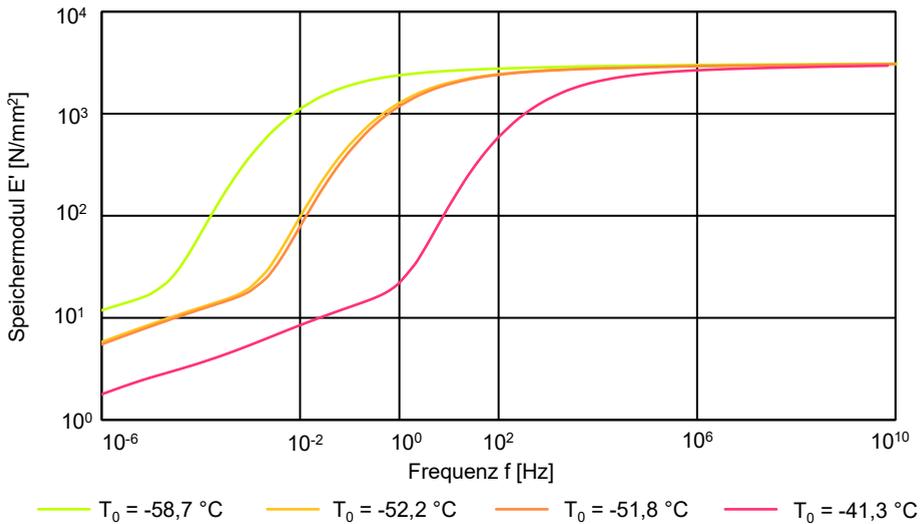


Bild 35

Masterkurve des Speichermoduls E' von Polyurethan mit unterschiedlichen Auswertungsmethoden mit Angabe der Referenztemperatur und der universellen Konstanten C_1 und C_2 der Williams-Landel-Ferry-Gleichung (WLF).

4.4 Herstellung

Bei der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln stellt das Gießharzverfahren mit einem mehrkomponentigen thermoplastischen Polyurethan den Verbund zwischen den einzelnen Schichten sicher. Zur Verbesserung der Haftung der Zwischenschicht werden die Oberflächen der Dünngläser gereinigt. Dabei ist eine Anpassung des Drucks der Reinigungsanlage auf die Glasdicke erforderlich. Ein Haftvermittler wird nicht aufgebracht. Untersuchungen zeigen eine Empfehlung für eine manuelle Reinigung von Dünngläsern mit einer Nenndicke unter 2 mm, um einen ungewollten Glasbruch zu vermeiden. Im Anschluss wird am Rand der untersten Dünnglastafel ein Butylband eingelegt, das der gewünschte Dicke der Zwischenschicht entspricht. Die aufgelegte Polycarbonattafel umschließt ein Volumen für das einzufüllende flüssige Gießharz. Eine Einlaufhülse in der Mitte der längeren Kante und mehrere Auslaufhülsen sind für das Befüllen mit dem Material der Zwischenschicht sowie für die Entlüftung notwendig. Das flüssige Polyurethan wird unter Druck in erforderlicher Menge in das Volumen eingefüllt. Das Polyurethan härtet mit einsetzender chemischer Reaktion bei Raumtemperatur ohne zusätzlichen Einfluss von Feuchtigkeit oder Bestrahlung innerhalb einer Dauer von 24 h aus. Die Hülsen werden entfernt und die entstehenden Öffnungen mit einem Silikon beziehungsweise Butyl verschlossen. Wegen der niedrigen Steifigkeit des Dünnglases sind produktionsbedingt geeignete Decktafeln zum Schutz der Verbundtafel sowie vor unerwünschtem Glasbruch erforderlich. In einem zweiten Arbeitsschritt wiederholt sich das Verfahren für die zweite Hälfte der Verbundtafel. Bild 36 zeigt die Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel auf einer

dickeren Glastafel liegend während des Aushärtungsprozesses mit einer Auslaufhülse in der oberen Polyurethanschicht.¹¹⁸

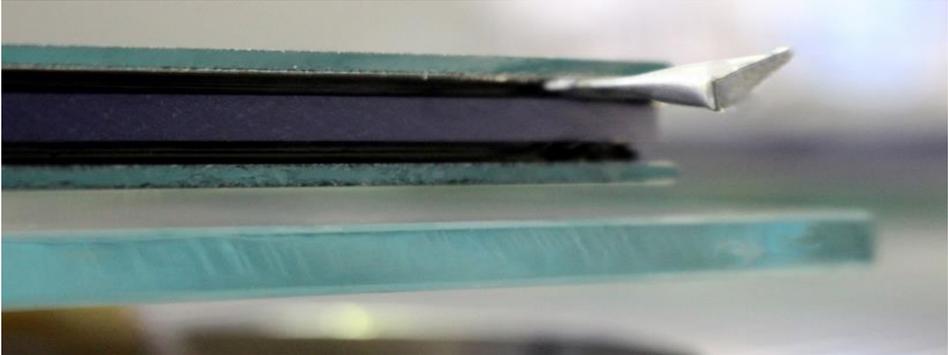


Bild 36

Schutz der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel durch geeignete Decktafeln während der Produktion.

Während der Produktion im Gießharzverfahren entstehen keine Eigenspannungen infolge unterschiedlicher Wärmeausdehnungen. Individuelle Abmessungen sowie Anforderungen und komplexe Geometrien an Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln sind in der Prozesskette einfach zu berücksichtigen.¹¹⁹ Das am Rand eingebrachte Butylband verhindert ein Herauslaufen der flüssigen Zwischenschicht. Üblicherweise wird dabei ein schwarzes Butylband verwendet, das bei freiliegenden Kanten zu einer optischen Beeinträchtigung führt. Ein transparentes Butylband stellt wie in Bild 37 eine Alternative dar und könnte bei einer Lagerung mit freien Kanten eingesetzt werden.

¹¹⁸ Vergleiche Weimar 2018a, Seite 68 f.

¹¹⁹ Vergleiche Weimar 2018a, Seite 64 ff.

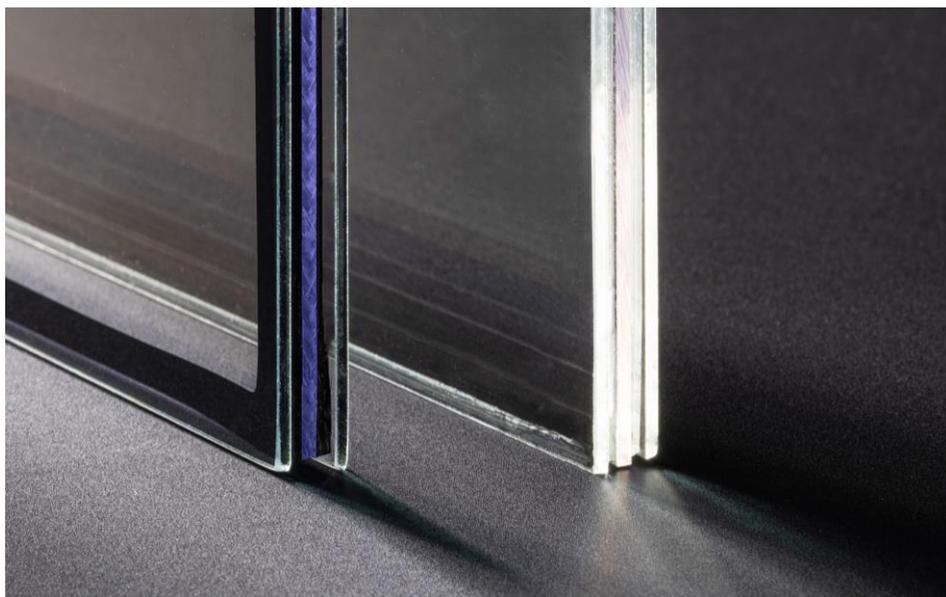


Bild 37

Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit einem schwarzen (links) und einem transparenten Butylband (rechts).

Eine Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel verbindet die günstigen Eigenschaften der transparenten Kunststoffe wie ein geringes Eigengewicht, leichte Verarbeitbarkeit und duktilen Materialverhalten. Kombiniert mit der hohen Oberflächenhärte, guter Alterungsbeständigkeit und hohem Elastizitätsmodul des Glases ergeben sich neuartige Verbundtafeln. Besondere Beachtung muss auf die Verhinderung des ultravioletten Strahlungseinflusses auf die Polycarbonatplatte gelegt werden. Dazu eignet sich die Zwischenschicht, die neben dem flächigen Verbund auch einen ausreichenden Schutz vor ultravioletter Strahlung über Additive sichergestellt. Die Untersuchungen zu Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln als Verbundsicherheitsglas werden nachfolgend durchgeführt und mit Zusatzanforderungen an den Brand-, Wärme- und Schallschutz sowie die Sicherheit ergänzt. Zusätzlich ist die Betrachtung der Ausdehnung infolge einer Temperaturdifferenz notwendig. Polycarbonat zeigt einen um den Faktor 7 höheren Wärmeausdehnungskoeffizienten. Über die Zwischenschicht muss die Dehnungsdifferenz ohne Gesamtversagen des Querschnittes ausgeglichen werden.

Der Prototyp einer Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel mit nachgewiesenen Untersuchungen als Verbundsicherheitsglas und Sicherheitssonderverglasung mit der höchsten Widerstandsklasse P8B gegen manuellen Angriff ist als Exponat auf der Sonderschau »glass technology live« der Glasstec 2018 in Düsseldorf zu sehen. Der Fokus der Ausstellung liegt auf innovative Entwicklungen zu Dünnglas, um zukunftsweisende Potentiale des dünnen, transparenten Materials im Bauwesen aufzuzeigen. Das Exponat in Bild 38 mit den Abmessungen 985 mm auf 1.677 mm besteht dabei aus zwei äußeren Dünnglastafeln Leoflex und zwei

innenliegenden Polycarbonattafeln, verbunden jeweils über eine Schicht aus thermoplastischem Polyurethan. Der mit einer Nenndicke von 17,7 mm dünne Querschnitt erfüllt die höchste Widerstandsklasse P8B gegen manuellen Angriff.¹²⁰



Bild 38

Prototyp einer Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel mit dem Dünnglas Leoflex und der höchsten Widerstandsklasse P8B gegen manuellen Angriff auf der Sonderschau »glass technology live« der Glasstec 2018 in Düsseldorf.

¹²⁰ Der Querschnittsaufbau aus zwei Dünnglastafeln des Dünnglases Leoflex der Nenndicke 0,85 mm, zwei Polycarbonattafeln der Nenndicke 5,00 mm und insgesamt drei Zwischenschichten aus Polyurethan der Nenndicke 2,00 mm ist in Kapitel 9.2 als angriffhemmende Verglasung nachgewiesen.

5 Beständigkeit

5.1 Grundlagen

Die klimatische Beständigkeit von Verbund- und Verbundsicherheitsglas wird mit DIN EN ISO 12543-4 über Versuche bei hoher Temperatur, in der Feuchte und unter Bestrahlung nachgewiesen. Die Untersuchungen geben Erkenntnisse zu einer künstlichen Alterung. Es sind hohe Temperaturen von +100 °C, hohe Luftfeuchtigkeit von nahezu 100 % rF bei +50 °C und eine Bestrahlung für 2.000 h bei +45 °C vorgesehen. Die Prüfungen stellen eine Vergleichbarkeit des klimatischen Einflusses auf die Alterung unter Laborbedingungen für Verbund- und Verbundsicherheitsglas dar. Eine Prüfung im Freifeld bietet die Möglichkeit, den Umwelteinfluss unter realen Bedingungen am Prüfkörper zu untersuchen. Allerdings sind die Feldversuche zur Klimaeinwirkung beispielweise in Texas in den USA sehr zeit- und kostenintensiv.

Die erweiterten Eigenschaften von Verbundsicherheitsglas erfordern zusätzliche Prüfungen. Zur Konformität des Laminates als Verbundsicherheitsglas sind die Prüfverfahren in DIN EN 14449, Anhang C als Prüfungen der mechanischen Festigkeit beschrieben. Die Kugelfallprüfung und der Pendelschlagversuch sind als zerstörungsbehaftete Versuche gegeben. Weitere Prüfungen wie ein Druck-Scherversuch, ein Pummeltest oder Zähigkeits- und Adhäsionsversuche untersuchen die Zähigkeit oder die Haftung der Zwischenschicht an Glas, allerdings sind diese Untersuchungen nicht abschließend geregelt. DIN EN ISO 12543-2 legt eine Pendelschlagklasse von mindestens 3(B)3 im Pendelschlagversuch für die Beanspruchung mit einem weichen Stoß fest. Die Musterverwaltungsvorschrift Technische Baubestimmung (MVV TB) erhöht die Widerstandsklasse auf 2(B)2. Eine Kugelfallprüfung simuliert den harten Stoß. Nachfolgend sind die Versuche zur klimatischen Beständigkeit unter Laborbedingungen und die mechanische Festigkeit mit der Kugelfallprüfung und dem Pendelschlagversuch durchgeführt, um die normativ geforderten Nachweise zur Klassifizierung als Verbund- und Verbundsicherheitsglas zu erfüllen. Die Versuche liefern Erkenntnisse zur klimatischen Beständigkeit und zum mechanischen Verhalten von Verbund- und Verbundsicherheitsglas.

5.2 Klimatische Beanspruchung

Die Beständigkeit der Zwischenschicht gegen klimatische Beanspruchung nach DIN EN ISO 12543-4 wird durch Untersuchungen bei hoher Temperatur, in der Feuchte und unter Bestrahlung experimentell nachgewiesen. Im Anschluss erfolgt für jeden Prüfkörper eine visuelle Untersuchung auf Fehlstellen. Die Zwischenschicht darf sich nach den Versuchen nicht durch das Auftreten von Blasen, Delaminationen, Schleier oder Trübungen wesentlich verändern. Das Verfahren zur Prüfung der Beständigkeit ist sowohl für Verbund- als auch für Verbundsicherheitsglas erforderlich.

Die Prüfung bei hoher Temperatur bestimmt den Einfluss von hohen Temperaturen über einen längeren Zeitraum auf den Verbund. Es soll eine Veränderung der Eigenschaften der Zwischenschicht durch Fehlstellen vermieden werden. Insgesamt lagern drei Prüfkörper mit den Mindestabmessungen von 300 mm auf 100 mm entweder bei einer Temperatur von +100 °C für 16 h oder für 2 h in einem Ofen. Nach Abkühlung auf Raumtemperatur werden die Prüfkörper auf Fehlstellen untersucht.¹²¹

Tabelle 9 zeigt den Querschnittsaufbau mit Nenn- und Realdicke der Prüfkörper zur Untersuchung bei hoher Temperatur für Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit den chemisch vorgespannten Dünngläsern Falcon und Leoflex mit schwarzem Butylband sowie mit dem Floatglas Optiwhite mit schwarzem und transparentem Butylband. Die Prüfungen sind mit Prüfkörpern der Abmessung 300 mm auf 150 mm bei einer Ofenlagerung mit einer Temperatur von +100 °C für 2 h durchgeführt.

Tabelle 9

Querschnittsaufbau für die Prüfkörper zur Beständigkeitsprüfung bei hoher Temperatur für Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit Dünnglas Falcon (CVG 01), Dünnglas Leoflex (CVG 02) und Dünnglas Optiwhite (FG) mit schwarzem (s) oder transparentem (t) Butylband.

Prüfkörper	Anzahl	Aufbau	Nenndicke	Realdicke
T_F_s	3	0,50 mm CVG 01 2,00 mm TPU 2,00 mm PC 2,00 mm TPU 0,50 mm CVG 01	7,0 mm	7,3 mm (0,1 mm)
T_L_s	3	0,85 mm CVG 02 2,00 mm TPU 2,00 mm PC 2,00 mm TPU 0,85 mm CVG 02	7,7 mm	7,6 mm (0,1 mm)
T_O_s	3	2,00 mm FG 2,00 mm TPU 2,00 mm PC 2,00 mm TPU 2,00 mm FG	10,0 mm	9,8 mm (0,1 mm)
T_O_t	3	2,00 mm FG 2,00 mm TPU 2,00 mm PC 2,00 mm TPU 2,00 mm FG	10,0 mm	10,0 mm (0,1 mm)

Nach Abschluss der Prüfung bei hoher Temperatur ist die optische Auswertung vor einem weißen, diffusen Hintergrund auf Fehlstellen möglich. Tabelle 10 fasst die Ergebnisse zusammen.

¹²¹ Die Novellierung der Normenreihe DIN EN ISO 12543 in 2022 sieht vor, dass die Untersuchung bei hoher Temperatur an Prüfkörpern mit Mindestabmessungen von 300 mm auf 200 mm stattfinden. Allerdings sind die Untersuchungen mit den zum Zeitpunkt der Prüfung geltenden Normen durchgeführt. Demnach findet die Prüfung bei hoher Temperatur bei 2 h mit den Mindestabmessungen 300 mm auf 100 mm statt.

Tabelle 10

Ergebnisse der Beständigkeitsprüfung bei hoher Temperatur für Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit Dünnglas Falcon, Dünnglas Leoflex und Dünnglas Optiwhite.

Prüfkörper	Ergebnis	
	Fehlstellen	Prüfbedingung
T_F_s	Delamination	$T_{\text{real}} = (+101,1 \pm 0,1) \text{ } ^\circ\text{C}$ $T_{\text{soll}} = (+100,0 \pm 2,0) \text{ } ^\circ\text{C}$
T_L_s	keine	$T_{\text{real}} = (+99,4 \pm <0,1) \text{ } ^\circ\text{C}$ $T_{\text{soll}} = (+100,0 \pm 2,0) \text{ } ^\circ\text{C}$
T_O_s	keine	$T_{\text{real}} = (+101,1 \pm 0,1) \text{ } ^\circ\text{C}$ $T_{\text{soll}} = (+100,0 \pm 2,0) \text{ } ^\circ\text{C}$
T_O_t	keine	$T_{\text{real}} = (+100,1 \pm 0,2) \text{ } ^\circ\text{C}$ $T_{\text{soll}} = (+100,0 \pm 2,0) \text{ } ^\circ\text{C}$

Bild 39 zeigt beispielhaft die optische Auswertung eines Prüfkörpers nach der Prüfung bei hoher Temperatur ohne Fehlstellen.

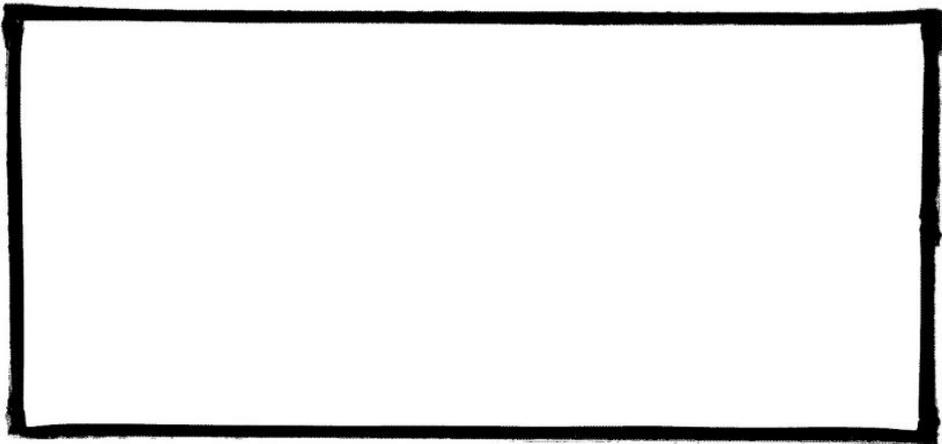


Bild 39

Prüfkörper nach der Beständigkeitsprüfung bei hoher Temperatur ohne Fehlstellen für Verbundtafeln mit dem Dünnglas Optiwhite.

Bei keinem der drei Prüfkörper einer Versuchsreihe mit den Dünngläsern Leoflex und Optiwhite treten Fehlstellen auf. Lediglich mit dem Dünnglas Falcon ergeben sich an der unteren rechten Ecke in Bild 40 Delaminationen. Die Verbundtafel besteht die Prüfung bei hoher Temperatur nicht.



Bild 40

Prüfkörper nach der Beständigkeitsprüfung bei hoher Temperatur mit Delamination für Verbundtafeln mit dem Dünnglas Falcon.

Die Prüfung in der Feuchte stellt den Einfluss von hoher Luftfeuchtigkeit auf den Verbund und insbesondere die Zwischenschicht über einen längeren Zeitraum fest. Die drei Prüfkörper mit Mindestabmessungen von 300 mm auf 100 mm stehen während des Versuchs ohne Kondensation senkrecht bei einer Temperatur von +50 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 80 % rF oder während des Versuchs mit Kondensation bei +50 °C über Wasser für einen Zeitraum von 14 d in einer Klimakammer.¹²²

Tabelle 11 zeigt den Querschnittsaufbau mit Nenn- und Realdicke der Prüfkörper zur Untersuchung in der Feuchte für Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit den chemisch vorgespannten Dünngläsern Falcon und Leoflex mit schwarzem Butylband sowie mit dem Floatglas Optiwhite mit schwarzem und transparentem Butylband. Die Prüfungen werden mit Prüfkörpern der Abmessungen 300 mm auf 150 mm durchgeführt.

¹²² Die Novellierung der Normenreihe DIN EN ISO 12543 in 2022 sieht vor, dass die Untersuchung in der Feuchte an Prüfkörpern mit Mindestabmessungen von 300 mm auf 200 mm stattfinden. Allerdings sind die Untersuchungen den zum Zeitpunkt der Prüfung geltenden Normen durchgeführt. Demnach findet die Prüfung mit Kondensation statt.

Tabelle 11

Querschnittsaufbau für die Prüfkörper zur Beständigkeitsprüfung in der Feuchte für Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit Dünnglas Falcon (CVG 01), Dünnglas Leoflex (CVG 02) und Dünnglas Optiwhite (FG) mit schwarzem (s) oder transparentem (t) Butylband.

Prüfkörper	Anzahl	Aufbau	Nennstärke	Realdicke
F_F_s	3	0,50 mm CVG 01 2,00 mm TPU 2,00 mm PC 2,00 mm TPU 0,50 mm CVG 01	7,0 mm	7,0 mm (<0,1 mm)
F_L_s	3	0,85 mm CVG 02 2,00 mm TPU 2,00 mm PC 2,00 mm TPU 0,85 mm CVG 02	7,7 mm	7,4 mm (0,1 mm)
F_O_s	3	2,00 mm FG 2,00 mm TPU 2,00 mm PC 2,00 mm TPU 2,00 mm FG	10,0 mm	10,1 mm (<0,1 mm)
F_O_t	3	2,00 mm FG 2,00 mm TPU 2,00 mm PC 2,00 mm TPU 2,00 mm FG	10,0 mm	10,1 mm (<0,1 mm)

Während der Lagerung in der Feuchte entsteht ein Kondensat auf den Prüfkörpern. Nach Abschluss der Prüfung ist die optische Auswertung vor einem weißen, diffusen Hintergrund auf Fehlstellen möglich. Tabelle 12 fasst die Ergebnisse der Prüfung in der Feuchte zusammen.

Tabelle 12

Ergebnisse der Beständigkeitsprüfung in der Feuchte für Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit Dünnglas Falcon, Dünnglas Leoflex und Dünnglas Optiwhite.

Prüfkörper	Ergebnis	
	Fehlstellen	Prüfbedingung
F_F_s	keine	$T_{\text{real}} = (+50,4 \pm 1,3) \text{ } ^\circ\text{C}$ $T_{\text{soil}} = (+50+5) \text{ } ^\circ\text{C}$ $\varphi_{\text{real}} = (98,2 \pm 0,7) \text{ } \% \text{ rF}$ $\varphi_{\text{soil}} = \text{ca. } 100 \text{ } \% \text{ rF}$
F_L_s	keine	$T_{\text{real}} = (+52,5 \pm 0,1) \text{ } ^\circ\text{C}$ $T_{\text{soil}} = (+50+5) \text{ } ^\circ\text{C}$ $\varphi_{\text{real}} = (99,1 \pm 0,4) \text{ } \% \text{ rF}$ $\varphi_{\text{soil}} = \text{ca. } 100 \text{ } \% \text{ rF}$
F_O_s	keine	$T_{\text{real}} = (+53,3 \pm 1,0) \text{ } ^\circ\text{C}$ $T_{\text{soil}} = (+50+5) \text{ } ^\circ\text{C}$ $\varphi_{\text{real}} = (99,9 \pm 0,1) \text{ } \% \text{ rF}$ $\varphi_{\text{soil}} = \text{ca. } 100 \text{ } \% \text{ rF}$
F_O_t	keine	$T_{\text{real}} = (+50,4 \pm 1,3) \text{ } ^\circ\text{C}$ $T_{\text{soil}} = (+50+5) \text{ } ^\circ\text{C}$ $\varphi_{\text{real}} = (98,2 \pm 0,7) \text{ } \% \text{ rF}$ $\varphi_{\text{soil}} = \text{ca. } 100 \text{ } \% \text{ rF}$

In Bild 41 ist beispielhaft die optische Auswertung eines Prüfkörpers nach der Prüfung in der Feuchte dargestellt.

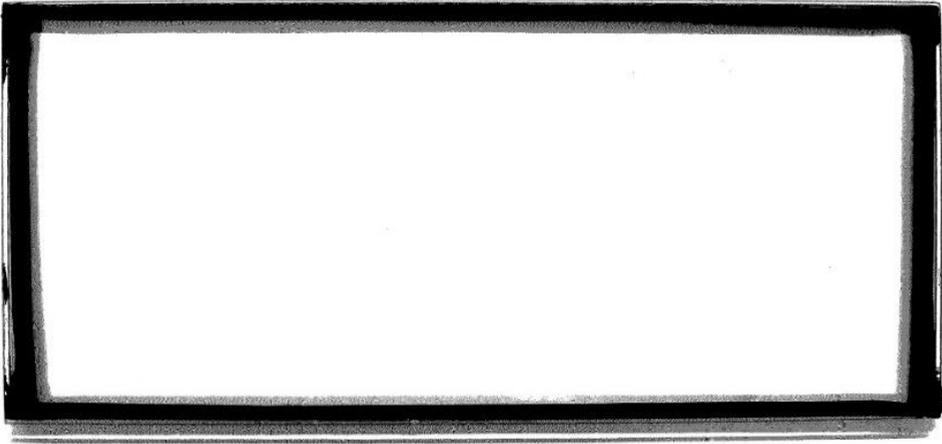


Bild 41

Prüfkörper nach der Beständigkeitsprüfung in der Feuchte ohne Fehlstellen für Verbundtafeln mit dem Dünnglas Optiwhite.

Keiner der drei Prüfkörper einer Versuchsreihe mit den Dünngläsern Falcon, Leoflex und Optiwhite weisen Fehlstellen auf. Alle Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln bestehen die Beständigkeitsprüfung in der Feuchte.

Bei der Bestrahlungsprüfung wird die Verbundtafel über einen längeren Zeitraum mit einer dem Sonnenspektrum nachempfunderer Strahlung beansprucht und der Einfluss auf die Eigenschaften der Zwischenschicht durch Veränderungen visuell beurteilt. Die drei Prüfkörper mit den Mindestabmessungen von 300 mm auf 150 mm befinden sich über einen Zeitraum von 2.000 h in einer Bestrahlungskammer mit einer Strahlungsintensität von 900 W/m^2 und einer Temperatur von $+45 \text{ }^\circ\text{C}$. Nach den Prüfungen werden die Prüfkörper auf mögliche Fehlstellen untersucht sowie der Lichttransmissionsgrad nach DIN EN 410 vor und nach der Bestrahlungsprüfung verglichen.¹²³

Tabelle 13 beschreibt den Querschnittsaufbau mit Nenn- und Realdicke der Prüfkörper zur Bestrahlungsprüfung für Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit den chemisch vorgespannten Dünngläsern Falcon und Leoflex mit schwarzem Butylband am Rand sowie für das Floatglas Optiwhite mit schwarzem und transparentem Butylband. Die Prüfungen werden mit Prüfkörpern mit den Abmessungen 300 mm auf 150 mm durchgeführt. Der Lichttransmissionsgrad wird in einem Spektralbereich von 380 nm bis 780 nm mit dem Gerät Lambda 1050+ von PerkinElmer LAS GmbH vor und nach der Prüfung gemessen.

¹²³ Die Novellierung der Normenreihe DIN EN ISO 12543 in 2022 verändert die Abmessungen der Prüfkörper für die Bestrahlungsprüfung nicht.

Tabelle 13

Querschnittsaufbau für die Prüfkörper zur Beständigkeitsprüfung unter Bestrahlung für Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit Dünnglas Falcon (CVG 01), Dünnglas Leoflex (CVG 02) und Dünnglas Optiwhite (FG) mit schwarzem (s) oder transparentem (t) Butylband.

Prüfkörper	Anzahl	Aufbau	Nennstärke	Realdicke
BP_F_s	3	0,50 mm CVG 01 2,00 mm TPU 2,00 mm PC 2,00 mm TPU 0,50 mm CVG 01	7,0 mm	7,4 mm (<0,1 mm)
BP_L_s	3	0,85 mm CVG 02 2,00 mm TPU 2,00 mm PC 2,00 mm TPU 0,85 mm CVG 02	7,7 mm	7,6 mm (0,1 mm)
BP_O_s	3	2,00 mm FG 2,00 mm TPU 2,00 mm PC 2,00 mm TPU 2,00 mm FG	10,0 mm	10,1 mm (0,1 mm)
BP_O_t	3	2,00 mm FG 2,00 mm TPU 2,00 mm PC 2,00 mm TPU 2,00 mm FG	10,0 mm	10,0 mm (<0,1 mm)

Nach Abschluss der Prüfung unter Bestrahlung ist die optische Auswertung vor einem weißen, diffusen Hintergrund auf Fehlstellen möglich. Der Unterschied beim Lichttransmissionsgrad vor und nach der Bestrahlungsprüfung darf maximal 3 % betragen.¹²⁴ Tabelle 14 fasst die Ergebnisse der Messung des Lichttransmissionsgrades zusammen. Während der Bestrahlungsprüfung liegt eine Temperatur von (+45,5±1,8) °C vor.

Tabelle 14

Ergebnisse der Beständigkeitsprüfung unter Bestrahlung für Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit Dünnglas Falcon, Dünnglas Leoflex und Dünnglas Optiwhite.

Prüfkörper	Ergebnis		
	Fehlstellen	Lichttransmissionsgrad τ_{VIS}	
		Messung	Differenz
B_F_s	keine	vorher $\tau_{VIS} = 89,5 \%$	0,3 %
		nachher $\tau_{VIS} = 89,2 \%$	
B_L_s	keine	vorher $\tau_{VIS} = 89,2 \%$	0,6 %
		nachher $\tau_{VIS} = 88,6 \%$	
B_O_s	keine	vorher $\tau_{VIS} = 89,3 \%$	0,2 %
		nachher $\tau_{VIS} = 89,1 \%$	
B_O_t	keine	vorher $\tau_{VIS} = 89,2 \%$	0,2 %
		nachher $\tau_{VIS} = 89,0 \%$	

¹²⁴ Nach DIN EN ISO 12543-2 ist eine Differenz von $\pm 3 \%$ zulässig, wenn der Lichttransmissionsgrad größer als 65 % ist, andernfalls beträgt die maximale Abweichung $\pm 2 \%$.

Keiner der drei Prüfkörper einer Versuchsreihe mit den Dünngläsern Falcon, Leoflex und Optiwhite weisen Fehlstellen auf. Alle Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln bestehen die Prüfung. Zusätzlich weicht der Lichttransmissionsgrad mit maximal 0,6 % nur geringfügig vor und nach der Prüfung voneinander ab. In Bild 42 ist beispielhaft die optische Auswertung eines Prüfkörpers nach der Bestrahlungsprüfung dargestellt.

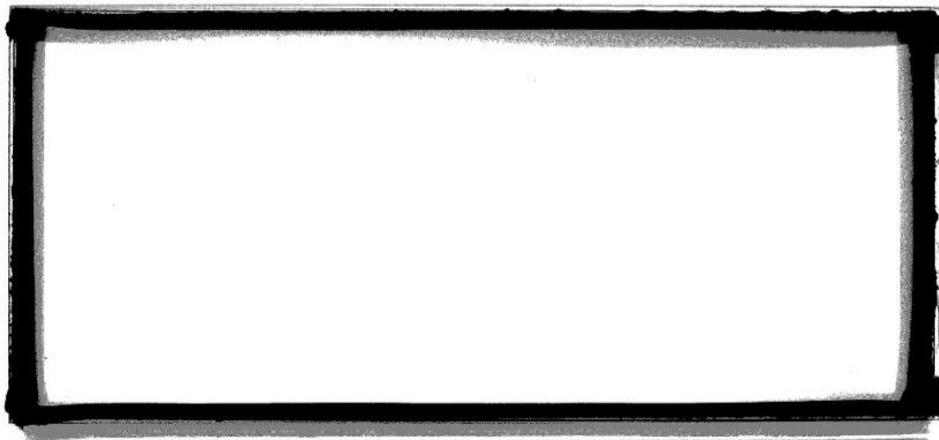


Bild 42

Prüfkörper nach der Bestrahlungsprüfung ohne Fehlstellen für Verbundtafeln mit dem Dünnglas Optiwhite.

Insgesamt erfüllt eine Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel mit den Dünnglastafeln Leoflex und Optiwhite die Nachweise der Beständigkeit nach DIN EN ISO 12543-4 für ein Verbund- und Verbundsicherheitsglas. Die Verbundtafel mit dem Dünnglas Falcon besteht die Prüfung bei hoher Temperatur nicht.

5.3 Mechanische Beanspruchung

Die Kugelfallprüfung nach DIN EN 14449 entspricht der Belastung mit einem harten Stoß. Eine Stahlkugel mit einem Durchmesser von 63,5 mm und einer Masse von 1.030 g wird aus einer Höhe von 4.000 mm mittig ohne Anfangsimpuls auf den Prüfkörper fallengelassen. Dabei beträgt die Abweichung der Auftreffstelle zur Probenmitte nicht mehr als 50 mm. Der Prüfkörper ist in einem Gestell vierseitig linienförmig eingespannt. In dem Versuchsaufbau löst ein Elektromagnet den Kugelfall aus. Insgesamt werden fünf Prüfkörper mit den Abmessungen von 500 mm auf 500 mm untersucht. Den Querschnittsaufbau mit Nenn- und Realdicke beschreibt Tabelle 15. Die Versuche werden nur für Verbundtafeln mit schwarzem Butylband durchgeführt.

Tabelle 15

Querschnittsaufbau für die Prüfkörper zur Kugelfallprüfung für Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit Dünnglas Falcon (CVG 01), Dünnglas Leoflex (CVG 02) und Dünnglas Optiwhite (FG).

Prüfkörper	Anzahl	Aufbau	Nennstärke	Realdicke
KF_F	5	0,50 mm CVG 01 2,00 mm TPU 2,00 mm PC 2,00 mm TPU 0,50 mm CVG 01	7,0 mm	7,4 mm (0,1 mm)
KF_L	5	0,85 mm CVG 02 2,00 mm TPU 2,00 mm PC 2,00 mm TPU 0,85 mm CVG 02	7,7 mm	7,3 mm (<0,1 mm)
KF_O	5	2,00 mm FG 2,00 mm TPU 2,00 mm PC 2,00 mm TPU 2,00 mm FG	10,0 mm	9,7 mm (<0,1 mm)

Nach dem Versuch wird der Zerstörungsgrad der Prüfkörper angegeben. Die Anzahl der durchschlagenden Prüfkörper, die Anzahl der angebrochenen, allerdings nicht durchschlagenden Prüfkörper sowie die Masse und Größe der von der stoß-abgewandten Zwischenschicht abgelösten Glassplitter sind dokumentiert. Die Prüfung gilt als bestanden, wenn die Stahlkugel den Prüfkörper nicht durchdringt. Die Kugelfallprüfung findet bei einer Temperatur von $(+21,4 \pm 1,8)$ °C und einer Luftfeuchtigkeit von $(42,7 \pm 5,6)$ % rF statt. Tabelle 16 zeigt die Ergebnisse der Kugelfallprüfung.

Tabelle 16

Mittelwerte für die Ergebnisse aus der Kugelfallprüfung für Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit Dünnglas Falcon, Dünnglas Leoflex und Dünnglas Optiwhite.

Prüfkörper	Fallhöhe	Anzahl	Zerstörung Durchschlag	Masse Glassplitter
KF_F	4.040 mm	5	2 x oben zerstört 1 x oben und unten zerstört 2 x nicht zerstört 5 x kein Durchschlag	0,1 g (0,2 g)
KF_L	4.040 mm	5	4 x oben zerstört 1 x nicht zerstört 5 x kein Durchschlag	0,0 g (0,0 g)
KF_O	4.040 mm	5	5 x oben und unten zerstört 5 x kein Durchschlag	1,4 g (0,4 g)

Die Kugel trifft bei allen Prüfkörpern innerhalb eines Kreises mit dem vorgeschriebenen Durchmesser von 100 mm zur Mitte des Prüfkörpers auf und durchdringt keinen Aufbau. Bei dem Dünnglas Falcon brechen an zwei Prüfkörpern nur die obere Glastafel, bei einem Prüfkörper sowohl die obere und untere Glastafel und zwei Prüfkörper bleiben auch nach dem Aufprall der Stahlkugel intakt. Insgesamt entsteht ein geringer Splitterabgang unterhalb der kritischen Größe von 40 mm an der Unterseite der Verbundtafel. Bei vier Prüfkörpern mit dem Dünnglas Leoflex bricht die obere Glastafel, bei einem Prüfkörper versagt keine der beiden

Glastafeln. Die untere Glastafel bleibt somit bei allen fünf Prüfkörpern nach dem Aufprall ohne Splitterabgang intakt. Bei allen fünf Prüfkörpern mit dem Dünnglas Optiwhite brechen sowohl die obere als auch die untere Glastafel. Dabei lösen sich Glassplitter unterhalb der kritischen Größe von 40 mm an beiden Glastafeln. Die aufgefangene Splittermasse der stoßabgewandten Glastafel weist mit einem Mittelwert von 1,4 g auf eine ausreichende Splitterbindung zwischen dem Glas und der Zwischenschicht hin. Bild 43 zeigt exemplarisch für beide Querschnittsaufbauten ein Bruchbild nach der Kugelfallprüfung.

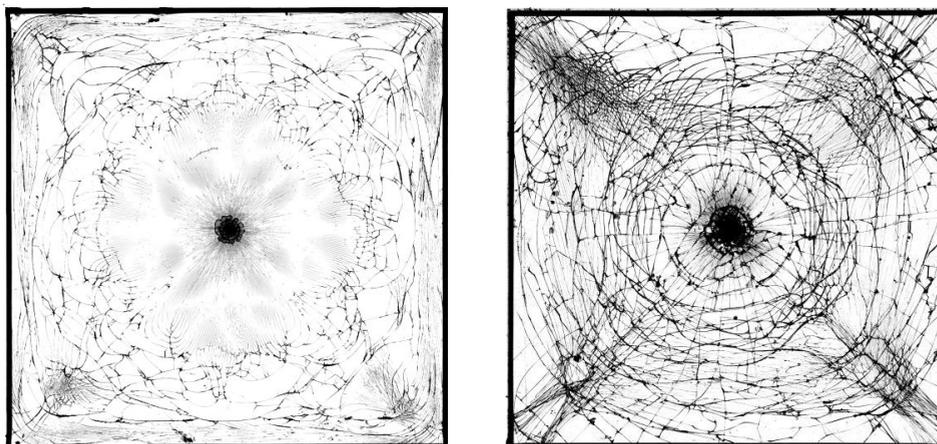


Bild 43

Bruchbild der Verbundtafeln nach der Kugelfallprüfung.

Links: Verbundtafel mit einem chemisch vorgespanntem Dünnglas

Rechts: Verbundtafel mit einem Floatglas

Während bei der Verbundtafel mit dem chemisch vorgespannten Dünnglas Leoflex nur die Glastafel an der Auftreffseite bricht, zeigen bei einem Laminat mit dem Dünnglas Optiwhite sowohl die obere als auch die untere Seite Risse. Im Vergleich der Rissbilder ist erkennbar, dass das chemisch vorgespannte Dünnglas vor allem an der Auftreffstelle ein sehr feines Bruchbild aufweist. Bei der Verbundtafel mit Floatglas entstehen an der Unterseite konzentrische Risse zur Auftreffstelle hin und an der Oberseite Risse zu den Eckpunkten.

Die Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln sowohl mit den chemisch vorgespannten Dünngläsern Falcon und Leoflex als auch mit dem nicht vorgespannten Dünnglas Optiwhite bestehen die Anforderungen an einen ausreichenden Haftverbund der Zwischenschicht an Dünnglas und Polycarbonat aus der Kugelfallprüfung. Die Splitterbindung unter mechanischer Beanspruchung mit hartem Stoß ist bei allen Querschnittsaufbauten gegeben.

Der Pendelschlagversuch für ebene Verglasungen untersucht zusätzlich den Haftverbund der Zwischenschicht zu den anderen Komponenten des Verbundes sowie das Bruchverhalten der Verbundtafel. Bei dem Prüfverfahren werden vier Prüfkörper der Breite 876 mm und der Höhe 1.938 mm jeweils bei bis zu drei

Fallhöhen eines Pendels mit der Masse von 50 kg als weicher Stoß beansprucht. Das Doppelreifenpendel schlägt aus den drei Fallhöhen 190 mm, 450 mm und 1.200 mm mittig auf die Verglasung auf. Nach jedem Aufprall werden sowohl der Prüfkörper als auch die Haltekonstruktion auf Beschädigungen untersucht. Solange ein Prüfkörper keine Beschädigung aufweist, wird die nächsthöhere Kategorie geprüft. Die Versuchsauswertung besteht aus einer Klassifizierung nach Tabelle 17 bei der das Bruchbild und die Fallhöhe entscheidend sind.¹²⁵

Tabelle 17

Klassifizierung der Ergebnisse zum Pendelschlagversuch in Abhängigkeit der Fallhöhe und des Bruchverhaltens nach DIN EN 12600.

Fallhöhe	Beschreibung
Klasse 3	Material, das mit einer Fallhöhe von 190 mm geprüft wird und den Anforderungen an die Prüfung besteht.
Klasse 2	Material, das mit einer Fallhöhe von 190 mm und 450 mm geprüft wird und den Anforderungen an die Prüfung besteht.
Klasse 1	Material, das mit einer Fallhöhe von 190 mm, 450 mm und 1.200 mm geprüft wird und den Anforderungen an die Prüfung besteht.
Bruchverhalten	Beschreibung
Typ A	Zahlreiche Risse mit scharfen Bruchkanten und großen Bruchstücken (typisch für Floatglas)
Typ B	Zahlreiche Risse entstehen, die zusammengehalten werden und nicht zerfallen (typisch für Verbundglas)
Typ C	Zerfall mit zahlreichen, kleinen, nicht scharfkantigen Bruchkrümeln (typisch für Einscheibensicherheitsglas)

Insgesamt stehen jeweils vier Prüfkörper in den Abmessungen von 876 mm auf 1.938 mm zur Verfügung. Die Prüfkörper werden bei einer Temperatur von +25 °C nacheinander mit den Fallhöhen 190 mm, 450 mm und 1.200 mm untersucht und eine Widerstandsklasse, bei der der Aufbau versagt, angegeben. Tabelle 18 zeigt den Prüfkörperquerschnitt mit Nenn- und Realdicke zum Pendelschlagversuch.

¹²⁵ Vergleiche DIN EN 14449 und DIN EN 12600.

Tabelle 18

Querschnittsaufbau für die Prüfkörper zum Pendelschlagversuch für Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit Dünnglas Falcon (CVG 01), Dünnglas Leoflex (CVG 02) und Dünnglas Optiwhite (FG).

Prüfkörper	Anzahl	Aufbau	Nennstärke	Realstärke
PS_F	4	0,50 mm CVG 01 2,00 mm TPU 3,00 mm PC 2,00 mm TPU 0,50 mm CVG 01	8,00 mm	keine Angabe
PS_L	-	0,85 mm CVG 02 2,00 mm TPU 3,00 mm PC 2,00 mm TPU 0,85 mm CVG 02	keine Verbundtafel mit dem Dünnglas Leoflex verfügbar	
PS_O	4	2,00 mm FG 2,00 mm TPU 3,00 mm PC 2,00 mm TPU 2,00 mm FG	11,00 mm	keine Angabe

Ziel der Untersuchung ist die Auswertung des Bruchverhaltens der Verbundtafel und die maximale Fallhöhe. Deshalb wird abweichend von der Norm bei jedem Prüfkörper auch nach Bruch der Glastafeln in der niedrigeren Fallhöhe ein weiterer Stoß in der nächsthöheren Fallhöhe durchgeführt. Tabelle 19 zeigt die Ergebnisse des Pendelschlagversuchs.

Tabelle 19

Klassifizierung für die Prüfkörper zum Pendelschlagversuch für Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit Dünnglas Falcon, Dünnglas Leoflex und Dünnglas Optiwhite.

Prüfkörper	Klassifizierung	
	erforderlich nach DIN EN ISO 12543-2	erreicht
PS_F	3(B)3	3(B)3 (höhere Widerstandsklassen sind mit angepasster konstruktiver Durchbildung im Klemmbereich möglich) ¹²⁶
PS_L	3(B)3	-
PS_O	3(B)3	3(B)3 (1(B)1 ist mit entsprechender Prüfkörperanzahl möglich) ¹²⁷

Sowohl die Verbundtafeln PS_F als auch PS_O entsprechen Bruchbild B, das auf Verbund- und Verbundsicherheitsglas hinweist. Die Ergebnisse zu PS_O erfüllen eine Widerstandsklasse 1(B)1, da selbst im gebrochenen Prüfkörperzustand das Pendel bei einer Fallhöhe von 1.200 mm den Aufbau nicht durchdringt. Die Dünnglastafeln von PS_F brechen bereits beim Einbau in die Haltevorrichtung und rutschen aufgrund der großen Verformungen beim Pendelaufprall aus einer Fallhöhe von 1.200 mm aus dem Auflagerrahmen. Sowohl PS_O als auch

¹²⁶ Vergleiche Weimar 2021a, Seite 43 f.

¹²⁷ Vergleiche Weimar 2021a, Seite 43 f.

PS_F werden für eine Pendelschlagklasse 3(B)3 klassifiziert, höhere Klassen sind mit Anpassungen ebenfalls möglich. Für Verbundtafeln mit dem Dünnglas Leoflex und Polycarbonat konnten keine Pendelschlagversuche durchgeführt werden, da das Dünnglas nicht mehr verfügbar ist. Das Dünnglas Leoflex ist wie das Dünnglas Falcon ein chemisch vorgespanntes Dünnglas von AGC. Im Vergleich ist Leoflex 0,35 mm dicker als Falcon, daher ist trotz leicht unterschiedlicher mechanischen Kennwerte eine Pendelschlagklasse analog zu PS_F zu erwarten.

5.4 Zusammenfassung

Die Verbundtafeln aus Dünnglas und Polycarbonat sind für einen Mindestquerschnitt mit einer innenliegenden Polycarbonatplatte einer Nenndicke von 2 mm in der Prüfung der klimatischen Beständigkeit nach DIN EN ISO 12543-4 untersucht. Dabei bestehen Verbundtafeln mit den Dünngläser Optiwhite und Polycarbonat die klimatischen Untersuchungen bei hoher Temperatur, in der Feuchte und unter Bestrahlung und können als Verbundglas eingeordnet werden. Verbundtafeln mit Deckschichten aus dem Dünnglas Falcon zeigen bei der Prüfung bei hoher Temperatur Delaminationen. Die mechanische Festigkeit nach DIN EN 14449 mit der Kugelfallprüfung ist für Verbundtafeln mit einer innenliegenden Polycarbonatplatte der Nenndicke von 2 mm mit allen drei Dünngläsern im Querschnitt bei geringem Splitterabgang bestanden. Der Pendelschlagversuch zeigt, dass eine Mindestklassifizierung von 3(B)3 mit einer Polycarbonatplatte von 3 mm im Verbund möglich ist. Der normative Nachweis höherer Pendelschlagklassen erfordert weitere intakte Prüfkörper, können aber bei größeren Fallhöhen getestet werden.

6 Tragverhalten

6.1 Grundlagen

Die Bemessung eines Bauteils basiert auf den Nachweisen im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) und im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG) mit einem semi-probabilistischen Sicherheitskonzept.¹²⁸ Der Nachweis erfolgt über einen Vergleich des Bemessungswertes des Tragwiderstands beziehungsweise des Gebrauchstauglichkeitskriteriums mit der Auswirkung der Einwirkung. Dabei setzt sich der Bemessungswert aus den Baustoffeigenschaften zusammen, die im Allgemeinen einem Quantilwert der statistischen Verteilung aus ausreichenden Messergebnissen entsprechen.

Der Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) für Verglasungen basiert auf den Untersuchungen zum Tragverhalten und wird mit einem Nachweis der zulässigen Spannungen durchgeführt. Der Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG) begrenzt mit dem Gebrauchstauglichkeitskriterium üblicherweise die maximale Durchbiegung der Verglasung und setzt sich in Abhängigkeit der Zusatzanforderungen an den Verbund aus Mindestquerschnitten zusammen.¹²⁹ Das Gebrauchstauglichkeitskriterium ergibt sich aus den Vorgaben zur uneingeschränkten Nutzung des Bauteils für den dafür vorgesehenen Zweck.¹³⁰

Die Verbundtafel besteht aus mehreren Materialien mit unterschiedlichen Eigenschaften. Das Tragverhalten setzt sich deshalb aus einem Zusammenwirken der Einzelkomponenten zusammen und entspricht üblicherweise nicht der Addition des Tragverhaltens der einzelnen Schichten. Der Schubverbund der Zwischenschicht beeinflusst wesentlich das Tragverhalten der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel. Allerdings darf nach DIN 18008-1 ein günstig wirkender Schubverbund nicht angesetzt werden. Die Grenzfälle »kein Verbund« und »voller Verbund« sind über analytische oder numerische Verfahren berechenbar. In der Praxis liegt im Allgemeinen ein »teilweiser Verbund« vor, der die Schubkräfte bedingt überträgt und das Tragverhalten der Verbundtafel realitätsnah abbildet. Die Ergebnisse aus den Versuchen zum Tragverhalten bilden die Grundlage und dienen als Eingangsparameter für die analytischen und numerischen Berechnungen. Zusätzlich ermöglichen die Ergebnisse die Einordnung der Verbundwirkung. Bild 44 zeigt die idealisierten Grenzfälle »kein Verbund« und »voller Verbund« einer Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel unter einer Biegebeanspruchung bei linearem Tragverhalten. Bei keinem Verbund stellt sich in jeder Schicht eine Zug- und Druckzone ein und die Spannungen an der Ober- und Unterseite der Tafel sind bei linearem Tragverhalten betragsmäßig gleich groß. Jede Schicht trägt die

¹²⁸ Vergleiche DIN EN 1990.

¹²⁹ Als Zusatzanforderungen werden beispielsweise Angriffshemmung oder Wärmeschutz verstanden, vergleiche Kapitel 9.

¹³⁰ Vergleiche DIN EN 1990.

Last selbstständig ab, die einzelnen Tafeln liegen lose aufeinander. Im vollen Verbund hingegen wirkt der Querschnitt wie ein monolithisches Bauteil, bei dem sich im oberen Bereich eine ausgeprägte Druckzone und im unteren Bereich eine Zugzone ausbildet. Im realitätsnahen teilweisen Verbund ergibt sich eine Spannungsverteilung zwischen keinem Verbund und vollem Verbund.

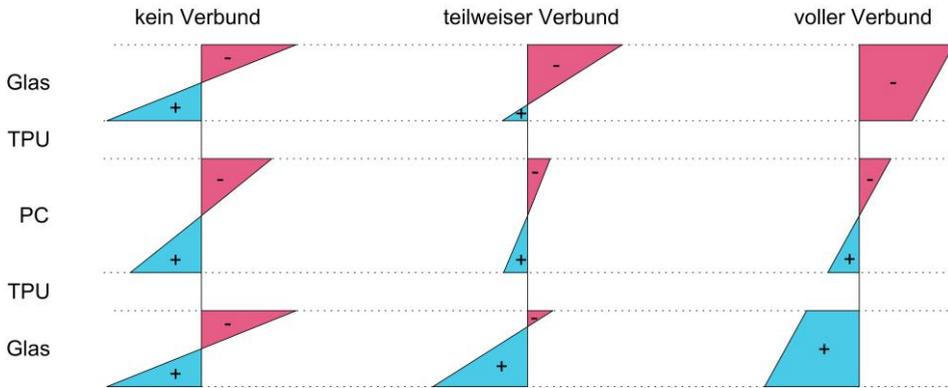


Bild 44

Qualitative Spannungsverteilung in einer Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel in Abhängigkeit der Schubübertragung der Zwischenschicht unter einer Biegebeanspruchung bei linearem Tragverhalten.

Die Bestimmung des teilweisen Schubverbundes und des Tragverhaltens erfolgen anhand von Vierpunkt-Biegeversuchen in Anlehnung an das Vierschneiden-Verfahren nach DIN EN 1288-3. Die experimentellen Ergebnisse zeigen im Vergleich zu analytischer und numerischer Berechnung der Grenzfälle die effektive Verbundwirkung innerhalb des Mehrschichtsystems.

In Abhängigkeit des Zustandes der Glastafeln werden die Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln in drei Zustände eingeteilt. In Zustand I sind beide Gläser intakt. Der Bruch einer Glastafel wird als Zustand II bezeichnet. In Zustand III sind beide Glastafeln zerstört.¹³¹ Bild 45 zeigt die Übertragung der Zustände I bis III auf eine Verbundtafel aus Dünnglas und Polycarbonat. Die Polycarbonattafel ist in jedem Zustand intakt. Während der Untersuchung des Tragverhaltens befinden sich die Prüfkörper im Zustand I.

¹³¹ Vergleiche Kott 2006, Seite 57 ff.

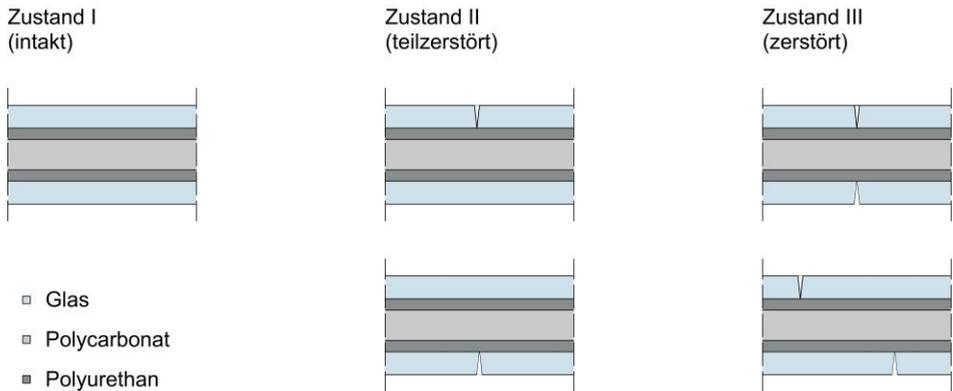


Bild 45

Einteilung der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel in Zustand I bis Zustand III.

6.2 Versuchsaufbau und Versuchsprogramm

In Anlehnung an das Vierschneiden-Verfahren nach DIN EN 1288-3 wird der Vierpunkt-Biegeversuch zur Untersuchung des Schubverbundes der Zwischenschicht und des daraus resultierenden Tragverhaltens der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel bei zweiseitiger Lagerung angewendet. Mit dem Versuchsaufbau erfolgt eine Charakterisierung des mechanischen Verhaltens und der mechanischen Eigenschaften. Die Prüfkörper mit den Abmessungen von 1.100 mm in der Länge sowie 360 mm in der Breite liegen auf zwei Auflagerrollen auf und sind symmetrisch zur Mitte durch zwei Biegerollen beansprucht. Die Spannweite zwischen den Auflagerrollen beträgt 1.000 mm. Zur Vermeidung eines Abrutschens des Prüfkörpers während des Versuchs überragt der Prüfkörper beide Auflagerrollen um 50 mm. Unter linearer Betrachtung des Kräfteverlaufs entsteht zwischen den Biegerollen ein über eine definierte Fläche konstantes Biegemoment mit Biegezugspannungen an der Unter- und Biegedruckspannungen an der Oberseite. Allerdings ist im Mehrschichtsystem der Spannungszustand in Längsrichtung über die Prüfkörperbreite nicht konstant. Querspannungen treten auf und ein geometrisch nichtlineares Tragverhalten beeinflusst bei Verformungen größer als die Nenndicke die Ergebnisse. In Bild 46 ist der Versuchsaufbau gezeigt.

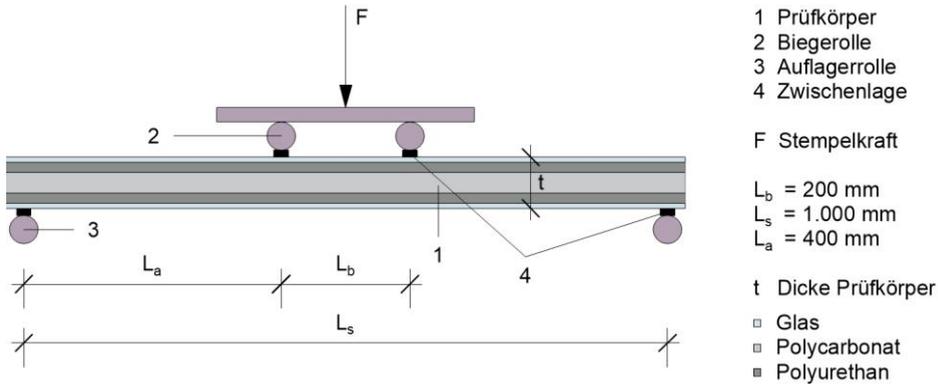


Bild 46

Schematische Darstellung des Vierpunkt-Biegeversuchs in Anlehnung an das Vierschneiden-Verfahren nach DIN EN 1288-3.

Den Querschnittsaufbau der Prüfkörper zur Untersuchung des Tragverhaltens zeigt Bild 47. Dabei sind zwei äußere Dünnglasdecktafeln über ein thermoplastisches Polyurethan mit einer innenliegenden Polycarbonat tafel flächig miteinander laminiert. Die Nenndicke der Polycarbonat tafel steigt von 4 mm über 8 mm bis zu 12 mm an.

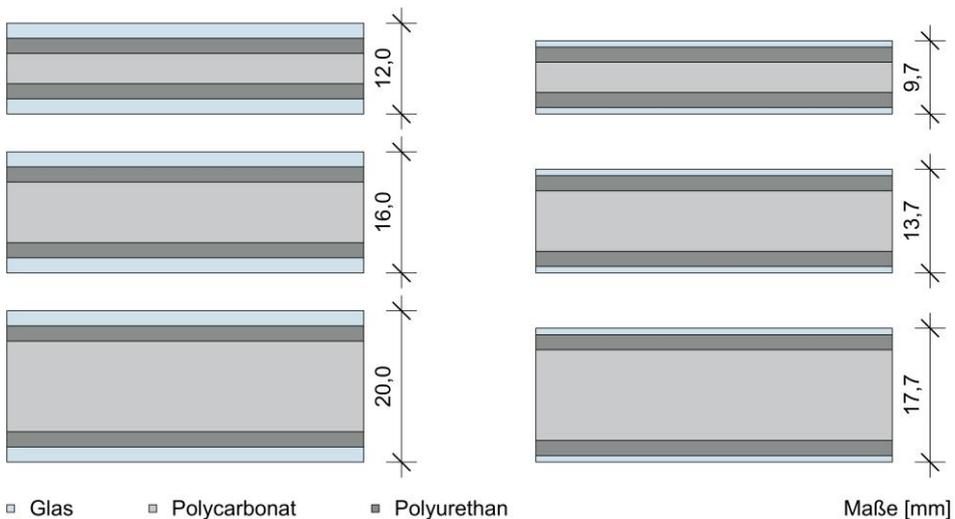


Bild 47

Querschnittsaufbau für die Prüfkörper aus Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit dem Dünnglas Optiwhite (links) und dem Dünnglas Leoflex (rechts).

Tabelle 20 zeigt die Anzahl, die Nenn- und Realdicken und den Aufbau der verschiedenen Prüfkörper. Die Differenz zwischen Realdicke und Nenndicke liegt im allgemein üblichen Toleranzbereich für Glas und Polycarbonat. Das Zwischen-

schichtmaterial wird im Gießharzverfahren manuell unter Druck zwischen die Glas- und Polycarbonattafel gegeben. Dadurch variiert die Realdicke der Zwischenschicht pro Prüfkörper. Im Querschnitt eines Prüfkörpers ist die Zwischenschicht mit gleichen Dicken angenommen. Somit entsteht ein zur Gesamtschwereachse symmetrischer Aufbau.

Tabelle 20

Anzahl, Nenn- und Aufbau der Prüfkörper zur Untersuchung des Tragverhaltens im Vierpunkt-Biegeversuch.

Prüfkörper	Anzahl	Nenn- dicke	Real- dicke	Aufbau Nenn- dicke [mm] Realdicke [mm]
L_04_K	3	9,7 mm	9,5 mm (<0,1 mm)	CVG 02 TPU PC TPU CVG 02 0,85 2,00 4,00 2,00 0,85 0,86 2,00 3,80 2,00 0,86
L_08_K	3	13,7 mm	13,4 mm (<0,1 mm)	CVG 02 TPU PC TPU CVG 02 0,85 2,00 8,00 2,00 0,85 0,86 1,94 7,80 1,94 0,86
L_12_K	3	17,7 mm	17,3 mm (0,1 mm)	CVG 02 TPU PC TPU CVG 02 0,85 2,00 12,00 2,00 0,85 0,86 1,87 11,80 1,87 0,86
O_04_K	3	12,0 mm	11,7 mm (0,1 mm)	FG TPU PC TPU FG 2,00 2,00 4,00 2,00 2,00 1,90 2,05 3,80 2,05 1,90
O_08_K	3	16,0 mm	15,5 mm (0,1 mm)	FG TPU PC TPU FG 2,00 2,00 8,00 2,00 2,00 1,90 1,95 7,80 1,95 1,90
O_12_K	3	20,0 mm	19,4 mm (0,1 mm)	FG TPU PC TPU FG 2,00 2,00 12,00 2,00 2,00 1,90 1,89 11,80 1,89 1,90

Die Untersuchungen zum Tragverhalten der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit dem Vierpunkt-Biegeversuch erfolgen im Zustand I. Die Verbundtafel wird für 120 s mit 5 N/s bis zu einer Kraft von 300 N kraftgesteuert beansprucht und anschließend komplett entlastet. Die Auswertung erfolgt über einen Zeitraum von 60 s, während das Mehrschichtsystem konstant belastet ist. Nach 7 d beginnt Prüfung 2 analog zu Prüfung 1 mit abschließender Belastung bis zum Bruch. Die Versuche werden mit der hydraulischen Prüfmaschine Delta 6-100 von Form + Test Seidner + Co. GmbH durchgeführt. Vor Prüfbeginn lagern die Prüfkörper für mindestens 24 h unter den klimatischen Versuchsbedingungen. Tabelle 21 fasst das Versuchsprogramm der Kurzzeitversuche zum Tragverhalten in Zustand I zusammen. Bild 48 zeigt den Kurzzeitversuch im Einbauzustand.

Tabelle 21

Versuchsprogramm für die Kurzzeitversuche zum Tragverhalten der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel im Zustand I.

Nummer	Zielwert	Auswertezeit	Belastungssteuerung
T_01_K	300 N	60 s	5 N/s kraftgesteuert
T_02a_K	300 N	60 s	5 N/s kraftgesteuert
T_02b_K	Bruch	1 s	5 N/s kraftgesteuert

T_01_K und T_02a_K werden zeitversetzt in einem Abstand von 7 d durchgeführt. T_02b_K erfolgt im direkten Anschluss an T_02a_K.

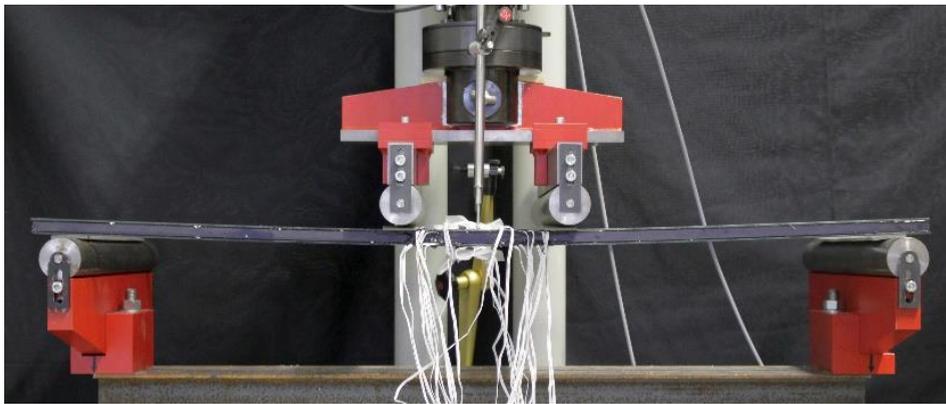


Bild 48

Einbauzustand der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel in die Universalprüfmaschine zur Durchführung der Vierpunkt-Biegeprüfung im Kurzzeitversuch der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel im Zustand I.

Zweiachsiale Dehnungsmessstreifen messen die Dehnung der Längs- und Querrichtung in der Mitte sowie an der längeren Kante der Verbundtafel an jeder Grenzfläche. Dehnungen unter Zugbeanspruchung werden mit positivem, Stauchungen unter Druckbeanspruchung mit negativem Vorzeichen gekennzeichnet. Die Applikation der Dehnungsmessstreifen im Querschnitt findet während der Produktion der Verbundtafeln statt. Nach der Herstellung zeigen sich keine sichtbaren Fehlstellen im Bereich der Kabelführung. Allerdings wird davon ausgegangen, dass die Verbundtafel im Tragverhalten geschwächt ist und eine Untersuchung mit diesem Verfahren im Vergleich zu Verbundtafeln ohne Dehnungsmessstreifen im Querschnitt auf der sicheren Seite liegen. Über induktive Wegaufnehmer mit einem Messweg von ± 50 mm wird die Durchbiegung senkrecht zur Plattenebene an den beiden längeren Kanten in Plattenmitte gemessen. Die Belastungsgeschwindigkeit während der Kurzzeitversuche ist über die Kraftmessdose der Prüfmaschine eingestellt. Bild 49 zeigt den Versuchsaufbau mit den Positionen der Dehnungsmessstreifen und der Wegaufnehmer.

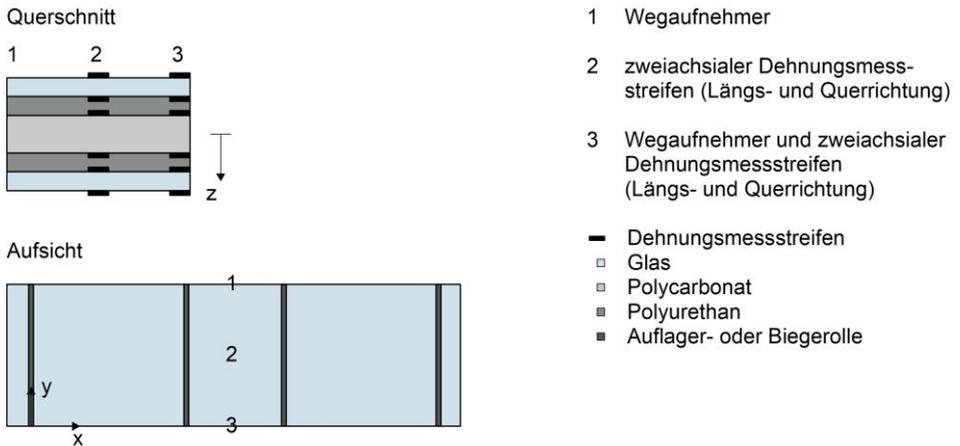


Bild 49

Anordnung der Dehnungsmessstreifen und induktiven Wegaufnehmer zur Erfassung der Messwerte während des Vierpunkt-Biegeversuchs.

Die Prüfungen T_01_K und T_02a_K werden jeweils in einem Abstand von 7 d durchgeführt und unterscheiden sich im Prüfprogramm nicht. Für den dünnsten Querschnitt L_04_K stellen sich erwartungsgemäß die größten Verformungen bei einer Belastung von 300 N ein. Die Messwerte aus T_01_K und T_02a_K werden miteinander verglichen. Die Messergebnisse in Tabelle 22 weichen gering voneinander ab, die Versuche dürfen gemeinsam ausgewertet und reproduziert werden.

Tabelle 22

Vergleich der Messwerte für Verformung, Kraft und Dehnung in Plattenmitte in Längsrichtung der Prüfungen T_01_K und T_02a_K, exemplarisch für L_04_K.

L_04_K	Absolute Abweichung	Relative Abweichung
Verformung	2,9 mm	4,8%
Kraft	0,3 N	0,1 %
Dehnung Glas 1 oben	17 $\mu\text{m/m}$	3,3 %
Dehnung Glas 1 unten	< 0,1 $\mu\text{m/m}$	0,3 %
Dehnung PC oben	55 $\mu\text{m/m}$	7,2 %
Dehnung PC unten	51 $\mu\text{m/m}$	7,3 %
Dehnung Glas 2 oben	< 0,1 $\mu\text{m/m}$	0,1 %
Dehnung Glas 2 unten	26 $\mu\text{m/m}$	5,1 %

Bild 50 zeigt die Darstellung zur Auswertung der Kraft und Verformung für einen Prüfkörper. Zu Beginn stellt sich die Anpresskraft von 30 N mit geringen Schwankungen ein, da sich die biegeeweiche Verbundtafel stark verformt und die Prüfmaschine die benötigte Kraft selbstgeregelt aufbringt. Anschließend steigt die Kraft kontinuierlich bis auf 300 N an. Das zeitversetzte Auftreten der Verformung im Vergleich zur Kraft zeigt das viskoelastische Materialverhalten der Kunststoffschichten im Verbund. Während der Haltephase von 120 s wächst die

Verformung nach der Belastung um 0,9 % an. Die Auswertung erfolgt über einen Mittelwert der Messgrößen in den letzten 60 s der Haltezeit.

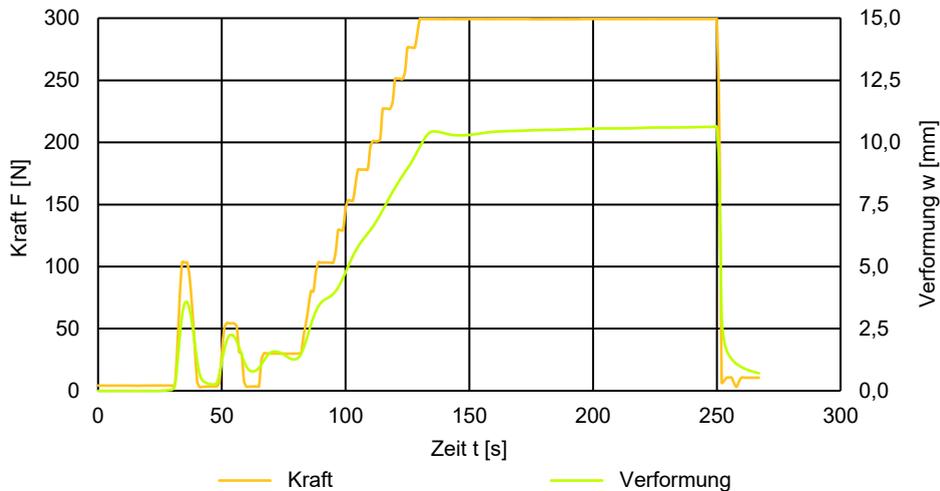


Bild 50

Exemplarische Darstellung der aufgebrachten Kraft und der Verformung über die Zeit als Mittelwert in Plattenmitte für die Prüfung zum Tragverhalten im Vierpunkt-Biegeversuch.

Die Auswertung der Dehnung erfolgt über eine Betrachtung der korrigierten Dehnungen unter Berücksichtigung der Querdehnungsempfindlichkeit im zweiachsialen Spannungsfeld. Die Messwerte der Längsrichtung in Plattenmitte stellt Bild 51 beispielhaft dar. Die Dehnungen weisen betragsmäßig einen ähnlichen Wert an der Ober- und Unterseite auf. Versuchsaufbau und Messmethode können zur Untersuchung des Mehrschichtsystems verwendet werden.

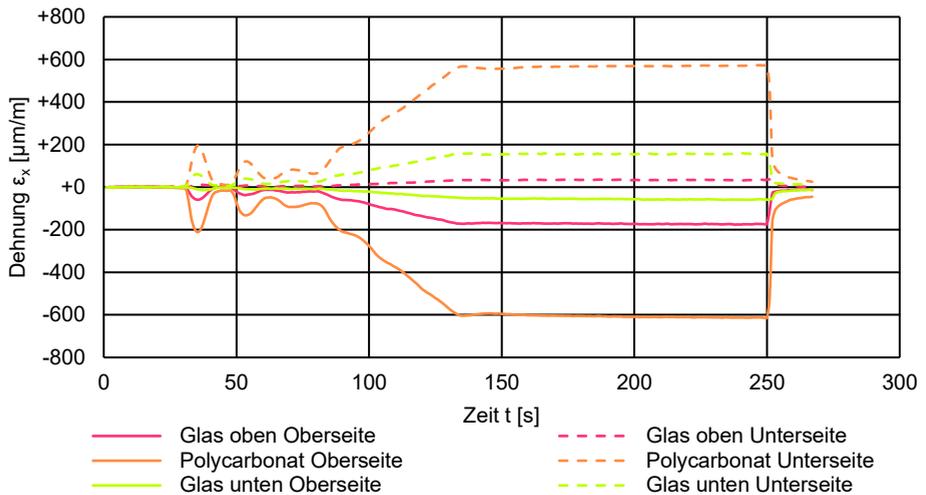


Bild 51

Exemplarische Darstellung der korrigierten Längsdehnungen in Plattenmitte über die Zeit für die Prüfung zum Tragverhalten im Vierpunkt-Biegeversuch.

6.3 Kurzzeitversuch

Kurzzeitversuche im intakten Zustand werden zur Untersuchung des Tragverhaltens von Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln durchgeführt und die Verformung sowie Dehnungen an vordefinierten Stellen ausgewertet. Die Ergebnisse ermöglichen Aussagen zum Schubverbund der Zwischenschicht.

Bild 52 zeigt die Ergebnisse der Durchbiegung der Prüfkörper der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit dem Dünnglas Leoflex und dem Dünnglas Optiwhite bei einer Belastung von 300 N. Zum Vergleich der Ergebnisse wird analog zu T_01_K eine Polycarbonat-Verbindtafel mit den Nenndicken 4 mm, 8 mm und 12 mm untersucht.¹³² Die Versuche finden bei einer Temperatur von $(+21,5 \pm 0,3) \text{ } ^\circ\text{C}$ und einer relativen Luftfeuchtigkeit von $(36,9 \pm 2,0) \text{ } \% \text{ rF}$ statt.

¹³² Die Ergebnisse zu einer Polycarbonat-Verbindtafel mit 4 mm und 8 mm Nenndicke sind numerisch mit dem Programm SJ Mepla 5.0.11 bei geometrisch nichtlinearem Ansatz berechnet.

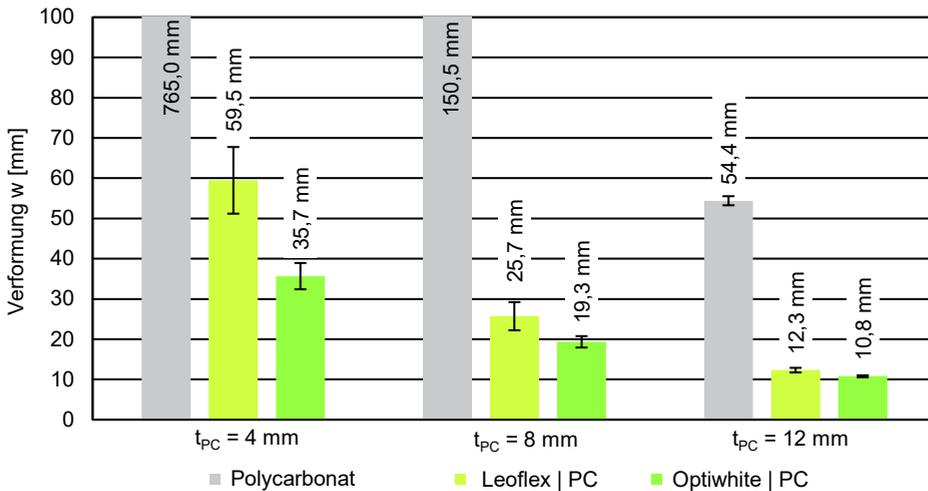


Bild 52

Ergebnisse der Verformung der Prüfkörper im Vierpunkt-Biegeversuch bei einer Belastung von 300 N in Prüfung T_01_K.

Bei der monolithischen Polycarbonatplatte treten für geringe Lasten große Durchbiegungen auf. Verbundplatten aus Glas und Polycarbonat zeigen im Vergleich geringere Durchbiegungen und ein günstigeres Tragverhalten. Die Gesamtbiegesteifigkeit eines mehrschichtigen Bauteils ergibt sich aus dem Zusammenwirken der einzelnen Materialsteifigkeiten und einem geometrischen Steifigkeitsanteil. Ergänzend beeinflusst der Schubverbund der Zwischenschicht das Tragverhalten. Dabei tritt die größte Verformung erwartungsgemäß mit den dünnsten Querschnitten L_04_K und O_04_K bei einer Belastung von 300 N auf und ist abhängig von der Glasdicke. Eine Erhöhung des Glasanteils am Gesamtquerschnitt von 0,85 mm auf 2,00 mm pro Dünnglastafel bei konstanter Kerndicke von 4,00 mm reduziert die Verformung bei gleicher Belastung um bis zu 40 %. Der Einfluss der Eigenbiegesteifigkeit des Glases wirkt sich bei dünnen Verbundplatten auf die Gesamtbiegesteifigkeit aus. Allerdings verringert sich der Einfluss mit steigender Polycarbonatdicke und gleicht sich unabhängig des verwendeten Glasproduktes an.

Tabelle 23 zeigt die Ergebnisse der Messungen zur Kraft, Verformung und Dehnung der Glastafel und des Polycarbonates in Plattenmitte in Längsrichtung.

Tabelle 23

Ergebnisse der Verformung w und Dehnung ε in Längsrichtung in Plattenmitte aus den Kurzzeitversuchen mit einer Kraft F von etwa 300 N im Vierpunkt-Biegeversuch.

Messwert	L_04_K	L_08_K	L_12_K	O_04_K	O_08_K	O_12_K
F [N]	298,7 (0,3)	298,8 (0,2)	298,6 (0,3)	299,2 (0,2)	299,0 (0,4)	299,2 (0,1)
w [mm]	59,5 (8,3)	25,7 (3,5)	12,3 (0,6)	35,7 (3,3)	19,3 (1,4)	10,8 (0,2)
w / t _{Real}	6,2	1,9	0,7	3,0	1,2	0,6
$\varepsilon_{\text{Glas1,o}}$ [$\mu\text{m/m}$]	-505 (55)	-309 (11)	-209 (7)	-423 (8)	-279 (12)	-175 (5)
$\varepsilon_{\text{Glas1,u}}$ [$\mu\text{m/m}$]	-147 (46)	-87 (26)	-102 (7)	+264 (32)	+96 (14)	+35 (5)
$\varepsilon_{\text{PC,o}}$ [$\mu\text{m/m}$]	-728 (139)	-908 (190)	-664 (32)	-553 (55)	-670 (22)	-593 (15)
$\varepsilon_{\text{PC,u}}$ [$\mu\text{m/m}$]	+673 (435)	+877 (72)	+636 (46)	+768 (150)	+753 (99)	+599 (24)
$\varepsilon_{\text{Glas2,o}}$ [$\mu\text{m/m}$]	+141 (74)	+84 (14)	+53 (5)	-258 (34)	-118 (13)	-65 (8)
$\varepsilon_{\text{Glas2,u}}$ [$\mu\text{m/m}$]	+492 (23)	+305 (29)	+163 (15)	+429 (21)	+253 (17)	+146 (6)

Die größten Dehnungen der Polycarbonattafel bei einer Belastung von 300 N betragen -908 $\mu\text{m/m}$ und +877 $\mu\text{m/m}$. Die Spannungen werden sowohl für die Glastafeln als auch für die Polycarbonattafeln nach der linearen Elastizitätstheorie mit dem Hooke'schen Gesetz für einen ebenen Spannungszustand mit Gleichung 10 und Gleichung 11 berechnet.

$$\sigma_{x,i} = \frac{E_i}{(1 - \mu_i^2)} \cdot (\varepsilon_{x,i} + \mu_i \cdot \varepsilon_{y,i}) \quad \text{Gleichung 10}$$

$$\sigma_{y,i} = \frac{E_i}{(1 - \mu_i^2)} \cdot (\varepsilon_{y,i} + \mu_i \cdot \varepsilon_{x,i}) \quad \text{Gleichung 11}$$

Tabelle 24 zeigt die berechnete Spannungen in Plattenmitte in Längsrichtung für eine Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel mit den beiden Dünngläsern Leoflex und Optiwhite.

Tabelle 24

Längsspannungen σ in Plattenmitte der Prüfkörper mit dem Dünnglas Leoflex und dem Dünnglas Optiwhite aus den Kurzzeitversuchen bei einer Kraft von 300 N im Vierpunkt-Biegeversuch.

Messwert	L_04_K	L_08_K	L_12_K	O_04_K	O_08_K	O_12_K
$\sigma_{\text{Glas1,o}}$ [N/mm ²]	-38,2 (4,3)	-23,6 (0,9)	-15,9 (0,6)	-31,2 (0,5)	-20,6 (0,9)	-12,9 (0,4)
$\sigma_{\text{Glas1,u}}$ [N/mm ²]	-10,6 (3,7)	-6,0 (2,0)	-7,5 (0,6)	+20,1 (2,3)	+7,5 (1,1)	+2,8 (0,4)
$\sigma_{\text{PC,o}}$ [N/mm ²]	-1,9 (0,3)	-2,5 (0,5)	-1,8 (0,1)	-1,5 (0,1)	-1,8 (0,1)	-1,6 (<0,1)
$\sigma_{\text{PC,u}}$ [N/mm ²]	+1,8 (1,1)	+2,4 (0,2)	+1,7 (0,1)	+2,0 (0,4)	+2,0 (0,3)	+1,6 (0,1)
$\sigma_{\text{Glas2,o}}$ [N/mm ²]	+9,8 (5,6)	+5,6 (1,1)	+3,5 (0,4)	-19,6 (2,4)	-9,3 (0,9)	-5,1 (0,6)
$\sigma_{\text{Glas2,u}}$ [N/mm ²]	+37,2 (2,0)	+23,4 (2,4)	+12,4 (1,2)	+31,7 (1,6)	+18,6 (1,4)	+10,7 (0,5)

Der schubweiche Verbund über die Zwischenschicht bewirkt eine teilweise Verbundwirkung. Dadurch erhöht sich die Gesamtbiegesteifigkeit des Laminats im Vergleich zum Grenzfall ohne Verbund. Zeitgleich verringern sich Spannungen und Verformungen. Die größten Zugspannungen treten bei dem dünnsten Querschnitt auf. Eine ideal-symmetrische Spannungsverteilung wie in der Theorie stellt sich nicht ein.¹³³ Allerdings zeigen die Spannungen an der Ober- und Unterseite der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel in Bild 53 eine ausreichende Übereinstimmung mit einem teilweisen Verbund auf. Der Lastabtrag der Verbundtafeln unterscheidet sich im Vergleich zwischen den beiden Dünngläsern im Verbund. Die Spannungen bei dem Prüfkörper mit dem Dünnglas Leoflex sind annähernd symmetrisch zur Gesamtschwereachse der Verbundtafeln mit einem oberen Druckbereich und einem unteren Zugbereich. Mit dem Dünnglas Optiwhite stellt sich in jeder Schicht ein zur eigenen Schwereachse symmetrischer Verlauf als teilweiser Verbund ein. Prüfkörper mit dem Dünnglas Leoflex zeigen einen membranartigen Zustand der Glastafeln. Die Dünnglastafel steht an der Oberseite der Verbundtafel über die gesamte Schicht unter einer Druckspannung und an der Unterseite unter einer Zugspannung. Prüfkörper mit dem Dünnglas Optiwhite zeigen an dieser Stelle ein anderes Tragverhalten. Die Dünnglastafeln mit einer Nenndicke von 2 mm beteiligen sich aufgrund des Biegespannungszustands am Tragverhalten der Verbundtafel.

¹³³ Bedingt durch die Vernetzung der Polymerwerkstoffe, des geometrisch nichtlinearen Tragverhaltens sowie physikalisch nichtlineare Materialeigenschaften, weichen die gemessenen Werte an der Ober- und Unterseite gering voneinander ab.

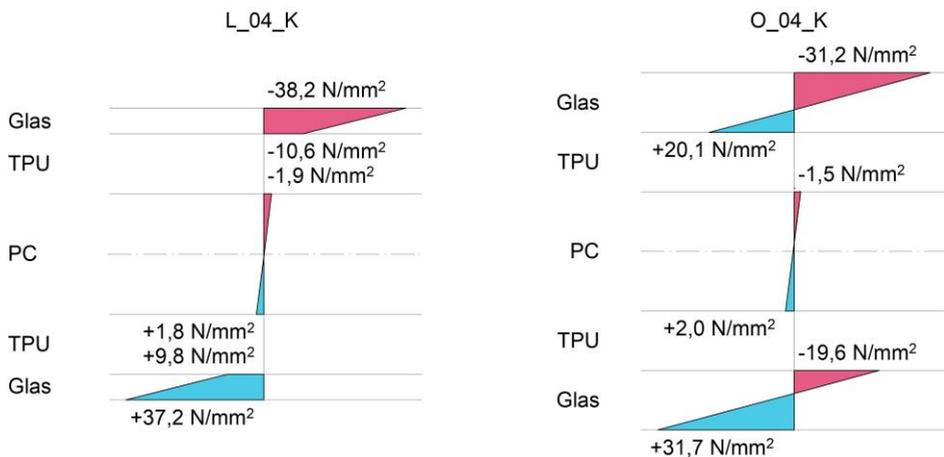


Bild 53

Spannungsverteilung in Plattenmitte in Längsrichtung einer Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel mit einer Polycarbonatdicke von 4 mm.

Mit der Balkentheorie ergibt sich ein konstanter Spannungsverlauf über die gesamte Breite des Prüfkörpers. Die Anwendung der Auswertung nach DIN EN 1288-3 beschreibt lediglich eine Näherungslösung, da Versuche mit dünnen Glastafeln im Vierschneiden-Verfahren zu keiner Übereinstimmung führen.¹³⁴ Je dicker der Prüfkörper, desto genauer die Auswertung mit der linearen Berechnungstheorie und desto geringer der Spannungsunterschied zwischen Prüfkörperperrand und Prüfkörpermitte. Im Gegensatz zu monolithischem Glas ist die Verbundtafel ein Mehrschichtsystem mit unterschiedlichen, auch schubweichen Materialien und geringer Gesamtbiegesteifigkeit. Querspannungen beeinflussen verstärkt das Verformungsverhalten der Verbundtafel.

Eine realitätsnahe Abbildung des Tragverhaltens benötigt den Schubmodul der Zwischenschicht aus geometrisch nichtlinearer Berechnung. Eine numerische Iteration mit dem Programm SJ Mepla 5.0.11 bestimmt den Elastizitätsmodul der Zwischenschicht bei einer Elementgröße von 20 mm. Die berechnete Verformung wird anschließend mit dem entsprechenden Messwert verglichen. Der Elastizitätsmodul der Zwischenschicht ergibt sich, wenn die berechnete Verformung mit der gemessenen Verformung übereinstimmt. Die numerische Berechnung beider Grenzfälle »voller Verbund« und »kein Verbund« ordnet den realen Schubverbund der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln in Bild 54 und Bild 55 ein.¹³⁵

¹³⁴ Vergleiche Blank 1993.

¹³⁵ Für die Grenzfälle »kein Verbund« ist ein Elastizitätsmodul der Zwischenschicht von 0,03 N/mm² und für den Grenzfall »voller Verbund« ein Elastizitätsmodul der Zwischenschicht von 300 N/mm² angenommen. Vergleiche Bohmann 2020, Seite 73.

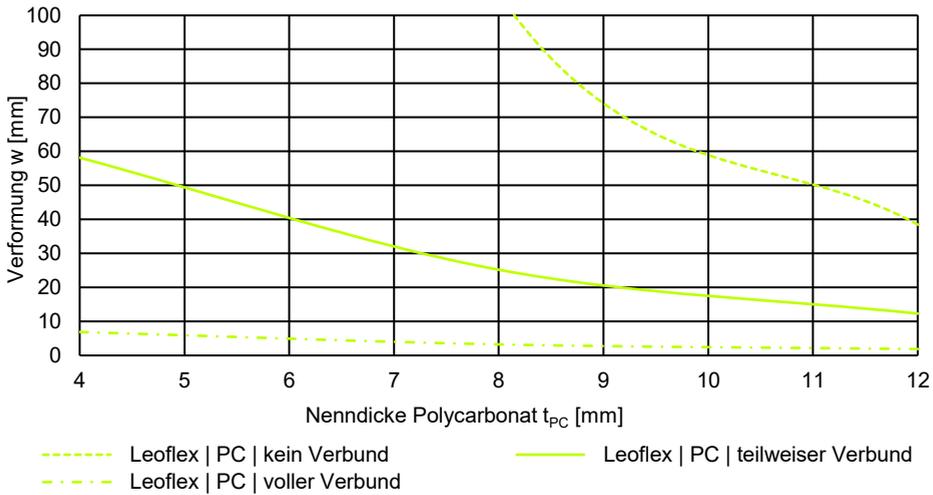


Bild 54

Einordnung des Schubverbundes der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel mit dem Dünnglas Leoflex.

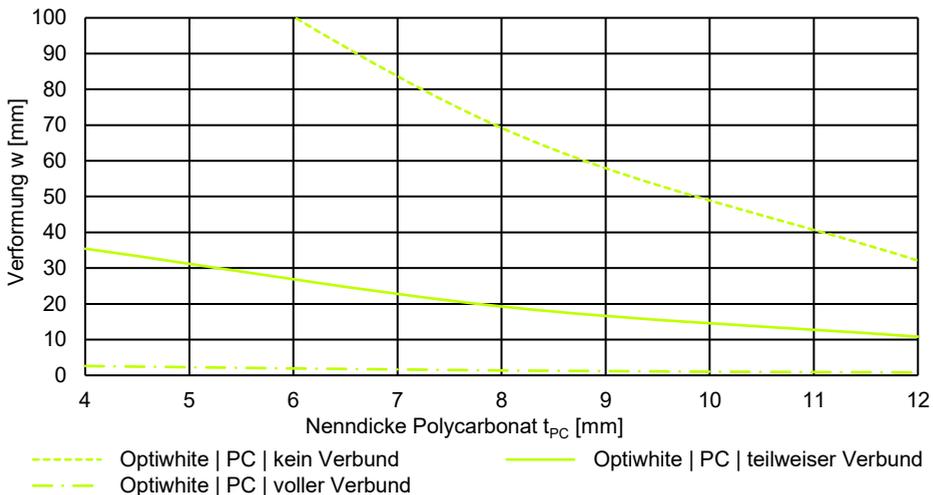


Bild 55

Einordnung des Schubverbundes der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel mit dem Dünnglas Optiwhite.

Sowohl für die Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel mit dem Dünnglas Leoflex als auch mit dem Dünnglas Optiwhite liegt der sich einstellende teilweise Schubverbund im Vergleich mit den numerisch ermittelten Grenzfällen näher am vollen Verbund. Mit steigender Polycarbonatdicke reduziert sich der Unterschied des Verbundverhaltens zum vollen Schubverbund. Der Sandwichtraganteil der Glas-tafel dominiert den Lastabtrag während die Eigenbiegesteifigkeit der Dünnglas-tafeln eine untergeordnete Rolle spielen. Dadurch wird bereits für eine geringe

Schubsteifigkeit ein hoher Schubverbund ermittelt. Der Schubmodul der Zwischenschicht unter Berücksichtigung der Randbedingungen der Untersuchungen zum Tragverhalten berechnet sich anschließend aus Gleichung 12.¹³⁶

$$G_{\text{TPU}} = \frac{E_{\text{TPU}}}{2 \cdot (1 + \mu_{\text{TPU}})}$$

Gleichung 12

Tabelle 25 gibt den Schubmodul der Verbundtafeln in Abhängigkeit der Prüfkörper für die Ergebnisse aus dem Vierpunkt-Biegeversuch an.

Tabelle 25

Schubmodul der Zwischenschicht aus den Vierpunkt-Biegeversuch in Abhängigkeit des Querschnitts und des Dünnglases.

Prüfkörper	Schubmodul der Zwischenschicht
L_04_K	0,16 N/mm ²
L_08_K	0,15 N/mm ²
L_12_K	0,16 N/mm ²
O_04_K	0,17 N/mm ²
O_08_K	0,15 N/mm ²
O_12_K	0,15 N/mm ²

Der Schubmodul der Zwischenschicht variiert zwischen 0,15 N/mm² und 0,17 N/mm² in Abhängigkeit des Dünnglases und der Polycarbonatdicke. Grundsätzlich zeigt sich ein leicht erhöhter Schubmodul bei Verbundtafeln mit dem Dünnglas Leoflex im Vergleich zu Verbundtafeln mit dem Dünnglas Optiwhite. Der statistische Mittelwert des Schubmoduls der unterschiedlichen Aufbauten beträgt 0,16 N/mm². Unter Berücksichtigung des Elastizitätsmoduls der Zwischenschicht von 0,76 N/mm² aus Materialuntersuchungen ergibt sich ein rechnerischer Schubmodul des Polyurethans im Zugversuch von 0,27 N/mm². Dieser Wert liegt über den Messwerten. Deshalb wird bei der Berechnung der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln in Kapitel 8 der gemessene Schubmodul im teilweisen Verbund der Verbundtafeln angenommen.¹³⁷

6.4 Kurzzeitversuch – Bruchverhalten

Die Betrachtung des Tragverhaltens von Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln beinhaltet zusätzlich die Untersuchung des Bruchverhaltens. Dazu werden die

¹³⁶ Der lineare Zusammenhang zwischen Elastizitäts- und Schubmodul wird vorausgesetzt, da der Speichermodul E' der Zwischenschicht ab einer Temperatur von -30 °C als konstant angenommen werden darf und keinen Einfluss auf den Schubmodul zeigt. Vergleiche Kapitel 4 und Kapitel 9.7.

¹³⁷ Bereits ein Schubmodul von 0,1 N/mm² reduziert die Spannungen im Verbund erheblich. Für einen nahezu vollen Verbund werden Werte zwischen 1 N/mm² bis 10 N/mm² benötigt, vergleiche Kuntsche 2019.

Prüfkörper bis zum Bruch der Glastafeln belastet.¹³⁸ Der Prüfaufbau und die Messereinrichtung sind mit der Untersuchung zum Tragverhalten identisch. Tabelle 26 zeigt die Messergebnisse der Belastung, der maximalen Druck- und Zugspannung in Plattenmitte. Die Prüftemperatur beträgt $(+21,5 \pm 0,2)$ °C bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von $(33,3 \pm 4,0)$ % rF. Die Verbundtafeln mit dem Dünnglas Leoflex können nicht bis zum Bruch der Dünnglastafel belastet werden. Bei maximal möglichem Ausfahrweg der Prüfmaschine brechen die Verbundtafeln nicht. Biegezugspannungen von $+158,8$ N/mm² an der Dünnglasunterseite der Verbundtafel stellen sich ein. Zeitgleich ist der maximale Messweg der induktiven Wegaufnehmer überschritten. Die charakteristische Festigkeit des Dünnglases Leoflex liegt nach Herstellerangaben bei $+260$ N/mm². Ein Bruch ist erst bei Überschreiten der Festigkeit zu rechnen. Bild 56 zeigt eine ungebrochene Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel mit dem Dünnglas Leoflex und einer 12 mm dicken Polycarbonattafel bei einer maximalen Auslenkung der Prüfmaschine.

Tabelle 26

Messergebnisse der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit dem Dünnglas Leoflex bei maximaler Auslenkung der Prüfmaschine. Angabe der maximalen Druckspannung an der Oberseite und der maximalen Zugspannung an der Unterseite der Dünnglastafel in Längsrichtung.

Prüfkörper	L_04_K	L_08_K	L_12_K
F [N]	703 (90)	1.534 (250)	3.175 (120)
w [mm]	> 100	> 100	> 100
$\sigma_{\text{min, Glas, oben, Mitte, längs}}$ [N/mm ²]	-85,9 (2,9)	-126,4 (12,9)	-165,4 (1,8)
$\sigma_{\text{max, Glas, oben, Mitte, längs}}$ [N/mm ²]	+84,5 (7,6)	+127,9 (6,8)	+158,8 (7,5)

¹³⁸ Ein Versagen des Polycarbonats ist unter gegebenem Prüfaufbau ausgeschlossen. Im maximal ausgefahrenen Zustand der Prüfmaschine verformt sich das Polymer bei geringen Spannungen ohne Bruch. Vergleiche Weimar 2021a, Seite 73 ff.

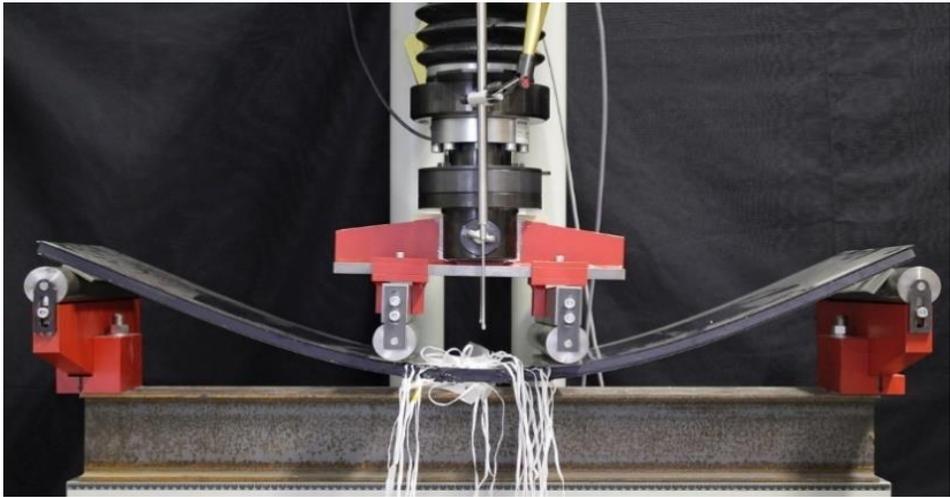


Bild 56

Prüfkörper L_12 mit einem 12 mm Polycarbonatkern bei maximalem Durchbiegung in der Prüfmachine.

Für eine Vergleichbarkeit der Messergebnisse wird der Grenzwert der Verformung auf 100 mm festgelegt. Tabelle 27 zeigt die Ergebnisse der Begrenzung auf 100 mm einer Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel mit dem Dünnglas Leoflex.

Tabelle 27

Messergebnisse für die Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel mit dem Dünnglas Leoflex bei Begrenzung der Verformung auf 100 mm ohne Bruch der außenliegenden Glastafel.

Prüfkörper	L_04_K	L_08_K	L_12_K
F [N]	525 (35)	1.154 (141)	2.366 (80)
w [mm]	99,5 (1,6)	101,0 (0,3)	101,8 (0,5)
$\sigma_{\min, \text{Glas, oben, Mitte, längs}}$ [N/mm ²]	-61,1 (3,4)	-87,3 (8,2)	-114,0 (3,0)
$\sigma_{\max, \text{Glas, oben, Mitte, längs}}$ [N/mm ²]	+59,6 (1,6)	+89,4 (3,9)	+103,8 (4,0)

Mit steigender Prüfkörperdicke wachsen erwartungsgemäß die Spannungen und aufnehmbaren Kräfte an. Die Spannungen an der Ober- und Unterseite der Verbundtafel sind bei einer Verformung von 100 mm annähernd gleich groß. Delaminationen im Prüfkörper werden auch während des Versuchs nicht beobachtet. Demnach besteht weiterhin ein Haftverbund zwischen Zwischenschicht und Glas beziehungsweise Polycarbonat bei großer Verformung. Die Erhöhung der Polycarbonatdicke im Kern von 4 mm auf 12 mm erzeugt eine etwa 4,5-fach erhöhte

Lastaufnahme. In Bild 57 sind die resultierenden Kräfte bei 100 mm Durchbiegung dargestellt.

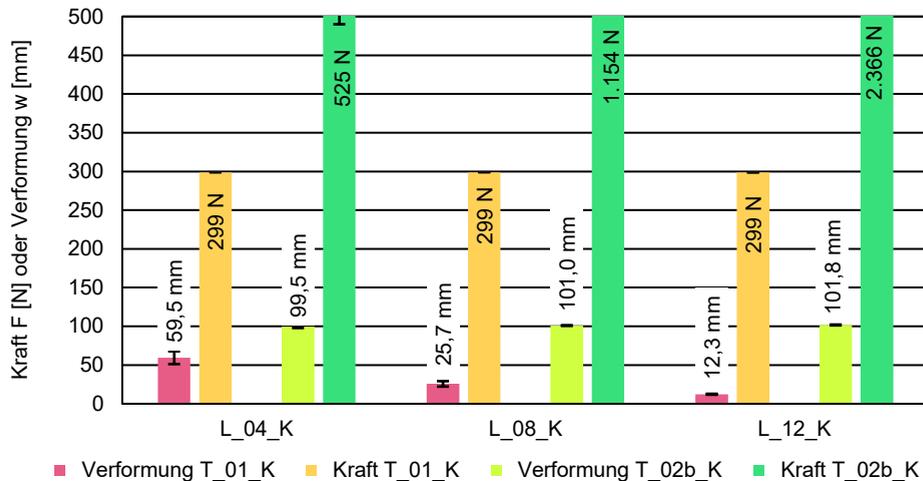


Bild 57

Vergleich zwischen Untersuchungen zum Tragverhalten und Untersuchungen bis zur Verformung von 100 mm für Verbundtafeln mit dem Dünnglas Leoflex.

Tabelle 28 listet die Ergebnisse zu den Versuchen zum Bruchverhalten der Verbundtafel mit dem Dünnglas Optiwhite auf. Die Temperatur der Untersuchungen beträgt $(+21,5 \pm 0,3)$ °C bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von $(35,4 \pm 4,8)$ % rF. Die Untersuchungen mit dem Dünnglas Optiwhite im Verbund mit Polycarbonat führen zu einem Bruch der unteren Glastafel.

Tabelle 28

Messergebnisse der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit dem Dünnglas Optiwhite bis zum Bruch.

Prüfkörper	O_04_K	O_08_K	O_12_K
F [N]	332 (46)	911 (1)	1.456 (135)
w [mm]	40,1 (5,6)	57,3 (4,7)	51,2 (3,3)
$\sigma_{\min, \text{Glas, oben, Mitte, längs}}$ [N/mm ²]	-35,7 (4,4)	-58,0 (2,5)	-58,2 (4,5)
$\sigma_{\max, \text{Glas, oben, Mitte, längs}}$ [N/mm ²]	+35,4 (3,7)	+55,2 (3,3)	+52,2 (5,6)

Der Bruchsprung befindet sich an der Kante im Bereich der maximalen Beanspruchung zwischen den Auflagerrollen und zeigt das typische Bruchbild in Bild 58.

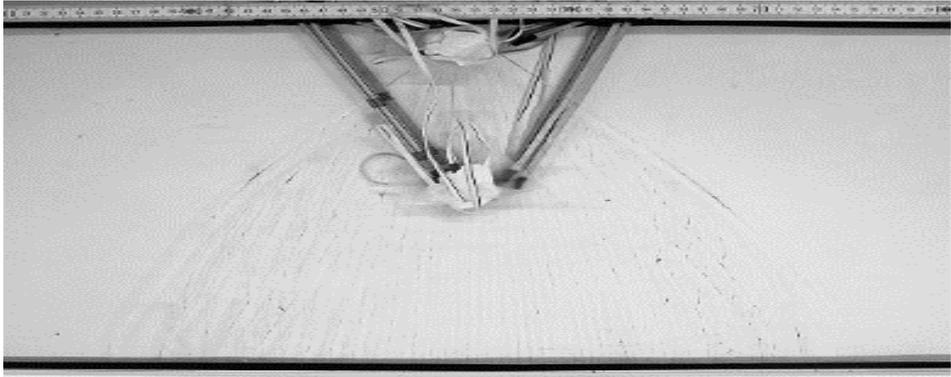


Bild 58

Bruch der unteren Glastafel von O_12 im Bereich der größten Beanspruchung .

Bei O_04_K bricht zuerst die untere Glastafel und mit der Spannungsumlagerung im Querschnitt unmittelbar danach die obere Glastafel. Bei einem 8 mm und 12 mm Polycarbonatkern hält nach dem Versagen der unteren Deckschicht die obere Glastafel der Beanspruchung stand. Alle Prüfkörper mit dem Dünnglas Optiwhite versagen ausgehend von der Glaskante im Bereich zwischen den beiden Biegerollen.

Bild 59 zeigt den Vergleich zwischen der Kraft und Verformung aus der Untersuchung zum Tragverhalten und zum Bruchverhalten für Verbundtafeln mit dem Dünnglas Optiwhite. Die Bruchlast nimmt bei steigender Polycarbonatdicke zu. Die Glastafeln beeinflussen das Tragverhalten, nehmen einen Großteil der Last auf und brechen bedingt durch die geringere charakteristische Festigkeit des nicht vorgespannten Glases im Vergleich zu chemisch vorgespanntem Dünnglas vor dem Erreichen der Grenzverformung von 100 mm. Die Spannungen an der Ober- und Unterseite der Verbundtafel sind bei allen Prüfreiheiten betragsmäßig annähernd gleich groß. Die Erhöhung der Polycarbonatdicke im Kern von 4 mm auf 12 mm erzeugt analog der Verbundtafel aus Leoflex und Polycarbonat eine etwa 4,5-fach erhöhte Lastaufnahme im Vergleich zum Tragverhalten. Nach dem Bruch treten Delaminationen an den Glasbruchstücken auf.

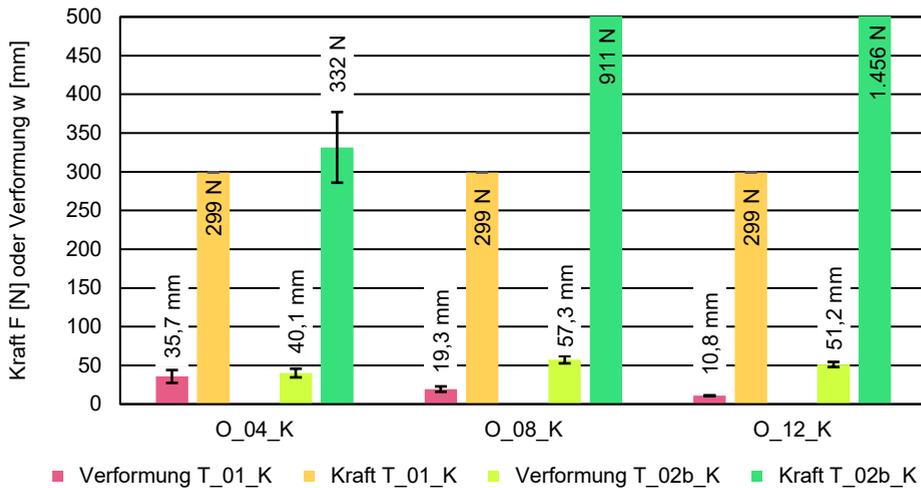


Bild 59

Vergleich zwischen Untersuchungen zum Tragverhalten und Untersuchungen bis zum Bruch für Verbundtafeln mit dem Dünnglas Optiwhite.

6.5 Zusammenfassung

Die Untersuchung des Tragverhaltens einer Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel mit dem chemisch vorgespannten Dünnglas Leoflex und dem nicht vorgespannten Dünnglas Optiwhite erfolgen im intakten Zustand I. Die Dünnglastafeln werden mit unterschiedlich dickem Polycarbonatkern von 4 mm, 8 mm und 12 mm über eine Zwischenschicht aus thermoplastischen Polyurethan hergestellt. Die Untersuchung an Prüfkörpern im Vierpunkt-Biegeversuch finden in Anlehnung an das Vierschneiden-Verfahren nach DIN EN 1288-3 statt. Dehnungsmessstreifen und induktive Wegaufnehmer messen Dehnungen und die Verformung. Die Untersuchungen zeigen den Einfluss der Einzelschichten am Tragverhalten. Im Vergleich der dünnen Verbundtafeln L_04 und O_04 untereinander ergibt sich ein hoher Verformungsunterschied. Bei Steigerung der Nenndicke des Polycarbonats auf eine Nenndicke von 12 mm reduziert sich die Differenz der Verformung von 24,2 mm auf 1,5 mm. Der innenliegende Kern erhöht die Biegesteifigkeit des Querschnitts. Es ist erkennbar, dass durch die Änderung der Nenndicke des Polycarbonates von 4 mm auf 12 mm die Spannungen bei konstanter Belastung im Versuchsprogramm T_01_K und T_02_K bei beiden Prüfserien um den Faktor 3 abnimmt. Das Tragverhalten beider Prüfkörperserien ist unterschiedlich. Während sich in den Glastafeln des Dünnglases Leoflex über den gesamten Querschnitt eine Druckspannung beziehungsweise Zugspannung einstellt, bildet sich eine Biegespannungszustand bei Prüfkörpern mit den

Dünnglastafeln Optiwhite aus.¹³⁹ Als Mehrschichtsystem mit schubweichen Zwischenschichten stellt sich ein teilweiser Schubverbund zwischen den Grenzflächen »kein Verbund« und »voller Verbund« ein. Für die Untersuchungen zum Tragverhalten ist der Schubmodul numerisch bestimmt. Das Zusammenwirken der Einzelschichten führt zu einer Erhöhung der Gesamtbiegesteifigkeit. Mit dickem Polycarbonatkern nähert sich das Tragverhalten beider Prüfkörperserien mit den Dünngläsern Leoflex oder Optiwhite an. Der Anteil des Dünnglases am Querschnitt nimmt mit zunehmender Dicke des Polycarbonatkerns ab. Dadurch wird das Tragverhalten maßgeblich vom Polycarbonat bestimmt.

Die Bruchlast ist für die Prüfkörper aus dem Tragverhalten ermittelt. Allerdings brechen unter den Randbedingungen der Prüfmaschine bei Prüfkörpern mit chemisch vorgespanntem Dünnglas keine Dünnglastafeln. Zugspannungen an der unteren Glastafel von $+158,8 \text{ N/mm}^2$ sind messbar. Deshalb fordert die Untersuchung zusätzlich eine Begrenzung der Durchbiegung auf 100 mm. Für die Prüfkörper mit nicht vorgespanntem Dünnglas sind die Bruchlasten im Vierpunkt-Biegeversuch ermittelt. Es zeigt sich, dass trotz Erhöhung der Belastung keine Delamination vor Glasbruch im Querschnitt auftritt.

Die Untersuchung zum Tragverhalten dient als Grundlage zur Validierung eines analytischen und numerischen Modells für die Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel. Dabei erfolgen eine analytische Berechnung und eine Modellierung mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) in Kapitel 8.

¹³⁹ In Weimar 2011, Seite 177 ff. sind Glas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit Glasnenndicken von 4 mm, 6 mm und 8 mm betrachtet. Im Unterschied zu den Untersuchungen an Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln stellen sich mit dickeren Deckschichten aus Glas geringer Verformungen und Spannungen ein, die sich im teilweisen Verbund mit einem hohen Schubmodul widerspiegeln. Im Querschnitt des Mehrschichtsystems treten ähnlich wie bei den Untersuchungen zu Verbundtafeln mit dem Dünnglas Optiwhite ein Biegespannungszustand auf, der jede Schicht in einen Zug- und einen Druckbereich unterteilt.

7 Resttragverhalten

7.1 Grundlagen

Sicherheitsanforderungen für Bauteile im Bauwesen werden durch eine entsprechende Berechnung, konstruktive Ausführung und Redundanz des Systems gewährleistet. Für den spröden Werkstoff Glas muss im Verbundsicherheitsglas eine ausreichende Resttragfähigkeit gegeben sein. Zum Sicherheitskonzept nach DIN 18008-1 zählen neben den Nachweisen im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) und im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG) auch der Nachweis der Resttragfähigkeit. Unter Resttragfähigkeit wird im Allgemeinen der Widerstand gegen vollständiges Versagen eines (teil-)zerstörten Systems über eine bestimmte Zeitdauer verstanden. Die Standsicherheit hängt von der Art der Konstruktion, der Schädigung der Verglasung und den äußeren Einwirkungen ab. Unter Berücksichtigung konstruktiver Vorgaben oder experimenteller beziehungsweise rechnerischer Nachweise ist die Resttragfähigkeit sicherzustellen. Alle drei Nachweise zum Trag- und Resttragverhalten führen zusammen zur Standsicherheit der Verglasung.

Die konstruktiven Vorgaben zur Sicherstellung einer Resttragfähigkeit ergeben sich aus der Verwendung von festgelegten Glasprodukten, dem Aufbau einer Verglasung, dem Glaseinstand und geometrischen Randbedingungen. Der rechnerische Nachweis berücksichtigt gebrochene Glastafeln nicht. Im Querschnitt muss somit mindestens eine Glastafel intakt sein, mit der der Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit mit der außergewöhnlichen Bemessungssituation geführt werden kann. Die zerstörten Glastafeln tragen nicht zum Lastabtrag bei, werden allerdings bei der Eigenlast berücksichtigt. Experimentelle Bauteilprüfungen untersuchen die Resttragfähigkeit am vorgegebenen Aufbau und der Konstruktion unter Belastung in Abhängigkeit der Ausrichtung als Horizontal- oder Vertikalverglasung. Die Verglasung wird planmäßig zerstört und muss über eine definierte Zeitdauer, ohne aus der Auflagerung zu rutschen oder komplett zu brechen, im Prüfstand halten.

Die Untersuchungen zum Resttragverhalten der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel erfolgen experimentell mit dem Vierpunkt-Biegeversuch in Anlehnung an das Vierschneiden-Verfahren nach DIN EN 1288-3 im Zustand III. Nachfolgend wird aufgezeigt, dass der Verbund aus Dünnglas und Polycarbonat ein Resttragverhalten aufweisen kann und den Anforderungen an das Sicherheitskonzept der DIN 18008-1 genügt. Dazu werden die Prüfkörper aus der Untersuchung zum Tragverhalten für die Versuche gebrochen und planmäßig zerstört, um einen Vergleich zwischen dem intakten und zerstörten Zustand zu ermöglichen.

7.2 Versuchsaufbau und Versuchsprogramm

In Anlehnung an das Vierschneiden-Verfahren nach DIN EN 1288-3 wird der Vierpunkt-Biegeversuch zur Untersuchung des Resttragverhaltens der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel bei zweiseitiger Lagerung durchgeführt. Die Prüfkörper mit den Abmessungen von 1.100 mm in der Länge und 360 mm in der Breite liegen auf zwei Auflagerrollen und sind symmetrisch zur Mitte durch zwei Biegerollen beansprucht. Die Spannweite zwischen den Auflagerrollen beträgt 1.000 mm. Beide Auflager überragt die Verbundtafel um 50 mm, um ein Abrutschen bei großen Verformungen zu verhindern. Der Versuchsaufbau ist in Bild 60 gezeigt.

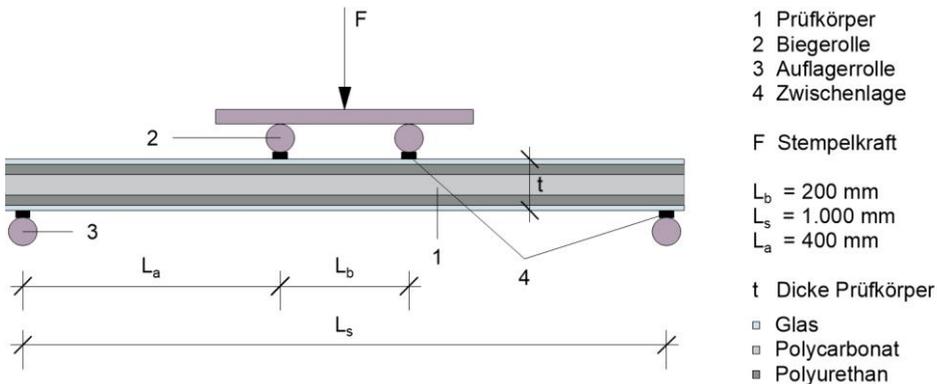


Bild 60

Schematische Darstellung des Vierpunkt-Biegeversuchs in Anlehnung an das Vierschneiden-Verfahren nach DIN EN 1288-3.

Der Aufbau der Verbundtafel entspricht dem Aufbau aus der Untersuchung des Tragverhaltens. Die Verbundtafel besteht dabei aus zwei außenliegenden Glas tafeln und einem innenliegenden Polycarbonatkern, flächig laminiert über eine Zwischenschicht aus thermoplastischem Polyurethan.

Tabelle 29 zeigt den Querschnittsaufbau der Prüfkörper mit der Anzahl, der Nenn dicke und der Realdicke.

Tabelle 29

Anzahl, Nenndicke und Aufbau der Prüfkörper. Für die Untersuchungen zum Resttragverhalten.

Prüfkörper	Anzahl	Nenndicke	Realdicke	Aufbau Nenndicke [mm] Realdicke [mm]
L_04_K	3	9,7 mm	9,5 mm (<0,1 mm)	CVG 02 TPU PC TPU CVG 02 0,85 2,00 4,00 2,00 0,85 0,86 2,00 3,80 2,00 0,86
L_08_K	3	13,7 mm	13,4 mm (<0,1 mm)	CVG 02 TPU PC TPU CVG 02 0,85 2,00 8,00 2,00 0,85 0,86 1,94 7,80 1,94 0,86
L_12_K	3	17,7 mm	17,3 mm (0,1 mm)	CVG 02 TPU PC TPU CVG 02 0,85 2,00 12,00 2,00 0,85 0,86 1,87 11,80 1,87 0,86
O_04_K	3	12,0 mm	11,7 mm (0,1 mm)	FG TPU PC TPU FG 2,00 2,00 4,00 2,00 2,00 1,90 2,05 3,80 2,05 1,90
O_08_K	3	16,0 mm	15,5 mm (0,1 mm)	FG TPU PC TPU FG 2,00 2,00 8,00 2,00 2,00 1,90 1,95 7,80 1,95 1,90
O_12_K	3	20,0 mm	19,4 mm (0,1 mm)	FG TPU PC TPU FG 2,00 2,00 12,00 2,00 2,00 1,90 1,89 11,80 1,89 1,90

Die Untersuchungen zum Resttragverhalten der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit dem Vierpunkt-Biegeversuch erfolgen im Zustand III. Die Verbundtafel wird für 120 s mit einer Kraft von 200 N kraftgesteuert mit 5 N/s beansprucht und anschließend komplett entlastet. Die Auswertung erfolgt über einen Zeitraum von 60 s während das Mehrschichtsystem konstant belastet ist. Die Versuche werden mit der hydraulischen Prüfmaschine Delta 6-100 von Form + Test Seidner + Co. GmbH durchgeführt. Vor Prüfbeginn lagern die Prüfkörper für mindestens 24 h unter den klimatischen Versuchsbedingungen.

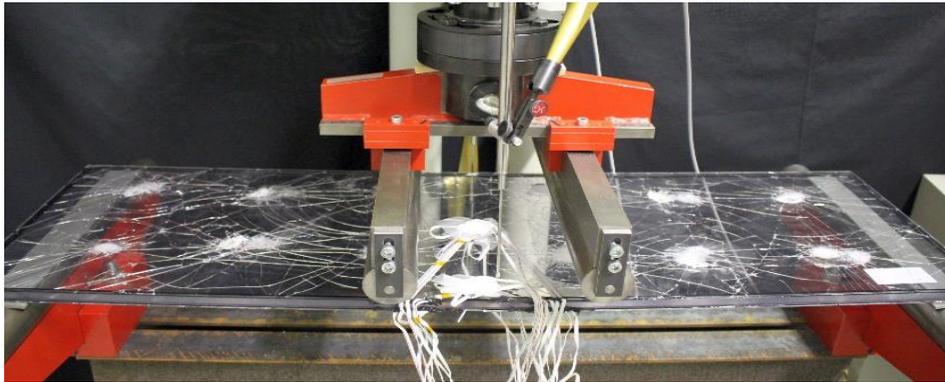
Die durchgeführten Untersuchungen unterteilen sich in die Prüfreihe T_R_III, die beidseitig zerstörte Glastafeln infolge des Bruchversuchs aus Kapitel 6.3 beziehungsweise mit einem mit Hammer und Meißel bei einmaligem Schlag zerstörten Prüfkörper verwendet, und in Prüfreihe T_R_IIIp. T_R_IIIp ist an planmäßig zerstörten Verbundtafeln durchgeführt, bei den die Glastafeln beidseitig gleichmäßig mit 12 Hammerschlägen zerstört sind, um den ungünstigen Fall an zerstörter Glastafeln darzustellen. Tabelle 30 zeigt das Versuchsprogramm für die Prüfkörper in Zustand III im Kurzzeitversuch und Bild 61 die planmäßig zerstörte Verbundtafel im Zustand III eingebaut in die Prüfmaschine.

Tabelle 30

Versuchsprogramm für die Kurzzeitversuche im Zustand III und Zustand IIIp.

Nummer	Zielwert	Auswertungszeit	Belastungssteuerung
T_R_III	200 N	60 s	5 N/s kraftgesteuert
T_R_IIIp	200 N	60 s	5 N/s kraftgesteuert

Als zusätzlicher Zielwert ist die maximale Verformung auf 100 mm begrenzt.

**Bild 61**

Vierpunkt-Biegeversuch mit einer planmäßig zerstörten Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel im Kurzzeitversuch.

Der Langzeitversuch im planmäßig zerstörtem Zustand IIIp mit einer Dauer von 24 h wird im Anschluss an T_R_IIIp an der Prüfkörpern bei einer Belastung von 50 N durchgeführt. Dabei erfolgt die Beanspruchung der Prüfkörper über Biegerollen mit zusätzlichem Gewicht. Tabelle 31 zeigt das Versuchsprogramm zu den Langzeitversuchen, Bild 62 den Versuchsaufbau unter Belastung.

Tabelle 31

Versuchsprogramm für die Langzeitversuche im planmäßig zerstörtem Zustand IIIp.

Nummer	Zielwert	Auswertungszeit	Belastungssteuerung
T_R_IIIp_L	50 N	24 h	50 N/s kraftgesteuert

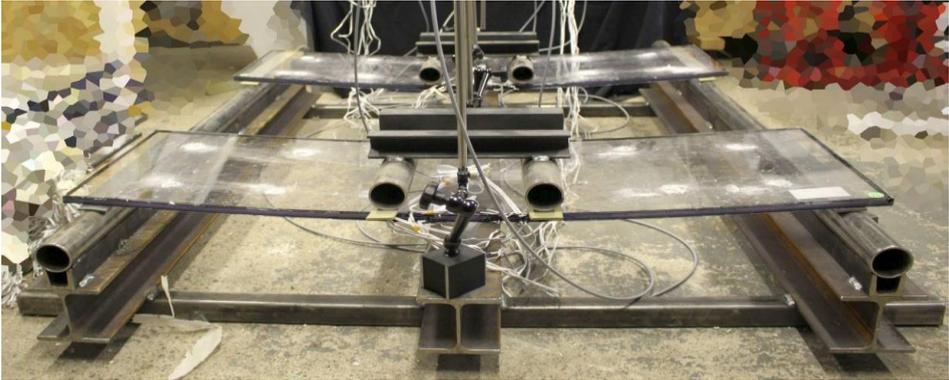


Bild 62

Vierpunkt-Biegeversuch mit einer planmäßig zerstörten Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel im Langzeitversuch.

Zweiachsiale Dehnungsmessstreifen messen die Dehnung der Längs- und Querrichtung in der Mitte sowie an der längeren Kante der Verbundtafel an jeder Grenzfläche. Die Dehnungsmessstreifen an zerstörten Glastafeln sind nicht zur Auswertung herangezogen. Dehnungen unter Zugbeanspruchungen werden positiv, Stauchungen unter Druckbeanspruchungen mit negativem Vorzeichen dargestellt. Die Applikation der Dehnungsmessstreifen im Querschnitt findet während der Produktion der Verbundtafeln statt. Nach Herstellung zeigen sich keine sichtbaren Delaminationen im Bereich der Kabelführung. Über induktive Wegaufnehmer mit einem Messweg von ± 50 mm wird die Durchbiegung senkrecht zur Plattenebene an den beiden längeren Kanten in Plattenmitte gemessen. Die Belastungsgeschwindigkeit während der Kurzzeitversuche beträgt 5 N/s. Die Anordnung und Auswertung der Messwerte erfolgt analog zur Untersuchung des Tragverhaltens in Kapitel 6.

7.3 Kurzzeitversuch

Die Untersuchungen des Resttragverhaltens im Kurzzeitversuch in Zustand III werden an Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit dem Dünnglas Leoflex und dem Dünnglas Optiwhite durchgeführt. Die Versuche finden bei einer Temperatur von $(+21,7 \pm 0,2)$ °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von $(31,9 \pm 0,4)$ % rF statt. Beide äußeren Glastafeln sind bei den Laminaten zerstört. Der Bruchsprung liegt zwischen den Biegerollen im Bereich der größten Beanspruchung. Bild 63 zeigt das typische Bruchbild beider Mehrschichtsysteme mit zwei gebrochenen Glastafeln. Verbundtafeln mit dem Dünnglas Leoflex werden am Rand gezielt mit einem Schlag zu Bruch gebracht. Bei dem Dünnglas Optiwhite brechen beide Glastafeln unter der Bruchbelastung.



Bild 63

Planmäßige Zerstörung der oberen und unteren Glastafel zur Untersuchung des Resttragverhaltens in Zustand III. Verbundtafel mit dem Dünnglas Leoflex (links) und Verbundtafel mit dem Dünnglas Optiwhite (rechts).

Die Auswertung erfolgt für die Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln bei einer Belastung von 200 N. Tabelle 32 und Tabelle 33 zeigen die Ergebnisse. Verbundtafeln mit Deckschichten aus Optiwhite verformen sich im Zustand III geringer als das System mit dem Dünnglas Leoflex. Verbundtafeln mit Optiwhite führen zu einer vergrößerten Druckzone und erhöhen die Verbundsteifigkeit auch im gebrochenen Zustand. Dadurch versteift dickeres Glas die Verbundtafel effektiver als dünneres Glas, niedrigere Verformungen treten auf.

Tabelle 32

Ergebnisse zum Resttragverhalten im Zustand III von Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit dem Dünnglas Leoflex.

Messwert	L_04_R_III	L_08_R_III	L_12_R_III
Realdicke	9,5 mm (<0,1 mm)	13,4 mm (<0,1 mm)	17,3 mm (0,1 mm)
Kraft	201,5 N (1,0 N)	200,1 N (0,1 N)	200,1 N (0,1 N)
Verformung	95,6 mm (6,6 mm)	35,7 mm (5,1 mm)	14,0 mm (1,5 mm)
Verformung / Realdicke	10,0 (0,6)	2,7 (0,4)	0,8 (0,1)

Tabelle 33

Ergebnisse zum Resttragverhalten im Zustand III von Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit dem Dünnglas Optiwhite.

Messwert	O_04_R_III	O_08_R_III	O_12_R_III
Realdicke	11,7 mm (0,1 mm)	15,5 mm (0,1 mm)	19,4 mm (0,1 mm)
Kraft	201,0 N (0,8 N)	200,3 N (0,1 N)	200,6 N (0,1 N)
Verformung	56,2 mm (9,0 mm)	27,1 mm (0,6 mm)	12,1 mm (0,9 mm)
Verformung / Realdicke	4,8 (0,8)	1,7 (<0,1)	0,6 (0,1)

Die Auswertung der Dehnungen ist nur für die intakte Polycarbonattafel möglich. Die zerstörten Glastafeln in der Zugzone übertragen keine Kräfte, in der Druckzone findet eine Verzahnung der Glasbruchstücke mit einer Übertragung von Druckspannungen über Kontakt statt. Die Spannungen in Tabelle 34 und Tabelle 35 werden mit Gleichung 10 und Gleichung 11 berechnet. Die dünnen Verbundtafeln zeigen sowohl für das Dünnglas Leoflex als auch das Dünnglas Optiwhite eine Übertragung von Druckspannungen im oberen Querschnittsbereich über Kontakt. Lediglich ein kleiner Bereich der Polycarbonattafel steht dabei unter Druck. Mit steigender Polycarbonatdicke reduzieren sich die Spannungen. Die Querschnittsteifigkeit erhöht sich, die Verbundtafel wird steifer. Dennoch bildet sich die Druckzone auch über den Bereich der gebrochenen Glastafeln aus. Während sich an der Oberseite in der Prüfkörpermitte noch Druckspannungen bilden, befindet sich am Plattenrand die komplette Polycarbonattafel unter einer Zugbeanspruchung. Querspannungen bewirken eine Biegung in Querrichtung und erhöhen im Kantenbereich die Zugspannungen in der Polycarbonatschicht.

Tabelle 34

Spannungswerte in Längsrichtung zum Resttragverhalten im Zustand III von Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit dem Dünnglas Leoflex.

Messwert	L_04_R_III	L_08_R_III	L_12_R_III
$\sigma_{PC,oben,Mitte}$ [N/mm ²]	-0,2 (0,5)	-2,7 (0,8)	-1,7 (0,1)
$\sigma_{PC,unten,Mitte}$ [N/mm ²]	+10,1 (2,2)	+5,1 (0,8)	+2,4 (0,2)
$\sigma_{PC,oben,Rand}$ [N/mm ²]	+0,4 (1,3)	-1,8 (0,7)	-1,3 (0,1)
$\sigma_{PC,unten,Rand}$ [N/mm ²]	+8,8 (1,8)	+4,4 (0,7)	+2,3 (0,4)

Tabelle 35

Spannungswerte in Längsrichtung zum Resttragverhalten im Zustand III von Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit dem Dünnglas Optiwhite.

Messwert	O_04_R_III	O_08_R_III	O_12_R_III
$\sigma_{PC,oben,Mitte}$ [N/mm ²]	-0,5 (1,1)	-1,8 (0,2)	-1,4 (0,1)
$\sigma_{PC,unten,Mitte}$ [N/mm ²]	+6,4 (2,6)	+4,2 (0,2)	+2,3 (0,1)
$\sigma_{PC,oben,Rand}$ [N/mm ²]	+0,5 (0,5)	-1,4 (0,3)	-1,3 (0,1)
$\sigma_{PC,unten,Rand}$ [N/mm ²]	+4,2 (0,8)	+3,9 (0,3)	+2,4 (0,3)

Die Untersuchungen zum Resttragverhalten im Zustand IIIp mit planmäßig zerstörten Glastafeln bilden den ungünstigsten Fall ab, während die Polycarbonattafel intakt bleibt. Die Glastafeln werden sowohl an der Ober- als auch an der

Unterseite planmäßig mit 12 Hammerschlägen als mutwillige Zerstörung bearbeitet. Dabei entstehen zahlreiche Risse. Bild 64 zeigt beispielhaft eine Verbundtafel im planmäßig zerstörtem Zustand IIIp.

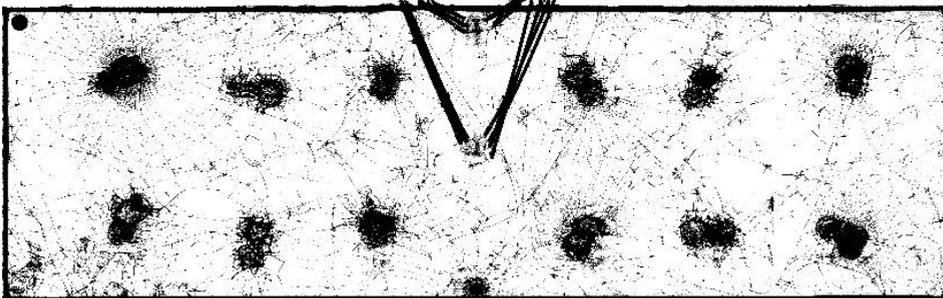


Bild 64

Planmäßige Zerstörung der oberen und unteren Glastafeln zur Untersuchung des Resttragverhaltens im Zustand IIIp.

Tabelle 36 und Tabelle 37 beschreiben die Ergebnisse zum Resttragverhalten für Verbundtafeln mit dem Dünnglas Optiwhite und dem Dünnglas Leoflex. Die Ergebnisse sind für eine Belastung von 200 N dargestellt. Grundsätzlich weisen die Prüfkörper mit dem Dünnglas Optiwhite geringere Verformungen als Verbundtafeln mit dem Dünnglas Leoflex auf. L_04_R_IIIp kann nicht bis zu 200 N bei gleichzeitiger Messung der Verformung über die induktiven Wegaufnehmer erfolgen, da die Verformung über der maximale Messlänge liegt. Deshalb wird L_04_R_IIIp bei einer Verformung von 100 mm ausgewertet.

Tabelle 36

Ergebnisse zum Resttragverhalten im planmäßig zerstörtem Zustand IIIp von Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit dem Dünnglas Leoflex.

Messwert	L_04_R_IIIp	L_08_R_IIIp	L_12_R_IIIp
Realdicke	9,5 mm (<0,1 mm)	13,4 mm (<0,1 mm)	17,3 mm (0,1 mm)
Kraft	139,8 N (11,1 N)	201,1 N (0,9 N)	199,2 N (0,5 N)
Verformung	101,9 mm (6,2 mm)	49,1 mm (7,7 mm)	19,4 mm (1,3 mm)
Verformung / Realdicke	10,7 (0,7)	3,7 (0,6)	1,1 (0,1)

Tabelle 37

Ergebnisse zum Resttragverhalten im planmäßig zerstörten Zustand IIIp von Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit dem Dünnglas Optiwhite.

Messwert	O_04_R_IIIp	O_08_R_IIIp	O_12_R_IIIp
Realdicke	11,7 mm (0,1 mm)	15,5 mm (0,1 mm)	19,4 mm (0,1 mm)
Kraft	202,2 N (0,3 N)	200,3 N (0,3 N)	200,6 N (0,1 N)
Verformung	88,6 mm (2,7 mm)	34,4 mm (1,0 mm)	14,8 mm (0,7 mm)
Verformung / Realdicke	7,5 (0,9)	2,2 (0,1)	0,8 (<0,1)

Im planmäßig zerstörtem Zustand IIIp zeigt eine Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel ein Resttragverhalten. In Bild 65 stehen Polycarbonatplatten ohne Glasdeckschichten im Vergleich mit dem Mehrschichtsystem. Eine Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel reduziert die Verformungen im Vergleich zur Polycarbonatplatte durch in der Druckzone befindliche Glasbruchstücke. Dabei entstehen in den Verbundtafeln mit Optiwhite die geringsten Verformungen. Mit steigender Polycarbonatdicke reduziert sich der Einfluss der in der Druckzone versteifenden Glasbruchstücke und die Polycarbonatplatte trägt einen Teil der Belastung über Biegung ab. Die Spannungswerte sind für den planmäßig zerstörten Zustand IIIp in Tabelle 38 und Tabelle 39 gezeigt. An der druckbeanspruchten Oberseite der Polycarbonatplatte entstehen geringere Werte als an der zugbeanspruchten Unterseite. Ein Teil der Druckspannung wird über Verzahnung und Kontakt der Glasbruchstücke abgetragen. Bei den Verbundtafeln mit einer 4 mm Polycarbonatplatte bildet sich kein Druckbereich in Plattenmitte in Längsrichtung an der Unterseite der Polycarbonatplatte aus. Der Kunststoff trägt die Lasten als zugbeanspruchte Schicht ab.

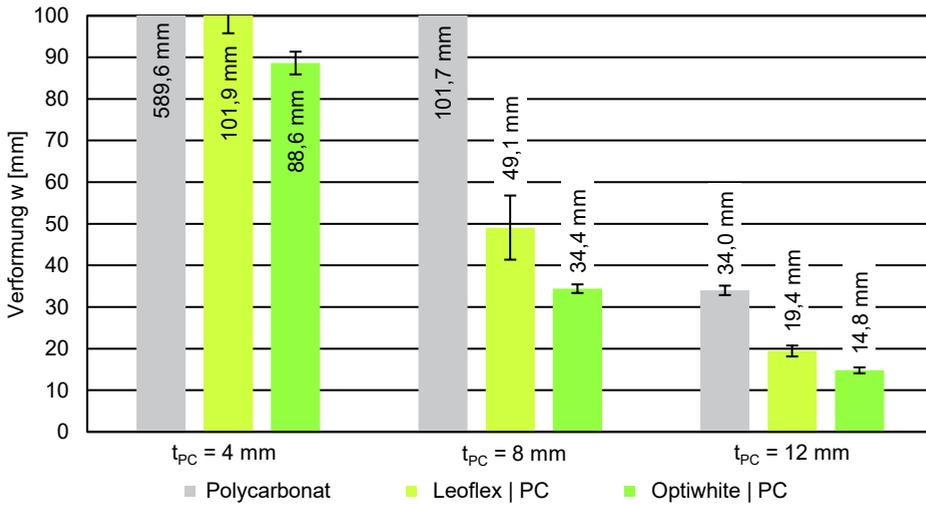


Bild 65

Ergebnisse der Verformung der Prüfkörper im Vierpunkt-Biegeversuch bei einer Belastung von 200 N in Prüfung T_R_IIIp im Vergleich zu einer Polycarbonatplatte. Für Verbundtafeln mit Leoflex und 4 mm Polycarbonatkern ist eine Belastung von 140 N aufgebracht, um den maximalen Messweg der Wegaufnehmer zu erreichen.

Tabelle 38

Ergebnisse der Längsspannung von Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel mit dem Dünnglas Leoflex im planmäßig zerstörten Zustand IIIp.

Messwert	L_04_R_IIIp	L_08_R_IIIp	L_12_R_IIIp
$\sigma_{PC,oben,Mitte}$ [N/mm ²]	+0,6 (0,1)	-3,6 (0,8)	-2,1 (<0,1)
$\sigma_{PC,unten,Mitte}$ [N/mm ²]	+8,8 (1,4)	+6,2 (0,7)	+2,8 (<0,1)
$\sigma_{PC,oben,Rand}$ [N/mm ²]	-1,9 (0,5)	-2,5 (0,4)	-0,7 (0,1)
$\sigma_{PC,unten,Rand}$ [N/mm ²]	+2,3 (0,6)	+2,6 (0,3)	+0,7 (<0,1)

Tabelle 39

Ergebnisse der Längsspannung von Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel mit dem Dünnglas Optiwhite im planmäßig zerstörten Zustand IIIp.

Messwert	O_04_R_IIIp	O_08_R_IIIp	O_12_R_IIIp
$\sigma_{PC,oben,Mitte}$ [N/mm ²]	+2,2 (<0,1)	-2,0 (0,2)	-1,7 (0,1)
$\sigma_{PC,unten,Mitte}$ [N/mm ²]	+6,6 (0,6)	+4,6 (0,2)	+2,4 (0,1)
$\sigma_{PC,oben,Rand}$ [N/mm ²]	-0,9 (<0,1)	-1,4 (0,2)	-1,3 (0,1)
$\sigma_{PC,unten,Rand}$ [N/mm ²]	+1,3 (0,1)	+4,2 (0,2)	+2,5 (0,2)

Mit Gleichung 13 wird das Verhältnis zwischen dem Kraft-Verformungs-Verhältnis in Zustand III beziehungsweise Zustand IIIp zum intakten Zustand I angegeben und in Bild 66 dargestellt.

$$\eta_i = \frac{\frac{F_i}{w_i}}{\frac{F_I}{w_I}}$$

Gleichung 13

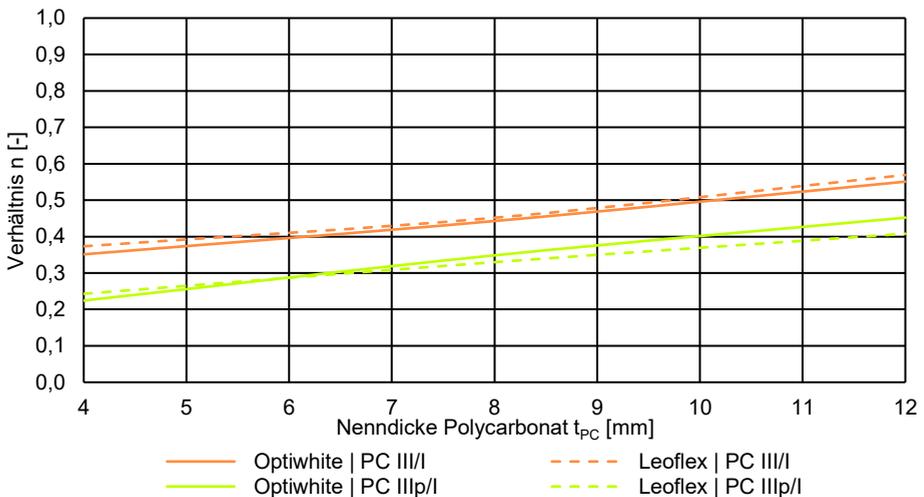


Bild 66

Verhältniszerte der Zustände III und IIIp im Vergleich zu Zustand I.

Der Vergleich des zerstörten Zustandes III und des planmäßig zerstörten Zustandes IIIp mit dem intakten Zustand I zeigt das Potential des Resttragverhaltens der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel. Mit steigender Nennstärke verbessert sich das Resttragverhalten. Während bei einem 4 mm Polycarbonatkern die Verbundtafel mit dem Dünnglas Leoflex bedingt durch die geringere Eigenlast des Glases einen günstigeren Wert aufweist, ändert sich ab einer Nennstärke des

Polycarbonates von 6 mm das Verhältnis und Verbundtafeln mit dem Dünnglas Optiwhite weisen günstigere Werte auf. Die Glasbruchstücke in der Druckzone können bei dickeren Glastafeln höhere Kräfte übertragen und verbessern das Resttragverhalten. In Zustand IIIp erreicht das Resttragverhalten der Prüfkörper unabhängig des Aufbaus und verwendeten Dünnglases eine Steifigkeit von mindestens 22 % im Vergleich zu Zustand I. Bei der konstruktiven Durchbildung muss auf einen ausreichenden Glaseinstand einer linienförmigen Lagerung geachtet werden, um ein Herausrutschen der Verglasung von der Auflagerung zu vermeiden.

7.4 Langzeitversuch

Das Verformungsverhalten im Vierpunkt-Biegeversuch wird für die Untersuchungen im planmäßig zerstörten Zustand IIIp mit einer Belastung von 50 N für eine Zeitdauer von 24 h im Langzeitversuch betrachtet. Die Versuche finden bei einer Temperatur von $(+17,4 \pm 0,7)$ °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von $(35,1 \pm 1,7)$ % rF statt. Die Prüfkörper entsprechen den Prüfkörpern der Untersuchung im planmäßig zerstörtem Zustand IIIp. Tabelle 40 zeigt den Aufbau sowie die Nenn- und Realdicke der Prüfkörper.

Tabelle 40

Anzahl, Nenndicke und Aufbau der Prüfkörper für die Untersuchungen zum Resttragverhalten im Langzeitversuch im planmäßig zerstörten Zustand IIIp.

Prüfkörper	Anzahl	Nenndicke	Realdicke	Aufbau
				Nenndicke [mm] Realdicke [mm]
L_04_LR	3	9,7 mm	9,5 mm ($<0,1$ mm)	CVG 02 TPU PC TPU CVG 02 0,85 2,00 4,00 2,00 0,85 0,86 2,00 3,80 2,00 0,86
L_08_LR	3	13,7 mm	13,4 mm ($<0,1$ mm)	CVG 02 TPU PC TPU CVG 02 0,85 2,00 8,00 2,00 0,85 0,86 1,94 7,80 1,94 0,86
L_12_LR	3	17,7 mm	17,3 mm (0,1 mm)	CVG 02 TPU PC TPU CVG 02 0,85 2,00 12,00 2,00 0,85 0,86 1,87 11,80 1,87 0,86
O_04_LR	3	12,0 mm	11,7 mm (0,1 mm)	FG TPU PC TPU FG 2,00 2,00 4,00 2,00 2,00 1,90 2,05 3,80 2,05 1,90
O_08_LR	3	16,0 mm	15,5 mm (0,1 mm)	FG TPU PC TPU FG 2,00 2,00 8,00 2,00 2,00 1,90 1,95 7,80 1,95 1,90
O_12_LR	3	20,0 mm	19,4 mm (0,1 mm)	FG TPU PC TPU FG 2,00 2,00 12,00 2,00 2,00 1,90 1,89 11,80 1,89 1,90

Bild 67 zeigt die Verformung über 24 h für die Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel mit dem Dünnglas Leoflex und dem Dünnglas Optiwhite. Die Verformung der Verbundtafeln steigt nach Belastungsbeginn steil an. Nachdem bei allen Prüfkörpern die Belastung von 50 N aufgebracht ist, verflacht der Anstieg der Verformung. Die Prüfkörper mit einer dicken Polycarbonat tafel zeigen geringere Verformungen und Verformungszuwachs als die Prüfkörper mit dem dünnen Kern. Die größten Verformungen treten bei O_04_LR mit dem Dünnglas Optiwhite und einer dünnen Polycarbonat tafel auf. Unter Beibehaltung der Nenndicke des Polycarbonats, aber mit dem Dünnglas Leoflex als außenliegende Glastafeln, ist die Verformung geringer. Bei den dünnen Verbundtafeln erhöht die Eigenlast der gebrochenen Glastafel die Durchbiegung zusätzlich. Die geringsten Verformungen nach 24 h treten bei dem Prüfkörper O_12_LR auf.

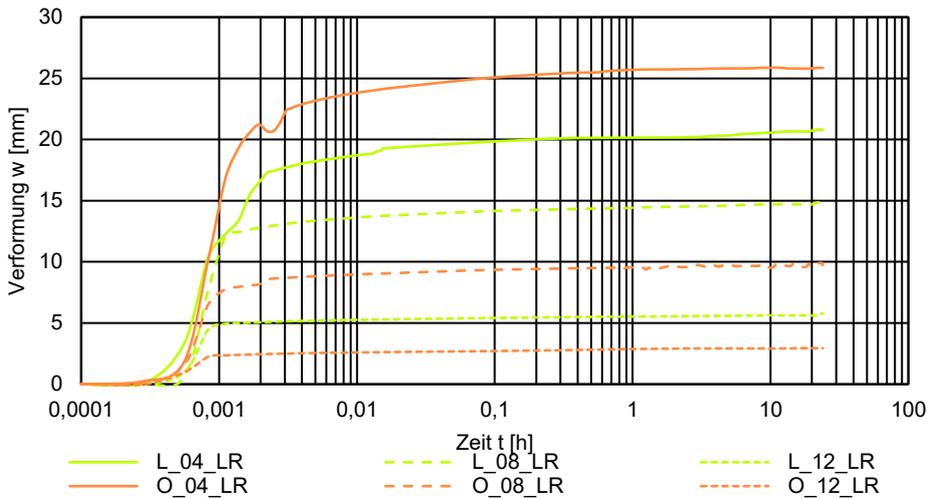


Bild 67

Verformungs-Zeit-Diagramm für Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit dem Dünnglas Leoflex und dem Dünnglas Optiwhite für Prüfkörper im planmäßig zerstörten Zustand IIIp mit einer Belastung von 50 N für eine Zeitdauer von 24 h.

Tabelle 41 zeigt den zeitabhängigen Verformungszuwachs nach einer Belastungsdauer von 1 min, 1 h, 12 h und 24 h für planmäßig zerstörte Verbundtafeln im Zustand IIIp. Bereits nach wenigen Stunden nähert sich die Verformung der Endverformung. Mit dem Dünnglas Leoflex zeigt sich ein Verformungszuwachs von bis zu 9 %, während sich beim Dünnglas Optiwhite die Verformung nach 24 h um bis zu 12 % erhöht. Im Langzeitversuch der zerstörten Verbundtafeln beeinflusst die Eigenlast die Durchbiegung, dadurch stellt sich ein größerer relativer Verformungszuwachs für Verbundtafeln mit dem Dünnglas Optiwhite ein, der allerdings absolut geringer ist.

Tabelle 41

Zeitabhängige Zunahme der Verformung für die Untersuchung im planmäßig zerstörten Zustand IIIp. Der obere Wert gibt die Verformung, der untere Wert die Relation im Vergleich zur Verformung bei 1 min, an.

Prüfkörper	1 min	1 h	12 h	24 h
L_04_LR	20,4 mm (1,00)	21,2 mm (1,04)	21,5 mm (1,05)	21,6 mm (1,06)
L_08_LR	13,8 mm (1,00)	14,4 mm (1,05)	14,7 mm (1,07)	14,9 mm (1,08)
L_12_LR	5,3 mm (1,00)	5,5 mm (1,04)	5,6 mm (1,06)	5,8 mm (1,09)
O_04_LR	24,2 mm (1,00)	25,7 mm (1,06)	25,9 mm (1,07)	25,9 mm (1,07)
O_08_LR	9,1 mm (1,00)	9,5 mm (1,05)	9,7 mm (1,07)	9,7 mm (1,08)
O_12_LR	2,6 mm (1,00)	2,9 mm (1,09)	2,9 mm (1,11)	2,9 mm (1,12)

Während der experimentellen Untersuchung der planmäßig zerstörten Verbundtafeln stellen sich bereits mit geringer Belastung große Verformungen ein. Zur Messung der Verformung stehen ausschließlich induktive Wegaufnehmer zur Verfügung, die über Kontakt zum Prüfkörper die Verformung aufnehmen. Zur Sicherstellung des Kontaktes wird eine geringe Kraft ausgeübt. Insbesondere bei biegewichen, dünnen Verbundtafeln darf dieser Einfluss nicht mehr vernachlässigt werden. Daher sind optische Wegaufnehmer zur Aufnahme der Verformung besser geeignet.¹⁴⁰

Zusätzlich erfährt die Verbundtafel eine weitere Beanspruchung durch die haftenden Glasbruchstücke. Dadurch treten bei biegewichen Verbundtafeln mit hohem Glasanteil größere Verformungen auf.

7.5 Zusammenfassung

Die Untersuchungen zum Resttragverhalten der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit den Dünngläsern Optiwhite und Leoflex erfolgen im Kurzzeitversuch im zerstörten Zustand III und planmäßig zerstörtem Zustand IIIp und im Langzeitversuch für Zustand IIIp. Die Prüfkörper entsprechen denen der Untersuchung des Tragverhaltens. In Anlehnung an das Vierschneiden-Verfahren nach DIN EN 1288-3 wird die Verbundtafel im Vierpunkt-Biegeversuch belastet, um Dehnungen und Verformungen zu messen und die Spannungen zu berechnen.

¹⁴⁰ Zum Zeitpunkt der Messung sind am Lehrstuhl für Tragkonstruktion der Universität Siegen keine optischen Wegaufnehmer vorhanden.

Die Untersuchungen zeigen, dass das Mehrschichtsystem eine Resttragfähigkeit aufweist. Dabei bildet sich eine Druckzone über die oberen Glasbruchstücke aus, während sich die untere gebrochene Glastafel im Zugbereich nicht am Lastabtrag beteiligt. Der Vergleich zwischen einer Polycarbonattafel und einer Verbundtafel verdeutlicht die Verzahnung der Glasbruchstücke in der Druckzone, die zu einer geringeren Verformung in Abhängigkeit der Nenndicke der Deckschicht führt. Bei einem dickeren Polycarbonatkern schwächt sich der Einfluss der Glasbruchstücke auf die Reduktion der Verformung und das Tragverhalten im zerstörten Zustand ab. Die Polycarbonattafel ist auf Biegung beansprucht. Im Langzeitversuch beeinflusst die Eigenlast der zerstörten Glastafeln insbesondere bei dem dünnsten Aufbau die Verformung. Nach 24 h ist mit einem relativen Verformungszuwachs von bis zu 12 % zu rechnen. Allerdings zeigt sich, dass bereits ein geringer absoluter Zuwachs bei kleiner Anfangsverformung einen großen relativen Wert ergibt.

8 Berechnungsmethoden

8.1 Grundlagen

Dieses Kapitel beschreibt analytische und numerische Berechnungsmethoden für Mehrschichtsysteme und vergleicht die berechneten Ergebnisse mit den Messwerten der Verbundtafel. Dabei liegt die Verbundtafel im intakten Zustand I vor. Die Berechnungsmethoden gehen von einer zweiseitig linienförmig gelenkigen Lagerung mit einer symmetrischen Belastung analog zum Vierpunkt-Biegeversuch aus.

Die Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel setzt sich aus mehreren Materialien zusammen, bei denen eine Schubkraft übertragen werden kann. In Abhängigkeit der Schubsteifigkeit des Verbundes stellt sich ein teilweiser Schubverbund ein, der zwischen den Grenzfällen »voller Verbund« und »kein Verbund« liegt. Für einige Zwischenschichtfolien sind in allgemein bauaufsichtliche Zulassungen (abZ) beziehungsweise in allgemeine Bauartengenehmigungen (aBG) ein teilweiser Schubverbund über die Angabe eines Schubmoduls beschrieben.¹⁴¹ Andernfalls gilt nach DIN 18008-1, dass mit dem ungünstigsten Verbundansatz gerechnet werden muss. Die vorgestellten Berechnungsmethoden zeigen Möglichkeiten zur analytischen und numerischen Berechnung von Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln bei bekanntem Schubmodul der Zwischenschicht und vergleichen die unterschiedlichen Ansätze miteinander zur Anwendbarkeit auf das Mehrschichtsystem.¹⁴²

Zusätzlich zum Ansatz des Schubverbundes können Nichtlinearitäten berücksichtigt werden. Im einfachsten Fall der linearen Berechnung stehen Einwirkung und Verformung proportional zueinander. Das lineare Tragverhalten von Glastafeln basiert auf der Bernoulli- oder Timoshenko-Balkentheorie beziehungsweise auf der Kirchhoff- oder Mindlin-Reissner-Plattentheorie. Für mehrlagige Querschnitte dürfen diese analytischen Verfahren entsprechend erweitert werden. Die analytische Methode gibt für einfache Systeme eine infinitesimale Lösung an, bei der an jeder Stelle die Verformung und Spannung eindeutig bestimmbar ist. Über Näherungsverfahren zur Spannungs- und Verformungsberechnung ergeben sich vereinfachte Methoden der analytischen Berechnung. Dazu müssen bekannte Verfahren auf Mehrschichtsysteme erweitert werden. Der hohen Genauigkeit der exakten, analytischen Lösung liegt die Beschränktheit auf Systeme mit einer einfachen Beanspruchung zugrunde. Aufwendigere Systeme erfordern neben einem tiefen mechanischen Verständnis auch einen stark zeitlichen Mehraufwand. Treten Verformungen auf, die größer als die Nenndicke sind, sollten zur realitäts-

¹⁴¹ Vergleiche beispielsweise abZ 70.3-170 und abZ-70.3-197.

¹⁴² Für die Zwischenschicht aus thermoplastischen Polyurethan liegt keine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung mit Ansatz eines Schubmoduls vor. Der Schubmodul wird aus den experimentellen Werten in Kapitel 6 bestimmt.

näheren Betrachtung die geometrischen Nichtlinearitäten berücksichtigt werden. Bei zweiseitiger Linienlagerung verlaufen die Längsspannungen nicht mehr konstant über die Balkenbreite. Günstig wirkende Querspannungen treten auf. Bei vierseitig linienförmiger Lagerung bilden sich Membranspannungen aus. Physikalische Nichtlinearität, wie nichtlineare Materialgesetze, inhomogenes Material oder ungleichmäßiger Schubverbund werden in diesem Kapitel nicht berücksichtigt.

Die analytische Berechnungsmethode nach der Sandwichtheorie und die erweiterte Näherungslösung für den nachgiebigen Verbund sind auf den fünfschichtigen Querschnittsaufbau mit dünnen Deckschichten angewendet. Die Ergebnisse aus der Berechnung werden mit den Messwerten aus Kapitel 6 verglichen. Bei dünnen Verbundtafeln tritt ein geometrisch nichtlinearer Trageffekt auf. Die analytische Lösung über eine Balkentheorie bildet dann die Spannungsverteilung im Querschnitt nicht realitätsnah ab. Spannungen bleiben trotz Berücksichtigung breiter Balken konstant über die Breite, eine Unterscheidung zwischen Mitte und Rand ist nicht möglich. Ein zur Gesamtschwereachse symmetrischer Spannungsverlauf stellt sich ein. Plattentheorien für einen nachgiebigen Verbund fünfschichtiger Lamine beschreiben das Tragverhalten mit geometrischer Nichtlinearität realitätsnäher.¹⁴³ Die Plattentheorie mit geometrisch nichtlinearer Berechnung ist numerisch auf Grundlage der Finite-Elemente-Methode (FEM) möglich. Die Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel wird mit den Programmen SJ Mepla, RFEM RF-Glas und Ansys modelliert. Die numerische Lösung stellt eine diskrete Lösung der berechneten Größen in Abhängigkeit der gewünschten Genauigkeit dar. Dabei ist ein Tragwerk in eine endliche Anzahl an Elementen unterteilt und die mechanischen Eigenschaften des Einzelements an den Knotenpunkten beschrieben. Mit dem Ergebnis wird aus der Steifigkeitsbeziehung bei Berücksichtigung der kinematischen Verträglichkeits- und statischen Gleichgewichtsbeziehungen des Einzelements die Elementsteifigkeit als Steifigkeitsbeziehung des Gesamtsystems zusammengesetzt. Die Lösung des Gleichungssystems ergibt den Verschiebungsvektor, mit dem die Schnittgrößen des Einzelements ermittelt werden. Das numerische Verfahren stellt mit ausreichender Genauigkeit eine Näherungslösung der geometrisch nichtlinearen Berechnung dar. Die Genauigkeit wird über eine Netzstudie als Vergleich der Verformungen und der Schnittgrößen zwischen zwei unterschiedlichen Elementgrößen bis zu einer ausreichenden Konvergenz durchgeführt. Gleichzeitig steigen bei zu hohem Vernetzungsgrad die Element- sowie die Knotenanzahl und damit die Berechnungsdauer exponentiell an. SJ Mepla modelliert die Verbundtafel mit zweidimensionalen, neunknotigen Mehrschichtelementen in der Schwereachse jeder Schicht und kombiniert die einzelnen Schichten auf Grundlage der Mindlin-Plattentheorie. In RFEM RF-Glas und Ansys hingegen ist die Verbundtafel über Volumenelemente modelliert und im Dreidimensionalen abgebildet.

¹⁴³ Vergleiche Gräf 2003, Seite 25 f.

8.2 Sandwichtheorie

Das Bauwesen verwendet häufig Sandwichelemente mit Deckschichten aus Stahl und einem Kern aus Polyurethanschaum. Analog kann auch Verbundglas als Sandwich betrachtet werden. Eine analytische Methode zur Berechnung für einen Werkstoffverbund aus Dünnglas und Polycarbonat bei zweiseitig linienförmig gelenkigen Lagerung basiert auf der linearen Analyse mehrschichtiger Balken im Vierpunkt-Biegeversuch mit der Sandwichtheorie.¹⁴⁴

Für weiterführende Untersuchungen zu einem fünfschichtigen Sandwichelement gelten die Geometriebezeichnungen nach Bild 68.

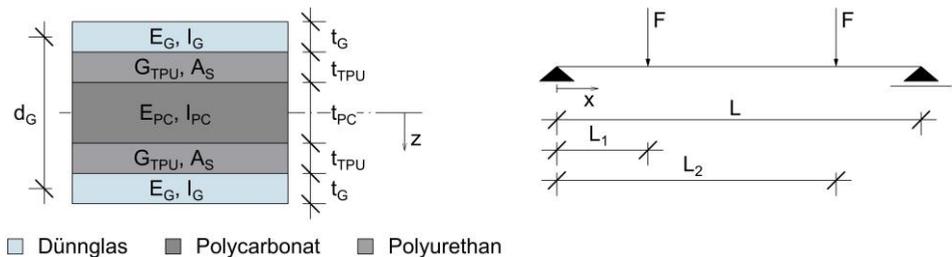


Bild 68

Querschnitt und statisches System zur Berechnung von Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln für die Sandwichtheorie mit einem fünfschichtigen Querschnittsaufbau.

Zur Berechnung gelten folgende Annahmen.

- Beschreibung und Anwendung einer analytischen Berechnungsmethode für Verbundquerschnitte mit fünf Schichten. Der statisch bestimmte Träger mit konstanter Breite und Querschnitt ist symmetrisch zur Gesamtschwereachse.
- Der Querschnitt ist von der Belastung unabhängig und inkompressibel. Die Belastung greift in der Gesamtschwereachse an.
- Für alle Schichten gilt ein linear-elastisches Materialverhalten und das Hooke'schen Gesetz. Jede Schicht ist homogen und isotrop.
- Die Zwischenschicht ist biegeweich. Es treten keine Normalspannungen in der Zwischenschicht auf. Die Eigenbiegesteifigkeit sowie der Traganteil der Sandwichsteifigkeit der Zwischenschicht dürfen vernachlässigt werden. Es gilt $E_{PC}, E_G \gg E_{TPU}$.

Zur Berechnung der Spannungen und Verformung einer Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln werden die benötigten Differentialgleichungen durch den Verformungszustand des Trägers dargestellt. Mit Randbedingungen und dem kinematischen Zusammenhang zwischen Durchbiegung und Schubwinkel lassen sich die Spannungen und Verformung berechnen.¹⁴⁵

¹⁴⁴ Für einen dreischichtigen Aufbau vergleiche Allen 1969, Seite 8 ff., Zenkert 1997, Seite 51 ff. und Stamm 1974, Seite 15 ff.

¹⁴⁵ Vergleiche Stamm 1974, Seite 15 ff. und Weimar 2011, Seite 220 ff.

Die Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln werden als Sandwichelement mit biegesteifen Deckschichten betrachtet. Für den allgemeinen Fall setzt sich die Gesamtbiegesteifigkeit B der Verbundtafel nach Gleichung 14 aus einem Anteil der Eigenbiegesteifigkeit der Deckschichten B_u und B_o und der Kernschicht B_m sowie einer Sandwichsteifigkeit B_s zusammen.¹⁴⁶

$$B = B_u + B_m + B_o + B_s = 2 \cdot B_G + B_{PC} + B_s$$

$$= 2 \cdot \frac{E_G \cdot b \cdot t_G^3}{12} + \frac{E_{PC} \cdot b \cdot t_{PC}^3}{12} + \frac{E_G \cdot b \cdot d_G^2 \cdot t_G}{2}$$

Gleichung 14

Die Schubsteifigkeit GA_s in Gleichung 15 ist von dem Schubmodul, dem Abstand der Schwerachsen der Deckschichten zur Gesamtschwerachse und der Nennstärke der Zwischenschicht abhängig.

$$GA_s = G_{TPU} \cdot \frac{b \cdot \left(\frac{d_G}{2}\right)^2}{t_{TPU}}$$

Gleichung 15

Mit den ermittelten Steifigkeiten und Randbedingungen wird die Differentialgleichung für die Verformung und den Schubwinkel aufgestellt. Nach Theorie I. Ordnung tritt keine Normalkraft im Sandwichbalken auf, die Differentialgleichungen vereinfachen sich zu Gleichung 16 und Gleichung 17.¹⁴⁷

$$w^{IV} - \left(\frac{\lambda}{L}\right)^2 \cdot w^{II} = \frac{L}{B} \cdot \left(\frac{\lambda}{L}\right)^2 \cdot (M + \beta \cdot L^2 \cdot q)$$

Gleichung 16

$$\gamma^{II} - \left(\frac{\lambda}{L}\right)^2 \cdot \gamma = -\frac{L}{B} \cdot \beta \cdot \lambda^2 \cdot Q$$

Gleichung 17

mit

$$\lambda = \sqrt{\frac{1 + \alpha}{\alpha \cdot \beta}} \quad \alpha = \frac{B_u + B_m + B_o}{B_s} \quad \beta = \frac{B_s}{2 \cdot GA_s \cdot L^2}$$

Die Lösung der Differenzialgleichungen führt für eine Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel im Vierpunkt-Biegeversuch als symmetrisch belasteter Balken zu den Gleichung 18 für die Verformung und Gleichung 19 für den Schubwinkel. Die Auswertung erfolgt für die Durchbiegung in Balkenmitte, der größte Schubwinkel stellt sich am Auflagerrand ein.¹⁴⁸

¹⁴⁶ Die Berechnung der Biegesteifigkeiten wird ohne Querdehnungsbehinderung gerechnet. Die Verbundtafel kann sich frei in der yz-Ebene krümmen. Vergleiche Allen 1969, Seite 46 f.

¹⁴⁷ Vergleiche Weimar 2011, Seite 224 ff.

¹⁴⁸ Vergleiche Weimar 2011, Seite 225 ff.

$$w(\xi) = \frac{F \cdot L^3}{B} \cdot \left[\begin{array}{l} \frac{1}{6} \cdot \left[\varepsilon_1 \cdot (1 - \xi) \cdot (-\varepsilon_1^2 + 2 \cdot \xi - \xi^2) \right. \\ \left. + (1 - \varepsilon_2) \cdot \xi \cdot (2 \cdot \varepsilon_2 - \varepsilon_2^2 - \xi^2) \right] \\ + \frac{1}{\alpha \cdot \lambda^2} \cdot [\varepsilon_1 \cdot (1 - \xi) + (1 - \varepsilon_2) \cdot \xi] \\ - \frac{1}{\alpha \cdot \lambda^3} \cdot \frac{1}{\sinh \lambda} \cdot \left[\sinh \lambda \varepsilon_1 \cdot \sinh \lambda (1 - \xi) \right. \\ \left. + \sinh \lambda (1 - \varepsilon_2) \cdot \sinh \lambda \xi \right] \end{array} \right] \quad \text{Gleichung 18}$$

$$\gamma(\xi) = \frac{F \cdot L^2}{B} \cdot \beta \cdot \left[\begin{array}{l} 1 - \varepsilon_1 - \frac{\sinh \lambda (1 - \varepsilon_1)}{\sinh \lambda} \cdot \cosh \lambda \xi \\ + 1 - \varepsilon_2 - \frac{\sinh \lambda (1 - \varepsilon_2)}{\sinh \lambda} \cdot \cosh \lambda \xi \end{array} \right] \quad \text{Gleichung 19}$$

mit

$$\xi = \frac{x}{L} \quad \varepsilon_i = \frac{L_i}{L} \quad \text{mit Index } i = 1, 2$$

Über die Gleichungen der Durchbiegung und des Schubwinkels lassen sich die Schnittkräfte Biegemoment und Querkraft an der Stelle $\xi = 0,5$ für die Balkenmitte der Verbundtafel bestimmen. Das Gesamtbiegemoment M setzt sich aus Anteilen M_s für die Sandwichtragwirkung sowie den Anteilen M_u und M_o für die Tragwirkung der Deckschichten und M_m für die Kernschicht zusammen.

$$M = M_u + M_m + M_o + M_s \quad \text{Gleichung 20}$$

$$= -w'' \cdot (B_u + B_m + B_o) + B_s \cdot (\gamma' - w''')$$

Für die Balkenmitte im Vierpunkt-Biegeversuch gilt für die Momente M_i und M_s .

$$M_i(\xi) = \frac{F \cdot L \cdot \alpha_i}{1 + \alpha} \cdot \left[\begin{array}{l} \varepsilon_1 \cdot (1 - \xi) + \frac{\sinh \lambda \varepsilon_1}{\alpha \cdot \lambda \cdot \sinh \lambda} \cdot \sinh \lambda (1 - \xi) \\ + (1 - \varepsilon_2) \cdot \xi - \frac{\sinh \lambda (1 - \varepsilon_2)}{\alpha \cdot \lambda \cdot \sinh \lambda} \cdot \sinh \lambda \xi \end{array} \right] \quad \text{Gleichung 21}$$

$$M_s(\xi) = \frac{F \cdot L}{1 + \alpha} \cdot \left[\begin{array}{l} \varepsilon_1 \cdot (1 - \xi) - \frac{\sinh \lambda \varepsilon_1}{\lambda \cdot \sinh \lambda} \cdot \sinh \lambda (1 - \xi) \\ + (1 - \varepsilon_2) \cdot \xi - \frac{\sinh \lambda (1 - \varepsilon_2)}{\lambda \cdot \sinh \lambda} \cdot \sinh \lambda \xi \end{array} \right] \quad \text{Gleichung 22}$$

mit

Index $i = u, m, o$

Die Spannungen in der oberen und unteren Deckschicht aus Dünnglas und der Kernschicht aus Polycarbonat ergeben sich mit nachfolgenden Gleichungen.

$$\sigma_u = \frac{z_u}{I_u} \cdot M_u + \frac{M_s}{b \cdot t_G \cdot d_G} \quad \text{Gleichung 23}$$

$$\sigma_o = \frac{z_o}{I_o} \cdot M_o - \frac{M_s}{b \cdot t_G \cdot d_G} \quad \text{Gleichung 24}$$

$$\sigma_m = \frac{z_m}{I_m} \cdot M_m \quad \text{Gleichung 25}$$

mit $I_i = \frac{b \cdot t_i^3}{12}$ mit Index $i = u, m, o$

Die Bestimmung der Gesamtverformung erfordert den Schubmodul der thermoplastischen Zwischenschicht. Die Schub- und die Biegesteifigkeit stellen sich nach Tabelle 42 ein.

Tabelle 42

Berechnung der Schubsteifigkeit einer Zwischenschicht und der Gesamtbiegesteifigkeit für die analytischen Berechnung als Sandwichelement.

Prüfkörper	Schubsteifigkeit	Gesamtbiegesteifigkeit
L_04_K	538 Nmm ²	0,9 · 10 ⁹ Nmm ²
L_08_K	1.101 Nmm ²	1,8 · 10 ⁹ Nmm ²
L_12_K	2.064 Nmm ²	3,2 · 10 ⁹ Nmm ²
O_04_K	706 Nmm ²	2,3 · 10 ⁹ Nmm ²
O_08_K	1.288 Nmm ²	4,5 · 10 ⁹ Nmm ²
O_12_K	2.138 Nmm ²	7,5 · 10 ⁹ Nmm ²

Damit lassen sich die Verformungen und Spannungen der Prüfkörper berechnen. Tabelle 43 zeigt die Ergebnisse aus der Sandwichtheorie für einen zweiseitig linienförmig gelenkigen gelagerten Balken. Der obere Wert beschreibt die Spannung an der Oberseite, der untere Wert die Spannung an der Unterseite der Einzelschicht.

Tabelle 43

Ergebnisse der Verformung und Längsspannung aus der analytischen Berechnung nach der Sandwichtheorie für die Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln.

Prüfkörper	Verformung	Spannung Glastafel oben	Spannung Polycarbonat	Spannung Glastafel unten
L_04_K	59,9 mm	-39,0 N/mm ² -2,7 N/mm ²	-2,5 N/mm ² +2,5 N/mm ²	+2,7 N/mm ² +39,0 N/mm ²
L_08_K	26,0 mm	-21,6 N/mm ² -4,4 N/mm ²	-2,4 N/mm ² +2,4 N/mm ²	+4,4 N/mm ² +21,6 N/mm ²
L_12_K	12,3 mm	-12,9 N/mm ² -4,7 N/mm ²	-1,8 N/mm ² +1,8 N/mm ²	+4,7 N/mm ² +12,9 N/mm ²
O_04_K	36,1 mm	-32,3 N/mm ² +18,1 N/mm ²	-1,7 N/mm ² +1,7 N/mm ²	-18,1 N/mm ² +32,3 N/mm ²
O_08_k	19,5 mm	-18,7 N/mm ² +8,6 N/mm ²	-1,8 N/mm ² +1,8 N/mm ²	-8,6 N/mm ² +18,7 N/mm ²
O_12_K	10,8 mm	-11,2 N/mm ² +3,9 N/mm ²	-1,5 N/mm ² +1,5 N/mm ²	-3,9 N/mm ² +11,2 N/mm ²

Bei Sandwichelementen und der Berechnung nach der Sandwichtheorie darf über eine vereinfachte Annahme die Gesamtbiegesteifigkeit angenähert werden. Dabei wird die Dünne-Deckschicht-Annäherung und Weiche-Kern-Annäherung als Verhältnis der lokalen Biegesteifigkeiten zur Gesamtbiegesteifigkeit gesetzt und bei einem Einfluss kleiner als 1 % der Verbundsteifigkeit vernachlässigt. Die Anwendung beider Annäherungen wird auf Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln überprüft.¹⁴⁹

Die Dünne-Deckschicht-Annäherung in Gleichung 26 sieht vor, dass die lokale Biegesteifigkeit der Dünngastafeln in Bezug zur Verbundsteifigkeit vernachlässigbar ist, wenn das Verhältnis kleiner als 1 % ist.

$$\frac{2 \cdot B_G}{B_s} < 0,01 \quad \text{wenn} \quad 3 \cdot \left(\frac{d_G}{t_G} \right)^2 > 100 \quad \text{oder} \quad \frac{d_G}{t_G} > 5,77 \quad \text{Gleichung 26}$$

Für die Weiche-Kern-Annäherung gilt bei einem Sandwichelement Gleichung 27. Die lokale Biegesteifigkeit der Kernschicht darf vernachlässigt werden, wenn diese weniger 1 % der Verbundsteifigkeit beträgt.

$$\frac{B_{PC}}{B_s} < 0,01 \quad \text{wenn} \quad \frac{6 \cdot E_G \cdot t_G \cdot d_G^2}{E_{PC} \cdot t_{PC}^2} > 100 \quad \text{Gleichung 27}$$

Bild 69 und Bild 70 zeigen die grafischen Auswertungen der Vereinfachungen der Gesamtbiegesteifigkeiten. Nach der Dünne-Deckschichten-Annäherung sind die

¹⁴⁹ Vergleiche Zenkert 1997, Seite 52.

Randbedingungen bei Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit dem Dünnglas Leoflex ab einer Nenndicke der Polycarbonat tafel von 0,1 mm und mit dem Dünnglas Optiwhite ab einer Nenndicke der Polycarbonat tafel von 5,5 mm erfüllt. Bei der Weiche-Kern-Annäherung ist die Bedingung bis zu einer Nenndicke der Polycarbonat tafel von 5,7 mm beziehungsweise 8,8 mm erfüllt.

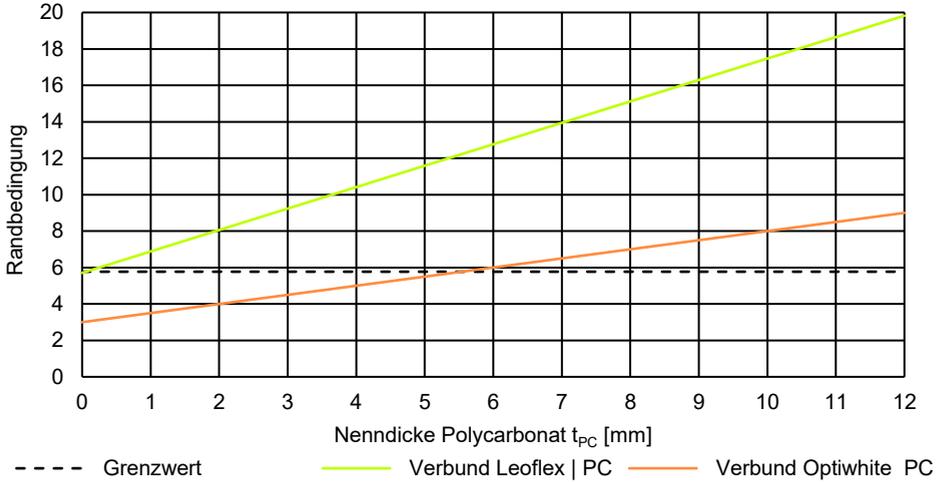


Bild 69

Auswertung der Randbedingung zur Dünne-Deckschicht-Annäherung.

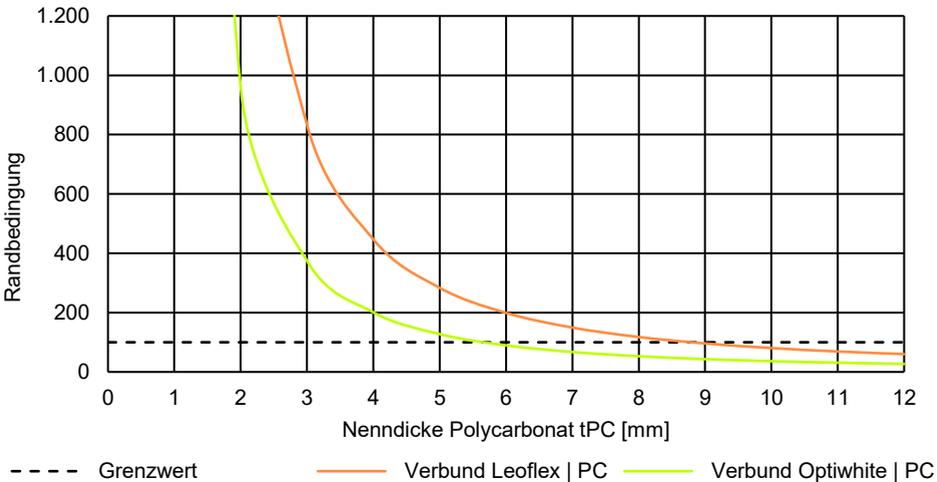


Bild 70

Auswertung der Randbedingung zur Weiche-Kern-Annäherung.

Mit der Anwendung der Annäherungen werden die Verformung und die Spannungen in Tabelle 44 berechnet. Der obere Wert beschreibt die Spannung an der Oberseite, der untere Wert die Spannung an der Unterseite der Einzelschicht. Die Ergebnisse der Verformungen liegen mit einer maximalen Abweichung vom berechneten Wert bei Berücksichtigung der Annäherung zum Messwert bei maximal +13,0 % für L_08_K. Eine Betrachtung mit den Vereinfachungen für die Verformung ist somit auf der sicheren Seite. Die Polycarbonatplatte trägt über die lokale Biegesteifigkeit zum Lastabtrag bei. Bei einer Vernachlässigung wird der innenliegenden Polycarbonatplatte keine Last zugewiesen. Ebenso gilt bei der Dünne-Deckschicht-Annäherung, dass sich bei einer Vernachlässigung der lokalen Biegesteifigkeit der Deckschichten der Traganteil über die Dehnsteifigkeit der Dünnglastafeln einstellt. Daraus resultieren ein über die Nenndicke konstanter Spannungsverlauf im Dünnglas.

Tabelle 44

Ergebnisse der Berechnung der Verformung und Spannungen nach der Sandwichtheorie unter Berücksichtigung einer Dünne-Deckschicht- und Weiche-Kern-Annäherung.

Prüfkörper	Verformung	Spannung Glastafel oben	Spannung Polycarbonat	Spannung Glastafel unten
L_04_K	64,0 mm	-22,3 N/mm ² -22,3 N/mm ²	+0,0 N/mm ² +0,0 N/mm ²	+22,3 N/mm ² +22,3 N/mm ²
L_08_K	26,4 mm	-13,2 N/mm ² -13,2 N/mm ²	-2,5 N/mm ² +2,5 N/mm ²	+13,2 N/mm ² +13,2 N/mm ²
L_12_K	12,4 mm	-8,9 N/mm ² -8,9 N/mm ²	-1,8 N/mm ² +1,8 N/mm ²	+8,9 N/mm ² +8,9 N/mm ²
O_04_K	37,0 mm	-33,0 N/mm ² +18,5 N/mm ²	+0,0 N/mm ² +0,0 N/mm ²	-18,5 N/mm ² +33,0 N/mm ²
O_08_k	22,1 mm	-20,7 N/mm ² +9,3 N/mm ²	+0,0 N/mm ² +0,0 N/mm ²	-9,3 N/mm ² +20,7 N/mm ²
O_12_K	10,8 mm	-11,2 N/mm ² +3,9 N/mm ²	-1,5 N/mm ² +1,5 N/mm ²	-3,9 N/mm ² +11,2 N/mm ²

Die analytischen Berechnung der Verformung können auf der sicheren Seite liegend die Vereinfachungen angewendet werden. Allerdings sind die Dünne-Deckschicht-Annäherung und Weiche-Kern-Annäherung für eine Anwendung auf Dünnglas-Polycarbonat-Verbundplatte bei der Spannungsberechnung nicht zu empfehlen. Bei herkömmlichen Sandwichelementen im Stahlbau bietet sich bei den dünnen Deckschichten und dickem Kern eine Praxistauglichkeit an. Die Übertragung der Annäherung auf die schlanken Querschnitte der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundplatte mit Nenndicken von maximal 20 mm ist nicht zielführend. Die Abweichungen zu den Messwerten sind zu groß und eine quantitative Übereinstimmung der Spannungsverteilung im Querschnitt wie in Bild 71 nicht erreichbar. Im Vergleich mit den Messergebnissen aus der Untersuchung zum Tragverhalten zeigt sich, dass die lokale Biegesteifigkeit der Dünnglastafeln und der Polycarbonatplatte nicht vernachlässigt werden darf. Die Annäherungen werden aus diesem Grund nicht weiter angewendet.

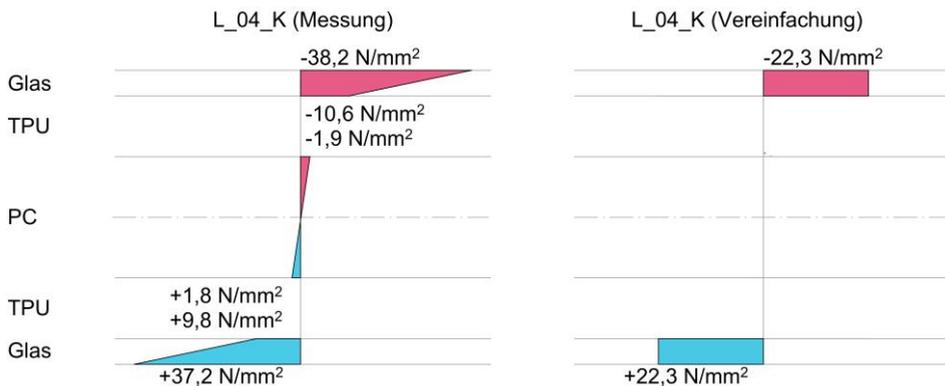


Bild 71
 Vergleich der gemessenen und mit den Vereinfachungen berechneten Spannungen am Prüfkörper L_04_K.

8.3 Näherungsverfahren

Wölfel schlägt ein Näherungsverfahren als Rechen- und Tragmodell für einen nachgiebigen Verbund bestehend aus zwei biegesteifen Deckschichten und einer schubweichen Kernschicht vor.¹⁵⁰ Ursprünglich für die Bemessung von verdübelten Holzbalken entwickelt, kann das Verfahren auch auf Verbundsicherheitsglas und Glas-Kunststoff-Verbundtafeln übertragen werden. Bisherige Anwendungen beschränken sich auf ein Verbundglas aus zwei Glastafeln mit einer Zwischenschicht. Allerdings lässt das Verfahren weitere Schichten zu.¹⁵¹ Die Erweiterung auf einen fünfschichtigen Querschnittsaufbau einer Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel zur Bestimmung der Verformung und Spannungen wird nachfolgend beschrieben.

Der fünfschichtige Aufbau der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel besteht aus zwei äußeren Glastafeln und einer innenliegenden Polycarbonat-Verbindtafel verbunden über eine Zwischenschicht aus thermoplastischem Polyurethan. Die Zwischenschicht ist dabei biegeweich und stellt den nachgiebigen Verbund sicher. Als Erweiterung des Verfahrens nach Wölfel auf einen fünfschichtigen Verbund ergeben sich die Bezeichnungen nach Bild 72.

¹⁵⁰ Vergleiche Wölfel 1987.

¹⁵¹ Vergleiche Gräf 2003, Seite 15 ff., Schuler 2003, Seite 27 ff. und Siebert 2012, Seite 82 ff.

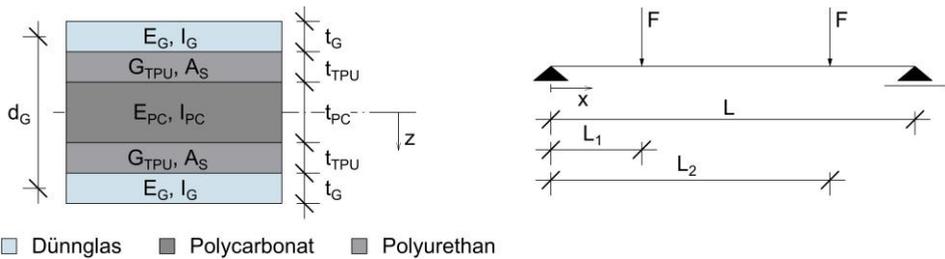


Bild 72

Querschnitt und statisches System zur Berechnung von Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln für ein Näherungsverfahren mit einem fünfschichtigen Querschnittsaufbau.

Zur Berechnung gelten folgende Annahmen.

- Alle Schichten zeigen ein linear-elastisches Materialverhalten mit homogener und isotroper Verteilung.
- Nachfolgende Gleichungen beziehen sich auf einen Einfeldträger im Vierpunkt-Biegeversuch bei linearer Berechnung des statisch bestimmten Systems.¹⁵²
- Die Zwischenschicht ist biegeweich. Es treten keine Normalspannungen in der Zwischenschicht auf. Die Eigenbiegesteifigkeit sowie der Traganteil der Sandwichsteifigkeit der Zwischenschicht dürfen vernachlässigt werden. Es gilt $E_{PC}, E_G \gg E_{TPU}$

Die Gesamtbiegesteifigkeit der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel setzt sich aus einem Anteil der Eigenbiegesteifigkeiten der oberen und unteren Glastafel B_u und B_o , aus der Polycarbonatplatte B_m sowie einem Anteil der Verbundsteifigkeit B_s nach Gleichung 28 zusammen.¹⁵³

$$\begin{aligned}
 B &= B_u + B_m + B_o + B_s = 2 \cdot B_G + B_m + B_s && \text{Gleichung 28} \\
 &= 2 \cdot \frac{E_G \cdot b \cdot t_G^3}{12} + \frac{E_{PC} \cdot b \cdot t_{PC}^3}{12} + \frac{E_G \cdot b \cdot d_G^2 \cdot t_G}{2}
 \end{aligned}$$

Zur Berücksichtigung des nachgiebigen Verbundes wird von einer Ersatzsteifigkeit der vollen Verbundsteifigkeit ausgegangen, die um einen Schubübertragungsfaktor verringert ist. Eine Reduktion der Verbundsteifigkeit bildet somit den teilweisen Verbund effektiv ab.

$$\bar{B}_s = \frac{1}{1+k} \cdot B_s \quad \text{Gleichung 29}$$

Der Faktor k beschreibt das Verhältnis der Querkraftverformung zur Biegeverformung in Abhängigkeit des statischen Systems. Für den Vierpunkt-Biegeversuch gilt nach Gleichung 30 für k ein Wert in Abhängigkeit der Schubsteifigkeit der

¹⁵² In Abhängigkeit der Belastungsanordnung und des Systems existieren weitere Gleichungen zur Berechnung der Beiwerte und Verformungen, vergleiche Wölfel 1987.

¹⁵³ Eine Querdehnungsbehinderung wird nicht angesetzt.

schubweichen Schichten. Der Grenzfall $k = 0$ ergibt den vollen Verbund, die äquivalente Biegesteifigkeit des Verbundteils entspricht der Verbundbiegesteifigkeit. Bei steigendem Faktor k stellt sich ein nachgiebiger Verbund ein. Im Grenzfall $k \rightarrow \infty$ ist kein Verbund erreicht.

$$k = \frac{24}{3-4 \cdot \alpha^2} \cdot \frac{B_s}{GA_s \cdot L^2} \quad \text{Gleichung 30}$$

$$\text{mit } \alpha = \frac{L_i}{L} \quad \text{Index } i = 1, 2 \quad GA_s = G_{\text{TPU}} \cdot \frac{d_G^2 \cdot b}{2 \cdot t_{\text{TPU}}}$$

Das einwirkende Biegemoment M berechnet sich in Feldmitte aus der Balkenstatik und teilt sich auf die einzelnen Schichten anhand der Traganteile in Abhängigkeit der Biegesteifigkeiten auf. Die Biegespannungen der biegesteifen Schichten lassen sich bestimmen. Daraus ergeben sich nachfolgende Beziehungen.

$$M = L_1 \cdot F \quad \text{Gleichung 31}$$

$$M_{\text{PC}} = M \cdot \beta_{\text{PC}}$$

$$M_{\text{G}} = M \cdot \frac{B_{\text{G}}}{2 \cdot B_{\text{G}}} \cdot \beta_{\text{G}}$$

$$M_{\text{s}} = M \cdot (1 - \beta_{\text{PC}} - \beta_{\text{G}})$$

$$\text{mit } \beta_{\text{G}} = \frac{2 \cdot B_{\text{G}}}{2 \cdot B_{\text{G}} + B_{\text{PC}} + B_{\text{s}}} \quad \beta_{\text{PC}} = \frac{B_{\text{PC}}}{2 \cdot B_{\text{G}} + B_{\text{PC}} + B_{\text{s}}}$$

Die Spannungen für die Deck- und Kernschichten berechnen sich nach Gleichung 32.

$$\sigma_u = \frac{z_u}{I_u} \cdot M_u + \frac{M_s}{b \cdot t_G \cdot d_G} \quad \text{Gleichung 32}$$

$$\sigma_o = \frac{z_o}{I_o} \cdot M_o - \frac{M_s}{b \cdot t_G \cdot d_G}$$

$$\sigma_m = \frac{z_m}{I_m} \cdot M_m$$

$$\text{mit } I_i = \frac{b \cdot t_i^3}{12} \quad \text{mit Index } i = u, m, o$$

Die Verformung w eines fünfschichtigen Querschnitts mit nachgiebigen Verbund berechnet sich nach Gleichung 33.

$$w = \frac{(1 + k) \cdot M_s}{24 \cdot B_s} \cdot (3 - 4 \cdot \alpha^2)$$

Gleichung 33

Die Erweiterung von einem drei- auf einen fünfschichtigen, nachgiebigen Verbund ermöglicht die analytische Berechnung zweiseitig linienförmig gelenkiger gelagerter Verbundtafeln im Vierpunkt-Biegeversuch. Zur Validierung der analytischen Berechnungsmethode werden die experimentellen Ergebnisse mit der analytischen Methode überprüft und verglichen. Allerdings ist ein Spannungsvergleich nur für die Spannungen in der Mitte der Prüfkörper möglich, da das Näherungsverfahren für einen Balken entwickelt ist. Querbiegung wird nicht berücksichtigt. Für jeden Prüfkörper werden die Verformungen und Spannungen berechnet und gemittelt für die Prüfreihe in Tabelle 45 angegeben.

Tabelle 45

Ergebnisse der Längsspannung aus der analytischen Näherungsberechnung für die Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel.

Prüfkörper	Verformung	Spannung Glastafel oben	Spannung Polycarbonat	Spannung Glastafel unten
L_04_K	59,6 mm	-40,1 N/mm ² -1,5 N/mm ²	-2,7 N/mm ² +2,7 N/mm ²	+1,5 N/mm ² +40,1 N/mm ²
L_08_K	25,9 mm	-21,4 N/mm ² -4,7 N/mm ²	-2,4 N/mm ² +3,4 N/mm ²	+4,7 N/mm ² +21,4 N/mm ²
L_12_K	12,4 mm	-12,9 N/mm ² -4,9 N/mm ²	-1,7 N/mm ² +1,7 N/mm ²	+4,9 N/mm ² +12,9 N/mm ²
O_04_K	36,3 mm	-31,7 N/mm ² +17,4 N/mm ²	-1,6 N/mm ² +1,6 N/mm ²	-17,4 N/mm ² +31,7 N/mm ²
O_08_k	19,6 mm	-18,4 N/mm ² +8,2 N/mm ²	-1,8 N/mm ² +1,8 N/mm ²	-8,2 N/mm ² +18,4 N/mm ²
O_12_K	10,9 mm	-11,1 N/mm ² +3,7 N/mm ²	-1,5 N/mm ² +1,5 N/mm ²	-3,7 N/mm ² +11,1 N/mm ²

8.4 Numerische Berechnungen

Zur numerischen Berechnung der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln in Zustand I stehen die Programm SJ Mepla 5.0.11, RFEM 5.26 mit dem Zusatzmodul RF-Glas und Ansys Workbench 2020 R2 auf Grundlage der Finite-Elemente-Methode (FEM) zur Verfügung. Die Berechnung erfolgt unter Berücksichtigung großer Verformungen mit einem geometrisch nichtlinearen Verfahren. Dazu werden die Verbundtafeln analog zum Vierpunkt-Biegeversuch nach DIN EN 1288-3 als zweiseitig linienförmig gelenkig gelagerte Platte mit entsprechender Beanspruchung symmetrisch zur Mitte modelliert.

SJ Mepla 5.0.11 von Mepla Glass Software GmbH ist ein für statische und dynamische Beanspruchungen im konstruktiven Glasbau entwickeltes Programm auf Grundlage der Finite-Elemente-Methode (FEM). Mit dem isoparametrischen 9-

Knoten-Mehrschichten-Element in Bild 73 lassen sich für jede einzelne Schicht Verformungen und Spannungen berechnen. SJ Mepla gibt für den Aufbau mehrschichtiger Verbundgläser eine feste Reihenfolge aus Deckschicht und Zwischenschicht vor. Damit entstehen für ein n -schichtiges Plattenelement $4 \cdot (n + 1)$ Freiheitsgrade an jedem Knoten. Das Mehrschichtelement bildet somit eine Kombination aus Platten-, Scheiben- und Volumenelement. Die Dehnungen der Zwischenschicht sind über die Verformungsbeziehungen mit denen der Deckschicht zu einem System gekoppelt.¹⁵⁴

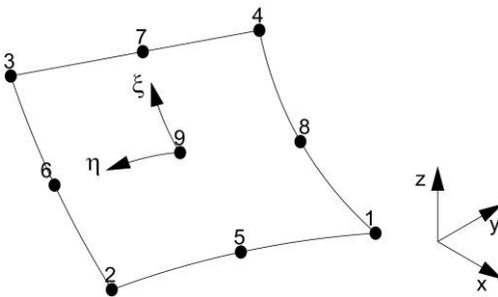


Bild 73

9-Knoten-Mehrschichtelement in SJ Mepla nach Bohmann 2018.

Das Elementnetz entsteht automatisch durch einen Frei-Vernetzungs-Algorithmus ausgehend vom Randbereich in den Innenbereich. Eine Netzverdichtung ist über die Elementgröße global einstellbar. Bei einem geometrisch nichtlinearen Ansatz mit der Berücksichtigung großer Durchbiegungen entsteht durch den schichtweisen Ansatz zur Einhaltung der Gleichgewichtsbedingungen schichtbezogene Membranspannungen. Dadurch versteift sich die Platte bei großen Querverformungen über entsprechende Druck- und Zugbereiche, die sich aus der Längenänderung in Plattenebene ergeben. Die nichtlinearen Anteile der Dehnungs- und der Verschiebungsansätze erfordern für den Gleichgewichtszustand ein iteratives Vorgehen. SJ Mepla kombiniert die Berechnung mit konstanter Initialsteifigkeitsmatrix und angepasster Tangentialsteifigkeitsmatrix. Dabei wird die Tangentialsteifigkeitsmatrix nicht nach jedem Berechnungsschritt neu aufgebaut, sondern erst nachdem eine definierte Anzahl an Versuchen mit konstanter Matrix zu keiner Lösungskonvergenz führt. Dadurch beschleunigt sich die Berechnungszeit.¹⁵⁵ Prinzipiell führt eine immer feinere Netzauflösung an die exakte Lösung heran. Allerdings erhöht sich mit der Anzahl der Elemente und Knoten die Berechnungszeit exponentiell. Zur ausreichenden Stabilität ist es notwendig zu Beginn eine Netzstudie durchzuführen, um eine optimale Netzdicke in Bezug zur Genauigkeit und Rechenzeit festzulegen. Die Berechnung mit dem Programm SJ Mepla erfolgt mit einer Elementabmessung von 20 mm.

¹⁵⁴ Vergleiche Bohmann 2018, Seite 6.

¹⁵⁵ Vergleiche Bohmann 2018, Seite 5 ff. und Seite 31 ff.

Die Untersuchung des Tragverhaltens im Vierpunkt-Biegeversuch wird am kompletten System ohne Ausnutzung der Symmetrie berechnet. Bild 74 zeigt das Berechnungsmodell des Vierpunkt-Biegeversuchs zur Modellierung der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel. An beiden kürzeren Seiten ist eine einfach drehbare Lagerung angesetzt. Die Modellierung von drei Eckfedern mit einer geringen Federsteifigkeit von 1 N/mm behindert die Verschiebung in Scheibenebene.

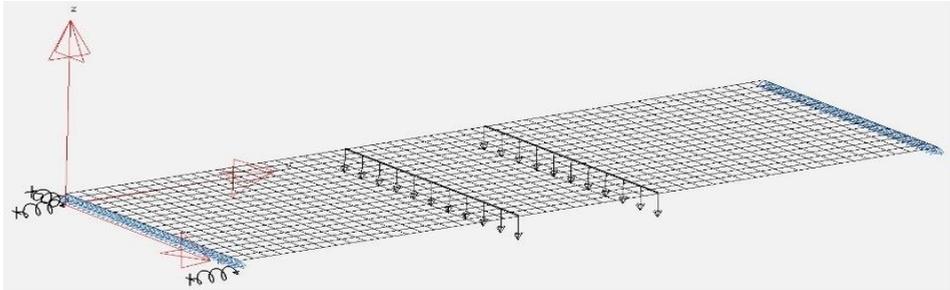


Bild 74

Modellierung des Vierpunkt-Biegeversuchs in SJ Mepla zur Berechnung der Spannungen und der Verformungen einer Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel.

Tabelle 46 zeigt die Ergebnisse in Plattenmitte aus der Berechnung mit dem Programm SJ Mepla. Der obere Wert beschreibt die Spannung an der Oberseite, der untere Wert die Spannung an der Unterseite der Einzelschicht.

Tabelle 46

Ergebnisse der Längsspannung in Plattenmitte aus der numerischen Berechnung für die Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel mit dem Programm SJ Mepla bei geometrisch nichtlinearer Berechnung.

Prüfkörper	Verformung	Spannung Glastafel oben	Spannung Polycarbonat	Spannung Glastafel unten
L_04_K	59,4 mm	-40,3 N/mm ² -1,7 N/mm ²	-2,9 N/mm ² +2,9 N/mm ²	+1,7 N/mm ² +40,3 N/mm ²
L_08_K	25,7 mm	-23,3 N/mm ² -5,5 N/mm ²	-2,8 N/mm ² +2,7 N/mm ²	+2,4 N/mm ² +20,2 N/mm ²
L_12_K	12,3 mm	-14,0 N/mm ² -5,8 N/mm ²	-1,9 N/mm ² +1,9 N/mm ²	-19,6 N/mm ² +33,6 N/mm ²
O_04_K	35,7 mm	-33,8 N/mm ² +19,0 N/mm ²	-1,9 N/mm ² +1,9 N/mm ²	-19,6 N/mm ² +33,6 N/mm ²
O_08_K	19,3 mm	-20,1 N/mm ² +7,9 N/mm ²	-2,1 N/mm ² +2,0 N/mm ²	-10,0 N/mm ² +18,1 N/mm ²
O_12_K	10,8 mm	-11,9 N/mm ² +3,1 N/mm ²	-1,6 N/mm ² +1,6 N/mm ²	-4,6 N/mm ² +10,4 N/mm ²

RFEM 5.26 von Dlubal Software GmbH ist ein modular aufgebautes, dreidimensionales Programm nach der Finite-Elemente-Methode (FEM). Im Basisprogramm RFEM sind die Struktur, die Materialität und die Einwirkungen ebener und

räumlicher Stab-, Platten-, Scheiben- und Schalentragerwerke definiert und Schnittgrößen sowie Verformungen lassen sich allgemein berechnen. Über Zusatzmodule können prüffähige Nachweise nach den entsprechenden Normen beispielsweise im Stahl-, Massiv-, Holz- oder Aluminiumbau sowie vertiefte Untersuchungen beispielsweise zur Dynamik oder Stabilität durchgeführt werden.

Mit dem Zusatzmodul RF-Glas lassen sich die beliebig geformten und gekrümmten Verglasungen sowohl als Einfachglas aus Mono- oder Verbundglas als auch Mehrscheiben-Isolierglas berechnen. Dabei greift das Zusatzmodul auf die Netzeinstellung und Elementmodellierung des Grundprogramms RFEM zurück. Prinzipiell lässt sich das Verbundglas zweidimensional auf Grundlage der Plattentheorie mit oder ohne Schubverbund zwischen den Schichten und dreidimensional über Volumenkörper berechnen. Die Modellierung der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel erfordert die Verwendung von Volumenelemente, um den Schubverbund der Zwischenschicht realitätsnäher als über zweidimensionale Elemente abbilden zu können. Dreidimensionale Elemente sind prismatische Tetraeder- und Pentaederelemente sowie Pyramide oder Hexaederelemente. Für das Mehrschichtsystem aus Dünnglas und Polycarbonat wird üblicherweise das 8-Knoten-Kubus-Element nach Bild 75 mit 6 Freiheitsgraden pro Knoten verwendet.¹⁵⁶

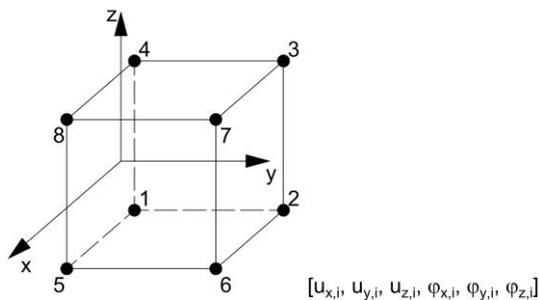


Bild 75

8-Knoten-Kubus-Element mit Angabe der Freiheitsgrade pro Knoten in RFEM RF-Glas nach Barth 2013.

Die Verbundtafeln werden unter Berücksichtigung der geometrischen Nichtlinearität mit der Theorie III. Ordnung iterativ berechnet, bei der die Schnittkräfte in der Analyse berücksichtigt und die Steifigkeitsmatrix für das verformte System nach jedem Iterationsschritt neu gebildet werden. Die Berechnung mit dem Programm RFEM RF-Glas erfolgt mit einer Elementabmessung von 20 mm. Dadurch kann schnell und hinreichend genau eine Auswertung von Spannungen und Verformungen der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln durchgeführt werden. Bild 76 zeigt das Modell zur Berechnung der Spannungen und der Verformungen im Vierpunkt-Biegeversuch. Dabei sind die Lagerungsbedingungen entsprechend

¹⁵⁶ Weitere Kubuselemente wie ein 6-Knoten-Keil, eine 5-Knoten-Pyramide oder ein 4-Knoten-Tetraeder sind beispielsweise bei der Kopplung mit Dreieck- und Stabelementen notwendig. Vergleiche Barth 2013, Seite 51 f.

den Annahmen des Vierpunkt-Biegeversuchs ausgeführt. Auch im Modell mit RF-Glas verhindern schwache Federn ohne einen Einfluss auf das Ergebnis eine Bewegung in Plattenebene.

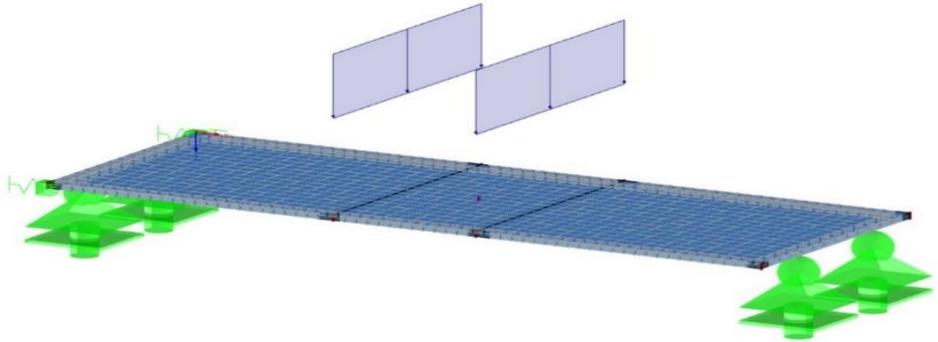


Bild 76

Modellierung des Vierpunkt-Biegeversuchs in RFEM RF-Glas zur Berechnung der Spannungen und Verformungen.

Tabelle 47 zeigt die Ergebnisse aus der Berechnung mit dem Programm RFEM RF-Glas die Ergebnisse in Plattenmitte. Der obere Wert beschreibt die Spannung an der Oberseite, der untere Wert die Spannung an der Unterseite der Schicht.

Tabelle 47

Ergebnisse der Längsspannung in Plattenmitte aus der numerischen Berechnung für die Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel mit dem Programm RFEM RF-Glas mit geometrisch nichtlinearer Berechnung.

Prüfkörper	Verformung	Spannung Glastafel oben	Spannung Polycarbonat	Spannung Glastafel unten
L_04_K	59,8 mm	-41,9 N/mm ² +0,6 N/mm ²	-2,6 N/mm ² +3,6 N/mm ²	-0,3 N/mm ² +41,4 N/mm ²
L_08_K	25,1 mm	-24,2 N/mm ² -5,7 N/mm ²	-3,4 N/mm ² +3,2 N/mm ²	+1,5 N/mm ² +19,9 N/mm ²
L_12_K	11,9 mm	-14,1 N/mm ² -5,9 N/mm ²	-2,2 N/mm ² +2,1 N/mm ²	+3,2 N/mm ² +11,5 N/mm ²
O_04_K	35,6 mm	-35,5 N/mm ² +20,2 N/mm ²	-2,4 N/mm ² +2,3 N/mm ²	-21,3 N/mm ² +34,3 N/mm ²
O_08_k	19,0 mm	-20,9 N/mm ² +8,2 N/mm ²	-2,5 N/mm ² +2,4 N/mm ²	-10,8 N/mm ² +18,2 N/mm ²
O_12_K	10,5 mm	-12,1 N/mm ² +3,1 N/mm ²	-1,9 N/mm ² +1,9 N/mm ²	-4,9 N/mm ² +10,3 N/mm ²

Als weiteres numerisches Berechnungsprogramm erfolgt die Betrachtung mit Ansys Workbench 2020 R2, vertrieben durch CADFEM Germany GmbH. Das Programm basiert auf der allgemeinen Finite-Elemente-Methode (FEM) und bietet neben der linearen und nichtlinearen, strukturmechanischen Berechnung weitere Lösungsmöglichkeiten im Bereich Fluidmechanik, Thermodynamik, Piezoelektronik oder Elektromagnetismus sowie kombinierte Problemstellungen an.

Während der Modellierung des Vierpunkt-Biegeversuchs in Bild 77 wird die Doppelsymmetrie des Versuchsaufbaus ausgenutzt, um Rechenzeit zu reduzieren und zeitgleich einen ausreichend feinen Vernetzungsgrad zu erreichen. Zur Eingabe der Randbedingungen bietet sich die grafische Oberfläche in Workbench an, die die Eingabe in die auf der Programmiersprache Python basierenden Skriptsprache ANSYS Parametric Design Language (APDL) übersetzt.

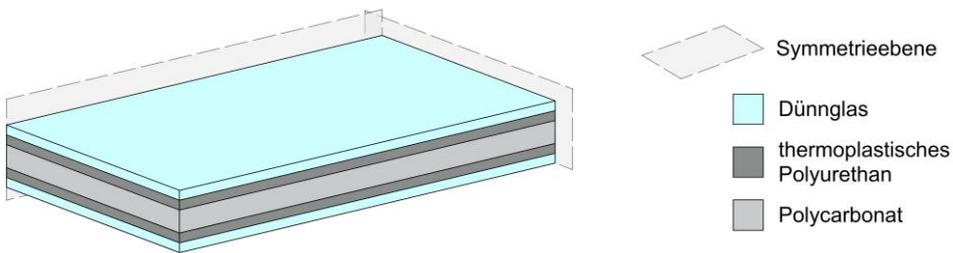


Bild 77

Darstellung eines Plattenviertels mit den Abmessungen von 180 mm auf 500 mm unter Ausnutzung der Doppelsymmetrie.

Die Verbundtafel wird schichtweise mit dem Element SOLID186 in Bild 78, ein dreidimensionales 20-Knoten-Element, vernetzt. Pro Knoten stehen insgesamt drei Freiheitsgrade in x-, y- und z-Richtung zur Verfügung.

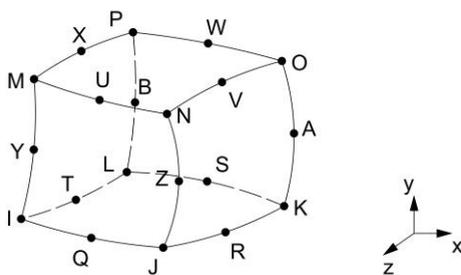


Bild 78

20-Knoten-Kubus-Element SOLID186 zur dreidimensionalen Modellierung der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel mit dem Programm Ansys Workbench 2020 R2.

Die Vernetzung mit dem Element SOLID186 erfolgt anhand grundlegender Annahmen zur Vernetzung in allgemeinen Finite-Elemente-Programmen. Die schubweiche Zwischenschicht wird mit zwei Elementen, über die die Schichtdicke zur Abbildung großer Verzerrungen, modelliert. Im Bereich der Lasteinleitung

und der Ergebnisauswertung ist eine lokale Netzverfeinerung angesetzt, um Elemente mit einer hohen Qualität zu erhalten. Der Verbundkontakt der einzelnen Schichten ist über eine gemeinsame Topologie eingestellt. Dadurch bildet sich keine Kontaktfläche aus, vielmehr teilen sich die Elemente zweier sich berührender Schichten die Knoten in der Grenzfläche. Somit kann ein deckungsgleiches, konformes Netz erzeugt werden, dass eine perfekte Vernetzung zwischen den Schichten ermöglicht. Der teilweise Verbund des Mehrschichtsystem stellt sich über den Schubmodul der Zwischenschicht ein. Mit der Aktivierung von großen Verformungen werden auch die geometrischen Nichtlinearitäten in der Berechnung berücksichtigt. Tabelle 48 zeigt die Ergebnisse der Verformung und der Spannung in Plattenmitte. Der obere Wert beschreibt die Spannung an der Oberseite, der untere Wert die Spannung an der Unterseite der Einzelschicht.

Tabelle 48

Ergebnisse in Plattenmitte aus der Längsspannung aus der numerischen Berechnung für die Dünn- glas-Polycarbonat-Verbundtafel mit dem Programm Ansys Workbench 2020 R2 bei geometrisch nichtlinearer Berechnung.

Prüfkörper	Verformung	Spannung Glastafel oben	Spannung Polycarbonat	Spannung Glastafel unten
L_04_K	60,1 mm	-40,5 N/mm ² +0,3 N/mm ²	-2,9 N/mm ² +2,9 N/mm ²	-0,3 N/mm ² +40,6 N/mm ²
L_08_K	26,4 mm	-24,0 N/mm ² -5,5 N/mm ²	-2,8 N/mm ² +2,8 N/mm ²	+1,4 N/mm ² +20,3 N/mm ²
L_12_K	12,9 mm	-14,6 N/mm ² -6,0 N/mm ²	-1,9 N/mm ² +2,0 N/mm ²	+2,3 N/mm ² +11,3 N/mm ²
O_04_K	35,9 mm	-34,1 N/mm ² +19,3 N/mm ²	-1,9 N/mm ² +1,9 N/mm ²	-19,8 N/mm ² +33,4 N/mm ²
O_08_k	19,3 mm	-20,2 N/mm ² +8,0 N/mm ²	-2,1 N/mm ² +2,0 N/mm ²	-10,0 N/mm ² +18,1 N/mm ²
O_12_K	10,7 mm	-12,0 N/mm ² +3,2 N/mm ²	-1,7 N/mm ² +1,6 N/mm ²	-4,6 N/mm ² +10,4 N/mm ²

8.5 Auswertung

Die berechneten Ergebnisse mit den analytischen und numerischen Verfahren werden mit den experimentell ermittelten Werten aus der Untersuchung zum Tragverhalten bei gegebenen Schubmodul verglichen. Die Auswertung erfolgt zuerst einzeln für die unterschiedlichen Berechnungsmethoden. Die analytischen Verfahren berücksichtigen lineares Tragverhalten, bei numerischer Berechnung ist der der Ansatz großer Verformung mit einem geometrisch nichtlinearem Tragverhalten gewählt. Anschließend sind für die Verformung und Hauptzugspannung die Ergebnisse untereinander verglichen. Mit einem positiven Vorzeichen ist der berechnete Wert größer als der gemessene Wert. Mit negativem Vorzeichen liegt der berechnete Wert unter dem gemessenen Wert. Die größten Zugspannungen stellen sich an der Unterseite der Verbundtafel ein. Grundsätzlich

treten im Glas größere Spannungen als im Polycarbonat auf. Bedingt durch die niedrigen Spannungswerte in der Polycarbonat tafel und der damit verbundenen geringen Auslastung sind die relativen Differenzen bei kleiner absoluter Abweichung bereits sehr hoch.

Die analytisch berechneten Verformungen und Spannungen der Sandwichtheorie werden in Tabelle 49 mit den Messergebnissen aus Kapitel 6 verglichen. Die relative Abweichung der Verformung für Verbundtafeln mit Dünnglas Leoflex und Polycarbonat beträgt maximal +0,7 %, im Mittel +0,4 %. Die größte Abweichung der Hauptzugspannung an der Unterseite der Verbundtafel von -7,7 % zeigt L_08_K, im Mittel ist die Differenz der zugbelasteten Unterseite +0,6 %. Mit Verbundtafeln aus Dünnglas Optiwhite und Polycarbonat berechnet sich eine maximale relative Verformungsabweichung mit +1,1 % und im Mittel von +0,4 %. Die Hauptzugspannungen an der Unterseite der Verbundtafel zeigen eine Differenz von maximal +4,7 % und im Mittel von +2,2 % auf. Das analytische Verfahren berechnet die Verformung unter Berücksichtigung einer Schubübertragung annähernd genau. Die Auswertung der Hauptzugspannung an der Unterseite der Verbundtafel führt im Mittel zu Ergebnissen auf der sicheren Seite.

Tabelle 49

Relative Abweichung an der Schichtoberseite (oben) und der Schichtunterseite (unten) der Sandwichtheorie und den Messergebnissen.

Prüfkörper	Verformung	Spannung Glastafel oben	Spannung Polycarbonat	Spannung Glastafel unten
L_04_K	+0,7 %	+2,1 % -74,5 %	+31,3 % +42,4 %	-72,4 % +5,0 %
L_08_K	+0,6 %	-8,5 % -27,2 %	-1,6 % +1,5 %	-22,5 % -7,7 %
L_12_K	+0,1 %	-18,6 % -37,0 %	-2,5 % +2,4 %	+33,6 % +4,5 %
O_04_K	+1,1 %	+3,5 % -9,9 %	+8,4 % -18,3 %	-7,6 % +1,7 %
O_08_k	+0,0 %	-9,3 % +14,2 %	+0,3 % -8,7 %	-8,2 % +0,3 %
O_12_K	+0,2 %	-12,8 % +38,6 %	-3,4 % -3,3 %	-23,9 % +4,7 %

Die analytisch berechneten Verformungen und Spannungen mit einem Näherungsverfahren mit nachgiebigen Verbund werden in Tabelle 50 mit Messergebnissen aus Kapitel 6 verglichen. Die relative Abweichung der Verformung für Verbundtafeln mit dem Dünnglas Leoflex und Polycarbonat beträgt maximal +0,7 %, im Mittel +0,4 %. Eine maximale Abweichung der Hauptzugspannung an der Unterseite der Verbundtafel von -8,4 % zeigt L_08_K, im Mittel ist die Differenz der zugbelasteten Unterseite +1,2 %. Mit Verbundtafeln aus Dünnglas Optiwhite und Polycarbonat berechnet sich eine maximale relative Abweichung der Verformung mit +1,7 % und im Mittel von +1,1 %. Die Spannungen zeigen eine Differenz von

maximal +3,3 % und im Mittel von +0,6 %. Das Berechnungsverfahren der Näherungslösung für einen nachgiebigen Verbund fünfschichtiger Verbundtafeln ermöglicht vereinfachte Parameterstudien, die mit einer geringen Abweichung zu den Messwerten an der zugbelasteten Oberfläche der Verbundtafel erste Ergebnisse bieten. Für eine zweiseitig linienförmig gelenkig gelagerte Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel ergeben sich dadurch schnell und zuverlässig Werte, die für eine Vordimensionierung und als Grundlage für weitere Betrachtungen dienen.

Tabelle 50

Relative Abweichung an der Schichtoberseite (oben) und der Schichtunterseite (unten) der Näherungslösung und den Messergebnissen.

Prüfkörper	Verformung	Spannung Glastafel oben	Spannung Polycarbonat	Spannung Glastafel unten
L_04_K	+0,3 %	+4,8 % -86,1 %	+39,5 % +51,3 %	-84,9 % +7,8 %
L_08_K	+0,1 %	-9,2 % -22,2 %	-4,2 % -1,3 %	-17,2 % -8,4 %
L_12_K	+0,7 %	-18,8 % -34,8 %	-4,7 % +0,1 %	+38,2 % +4,3 %
O_04_K	+1,7 %	+1,6 % -13,2 %	+5,8 % -20,3 %	-11,0 % -0,1 %
O_08_k	+0,7 %	-10,8 % +9,2 %	-2,2 % -11,0 %	-12,2 % -1,3 %
O_12_K	+0,9 %	-13,9 % +31,3 %	-5,6 % -5,6 %	-28,0 % +3,3 %

Für die untersuchten Verbundtafeln zeigen die berechneten Hauptzugspannungen und Verformungen eine ausreichend genaue Übereinstimmigkeit auf. Die Berechnungen mit der Sandwichtheorie führen näher an die Messung als die Ergebnisse mit der Näherungsverfahren. Demgegenüber steht allerdings der höhere Zeitaufwand. Beide analytische Verfahren setzen ein lineares Tragverhalten voraus. Die Anwendung der Methoden auf die Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel ist möglich, sofern Verformungen geringer als die Nenndicke sind. Andernfalls ist geometrisch nichtlineares Tragverhalten zu berücksichtigen, dass insbesondere zu größeren absoluten Abweichungen bei den Spannungen führt. Die Auswertung des nichtlinearen Verhaltens mit unterschiedlichen Stellen über die Breite der Verbundtafel ist mit den verwendeten, analytischen Verfahren auf Grundlage der Balkentheorie nicht möglich. Der Vergleich der Spannungen bezieht sich auf eine Auswertung in der Mitte und ergibt teilweise bei der Spannungsberechnung hohe Unterschiede zwischen der Messung und der Berechnung auf.

Der Vergleich beider Berechnungsmethoden in Bild 79 zeigt das Verhältnis der Näherungslösung zur Sandwichtheorie. Werte über 100 % entsprechen einen größeren berechneten Wert aus der Näherungslösung, Werte unter 100 % einen

größeren Wert aus der Sandwichtheorie. Mit steigender Polycarbonatdicke verringert sich die Abweichungen zwischen Sandwichtheorie und Näherungslösung bei den Verformungs- und Spannungswerten. Bei Verformungen kleiner als die Nenndicke sind die Unterschiede beider Verfahren vernachlässigbar, bei L_04_K und O_04_K zeigen sich erwartungsgemäß größere Unterschiede zwischen den Berechnungsmethoden.

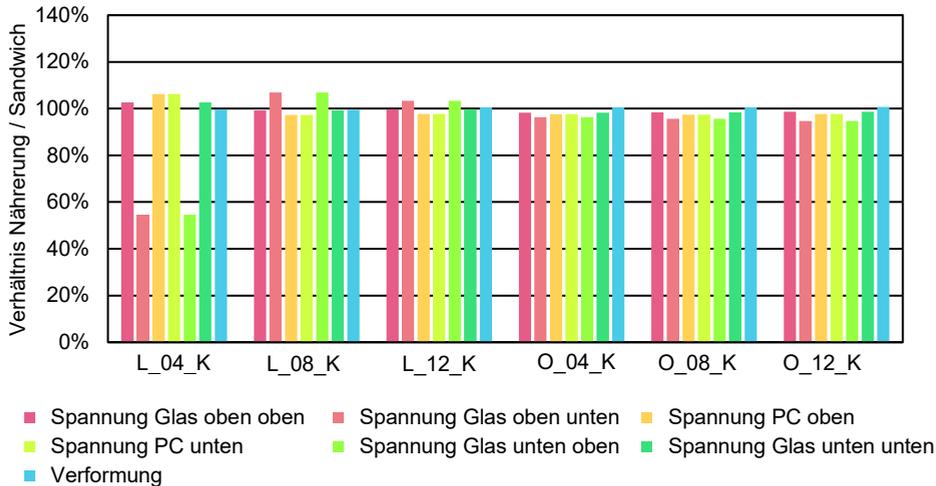


Bild 79

Vergleich zwischen den berechneten Werten aus der Sandwichtheorie und Näherungslösung.

Die numerisch berechneten Verformungen und Spannungen mit dem Finite-Elemente-Programm SJ Mepla werden in Tabelle 51 mit den Messergebnissen in Plattenmitte aus Kapitel 6 verglichen. Die Werte für den Plattenrand befinden sich im Anhang. Die Verformung für Verbundtafeln mit Dünnglas Leoflex und Polycarbonat weichen um $\pm 0,0$ % vom gemessenen Wert ab. Mit einer maximalen Abweichung von $-13,6$ % weist L_08_K den größten prozentualen Unterschied der Hauptzugspannungen in Plattenmitte auf. Im Mittel liegt die Abweichung bei $-3,4$ %, die berechneten Hauptzugspannungen befinden sich allerdings teilweise auf der unsicheren Seite. Für Verbundtafeln mit Dünnglas Optiwhite und Polycarbonat ergibt sich eine maximale Abweichung der Verformung von $+0,0$ % bei einem Mittelwert von $+0,0$ % und ein Unterschied der Hauptzugspannungen von maximal $+4,7$ % und im Mittel von $-0,5$ %.

Tabelle 51

Relative Abweichung an der Schichtoberseite (oben) und der Schichtunterseite (unten) der numerischen Auswertung mit SJ Mepla und den Messergebnissen in Plattenmitte.

Prüfkörper	Verformung	Spannung Glastafel oben	Spannung Polycarbonat	Spannung Glastafel unten
L_04_K	±0,0 %	+5,4 % -84,1 %	+51,9 % +64,8 %	-82,4 % +8,5 %
L_08_K	±0,0 %	-1,1 % -7,9 %	+12,5 % +12,0 %	-57,4 % -13,6 %
L_12_K	±0,0 %	-12,1 % -22,0 %	+4,2 % +5,3 %	+3,5 % -5,0 %
O_04_K	±0,0 %	+8,5 % -5,2 %	+24,8 % -7,1 %	+0,3 % +4,7 %
O_08_k	±0,0 %	-2,6 % +5,9 %	+13,3 % -0,0 %	+7,0 % -3,1 %
O_12_K	±0,0 %	-7,8 % +10,1 %	+3,4 % +0,3 %	-10,8 % -3,0 %

Die numerisch berechneten Verformungen und Spannungen mit dem Finite-Elemente-Programm RFEM RF-Glas werden in Tabelle 52 mit den Messergebnissen in Plattenmitte aus Kapitel 6 verglichen. Die Werte für den Plattenrand befinden sich im Anhang. Die relative Abweichung der Verformung für Verbundtafeln mit Dünnglas Leoflex und Polycarbonat beträgt maximal -3,0 %, im Mittel -1,6 %. Mit einer maximalen Abweichung der Hauptzugspannungen an der Unterseite der Verbundtafel in Plattenmitte von -15,2 % und im Mittel von -3,7 % stellen sich ähnliche Ergebnisse wie bei SJ Mepla ein. Berechnungen mit dem Dünnglas Optiwhite und Polycarbonat weichen bei der Verformung um maximal -3,1 %, im Mittel um -1,7 % und bei der Hauptzugspannung um maximal +8,2 % und im Mittel um +0,8 % von den Messwerten ab.

Tabelle 52

Relative Abweichung an der Schichtoberseite (oben) und der Schichtunterseite (unten) der numerischen Auswertung mit RFEM RF-Glas und den Messergebnissen in der Plattenmitte.

Prüfkörper	Verformung	Spannung Glastafel oben	Spannung Polycarbonat	Spannung Glastafel unten
L_04_K	+0,6 %	+9,7 % -93,9 %	+35,1 % +104,8 %	-103,2 % +11,4 %
L_08_K	-2,2 %	+2,4 % -4,2 %	+36,4 % +34,4 %	-73,8 % -15,2 %
L_12_K	-3,0 %	-11,1 % -21,1 %	+21,1 % +21,9 %	-8,3 % -7,4 %
O_04_K	-0,1 %	+13,9 % +1,0 %	+55,4 % +14,8 %	+9,1 % +8,2 %
O_08_k	-1,7 %	+1,2 % +9,6 %	+37,5 % +20,4 %	+16,3 % -2,2 %
O_12_K	-3,1 %	-5,8 % +11,2 %	+20,6 % +16,5 %	-4,1 % -3,7 %

Die numerisch berechneten Verformungen und Spannungen mit dem Finite-Elemente-Programm ANSYS Workbench 2020 R2 werden in Tabelle 53 mit den Messergebnissen in Plattenmitte aus Kapitel 6 verglichen. Die relative Abweichung der Verformung für Verbundtafeln mit Dünnglas Leoflex und Polycarbonat beträgt maximal +6,2 %, im Mittel +3,3 %. Mit einer maximalen Abweichung der Hauptzugspannungen an der Unterseite der Verbundtafel in Plattenmitte von -13,3 % und im Mittel von -4,3 % ergeben sich ähnliche Ergebnisse wie mit den zuvor gezeigten Finite-Elemente-Programmen SJ Mepla und RFEM RF-Glas. Die Abweichung der Verformung der Verbundtafeln mit dem Dünnglas Optiwhite und Polycarbonat betragen maximal -1,1 % und im Mittel -0,2 %. Für die Auswertung der unteren Hauptzugspannung zeigt sich eine maximale Abweichung von +5,3 % und eine mittlere Abweichung zwischen Messung von Berechnung von -0,1 %.

Tabelle 53

Relative Abweichung an der Schichtoberseite (oben) und der Schichtunterseite (unten) der numerischen Auswertung mit Ansys Workbench 2020 R2 und den Messergebnissen in der Plattenmitte.

Prüfkörper	Verformung	Spannung Glastafel oben	Spannung Polycarbonat	Spannung Glastafel unten
L_04_K	+1,1 %	+6,0 % -103,3 %	+54,9 % +67,1 %	-103,0 % +9,3 %
L_08_K	+2,7 %	+1,7 % -8,5 %	+14,6 % +18,5 %	-75,5 % -13,3 %
L_12_K	+6,2 %	-8,1 % -20,0 %	+8,0 % +15,8 %	-35,2 % -8,7 %
O_04_K	+0,6 %	+9,5 % -3,7 %	+26,3 % -6,3 %	+1,3 % +5,3 %
O_08_K	-0,1 %	-1,9 % +7,5 %	+14,3 % +0,4 %	+7,6 % -2,8 %
O_12_K	-1,1 %	-6,9 % +12,6 %	+4,0 % +0,7 %	-10,5 % -2,8 %

Insgesamt zeigen die Programme zwischen der gemessenen und berechneten Verformung untereinander geringe Abweichungen. Die Unterschiede bei der Spannungsberechnung sind größer, allerdings aufgrund unterschiedlich gewählter Elementtypen zu erklären. Mit dem Programm SJ Mepla sind die Spannungsunterschiede zwischen Messung und Berechnung am geringsten. Da der Elastizitätsmodul der Zwischenschicht in Kapitel 6 mit SJ Mepla bestimmt wird, ist dies auch zu erwarten. Bild 80 und Bild 81 zeigen die Unterschiede der numerischen Verfahren im Vergleich zu SJ Mepla an jeder Grenzfläche für die Ergebnisse in Plattenmitte. Insbesondere die Spannungen an der oberen Grenzfläche zwischen Polycarbonat und Zwischenschicht sowie an der Grenzfläche zwischen der unteren Glastafel und der Zwischenschicht weisen trotz geometrisch nichtlinearer Berechnung insbesondere bei Querschnittsaufbauten mit dem Dünnglas Leoflex eine große Differenz auf.

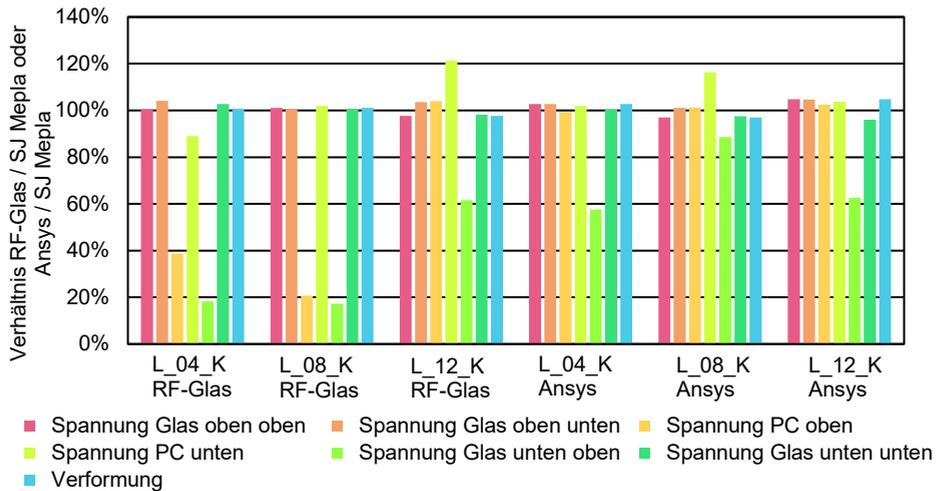


Bild 80

Vergleich zwischen den berechneten Werten aus der numerischen Berechnung mit RFEM RF-Glas und Ansys im Vergleich zu SJ Mepla für Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit dem Dünnglas Leoflex in Plattenmitte.

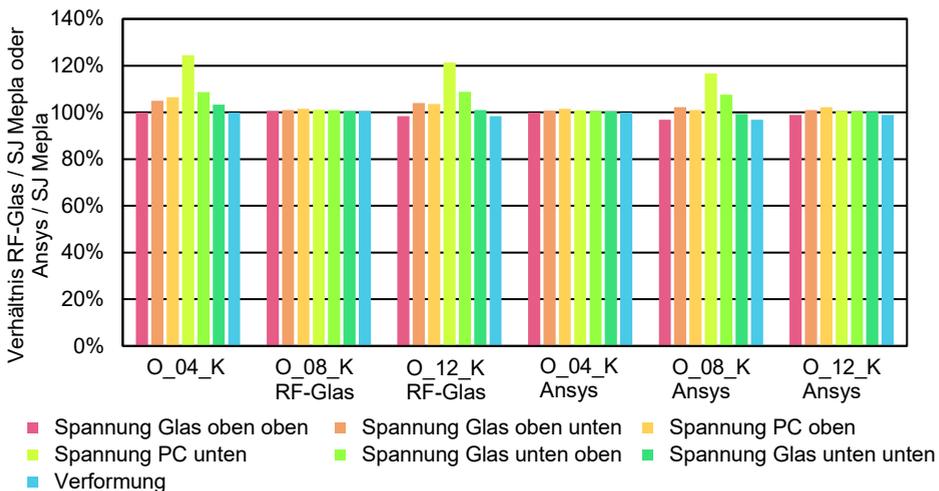


Bild 81

Vergleich zwischen den Berechneten Werten aus der numerischen Berechnung mit RFEM RF-Glas und Ansys im Vergleich zu SJ Mepla für Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit dem Dünnglas Optiwhite in Plattenmitte.

8.6 Zusammenfassung

Sowohl die analytische Berechnung auf Grundlage der Sandwichtheorie als auch die Näherungslösung für einen nachgiebigen, fünfschichtigen Verbund eignen

sich grundsätzlich zur Berechnung der Verformungen der Verbundtafel im Vierpunkt-Biegeversuch. Die Hauptzugspannungen an der Unterseite der Verbundtafel werden unter Ansatz eines linearen Tragverhaltens für die dicken Verbundtafeln mit einer Abweichung zwischen Berechnung und Messung von etwa +3,3 % zufriedenstellend auf der sicheren Seite berechnet. Allerdings zeigt die analytische Spannungsauswertung bei dünnen Querschnitten mit einer 4 mm Polycarbonat tafel unzureichende Ergebnisse. Insbesondere die Spannungen der Polycarbonat tafel und die Spannungen der Glasoberfläche zur Zwischenschicht werden mit den analytischen Methoden mit hohen relativen Abweichungen zum gemessenen Wert ermittelt. Unter Berücksichtigung der Anwendbarkeit der linearen Theorie für Verbundtafeln mit 12 mm Polycarbonat bieten sich die analytischen Berechnungsmethoden zur Bestimmung der maximalen Hauptzugspannung mit einer Abweichung von ungefähr +7,2 %.

Insgesamt sind drei Berechnungsprogramme auf Grundlage der Finite-Elemente-Methode (FEM) zur Verformungs- und Spannungsbestimmung verwendet. Der Schubmodul der Zwischenschicht ist im Vorfeld mit einer geometrisch nichtlinearen Analyse mit dem Programm SJ Mepla bestimmt. Dadurch zeigt SJ Mepla geringe Abweichungen zwischen der gemessenen und der berechneten Verformung beziehungsweise Spannung. Lediglich für die dünnen Verbundtafeln L_04_K ergeben sich im Querschnitt Spannungsunterschiede. Das Programm RFEM RF-Glas weist im Vergleich der Berechnungsprogramm sowohl bei der Bestimmung der Verformung und der Spannung die größten Abweichungen zur Messung auf. Das Mehrschichtsystem wird bei Verwendung der Modellierung von Verbundglas mit Berücksichtigung des Schubverbundes zwischen den Schichten und Modellierung mit dreidimensionalen Volumenelementen im Vergleich zu SJ Mepla als zu weich abgebildet. Mit Ansys Workbench 2020 R2 ergeben sich ebenfalls für die Verformungen und Hauptzugspannung an der Unterseite der Verbundtafel eine gute Übereinstimmung zwischen numerischer Berechnung und experimenteller Berechnung. Allerdings zeigen auch mit diesem Berechnungsprogramm die Spannungen an der Oberseite der unteren Glastafel und der Polycarbonat tafel Unterschiede zwischen Berechnung und Messung auf.

Der Vergleich der numerischen mit den experimentellen Werten weist insbesondere im Querschnitt eine Abweichung auf. Die Spannungswerte an den Oberflächen zur Zwischenschicht zeigen große Abweichungen. Die hohen relativen Abweichungen lassen sich mit den geringen Spannungswerten der Polycarbonat tafel erklären. Bereits geringe Spannungsunterschiede von beispielsweise $0,3 \text{ N/mm}^2$ führen bei O_04_K zu Abweichungen von über 22 % gegenüber dem gemessenen Wert.

Weiterhin besteht eine Ungenauigkeit in der verwendeten Messtechnik mit den applizierten zweiachsialen Dehnungsmessstreifen, die nicht an den geforderten Stellen exakt ausgerichtet beziehungsweise mit perfekter Genauigkeit auf die gewünschte Stelle aufgebracht sind. Die verwendete Isolierung der Kabel der Dehnungsmessstreifen kann lokal zu unzureichend verbundenen, optisch mit dem Auge nicht sichtbaren Stellen führen und das Messergebnis verfälschen. Die

Berechnungsmethoden gehen allerdings von keiner Querschnittsschwächung aus. Mit einer Weiterentwicklung der Messtechnik mit optischen Glasfasern ist es möglich, Dehnungen positionsgetreu zu bestimmen und Spannungen auszurechnen. Dabei ist die Glasfaser mit einem Durchmesser von 0,16 mm sehr dünn und beeinflusst nicht den Schubverbund der Zwischenschicht.¹⁵⁷ Optische Wegaufnehmer eignen sich zur berührungslosen Messung der Verformung. Es tritt keine zusätzliche Belastung wie bei induktiven Wegaufnehmern auf. Ergänzend können die Annahmen in der analytischen und numerischen Berechnung mit einem linear-elastischen Materialgesetz, gleichmäßigen und flächigen Schubverbund sowie einem homogenen und isotropen Material zu den Unterschieden zwischen Berechnung und Messung führen.

Es zeigt sich, dass eine Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel mit denen zur Verfügung stehenden Methoden effektiv und ausreichend genau analytisch und numerisch berechnet werden kann. Die Qualität der Ergebnisse ist dabei vom Verfahren und Programm abhängig. Mit der Kenntnis über die nichtlinearen Materialkennwerte und dem Ansatz der geometrischen Nichtlinearität sind unterschiedliche Ansätze anwendbar. SJ Mepla und RFEM RF-Glas stellen für einfache Materialannahmen auch bei großen Verformungen eine ausreichende Alternative zum komplexeren Programm Ansys dar.

¹⁵⁷ Vergleiche Weimar 2021c und Weimar 2022.

9 Zusatzanforderungen

9.1 Grundlagen

Verglasungen und Fassadenelemente dienen nicht nur dem reinen Raumabschluss, sondern müssen auch zusätzliche Eigenschaften erfüllen. Die Begriffe der multifunktionalen Fassade oder der polyvalenten Wand beschreiben dabei eine Art gebäudegesteuertes Bauteil, das sich in Abhängigkeit der äußeren Einwirkungen individuell anpasst. Das Element nutzt die Umgebung um Komfort, Benutzerfreundlichkeit und Energieverbrauch individuell zu regeln.¹⁵⁸ Mike Davies stellt 1981 seine Vision der polyvalenten Wand, bei der sich zwischen zwei Glastafeln verschiedene Funktionsschichten eingebracht werden, die sich selbstständig in Abhängigkeit der äußeren Einwirkung hinsichtlich Brand-, Wärme-, Schall-, Witterungs- und Sonnenschutz sowie Design, Energie, Medien und Sicherheit anpassen, vor. Benötigte Energie wird dabei selbst erzeugt.¹⁵⁹ Eine Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel eignet sich wegen des leichten und schlanken Verglasungsaufbaus als optimierte Alternative zu Verbundsicherheitsglas und kann zahlreiche Eigenschaften der polyvalenten Wand übernehmen. Als Horizontalverglasung treten große Verformungen bereits bei geringer Last auf. Deshalb bietet sich eine Anwendung in der Gebäudehülle als Vertikalverglasung, beispielsweise im Fassadenbereich, an.

Die Untersuchungen in diesem Kapitel stellen Zusatzanforderungen und Eigenschaften des Verbundes aus Dünnglas und Polycarbonat vor, die sich an einem Aufbau der multifunktionalen Fassade als polyvalente Wand orientieren. Theoretische Untersuchungen werden an Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit Dünnglas Leoflex und Dünnglas Optiwhite durchgeführt. Die experimentellen Nachweise konzentrieren sich vorwiegend auf die Verbundtafeln mit Decktafeln aus Optiwhite und lassen sich grundsätzlich auch für chemisch vorgespannte Glastafeln im Querschnitt durchführen. Nachfolgende Untersuchungen beinhalten Untersuchungen der Angriffshemmung als Sicherheitssonderverglasung mit einem Widerstand gegen manuellen Angriff, der lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Eigenschaften, der Berechnung des Wärmeschutzes sowie der Betrachtung der Baustoffklasse für den Brandschutzbereich und des Luftschalldämm-Maßes. Die Prüfung zum Widerstand gegen manuellen Angriff, die Bestimmung der Baustoffklasse und die Messung des Luftschalldämm-Maßes sind an externen Instituten durchgeführt. Die Vorbereitung mit Querschnittsentwicklung, die Koordinierung der beteiligten Personen, die Anwesenheit während der Messung und die Nachbereitung sind Bestandteil der eigenen Arbeit.

Untersuchungen zur temperaturbedingten Scherung der Zwischenschicht unter Berücksichtigung des nichtlinearen Verlaufs der Wärmeausdehnung von

¹⁵⁸ Vergleiche Knaack 2014, Seite 85 ff.

¹⁵⁹ Vergleiche Davies 1981.

Polycarbonat und Polyurethan runden die Zusatzanforderungen an die Verbundtafel ab.

9.2 Angriffshemmung

Der Widerstand gegen manuellen Angriff ist mit erhöhten Anforderungen an die Verglasung als Sicherheitssonderverglasung verbunden.¹⁶⁰ Dabei soll der Ein- oder Ausbruch aus einem Raum durch die Verglasung verzögert werden. Eine analytische oder numerische Berechnung der Untersuchung zum Widerstand gegen manuellen Angriff ist nicht möglich.¹⁶¹ Der Nachweis erfolgt experimentell an einem Mindestquerschnittsaufbau. Die Ergebnisse sind dabei unabhängig von der Untersuchung des Tragverhaltens und des Resttragverhaltens. Eine anschließende Ergänzung des Mindestquerschnitts mit weiteren Glas- oder Polycarbonatplatten ist möglich. In Abhängigkeit der Widerstandsklasse ergeben sich die Klassen P1A bis P5A für eine durchwurfhemmende Verglasung und P6B bis P8B für eine durchbruchhemmende Verglasung. Für beide Prüfungen sind die Abmessungen der Verglasung mit 900 mm auf 1.100 mm festgelegt. Für die Widerstandsklassen P1A bis P4A werden drei (4.110±60) g schwere Stahlkugel auf eine vierseitige linienförmig eingespannte Verglasung aus Fallhöhen von bis zu (9.000±50) mm einmal fallen gelassen. Bei der Widerstandsklasse P5A treffen jeweils dreimal drei Kugeln auf die Verglasung. Die Prüfung gilt als bestanden, sofern bis 5 s nach dem Aufprall der Fallkörper keinen Prüfkörper vollständig durchdrungen oder der Prüfkörper sich weniger als 5 mm im Einspannrahmen bewegt. Die Untersuchung einer durchbruchhemmenden Verglasung sieht eine (2,0±0,1) kg schwere, maschinengeführte Axt unter einer Schlaggeschwindigkeit von (11±0,3) m/s bei einer Auftreffenergie von (300±15) J auf den Prüfkörper vor. Die Widerstandsklassen P6B bis P8B werden in Abhängigkeit der Anzahl der Lockerungs- und Axtschläge bis zur Entstehung einer 400 mm auf 400 mm großen Öffnung in der Mitte des Prüfkörpers angegeben.¹⁶² Den ersten Lockerungsschlag zeigt Bild 82. Tabelle 54 beschreibt die Widerstandsklassen mit Anforderungen an die durchwurfhemmende und durchbruchhemmende Sicherheitssonderverglasung mit einem Widerstand gegen manuellen Angriff nach DIN EN 356.¹⁶³

¹⁶⁰ Neben einem Widerstand gegen manuellen Angriff zählt der Widerstand gegen Beschuss und der Widerstand gegen Sprengwirkung zu den erhöhten Anforderungen an Verglasungen als Sicherheitssonderverglasung.

¹⁶¹ Vergleiche DIN EN 356.

¹⁶² Die experimentelle Prüfung startet mit 12 Lockerungsschlägen mit einem Hammer entlang der herzustellenden Öffnung. Anschließend wird der Prüfkörper mit einer Axt beansprucht.

¹⁶³ Eine Einordnung nach VdS 2163 in die VdS-Klassen EH1 für P6B und EH3 für P8B kann ebenfalls erfolgen.



Bild 82
Prüfung mit der Axt an einer Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel.

Tabelle 54
Widerstandsklasse gegen manuellen Angriff nach DIN EN 356.

Widerstandsklasse	Bezeichnung	Anforderung	
P1A	durchwurf- hemmend	Fallhöhe: 1.500 mm	3 Abwürfe
P2A		Fallhöhe: 3.000 mm	3 Abwürfe
P3A		Fallhöhe: 6.000 mm	3 Abwürfe
P4A		Fallhöhe: 9.000 mm	3 Abwürfe
P5A		Fallhöhe: 9.000 mm	3 x 3 Abwürfe
P6B	durchbruch- hemmend	30 bis 50 Axtschläge	
P7B		51 bis 70 Axtschläge	
P8B		über 70 Axtschläge	

Die Prüfungen einer durchbruchhemmenden Sicherheitssonderverglasung führt das Beschussamt Mellrichstadt durch. Insgesamt werden vier unterschiedliche Querschnittsvarianten untersucht.

Tabelle 55 beschreibt den Querschnittsaufbau der Prüfkörper für die Untersuchung der Widerstandsklassen P6B und P8B mit den Dünngläsern Optiwhite und Leoflex. Beide Dünngläser benötigen eine innenliegende Polycarbonattafel mit einer Nenndicke von 5 mm zum Erreichen der Widerstandsklasse P6B. Die Widerstandsklasse P8B benötigt insgesamt mindestens zwei Polycarbonattafeln

einer Nenndicke von 5 mm, die über eine zusätzliche Zwischenschicht miteinander verbunden sind.¹⁶⁴

Tabelle 55

Querschnittsaufbau für die Prüfkörper zur Untersuchung der Angriffshemmung für Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit Dünnglas Leoflex (CVG 02) und Dünnglas Optiwhite (FG).

Prüfkörper	Widerstandsklasse	Aufbau [mm]	Nenndicke	Realdicke
P6B_L	P6B	0,85 CVG 02 2,00 TPU 5,00 PC 2,00 TPU 0,85 CVG 02	10,7 mm	10,3 mm
P6B_O	P6B	2,00 FG 2,00 TPU 5,00 PC 2,00 TPU 2,00 FG	13,0 mm	12,7 mm
P8B_L	P8B	0,85 CVG 02 2,00 TPU 5,00 PC 2,00 TPU 5,00 PC 2,00 TPU 0,85 CVG 02	17,7 mm	16,9 mm
P8B_O	P8B	2,00 FG 2,00 TPU 5,00 PC 2,00 TPU 5,00 PC 2,00 TPU 2,00 FG	20,0 mm	19,6 mm

Der Vergleich einer Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel mit einer konventionellen Sicherheitssonderverglasung aus einem Glas-Verbund zeigt in Bild 83 und Bild 84 das Potential in Hinblick auf Eigengewicht und Nenndicke. Dabei ergeben sich die in Bild 85 und Bild 86 angegebenen Kennwerte. Die Prüfkörper der Widerstandsklasse P6B und P8B weisen einen um bis zu 51 % dünneren und 73 % leichteren Aufbau auf. Im Mehrscheiben-Isolierglas entstehen mit dem Verbund aus Dünnglas und Polycarbonat erstmalig Sicherheitssonderverglasungen mit einem auf alle Glaspakete aufgeteilten Widerstand.¹⁶⁵

¹⁶⁴ Untersuchungen zu Verbundtafeln mit dem Dünnglas Falcon führen zu niedrigeren Widerstandsklassen, vergleiche Weimar 2021a, Seite 44 ff.

¹⁶⁵ Vergleiche Weimar 2018b und Weimar 2021b.

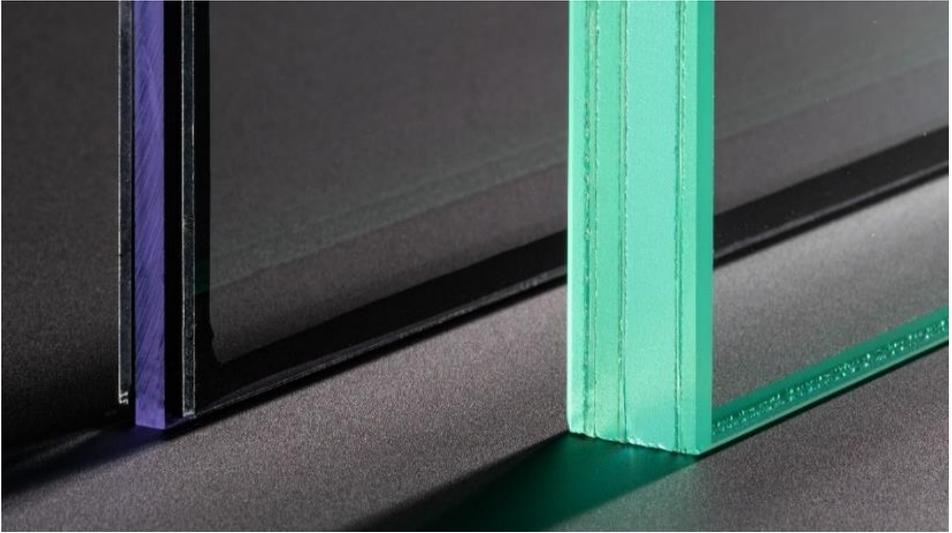


Bild 83

Eine Sicherheitssonderverglasung der Widerstandsklasse P6B gegen manuellen Angriff als Dünn-
glas-Polycarbonat-Verbundtafel mit dem Dünnglas Optiwhite (links) und aus einem Glas-Verbund
(rechts).

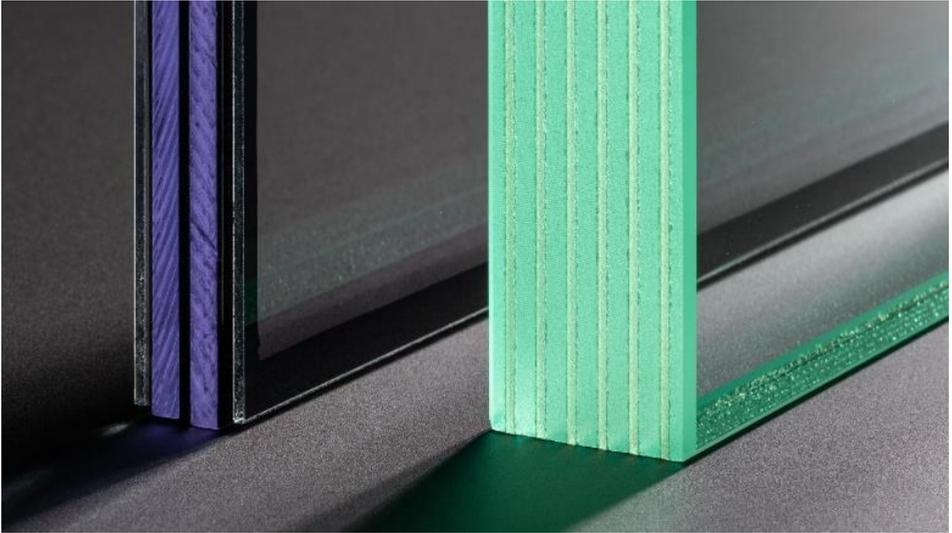


Bild 84

Eine Sicherheitssonderverglasung der Widerstandsklasse P8B gegen manuellen Angriff als Dünn-
glas-Polycarbonat-Verbundtafel mit dem Dünnglas Optiwhite (links) und aus einem Glas-Verbund
(rechts).

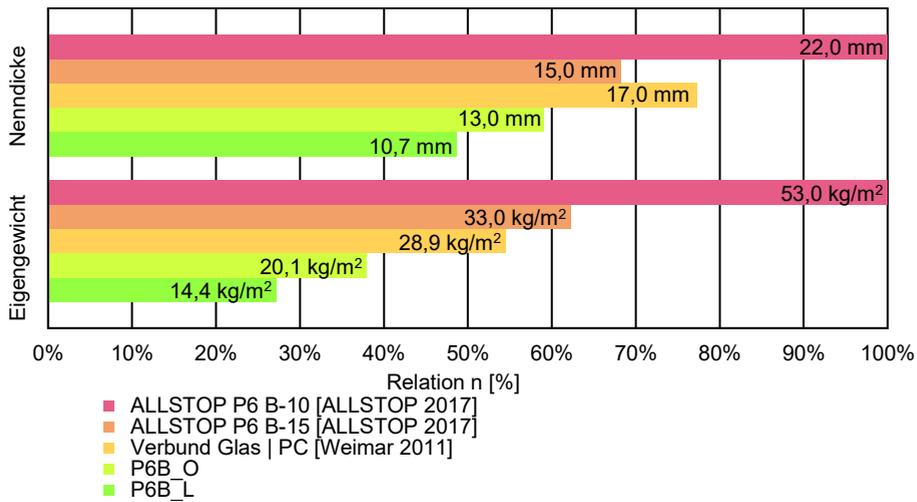


Bild 85

Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit Widerstandsklasse P6B gegen manuellen Angriff im Vergleich zu herkömmlicher Sicherheitssonderverglasung aus Glas-Verbund sowie Glas-Polycarbonat-Verbund in Bezug auf die Nenndicke und das Eigengewicht.

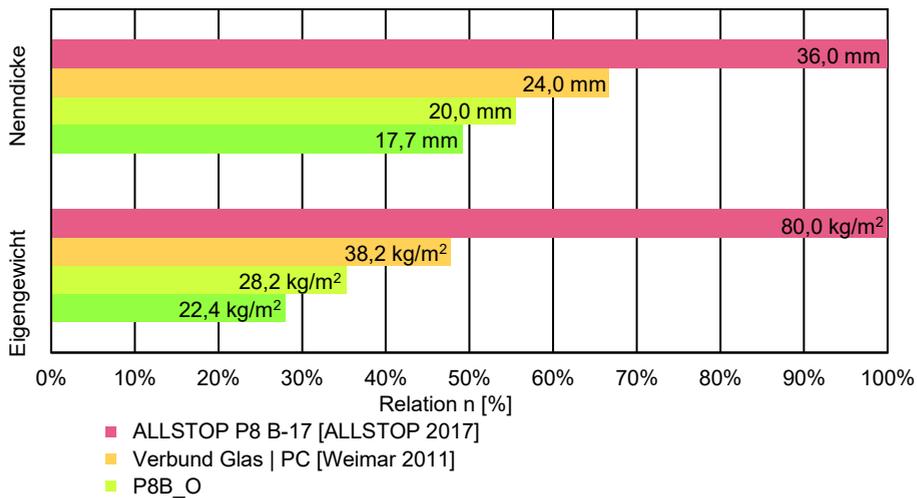


Bild 86

Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit Widerstandsklasse P8B gegen manuellen Angriff im Vergleich zu herkömmlicher Sicherheitssonderverglasung aus Glas-Verbund sowie Glas-Polycarbonat-Verbund in Bezug auf die Nenndicke und das Eigengewicht.

9.3 Lichttechnische und strahlungsphysikalische Kenngrößen

Die wesentliche Eigenschaft von Glas ist die Transparenz und das Transmissionsvermögen des sichtbaren Lichts als Teil der auftreffenden, elektromagnetischen Sonnenstrahlung. Das elektromagnetische Wellenlängenspektrum beschreibt die Summe aller elektromagnetischen Wellen unterschiedlicher Wellenlängen innerhalb derer auch das Lichtspektrum als sichtbarer Bereich eingebettet ist. Dabei ist übliches Silikatglas nicht nur im Spektralbereich des sichtbaren Lichts durchlässig, sondern ebenfalls im nahen ultravioletten Bereich und im kurzwelligen Infrarotbereich. Liegen keine farbgebenden Verunreinigungen im Glas vor, dann erscheint das Glas klar und durchsichtig.

Tabelle 56 unterteilt die relevanten Strahlungsanteile für Glas im Bauwesen. Der Grad der Lichtdurchlässigkeit im sichtbaren Bereich ist entscheidend für das Sehvermögen des Menschen, da lediglich der sichtbare Spektralbereich zwischen Wellenlängen von 380 nm und 780 nm Wellenlänge für das menschliche Auge wahrnehmbar ist. Ultraviolette Strahlung erzeugt eine biologische Reaktion und infrarote Strahlung eine thermische Reaktion.

Tabelle 56

Relevantes elektromagnetisches Wellenlängenspektrum für Glas im Bauwesen.

Bereich	Bezeichnung	Wellenlänge λ
Ultravioletter Bereich	UV-C	100 nm bis 280 nm
	UV-B	280 nm bis 315 nm
	UV-A	315 nm bis 380 nm
Sichtbarer Bereich	VIS	380 nm bis 780 nm
Infraroter Bereich	IR-A	780 nm bis 1.400 nm
	IR-B	1.400 nm bis 3.000 nm
	IR-C	3.000 nm bis 1.000.000 nm

Die auftreffende Strahlung wird grundsätzlich durch die Verglasung geleitet, von der Verglasung aufgenommen oder zurückgeworfen. Die Summe aus Transmission τ , Absorption α und Reflexion ρ entspricht der eintreffenden Strahlungsmenge. Transmission und Reflexion lassen sich direkt messen, die Absorption wird mit Gleichung 34 berechnet.

$$\tau + \alpha + \rho = 100 \%$$

Gleichung 34

Die lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kenngrößen von Verglasungen beschreibt DIN EN 410. Die Kenngrößen werden bei quasi-parallelem, beinahe senkrechtem Strahlungseinfall mit einer Verteilung nach Normlichtart D65, der Globalstrahlung und der ultravioletten Strahlung ermittelt. Die bedeutenden Kenngrößen von Verglasungen stellen der Lichttransmissionsgrad und der Gesamtenergiedurchlassgrad dar.

Die auf die Erdoberfläche auftreffende Sonneneinstrahlung in Abhängigkeit der Wellenlänge zeigt Bild 87. Demnach gelangt unterhalb von 300 nm und oberhalb von 2.500 nm keine Strahlung auf die Erdoberfläche. Der baurelevante Bereich liegt somit zwischen 300 nm und 2.500 nm.

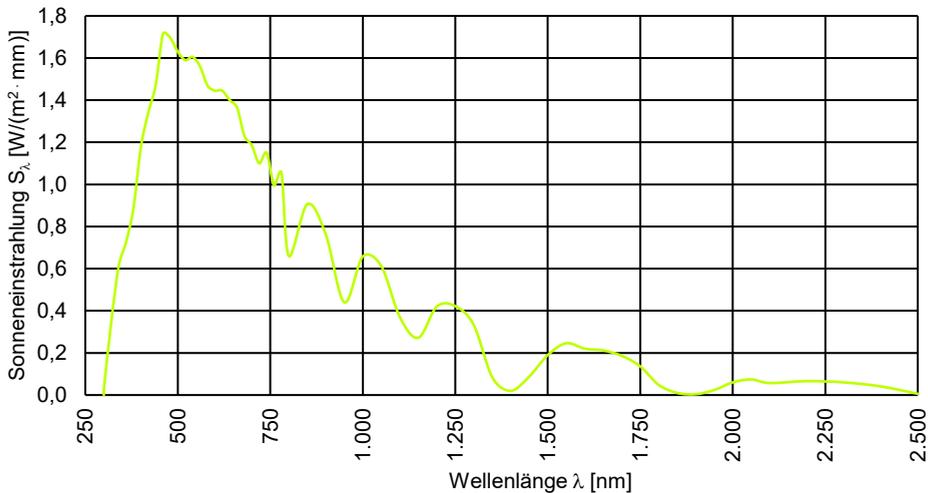


Bild 87

Auf die Erdoberfläche auftreffende Sonneneinstrahlung in Abhängigkeit der Wellenlänge nach DIN EN 410.

Die lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kenngrößen werden mit Lambda 1050+ von PerkinElmer (LAS) GmbH für die Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln bestimmt. Dazu werden entsprechende Prüfkörper in den Abmessungen von 50 mm auf 50 mm beziehungsweise 40 mm auf 60 mm in das Messgerät eingelegt und bei einer Wellenlängendifferenz von 10 nm im Bereich zwischen 250 nm und 2.500 nm für Transmission und Reflexion ausgewertet. Anschließend erfolgt die Berechnung der Kenngrößen nach den in der DIN EN 410 angegebenen Berechnungsverfahren.

Die Anforderungen an die Verbundtafel aus Polycarbonat und Dünnglas sind wesentlich höher als die für übliches Verbund- und Verbundsicherheitsglas aus einem Glas-Verbund. Die innenliegende Polycarbonat tafel reagiert mit auftreffender ultravioletter Strahlung. Dadurch verändern sich mechanische Eigenschaften und der technische Thermoplast versprödet. Daher sollte ein ausreichender Schutz vor ultravioletter Strahlung vorliegen.

Bild 88 zeigt die Transmission, die Reflexion und die Absorption des nicht vorgespannten Kalk-Natronsilikatglases Optiwhite. Bis etwa 250 nm absorbiert das Glas den Großteil der Strahlung ohne Transmission. Anschließend steigt die Strahlungsdurchlässigkeit bis auf einen Wert von über 90 % bei etwa 300 nm an und bleibt bis in den kurzwelligen Infrarotbereich annähernd konstant. Eine einfache Glastafel bietet keinen Schutz der dahinterliegenden Materialien und

Gegenstände vor ultravioletter und infraroter Strahlung. Eine Veränderung der Glasschmelze zur Verschiebung der Absorptionskante von 250 nm bis auf den Beginn des sichtbaren Bereiches bei 380 nm ist produktionsbedingt sehr aufwendig und kostenintensiv.

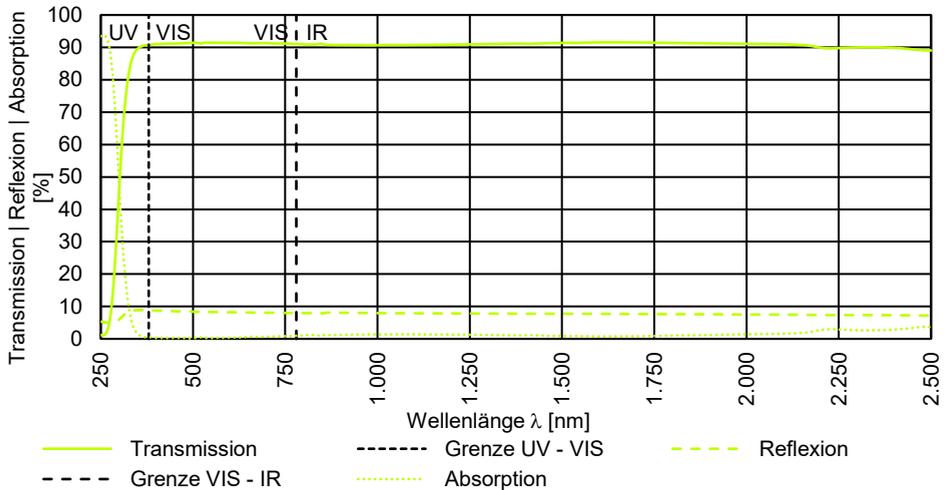


Bild 88

Transmission, Reflexion und Absorption des Dünnglases Optiwhite mit einer Nenndicke von 2 mm im Wellenlängenbereich von 250 nm bis 2.500 nm.

Die Verhinderung der Transmission ultravioletter Strahlung zum Schutz des Polycarbonats kann einerseits über die Anpassung des Polycarbonats mit ultraviolettbeständigen Ausgangsstoffen oder der Zwischenschicht erfolgen. Die Zugabe von blockierenden Additiven in die Zwischenschicht wird aus wirtschaftlichen und produktionsbedingten Gründen der genauen Dosierung bevorzugt. Der Nachweis einer Blockierung der Transmission von ultravioletter Strahlung über die Zwischenschicht an einem Verbundglas aus dem Dünnglas Optiwhite und der Zwischenschicht zeigt Bild 89. Die Additive erzeugen eine Verschiebung der Absorptionskante bis zu Beginn des sichtbaren Spektralbereiches bei 380 nm. Die innenliegende Polycarbonatplatte ist mit einem Transmissionsgrad durch Glas und Zwischenschicht im ultravioletten Bereich deshalb ausreichend von beiden Seiten vor Eigenschaftsänderung und Versprödung geschützt. Ein analoges Vorgehen ist für Verbundplatten mit Deckschichten aus Alumo-Silikatglas ebenfalls möglich.

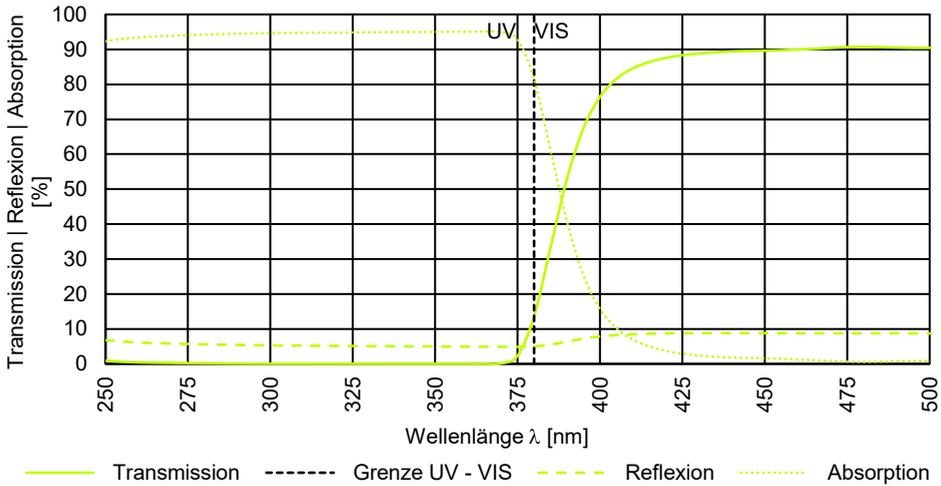


Bild 89

Transmission, Reflexion und Absorption von Verbundglas mit 2 mm FG | 2 mm TPU | 2 mm FG im Wellenlängenbereich von 250 nm bis 500 nm.

Die Transmissionskurve im Wellenlängenbereich von 300 nm bis 1.400 nm der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit unterschiedlichen Dünnglasdecktafeln stellt sich nach Bild 90 ein. Die Verbundtafel aus den Dünngläsern Leoflex oder Optiwhite, mit zwei 2 mm dicken Zwischenschichten und 2 mm Polycarbonatplatten zeigen einen hohen Lichttransmissionsgrad. Der Eintrag ultravioletter Strahlung ist behindert und der Durchgang infraroter Strahlung reduziert.

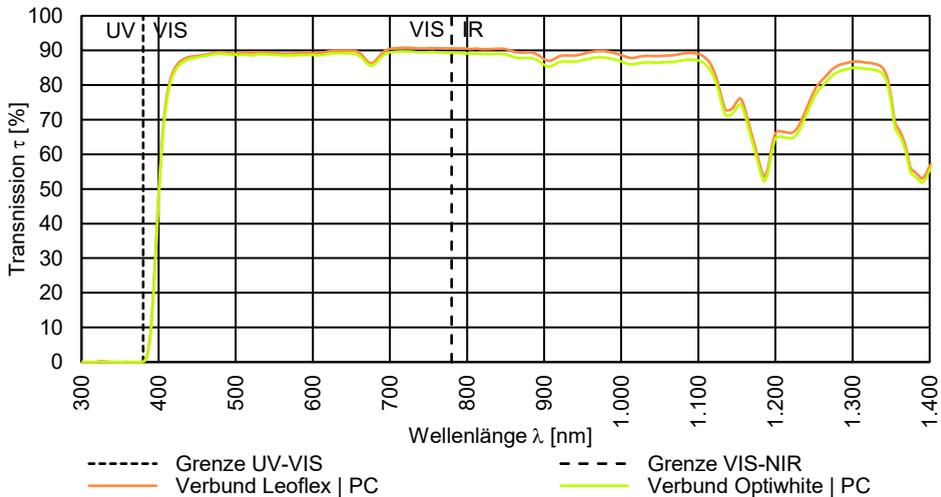


Bild 90

Transmissionskurve für Verbundtafeln mit dem Dünnglas Leoflex ($t = 0,85$ mm) oder dem Dünnglas Optiwhite ($t = 2,00$ mm) mit dem Aufbau Glas | 2 mm TPU | 2 mm PC | 2 mm TPU | Glas.

Auf Grundlage der Messergebnisse der spektralen Kenngrößen der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln der Widerstandsklasse P6B oder P8B gegen manuellen Angriff in Bild 91 werden die Werte in Tabelle 57 nach DIN EN 410 berechnet. Die Verbundtafel weist im nahen Infrarotbereich zwischen 780 nm und 1.400 nm weiterhin einen hohen Transmissionswert auf. Dadurch sind die Nutzung von winterlichen Energieeinträgen möglich, gleichzeitig muss im Sommer vor Überhitzung geschützt werden.

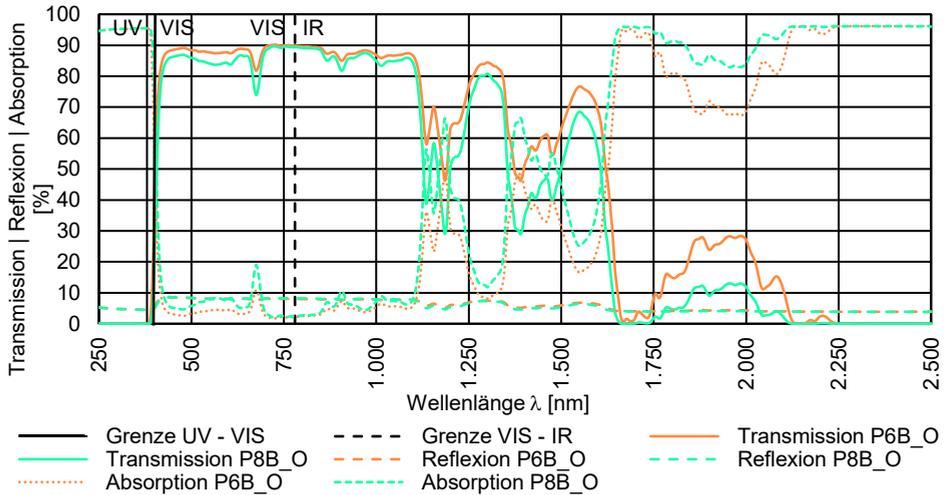


Bild 91

Transmissionskurve für Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit dem Dünnglas Optiwhite für die Widerstandsklassen P6B und P8B.

Tabelle 57

Spektrale Kenngrößen nach DIN EN 410 für Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit der Widerstandsklasse P6B oder P8B gegen manuellen Angriff und Dünnglas Optiwhite.

Kenngröße	P6B_O	P8B_O
Nennstärke	13,0 mm	20,0 mm
Realdicke	12,7 mm	19,7 mm
Lichttransmissionsgrad	87,8 %	84,6 %
Lichtreflexionsgrad	8,1 %	8,1 %
UV-Transmissionsgrad	0,0 %	0,0 %
Gesamtenergiedurchlassgrad	79,5 %	76,6 %

Der Vergleich mit einem Verbundsicherheitsglas als Sicherheitssonderverglasungen der Widerstandsklasse P6B und P8B in Bild 92 und Bild 93 zeigt in Hinblick auf den Lichttransmissionsgrad und den Energiedurchlassgrad das Potential der mehrschichtigen Verbundtafel. Während sich die Kennwerte einer P6B-Verglasung nicht wesentlich im Vergleich mit einer herkömmlichen Sicherheitssonderverglasung unterscheiden, zeigt der P8B-Querschnitt einen um 3 % reduzierten Lichttransmissionsgrad. Die Differenz ist allerdings für das menschliche Auge

kaum sichtbar. Dahingegen erhöht sich der Gesamtenergiegrad durchlassgrad um 4 %, was einen erhöhten Energieeintrag zur Folge hat.

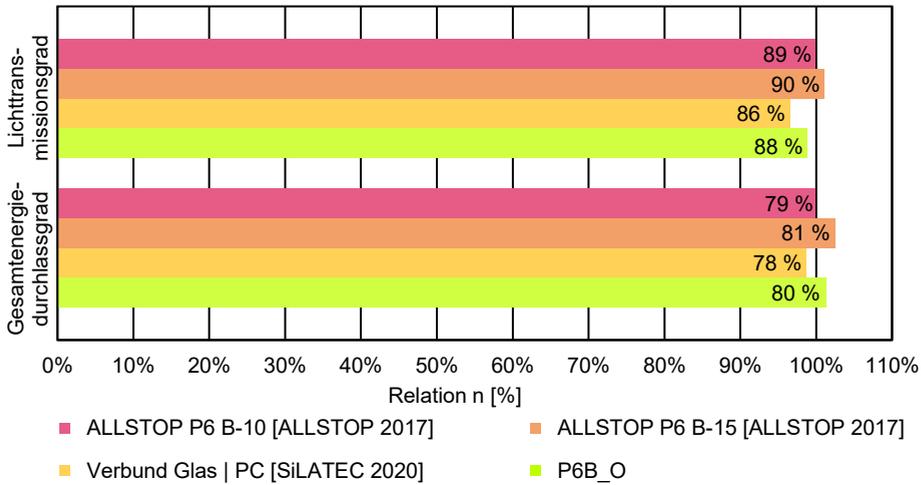


Bild 92

Dünn glas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit Widerstandsklasse P6B gegen manuellen Angriff im Vergleich zu herkömmlicher Sicherheitssonderverglasung aus Glas-Verbund sowie Glas-Polycarbonat-Verbund in Bezug auf den Transmissionsgrad τ_{VIS} und den Gesamtenergiegrad durchlassgrad g-Wert.

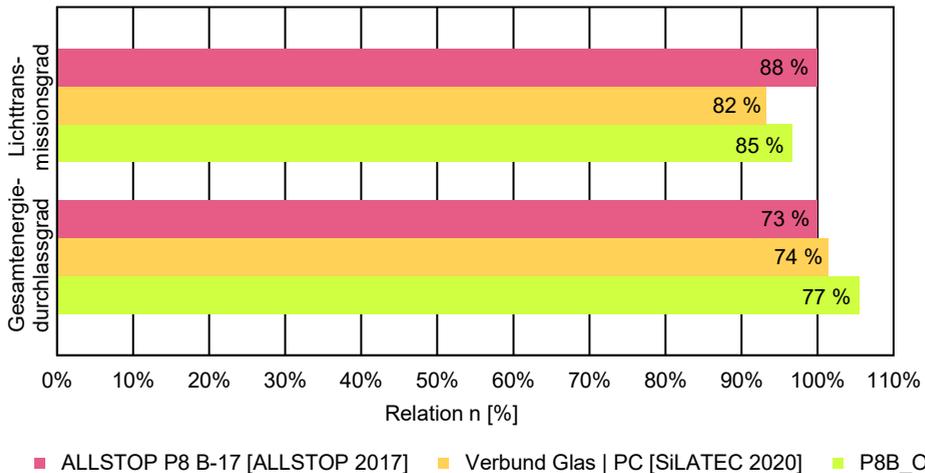


Bild 93

Dünn glas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit Widerstandsklasse P8B gegen manuellen Angriff im Vergleich zu herkömmlicher Sicherheitssonderverglasung aus Glas-Verbund sowie Glas-Polycarbonat-Verbund in Bezug auf den Transmissionsgrad τ_{VIS} und den Gesamtenergiegrad durchlassgrad g-Wert.

Während der Entwicklung und Herstellung von Mehrscheiben-Isolierglas mit Dünn glas-Polycarbonat-Verbundtafeln kann eine zum Scheibenzwischenraum ausgerichtete Sonnenschutzbeschichtung den Strahlungsdurchgang im nahen

Infrarotbereich weitestgehend verhindern. Üblicherweise werden dazu bis zu 100 nm dünne Metallbeschichtungen auf das Glas zur Reduzierung des Emissionsgrades¹⁶⁶ aufgebracht. Damit reduziert sich der Gesamtenergiedurchlassgrad, ohne einen wesentlichen Einfluss auf die Lichtdurchlässigkeit zu erhalten.¹⁶⁷

9.4 Wärmeschutz

In der Gebäudehülle ist der Wärmeverlust über Verglasungen in der Fassade zu berücksichtigen. Der Wärmedurchgangskoeffizient, auch als U-Wert bezeichnet, beschreibt die Wärmedämmeigenschaften und setzt sich aus dem Verglasungsanteil U_g , dem Rahmenanteil U_R und dem Randverbundanteil ψ zusammen. Der Kennwert definiert den Wärmedurchgang durch ein ebenes Bauteil mit einer Fläche von 1 m² bei einer Temperaturdifferenz von 1 K und ist ein wesentlicher Wert zur Kennzeichnung des Wärmeschutzes von Bauteilen. Eine Verbesserung des U-Wertes erfolgt hauptsächlich über eine Optimierung des U_g -Wertes, da der Einfluss des Rahmens im Vergleich zur großflächigen Verglasung gering ausfällt.¹⁶⁸ Bei Mehrscheiben-Isoliergläsern ist eine Verbesserung des U_g -Wertes zusätzlich durch Beschichtungen auf den Oberflächen im Querschnitt und den Einsatz von Edelgasen im Scheibenzwischenraum möglich. Ein geringer Wärmedurchgangskoeffizient weist auf einen geringen Wärmeverlust und damit einen hohen Wärmeschutz einer Verglasung hin.

Grundsätzlich stehen drei unterschiedliche Verfahren zur Bestimmung des Kennwertes zur Verfügung. Eine Berechnungsmethode liegt mit DIN EN 673 vor, die experimentellen Bestimmungen erfolgen entweder mit dem Plattengerät nach DIN EN 674 oder mit dem Wärmestrom-Verfahren nach DIN EN 675. In dieser Arbeit wird der Wärmedurchgangskoeffizient mit dem Berechnungsverfahren für eine Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel als Einfachglas mit unterschiedlichem Aufbau durchgeführt.

¹⁶⁶ Der Emissionsgrad ist das Maß der spezifischen Wärmestrahlung eines Körpers im Verhältnis zu einem idealen Wärmestrahler als schwarzer Körper bei gleicher Temperaturbedingung. Der Emissionsgrad von Kalk-Natronsilikatglas liegt bei etwa 83,7 %. Beschichtungen reduzieren den Wert auf 1 % bis 10 %. Beschichtete Gläser strahlen somit eine geringere Wärmemenge ab.

¹⁶⁷ Potentiale und Ergebnisse zum Einsatz der Verbundtafeln im Mehrscheiben-Isolierglas in Hinblick auf die spektralen und lichttechnischen Kenngrößen können aus Weimar 2018b, Seite 44 ff., Weimar 2021a, Seite 58 ff. und Weimar 2021b entnommen werden.

¹⁶⁸ Je kleiner die verglaste Fläche, desto größer der Einfluss des Rahmens und des Randverbundes auf den U-Wert. In diesem Kapitel wird ausschließlich der U_g -Wert betrachtet. Die Ausbildung des Rahmens und des Randverbundes sind von weiteren Faktoren abhängig, wie beispielsweise individuelle Anforderungen resultierend aus der Anwendung, der Materialwahl oder der Wirtschaftlichkeit.

Zur rechnerischen Ermittlung des U_g -Wertes nach DIN EN 673 sind die in Tabelle 58 angegebenen Nenndicken und Wärmeleitfähigkeiten für die einzelnen Schichten verwendet.

Tabelle 58

Kennwerte zur Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizientens nach DIN EN 673 für die Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel.

Material	Hersteller	Nenndicke	Wärmeleitfähigkeit
Dünnglas CVG 02 Leoflex	Asahi Glass Co., Ltd	0,85 mm	1,04 W/(m·K)
Dünnglas FG Optiwhite	Pilkington Deutschland AG	2,00 mm	1,00 W/(m·K)
Polycarbonat Lexan 9030	Sabic Deutschland GmbH	variabel	0,20 W/(m·K)
Zwischenschicht Thermoplastisches Polyurethan	SiLATEC Sicherheits- und Laminatglastechnik GmbH	2,00 mm	0,25 W/(m·K)

Der U_g -Wert ergibt sich für eine Einfachglas nach Gleichung 35. Dabei wird der U_g -Wert auf eine Nachkommastelle gerundet angegeben.

$$\frac{1}{U_g} = R + \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} = \frac{1}{h_t} + \frac{1}{h_e} + \frac{1}{h_i} \quad \text{Gleichung 35}$$

Der äußere Wärmeübergangskoeffizient h_e und der innere Wärmeübergangskoeffizient h_i stellen einen Kennwert für die Übertragung der Wärme an der Bauteiloberfläche zum umgebenden Medium dar. Die Übergangskoeffizienten hängen von einer Vielzahl von Faktoren ab und lassen sich individuell für das Bauvorhaben nur sehr schwer bestimmen. In DIN EN 673 sind zum Vergleich des U_g -Wertes der Verglasung entsprechende Werte der Wärmeübergangskoeffizienten angegeben.¹⁶⁹ Der Gesamtwärmedurchlasskoeffizient für ein Einfachglas ohne Scheibenzwischenraum berechnet sich aus der Summe der Nenndicke multipliziert mit der Wärmeleitfähigkeit jeder Schicht nach Gleichung 36.

$$R = \frac{1}{h_t} = \sum_i (t_i \cdot \lambda_i) \quad \text{Gleichung 36}$$

Zu Beginn der Untersuchung wird zuerst der Wärmedurchgangskoeffizient der Ausgangsmaterialien in Bild 94 betrachtet. Die Kunststoffe Polycarbonat und thermoplastisches Polyurethan zeigen einen um bis zu 1,5 W/(m²·K) verringerten Wert im Vergleich zum Glas. Die Polycarbonattafel stellt den unteren Grenzwert und das Dünnglas Leoflex den oberen Grenzwert der Untersuchungen dar. Je

¹⁶⁹ Der äußere Wärmeübergangskoeffizient h_e ist mit 25,0 W/(m²·K) und der innere Wärmeübergangskoeffizient h_i mit 7,7 W/(m²·K) angegeben.

näher der U_g -Wert der Verbundtafel am U_g -Wert der Polycarbonattafel liegt, desto besser ist der Wärmeschutz des Mehrschichtsystems.

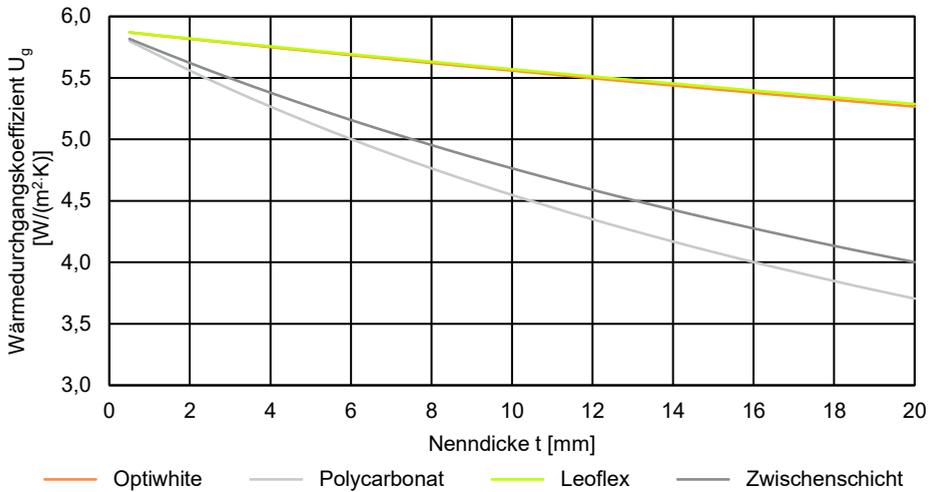


Bild 94

Berechneter U_g -Wert der Einzelkomponenten einer Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel nach DIN EN 673.

Eine Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel setzt sich unabhängig der Nenndicke mindestens aus zwei äußeren Dünnglastafeln, zwei Zwischenschichten und einer Polycarbonattafel zusammen. In Abhängigkeit der Widerstandsklasse gegen manuellen Angriff sind teilweise zwei innenliegende Polycarbonattafeln mit einer zusätzlichen Zwischenschicht notwendig. Die Untersuchung zum Wärmedurchgangskoeffizienten der Verbundtafel mit den Widerstandsklassen P6B und P8B gegen manuellen Angriff zeigen Bild 95 und Bild 96. Im Vergleich zu einer Glas-tafel derselben Nenndicke wie die Verbundtafel ist in Abhängigkeit des außenliegenden Dünnglases der Wärmedurchgangskoeffizient um bis zu 1,7 W/(m²·K) reduziert. Mit der Erhöhung der Nenndicke des Polycarbonats nähert sich der U_g -Wert dem Wert einer monolithischen Polycarbonattafel an. Die Wärmeschutz-eigenschaft des Laminats wird maßgeblich von den Kunststoffen beeinflusst.

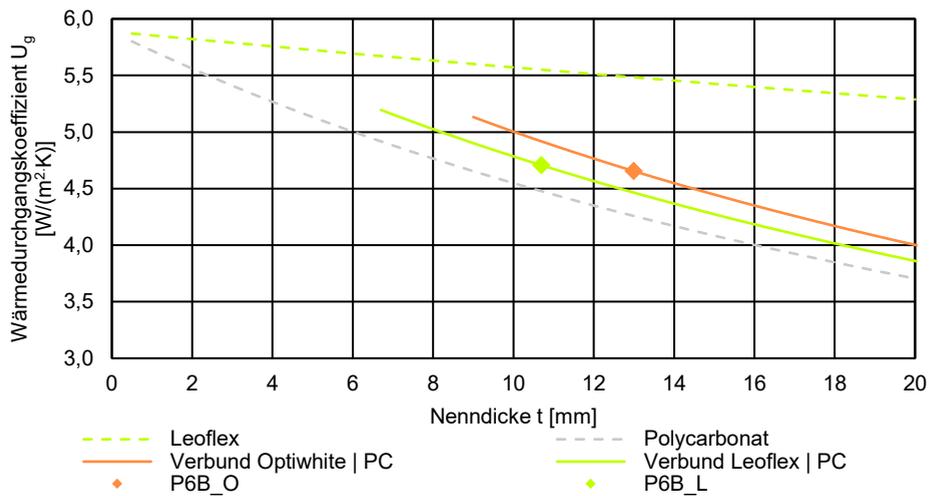


Bild 95

Berechnung des U_g -Wertes nach DIN EN 673 für die Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit einer innenliegenden Polycarbonat tafel.

Bild 96 zeigt die Ergebnisse für eine Verbundtafel mit unterschiedlichem Dünnglas, drei Zwischenschichten und zwei Polycarbonat tafeln. Der hohe Kunststoffanteil reduziert den U_g -Wert. Bei einer Verbundtafel der Widerstandsklasse P8B mit Dünnglas Optiwhite liegt der Anteil der Glasnenndicke am Gesamtquerschnitt bei 20 %. Die Abweichung zwischen dem unteren Grenzwert der monolithischen Polycarbonat tafel zu der Verbundtafel bei einer Nenndicke von 20 mm beträgt nur noch 0,3 W/(m²·K). Verbundtafeln mit dem Dünnglas Leoflex weisen einen Glasanteil am Gesamtquerschnitt von unter 10 % auf. Die Kurve der Verbundtafel und des Polycarbonates bei einer Nenndicke von 17,7 mm für das Dünnglas Leoflex liegt um 0,2 W/(m²·K) vom U_g -Wert des Polycarbonates gleicher Nenndicke höher.

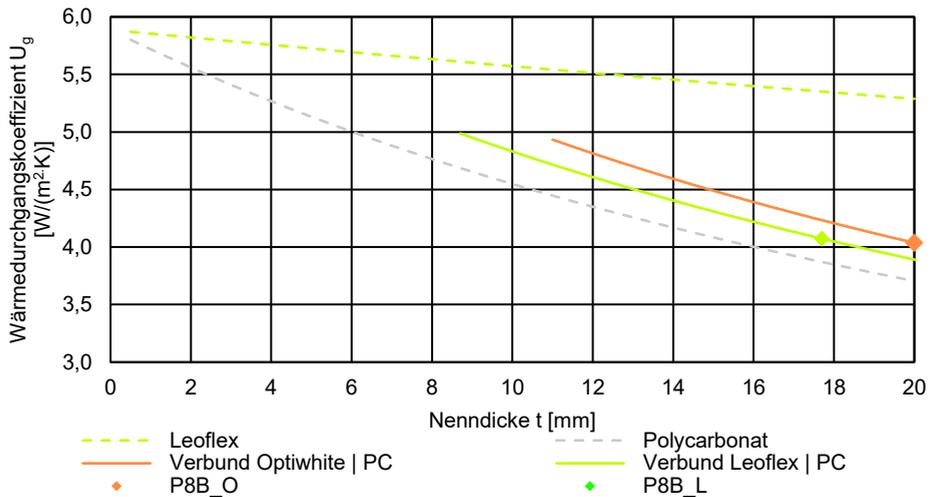


Bild 96

Berechnung des U_g -Wertes nach DIN EN 673 für die Dünnglas- Polycarbonat-Verbundtafeln mit zwei innenliegenden Polycarbonatplatten.

Die Betrachtung einer Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel mit unterschiedlichen Dünnglastafeln weist als Einfachglas einen deutlich verbesserten Wärmedurchgangskoeffizienten als eine Glastafel gleicher Nenndicke auf. Der Vergleich zwischen dem Mehrschichtsystem und herkömmlichen Verglasungen mit gleicher Widerstandsklasse gegen manuellen Angriff zeigen das Potential der Verbundtafeln. Bild 97 zieht einen Vergleich einer Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel mit einer herkömmlichen Sicherheitssonderverglasungen aus einem Glas-Verbund und aus Glas-Polycarbonat-Verbund bei einer Widerstandsklasse P6B gegen manuellen Angriff in Hinblick auf den Wärmedurchgangskoeffizienten. Für eine Widerstandsklasse P8B sind entsprechende Kennwerte in Bild 98 angegeben.

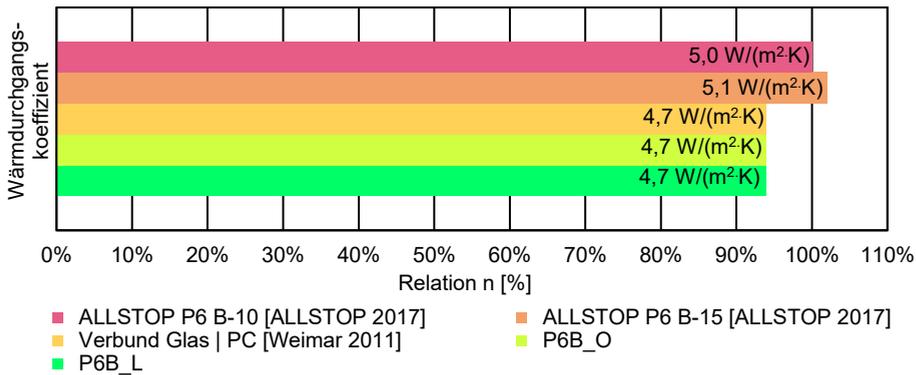


Bild 97

Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit Widerstandsklasse P6B gegen manuellen Angriff im Vergleich zu herkömmlicher Sicherheitssonderverglasung aus Glas-Verbund sowie Glas-Polycarbonat-Verbund in Bezug auf den Wärmedurchgangskoeffizient U_g .

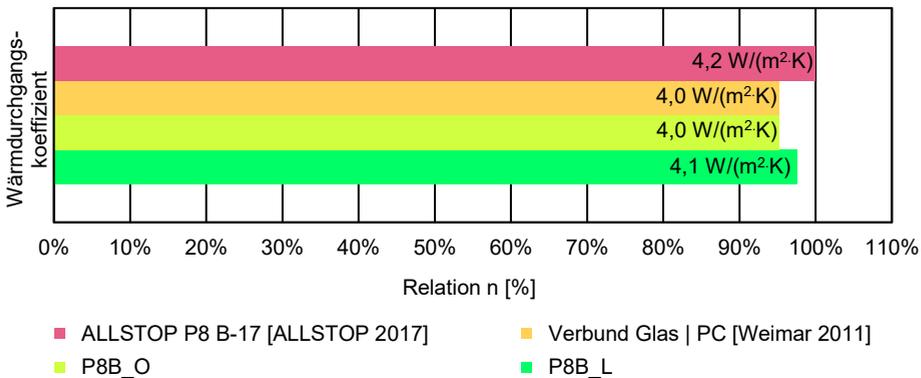


Bild 98

Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit Widerstandsklasse P8B gegen manuellen Angriff im Vergleich zu herkömmlicher Sicherheitssonderverglasung aus Glas-Verbund sowie Glas-Polycarbonat-Verbund in Bezug auf den Wärmedurchgangskoeffizient U_g .

Die Weiterverarbeitung zu einem Mehrscheiben-Isolierglas mit einer Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel in der Gebäudehülle ermöglicht das Potential in Hinblick auf den Wärmeschutz für die Kombination aus Dünnglas und Polycarbonat mit einem gasgefüllten Scheibenzwischenraum zu nutzen. Ein Wärmedurchgangskoeffizient von $1,0 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ ist erreichbar. Über eine Anpassung des Gasfüllgrades, der Scheibenzwischenraumdicke und der Verarbeitung zu einem Dreischeiben-Isolierglas mit Beschichtungen zum Scheibenzwischenraum reduziert sich der U_g -Werte zusätzlich. Ergänzend ist die Verteilung der Widerstandsklasse gegen manuellen Angriff auf mehrere Glaspakete eines Mehrscheiben-Isolierglases möglich. Damit wird ein U_g -Wert für ein Zweischeiben-Isolierglas mit $0,9 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ und für ein Dreischeiben-Isolierglas mit $0,7 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ bei gleichzeit-

iger Reduktion der Eigenlast und Nenndicke im Vergleich zu Sicherheitssonderverglasungen aus einem Glas-Verbund nachgewiesen.¹⁷⁰

9.5 Brandschutz

Nach §14 der Musterbauordnung (MBO) sind bauliche Anlagen so zu errichten, dass der Entstehung eines Brandes und der Ausbreitung von Feuer und Rauch vorgebeugt sowie die Rettung von Menschen und Tieren sowie Löscharbeiten möglich sind. Somit gewährleistet der Brandschutz die Schutzziele der Sicherheit von Leben und Gesundheit, des Erhalts von Bauwerken und des Erhalts von Umgebung, Natur und Umwelt. Daraus ableitend lässt sich der Brandschutz grundsätzlich in drei Arten einteilen, die sich mit dem Ziel der Einhaltung der festgelegten Schutzziele weiter verfeinern. Der vorbeugende Brandschutz mit baulichen und der technischen Maßnahmen beschreibt die Verhinderung des Ausbruchs und der Ausbreitung von Feuer und Rauch. Der statisch-konstruktive Brandschutz umfasst die Auswahl und die Dimensionierung der Materialien sowie die Berücksichtigung der Feuerwiderstandsklasse gemäß den Anforderungen. Der abwehrende Brandschutz ermöglicht die Rettung von Menschen und Tieren sowie die Bekämpfung von Feuer und Rauch. Zusätzlich unterstützen technische, betrieblich-organisatorische oder öffentliche Anlagen den abwehrenden Brandschutz.

Ein Tragwerk gliedert sich in ein Primär-, Sekundär- und Tertiärtragwerk. Maßgebend für die Einteilung eines Bauteils ist die Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer Gefahr für den Nutzer und der Standsicherheit des Gebäudes im Falle eines Bauteilversagens. Mit geringerem Einfluss auf die Gefahr für den Nutzer und die Standsicherheit nimmt die Einordnung des Bauteils in der Hierarchie ab. Eine Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel als flächiges, raumabschließendes Bauteil ist vor allem dem Tertiärtragwerk als nicht aussteifendes Element zuzuordnen. Mit der Wahl der Baustoffklasse des Mehrschichtsystems trägt das Material zum vorbeugend baulichen und statisch-konstruktiven Brandschutz bei. Der Brennbarkeitsgrad eines Baustoffs lässt sich nicht direkt aus den Materialeigenschaften ableiten, kann aber beispielsweise nach DIN 4102 experimentell bestimmt werden. Dazu gibt die Norm fünf Baustoffklassen nach Tabelle 59 vor. Baustoffe der Baustoffklasse A sind nichtbrennbar und leisten keinen oder nur im geringen Umfang einen Beitrag zum Brand. Baustoffe der Klasse B sind je nach Unterteilung in der Lage einem Angriff durch eine kleine Flamme oder eines brennenden Gegenstandes längere Zeit standzuhalten. Die Baustoffklasse untergliedert sich von B3 als leichtentflammbar bis B1 schwerentflammbar.

¹⁷⁰ Vergleiche Weimar 2018b, Seite 46, Weimar 2021a, Seite 44 ff. und Weimar 2021b.

Tabelle 59

Einteilung der Baustoffe in Baustoffklassen nach DIN 4102.

Baustoffklasse	Benennung	Beschreibung
A1	nichtbrennbarer Baustoff	nichtbrennbar und ohne brennbare Bestandteile
A2		nichtbrennbar und mit geringem Umfang an brennbaren Bestandteilen
B1	brennbarer Baustoff	schwerentflammbar
B2		normalentflammbar
B3		leichtentflammbar

In Hinblick auf die brandschutztechnischen Eigenschaften der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel werden Untersuchungen zur Baustoffklasse nach DIN 4102 an der Materialprüfanstalt Nordrhein-Westfalen in Erwitte durchgeführt. Grundsätzlich ist die Verbundtafel als Mehrschichtelement mit brennbaren, polymeren Werkstoffen einem brennbaren Baustoff der Baustoffklasse B zuzuordnen. Die Baustoffklasse B1 beinhaltet die Prüfverfahren im Brandschacht und der Entzündbarkeit, die beide erfolgreich bestanden werden müssen.

Die Prüfung im Brandschacht untersucht das Verhalten der Verbundtafel in Hinblick auf die Flammenausbreitung außerhalb des Bereichs der ersten Brandbeanspruchung sowie die Energieabgabe während des Entstehungsbrandes. Ein quadratischer Brenner in der Größe eines brennenden Papierkorbs fungiert als Zündquelle. Die Prüfkörper mit den Abmessungen von 1.000 mm auf 190 mm hängen vertikal über dem Gasbrenner und sind für die Zeitdauer von 10 min beflammt. Zeitgleich werden kontinuierlich Messdaten wie Rauchgastemperatur und Intensität der Rauchgasentwicklung aufgezeichnet. Die Restlänge des unzerstörten Prüfkörpers gibt die Flammenausbreitung an.

Die Prüfung der Baustoffklasse B2 untersucht die Entzündbarkeit des Werkstoffs. Der Prüfkörper darf nach Entfernen der Zündquelle nur eine begrenzte Flammenausbreitung zeigen. Im Gegensatz zu den Untersuchungen der Klasse B1 simuliert die Gasflamme als Zündquelle in der Prüfung der Baustoffklasse B2 eine Streichholz- oder Feuerzeugflamme. Die Flamme beansprucht den hängenden Prüfkörper für 15 s entweder an der Unterkante der 190 mm auf 90 mm definierten Verbundtafel oder auf der Prüfkörperoberfläche des 230 mm auf 90 mm Mehrschichtsystems mit einem Abstand von 40 mm von der Unterkante. Anschließend wird für weitere 5 s die Flammenausbreitung beobachtet. Die Flammenhöhe darf in den ersten 20 s nach Prüfbeginn nicht größer als 150 mm sein. Somit ist die Flammenausbreitung und die Entzündbarkeit innerhalb eines bestimmten Zeitraums begrenzt.

Tabelle 60 beschreibt den Querschnitt, die Nenndicke, die Anzahl und die Abmessungen der Prüfkörper zur Untersuchung der Baustoffklasse nach DIN 4102. Die Prüfkörper der Abmessung 1.000 mm auf 190 mm werden für die Brand-

schachtprüfung, die Prüfkörper mit 190 mm auf 90 mm für die Untersuchung der Entzündbarkeit verwendet.

Tabelle 60

Querschnitt, Nenndicke, Anzahl und Abmessungen für die Untersuchung der Baustoffklasse nach DIN 4102.

Prüfkörper	Querschnitt	Nenndicke	Abmessung Anzahl
B1_O_P6B	2 mm FG 2 mm TPU 5 mm PC 2 mm TPU 2 mm FG	13 mm	1.000 mm x 190 mm 4 Prüfkörper
B2_O_P6B	2 mm FG 2 mm TPU 5 mm PC 2 mm TPU 2 mm FG	13 mm	190 mm x 90 mm 5 Prüfkörper
B1_O_P8B	2 mm FG 2 mm TPU 5 mm PC 2 mm TPU 5 mm PC 2 mm TPU 2 mm FG	20 mm	1.000 mm x 190 mm 4 Prüfkörper
B2_O_P8B	2 mm FG 2 mm TPU 5 mm PC 2 mm TPU 5 mm PC 2 mm TPU 2 mm FG	20 mm	190 mm x 90 mm 5 Prüfkörper

Die Prüfung der Baustoffklasse B2 erfolgt an Prüfkörpern der Abmessung mit 190 mm auf 90 mm für 15 s durch eine definierte Gasbrennerflamme. Am um 90 ° gedrehte Prüfkörper identifiziert. Bild 99 zeigt die Prüfung des Prüfkörpers B2_O_P6B kurz vor der Beflammung.

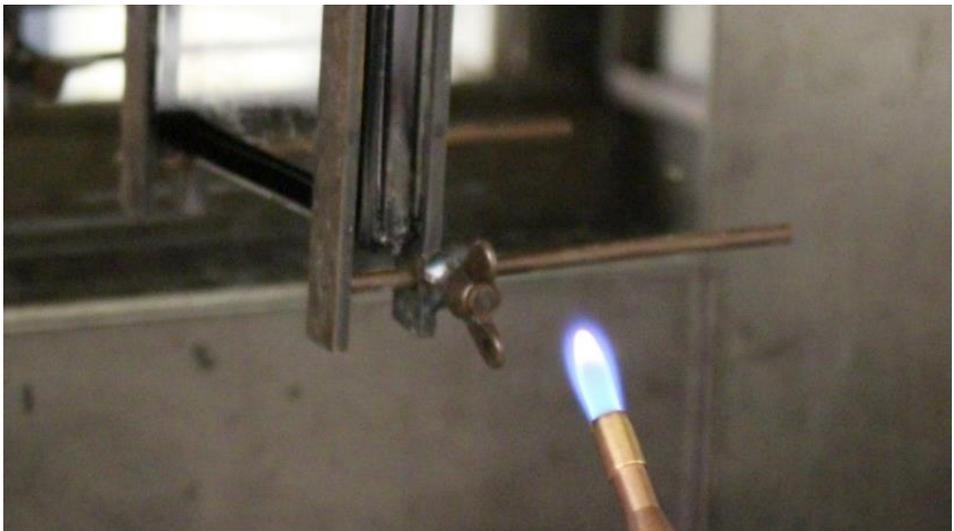


Bild 99

Prüfung der Baustoffklasse B2 am um 90° gedrehten Prüfkörper.

Insgesamt werden fünf Prüfkörper im 90 ° gedrehten Einbauzustand bei mittlerer Brandbeanspruchung untersucht. Jede Schicht der Verbundtafel erfährt eine Be-

flammung. Sowohl alle Prüfkörper B2_O_P6B als auch B2_O_P8B entzünden sich nach kurzer Zeit an den Butylbändern. Die Flamme erlischt von selbst und erreicht nach 20 s nicht die kritische Flammhöhe von 150 mm. Eine geringe Rauchentwicklung ohne brennendes Abfallen der Materialien entsteht. Tabelle 61 zeigt die mittlere Höhe der Flammenspitze. Auf eine direkte Beflammung der Glasoberfläche wird als nichtbrennbarer Baustoff verzichtet. Alle Prüfkörper sind mit der Baustoffklasse B2 klassifiziert.

Tabelle 61

Auswertung der Prüfung zur Entzündbarkeit zur Baustoffklasse B2.

Prüfkörper	Höhe der Flammenspitze \leq 150 mm
B2_O_P6B	32 mm (4mm)
B2_O_P8B	46 mm (5 mm)

Die Prüfung zur Baustoffklasse B1 erfolgt für B1_O_P6B und B1_O_P8B in den Abmessungen von 1.000 mm auf 190 mm im Brandschacht. Die Prüfkörper werden in das Gestell entsprechend der Darstellung in Bild 100 gehängt, in den Brandschacht geschoben und beflammt.



Bild 100

Prüfung der Baustoffklasse B1 im Bandschacht. Einhängen des Gestells mit vier Prüfkörpern im Brandschacht (links) und Prüfkörper während der Beflammung (rechts).

Beide Prüfserien B1_O_P6B und B1_O_P8B bestehen die Prüfungen zur Baustoffklasse B1 aufgrund einer zu hohen Rauchgasentwicklung innerhalb der Versuchsdauer von 10 min nicht. Dadurch entfällt die Bestimmung der unverbrannt-

en mittleren Restlänge. Während B1_O_P6B eine mittlere Rauchgastemperatur von über +200 °C nach 7 min entwickelt, ergibt sich die Überschreitung des Grenzwertes für B1_O_P8B bereits nach 6 min. Zusätzlich fallen brennende Materialien ab und brennen am Boden des Brandschachtes weiter. Während des Versuchs bricht die schützende Dünnglasschicht und die Brandbeanspruchung greift direkt die Zwischenschicht und das Polycarbonat an. Beide Polymerwerkstoffe schmelzen während des Versuchs.¹⁷¹ Die Ergebnisse der Prüfung für Baustoffklasse B1 sind in Tabelle 62 dargestellt. Bild 101 zeigt die vier Prüfkörper B1_O_P6B nach Abbruch des Versuchs.

Tabelle 62

Auswertung der Prüfung im Brandschacht zur Baustoffklasse B1.

Prüfkörper	Unverbrannte mittlere Restlänge ≥ 150 mm	Mittlere Rauchgastemperatur $\leq +200$ °C
B2_O_P6B	entfällt	+200 °C erreicht nach 7 min
B2_O_P8B	entfällt	+200 °C erreicht nach 6 min



Bild 101

Ergebnis der Brandschachtprüfung zur Baustoffklasse B1 für B1_O_P6B nach Abkühlung und Ausbau der Prüfkörper.

¹⁷¹ Die Schmelztemperatur des Polyurethans liegt bei etwa +95 °C, vergleiche Weimar 2011, Seite 101. Polycarbonat zeigt als amorpher Kunststoff keine ausgewiesene Schmelztemperatur, allerdings liegt die Glasübergangstemperatur bei etwa +158 °C, die Fließtemperatur herkömmlicher Polycarbonate bei etwa +240 °C. Vergleiche Herrlich 1999, Teil 7 Kapitel 2.3.1, Seite 3.

Die Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit Dünnglas Optiwhite erreichen mit dem Querschnittsaufbau P6B und P8B die Baustoffklasse B2. Sind brandschutztechnische Anforderungen an das Einsatzgebiet der Verbundtafel gestellt, müssen weitergehende Untersuchungen durchgeführt und der Querschnitt optimiert werden.¹⁷²

9.6 Schallschutz

Ein Großteil der Bevölkerung fühlt sich in der unmittelbaren Umgebung durch Lärm¹⁷³ persönlich beeinträchtigt. Nach einer repräsentativen Erhebung des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit aus dem Jahr 2018 sind 75 % der Befragten durch Straßenlärm, 42 % durch Luftverkehr und 35 % durch Schienenverkehr gestört. Insgesamt geben 89 % der Befragten an, durch unterschiedliche Lärmquellen belastigt zu werden.¹⁷⁴ Darüber hinaus führt Lärm zu gesundheitlichen Schäden. Mögliche Langzeitfolgen chronischer Lärmbelastung sind Gehörschäden aber auch Herz-Kreislauf-Erkrankungen, Bluthochdruck oder Herzkrankheiten.¹⁷⁵

Die Bauakustik beschäftigt sich mit der Schallausbreitung innerhalb baulicher Anlagen und zwischen dem Innen- und Außenraum. Damit beeinflusst die Bauakustik maßgeblich die Gesundheit und das Wohlbefinden der Nutzer. Schall beschreibt eine durch mechanische Schwingungen hervorgerufene, sich fortpflanzende Wellenbewegung in einem elastischen Medium wie Gas, Flüssigkeit oder Festkörper. Die Wahrnehmung des Schalls erfolgt im menschlichen Ohr über die drei elastisch gelagerten Gehörknöchelchen in einem bestimmten Frequenzbereich von der Hör- bis zur Lärmschwelle. Der menschliche Hörbereich liegt etwa zwischen 16 Hz und 20.000 Hz, die Bauakustik konzentriert sich mit den üblichen Einflussgrößen vorwiegend auf einen kleineren Bereich zwischen 100 Hz bis 3.150 Hz. Die Auswertung von Isophonen¹⁷⁶ zeigt, dass das menschliche Gehör bei etwa 4.000 Hz die größte Empfindlichkeit besitzt. Die Empfindung der Lautstärke ist subjektiv und abhängig vom Schalldruckpegel und der Frequenz.

Schall lässt sich nach leitender Stoffart in Luft- und Körperschall unterteilen. Luftschall sind Schallwellen, die sich über die Luft ausbreiten, Körperschall breiten sich hingegen im Festkörper aus. DIN 4109-1 legt Mindestanforderungen an die Schalldämmung von Bauteilen und die zulässigen Schallpegel in Wohn- und

¹⁷² Vergleiche Weimar 2021a, Seite 49 ff. Zusätzlich lassen sich die Brandschutzeigenschaften von Polycarbonat mit der Zugabe von Additiven erhöhen, vergleiche Domininghaus 2012, Seite 718 f. und Seite 735 f.

¹⁷³ Lärm ist jede Art von Schall, der störend, lästig oder schmerzhaft empfunden wird.

¹⁷⁴ Vergleiche Rubik 2020.

¹⁷⁵ Vergleiche Umweltbundesamt 2020.

¹⁷⁶ In einer Isophonengrafik werden Linien gleicher Lautstärkewahrnehmung und in Bezug zum Schalldruckpegel und der Frequenz dargestellt. Mit den Isophonen wird beschrieben, welcher Schalldruckpegel für einen Ton bei welcher Frequenz notwendig ist, um jeweils denselben Lautstärkeindruck zu generieren. Vergleiche DIN ISO 226.

Nichtwohngebäuden fest. Die Angaben beschreiben Mindestmaßnahmen zum Schutz von Menschen in einem Raum vor Geräuschen von außerhalb. Die Erwartungen der Nutzer liegen teilweise deutlich höher als der gesetzlich vorgeschriebene und wirtschaftliche Schallschutz.

Als raumabschließendes Element wird bei einer Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel die Luftschalldämmung betrachtet. Schallwellen aus der äußeren Umgebung wirken als Druckschwankungen auf die Verbundtafel und regen diese zum Schwingen an. Über die Schwingung wird Luftschall an den innenliegenden Bereich abgegeben und gelangt schließlich zum menschlichen Ohr. Die Luftschalldämmung von Bauteilen ist somit im Fassadenbereich maßgebend. Das Luftschalldämm-Maß R kennzeichnet das 10-fache logarithmische Verhältnis der Schall-Leistungen auf beiden Seiten des Mehrschichtsystems. Das Luftschalldämm-Maß beschreibt das Vermögen eines Bauteils, den Schall zwischen zwei schallführenden Medien zu dämmen. Das bewertete Schalldämm-Maß R_w wird anschließend durch Vergleich zu einer festgelegten Bezugskurve nach DIN EN ISO 717-1 angegeben. Das normative Bewertungsverfahren berücksichtigt die Empfindlichkeit des menschlichen Gehörs bei niedrigeren Frequenzen weniger empfindlich zu reagieren als bei höheren Frequenzen.

Die Luftschalldämmung einschaliger Bauteile verbessert sich nach dem Berger'schen Massengesetz mit steigender, flächenbezogener Masse. Weiterhin verbessert eine niedrige Scheibensteifigkeit den Schalldämmwert und wird durch weiche Zwischenschichten realisiert. Im Zusammenwirken mit der Rahmenkonstruktion und der Weiterverarbeitung zu Mehrscheiben-Isoliergläsern mit Gasfüllung werden somit bewertete Schalldämm-Maße von über 50 dB erreicht.

Die Untersuchung des Luftschalldämm-Maßes nach DIN EN ISO 10140-2 wird an Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln als Einfachglas mit den Querschnittsaufbauten einer angriffhemmenden Verglasung der Widerstandsklassen P6B und P8B im Normformat im Fensterprüfstand durchgeführt. Die Auswertung der Messungen und die Bestimmung der Einzahlangaben R_w , C und C_{tr} erfolgen anschließend nach DIN EN ISO 717-1.¹⁷⁷

Das Ergebnis der Prüfung des Luftschalldämm-Maßes kann für eine nachfolgende Klassifizierung im Hinblick auf die Schalldämmung, zum Vergleich der Schalldämmeigenschaften von Bauteilen und zur Abschätzung der Leistung im eingebauten Zustand herangezogen werden. Die Messung erfolgt dabei in einem Prüfstand ohne Schallübertragung über Flankenwege. Deshalb sind die

¹⁷⁷ Mit dem Anpassungsbeiwert C sind Lärmquellen aus Wohnaktivitäten, Kinderspielen, Schienenverkehr mit mittlerer und hoher Geschwindigkeit, Autobahnverkehr mit mehr als 80 km/h, Düsenflugzeuge in kleinem Abstand sowie Betriebe, die überwiegend mittel- und hochfrequenten Lärm abstrahlen, berücksichtigt. Der Anpassungsbeiwert C_{tr} setzt sich aus Lärmquellen aus städtischem Straßenverkehr, Schienenverkehr mit geringer Geschwindigkeit, Propellerflugzeuge, Düsenflugzeuge mit großem Abstand, Discomusik sowie Betriebe, die überwiegend tief- und mittelfrequenten Lärm abstrahlen, zusammen. Vergleiche DIN EN ISO 717-1.

Messungen nicht direkt auf das eingebaute Bauteil übertragbar. Die Messung des Luftschalldämm-Maßes findet in zwei vertikal angrenzende Räume mit mindestens 50 m³ statt. Der Prüfkörper wird in eine Öffnung in der Trennwand zwischen beiden Räumen eingebaut. Im Senderraum ist mit Hilfe von Lautsprechern ein diffuses Schallfeld¹⁷⁸ zu erzeugen und sowohl im Sender- als auch im Empfängererraum der Schalldruckpegel in einem Frequenzbereich von 100 Hz bis 5.000 Hz in Terzbandfiltern zu messen. Die erhaltenen Messergebnisse werden in einem Frequenz-Schalldämmmaß-Diagramm aufgezeichnet und mit Verschiebung der Bezugskurve aus DIN EN ISO 717-1 zur Deckung gebracht. Der Wert bei 500 Hz der verschobenen Bezugskurve entspricht dem bewerteten Luftschalldämm-Maß. Bild 102 zeigt den am Rand verkitteten Einbau einer Verbundtafel in den Normprüfstand mit Blick vom Empfänger- zum Senderraum.



Bild 102

Einbauzustand einer Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel mit Blick vom Empfänger- zum Senderraum.

Die Messungen des Luftschalldämm-Maßes werden bei Müller-BBM GmbH in Planegg bei München durchgeführt. Dazu wird jeweils ein Prüfkörper mit einer Widerstandsklasse P6B und P8B gegen manuellen Angriff in den Abmessungen von 1.230 mm auf 1.480 mm geprüft. Tabelle 63 zeigt den Querschnitt der Prüfkörper sowie die Nenn- und Realdicke.

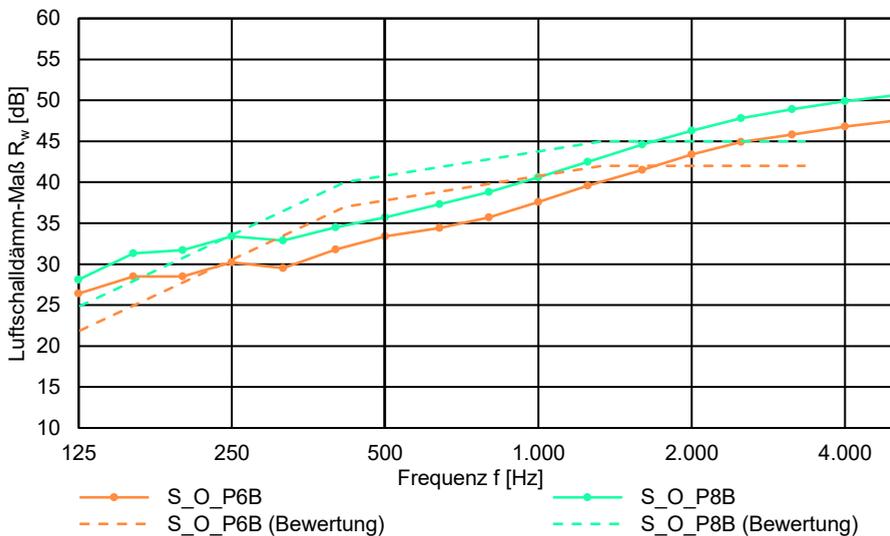
¹⁷⁸ Bei einem diffusen Schallfeld ist der Schallintensitätsfaktor während der Messung gleichmäßig und somit isotrop verteilt.

Tabelle 63

Querschnittsaufbau, Nenn- und Realdicke sowie Abmessungen der Prüfkörper für die Bestimmung des Luftschalldämm-Maßes nach DIN EN ISO 10140-2.

Prüfkörper	Querschnitt	Nenndicke	Realdicke
S_O_P6B	2 mm FG 2 mm TPU 5 mm PC 2 mm TPU 2 mm FG	13,0 mm	12,6 mm
S_O_P8B	2 mm FG 2 mm TPU 5 mm PC 2 mm TPU 5 mm PC 2 mm TPU 2 mm FG	20,0 mm	19,2 mm

Während der Prüfung liegt eine durchschnittliche Temperatur von +22 °C und eine relative Luftfeuchtigkeit von 49 % rF vor. Bild 103 zeigt die Ergebnisse beider Messungen der Luftschalldämmung mit der verschobenen Bezugskurve. Das Luftschalldämm-Maß R_w ergibt sich als Einzahlwert der verschobenen Bewertungskurve bei einer Frequenz von 500 Hz.

**Bild 103**

Ergebnis der Untersuchung der Luftschalldämmung nach DIN EN ISO 10140-2 für Dünnglas-Poly-carbonat-Verbundtafeln S_O_P6B und S_O_P8B.

Der Prüfkörper S_O_P6B weist ein Luftschalldämm-Maß R_w von 38 dB auf. Für S_O_P8B lässt sich ein Luftschalldämm-Maß von 41 dB bestimmen. Die Beiwerte C und C_{tr} sind in Tabelle 64 angegeben.

Mit DIN EN 12758 steht eine Norm zur Produktbeschreibung von Glas und Luftschalldämmung zur Verfügung und zeigt die auf dem Labormessverfahren von DIN EN ISO 10140-2 beruhenden Ergebnissen zur Luftschalldämmung. Die Werte dürfen verwendet werden, sofern keine weiteren Ergebnisse aus Messungen oder von dem Hersteller zur Verfügung stehen. Die typischen Luftschalldämm-Maße werden als Mittelwert der Messwerte unter Berücksichtigung einer

Standardabweichung für Verbundgläser ohne akustisch wirksame Zwischenschicht abgeleitet. Ein Vergleich zwischen der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel mit einer monolithischen Glastafel erfolgt über das flächenbezogene Gewicht. Tabelle 20 zeigt für den Prüfkörper eine äquivalente Glasdicke. Das spezifische Gewicht von Glas ist mit 2.500 kg/m^3 angenommen und das Luftschalldämm-Maß bei 500 Hz ausgewertet. Für eine Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel ergibt sich ein bis zu 7 dB verbessertes Luftschalldämm-Maß im Vergleich zu einer monolithischen Glastafel gleicher Eigenlast. Besonders die elastische Zwischenschicht wirkt sich günstig auf den Schallschutz aus.¹⁷⁹

Tabelle 64

Vergleich des Luftschalldämm-Maßes einer Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel mit einer monolithischen Glastafel mit äquivalentem Eigengewicht nach DIN EN 12758.

Prüfkörper	Gewicht	Äquivalente Glasdicke	Schalldämmmaß R_w (C; C_{tr})	
			Standardisierter Wert (monolithisches Glas)	Gemessener Wert (Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel)
S_O_P6B	20 kg/m ²	8 mm	32 dB (-2 dB; -3 dB)	38 dB (-1 dB; -3 dB)
S_O_P8B	29 kg/m ²	12 mm	34 dB (-1 dB; -2 dB)	41 dB (-1 dB; -4 dB)

Im Vergleich zu herkömmlichen Verbundsicherheitsglas als Sicherheitssonderverglasungen gleicher Widerstandsklasse gegen manuellen Angriff zeigt sich in Bild 104 und Bild 105, dass obwohl das Eigengewicht um bis zu 64 % geringer ist, die Luftschalldämmung einer Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel um lediglich 1 dB bis 2 dB niedriger ausfällt. Somit überwiegen die Vorteile des reduzierten Eigengewichts mit geringerer Nenndicke bei nahezu gleichbleibendem Schallschutz.

¹⁷⁹ Vergleiche Weimar 2021a, Seite 54 ff.

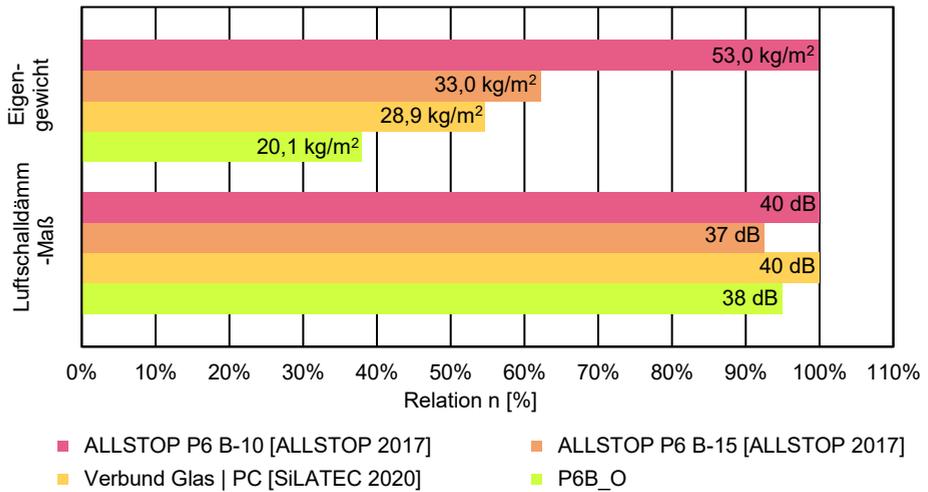


Bild 104

Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit Widerstandsklasse P6B gegen manuellen Angriff im Vergleich zu herkömmlicher Sicherheitssonderverglasung aus Glas-Verbund sowie Glas-Polycarbonat-Verbund in Bezug auf das Eigengewicht und das Luftschalldämm-Maß R_w .

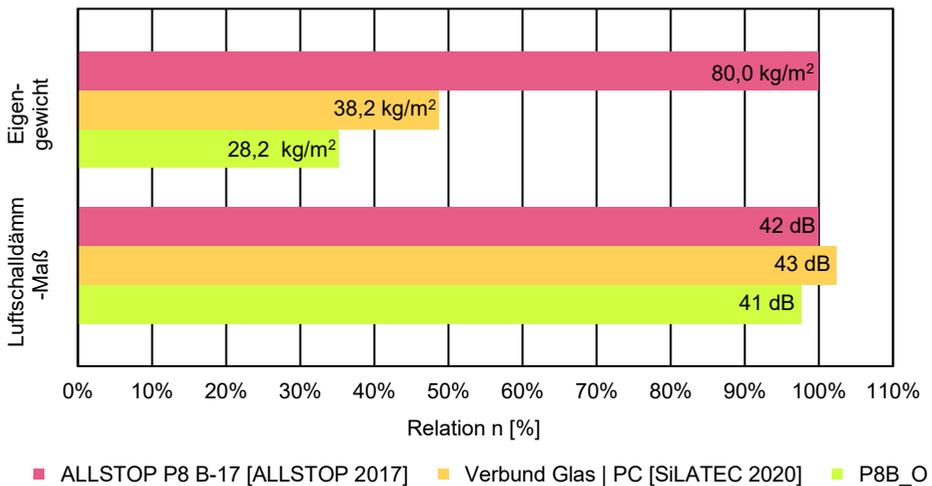


Bild 105

Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit Widerstandsklasse P8B gegen manuellen Angriff im Vergleich zu herkömmlicher Sicherheitssonderverglasung aus Glas-Verbund sowie Glas-Polycarbonat-Verbund in Bezug auf das Eigengewicht und das Luftschalldämm-Maß R_w .

9.7 Temperaturbeanspruchung

Die Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel besteht aus drei unterschiedlichen Materialien, bei denen die polymeren Schichten zeit-, temperatur- und belastungs-

abhängige Materialkennwerte aufweisen. Den Nachweis der Beständigkeit unter hoher Temperatur für ein Verbundsicherheitsglas bestehen die Verbundtafeln. Allerdings ist die Lagerung bei +100 °C an kleinteiligen Prüfkörpern mit den Abmessungen von 150 mm auf 300 mm durchgeführt.¹⁸⁰ Die Betrachtung des Mehrschichtsystems als leistungsfähige Alternative zu Sicherheitssonderverglasungen und Verbund- sowie Verbundsicherheitsglas erfordert die Begrenzung der Scherung in der Zwischenschicht bei einer Temperaturbeanspruchung für auch für größere Abmessungen. Bereits bei Raumtemperatur ist der thermische Längenausdehnungskoeffizient von Polycarbonat um den Faktor 7 größer als der Kennwert von Glas. Dadurch muss die Zwischenschicht infolge Temperaturexpansion eine entsprechende Nennstärke und Flexibilität mit niedrigem Elastizitätsmodul und hohem Wärmeausdehnungskoeffizienten aufweisen. Beide Kennwerte verlaufen für die polymeren Schichten allerdings nichtlinear über den üblichen Anwendungsbereich.¹⁸¹

Der thermische Längenausdehnungskoeffizient für die Zwischenschicht aus Polyurethan ist mit einer thermomechanischen Analyse (TMA) in einem Temperaturbereich von -60 °C bis +115 °C bei einer Heizrate von +3 K/min und einer mechanischen Beanspruchung der Probe während der Messung mit einer Last von 0,05 N bestimmt. Der mittlere thermische Längenausdehnungskoeffizient der Zwischenschicht stellt sich bei Raumtemperatur mit $223,5 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ ein.¹⁸² Der thermische Längenausdehnungskoeffizient für Polycarbonat ist über die Dilatometrie (DIL) nach DIN 53752 ermittelt und an einem Prüfkörper der Nennlänge 20 mm in einem Temperaturbereich von -80 °C bis +120 °C bei einer Heizrate von +1 K/min bestimmt. Dabei ist der Kunststoff in die Probenaufnahme eines horizontalen Schubstangendilatometers Linseis L75 eingespannt und mit einer konstanten Anpresskraft von 0,25 N zwischen Stempel und Probe über den gesamten Temperaturbereich belastet. Bild 106 zeigt den Verlauf des thermischen Längenausdehnungskoeffizienten von Polyurethan und Polycarbonat in einem Bereich von -60 °C bis +120 °C. Der Verlauf des Kennwertes von Polycarbonat verläuft nahezu linear, während der Wärmeausdehnungskoeffizient des Polyurethans im Bereich von etwa -50 °C bis +40 °C nichtlinear ansteigt. Bei höheren Temperaturen gibt es einen weiteren Anstieg des Wärmeausdehnungskoeffizienten.

¹⁸⁰ Vergleiche Kapitel 5.2.

¹⁸¹ Die Querdehnzahl polymerer Werkstoff ist ebenfalls zeit-, temperatur- und belastungsabhängig. Allerdings wird der Einfluss der temperaturabhängigen Querdehnzahl auf das Ergebnis vernachlässigt und mit den Kennwerten bei Raumtemperatur gerechnet.

¹⁸² Vergleiche Weimar 2011, Seite 108 f.

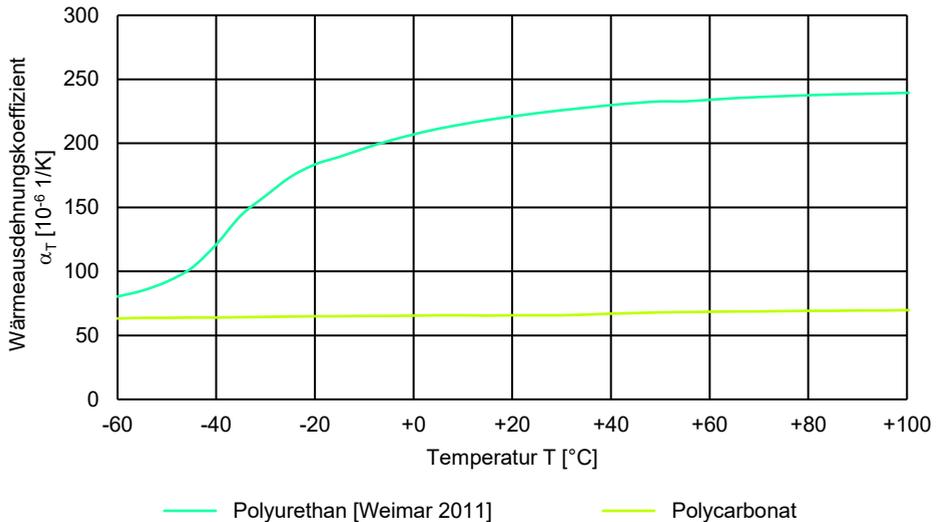


Bild 106

Wärmeausdehnungskoeffizient in Abhängigkeit der Temperatur für Polyurethan nach Weimar 2011 mit einer Thermomechanischen Analyse (TMA) und für Polycarbonat Lexan 9030 mit einer Dilatometrie (DIL).

Der temperaturabhängige Verlauf des Elastizitätsmoduls des thermoplastischen Polyurethans und des Polycarbonates lassen sich aus den Untersuchungen mit der dynamisch-mechanisch-thermischen Analyse (DMTA) ableiten.¹⁸³ Bild 107 zeigt den Verlauf des Speichermoduls E' von Polycarbonat und Polyurethan. Der Speichermodul E' entspricht bei einer einmaligen zügigen und niedrigen Belastung bei reversibler Verformung ungefähr dem Elastizitätsmodul.¹⁸⁴ Der Verlauf des Speichermoduls E' der Zwischenschicht zeigt einen deutlichen Abfall nach dem Glasübergang. Der Speichermodul nimmt einen nahezu konstanten Wert an und verändert sich für das thermoplastische Polyurethan bei weiterer Erwärmung nicht mehr. Für die Berechnung der Temperaturdehnungen in der Zwischenschicht wird ein Elastizitätsmodul auf Grundlage der Ergebnisse zur Untersuchung des Tragverhaltens auf der sicheren Seite angenommen. Der Speichermodul E' des Polycarbonats fällt annähernd linear im Bereich von -20 °C bis $+60\text{ °C}$ ab. Im Glasübergang reduziert sich der Speichermodul in einem engen Temperaturbereich mit einsetzendem entropieelastischen Bereich.¹⁸⁵

¹⁸³ Vergleiche Kapitel 4.

¹⁸⁴ Es wird für die numerische Berechnung diese Annahme angesetzt. Vergleiche Ehrenstein 2011, Seite 182.

¹⁸⁵ Der Verlauf des Speichermoduls E' stimmt qualitative mit Literaturwerten aus Dominghaus 2012, Seite 724 überein.

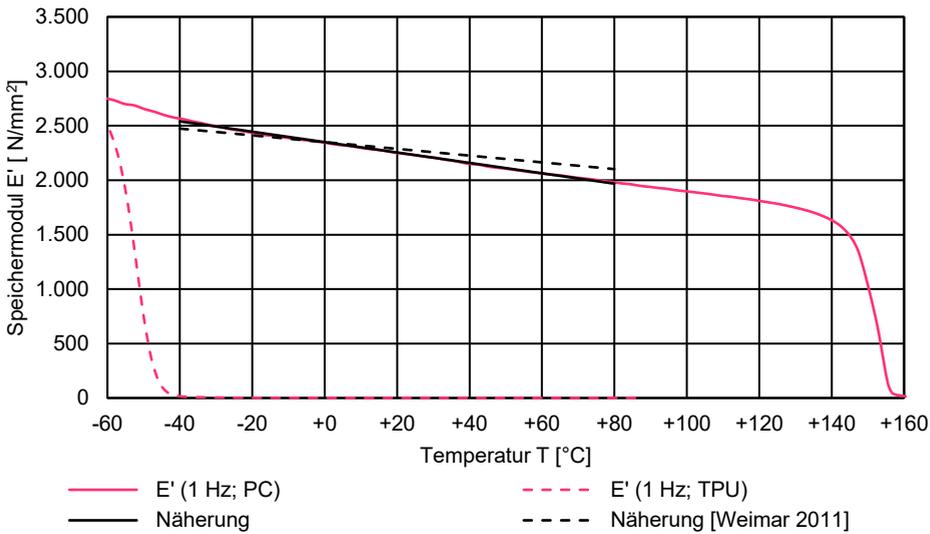


Bild 107

Darstellung des Verlaufs des Speichermoduls von E' bei 1 Hz von Polycarbonat (PC) und thermoplastischem Polyurethan (TPU).

Für den Verlauf des Speichermoduls von Polycarbonat ist näherungsweise eine linearer Zusammenhang zwischen Speichermodul und Temperatur aufgestellt.¹⁸⁶ Aus der Messung des Speichermoduls erfolgt eine Näherungsfunktion mit linearem Ansatz mit Gleichung 37.

$$E(T) = 2.350 \text{ N/mm}^2 - 4,77 \text{ N}/(\text{mm}^2 \cdot \text{K}) \cdot T \quad \text{Gleichung 37}$$

Im Vergleich zur Näherung nach Weimar¹⁸⁷ zeigt sich eine betragsmäßig höhere Steigerung der linearen Gerade. Die Näherung nach Weimar überschätzt die Steifigkeit des Polycarbonates um bis zu 7 %. Es wird für die numerische Berechnung daher der mit Gleichung 37 gegebene Verlauf des Elastizitätsmoduls angesetzt. Der Unterschied zwischen beiden Ansätzen lässt auf das Prüfverfahren und die Prüfgeometrie zurückzuführen.

Die Berechnung der Scherung infolge Temperatur ist über eine numerische Berechnung auf Grundlage der Finite-Elemente-Methode (FEM) mit dem Programm Ansys Workbench 2020 R2 durchgeführt. Dabei sind die Temperaturlastfälle mit $\Delta T = \pm 40 \text{ K}$ bei einer Herstellungstemperatur von $+20 \text{ °C}$ betrachtet.¹⁸⁸ Die Untersuchung zum Tragverhalten zeigt einen ansetzbaren Schubmodul der Zwischenschicht im Mehrschichtsystem. Dabei liegt der Schubmodul aus der

¹⁸⁶ Die Näherungsfunktion ist für eine genauere Abbildung des Verlaufs um $\pm 20 \text{ K}$ um den betrachteten Temperaturbereich von -20 °C bis $+60 \text{ °C}$ erweitert.

¹⁸⁷ Vergleiche Weimar 2011, Seite 73.

¹⁸⁸ Die Temperaturdifferenz von $\Delta T = \pm 40 \text{ K}$ orientiert sich an den Vorgaben der Temperatur der Zwischenschicht mit -20 °C und $+60 \text{ °C}$ nach DIN EN 16613.

Untersuchung im Vierpunkt-Biegeversuch bei Werten zwischen $0,15 \text{ N/mm}^2$ und $0,17 \text{ N/mm}^2$. Die Berechnungen sind deshalb mit Werten für den Schubmodul von $0,15 \text{ N/mm}^2$ und $0,20 \text{ N/mm}^2$ durchgeführt, um den Einfluss einer Schubübertragung auf das Ergebnis zu untersuchen, ohne dabei unrealistische Werte anzunehmen. Die Nenndicke der Zwischenschicht ist mit 2 mm vorgegeben. Allerdings zeigen Messungen der Einzelschichten einen geringeren Wert der Zwischenschicht. Die Berechnungen der Scherung der Zwischenschicht infolge Temperatureinfluss auf die Verbundtafel erfolgt beispielhaft für die Abmessungen einer Polycarbonattafel von 2.050 mm auf 3.050 mm. Als Dünnglas ist Optiwhite mit einer Nenndicke von 2 mm angesetzt, die Polycarbonattafel mit einer Nenndicke von 5 mm. Der Querschnitt entspricht somit der Widerstandsklasse P6B gegen manuellen Angriff. Tabelle 65 fasst die Berechnungen zur Scherung der Zwischenschicht infolge Temperatur zusammen.

Tabelle 65

Lastfälle für die Berechnung der Scherung der Zwischenschicht infolge Temperatur der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel der Widerstandsklasse P6B.

Abmessung	Aufbau	Schubmodul der Zwischenschicht	Temperatur
2.050 mm x 3.050 mm	2 mm FG TPU 5 mm PC TPU 2 mm FG	0,15 N/mm ² 0,20 N/mm ²	+20 °C auf +60 °C $\Delta T = +40 \text{ K}$
2.050 mm x 3.050 mm	2 mm FG TPU 5 mm PC TPU 2 mm FG	0,15 N/mm ² 0,20 N/mm ²	+20 °C auf -20 °C $\Delta T = -40 \text{ K}$
Die Nenndicke des thermoplastischen Polyurethans liegt bei 1,85 mm, 1,95 mm oder 2,00 mm.			

Die Scherung infolge Temperatureinfluss in der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel wird mit einer gekoppelten thermischen und strukturmechanischen Analyse berechnet. Dazu ist die Doppelsymmetrie des Systems wie in Bild 108 ausgenutzt und ein Viertelmodell in den Abmessungen mit 1.025 mm auf 1.525 mm mit SOLID186-Elementen modelliert. Über die Dicke der schubweichen Zwischenschicht sind mindestens drei Elemente angesetzt, um Verzerrungen realitätsnäher abzubilden.

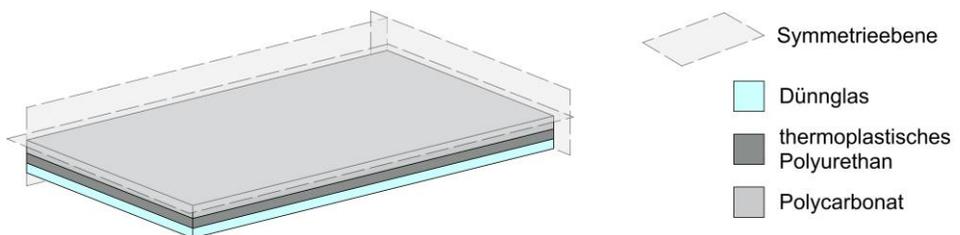


Bild 108

Darstellung zur Ausnutzung der Symmetrie für die numerische Berechnung.

Die Zwischenschicht zeigt infolge unterschiedlicher Wärmeausdehnungskoeffizienten von Glas, Polyurethan und Polycarbonat einen mehrachsigen Dehnungs-

zustand. Die Auswertung erfolgt unter Berücksichtigung großer Verformungen über die Berechnung der Scherung der Zwischenschicht. Die Scherung berechnet sich mit dem Quotienten aus der gemessenen Längenänderung und der Dicke der Zwischenschicht nach Gleichung 38. Zusätzlich ist die Scherung aus statischer Beanspruchung zu berücksichtigen.

$$\gamma = \frac{\Delta l}{t_{TPU}}$$

Gleichung 38

Mit den gewählten Temperaturdifferenzen stellen sich die in Bild 109 gezeigte Verformung ein. Anschließend kann die Scherung berechnet werden.

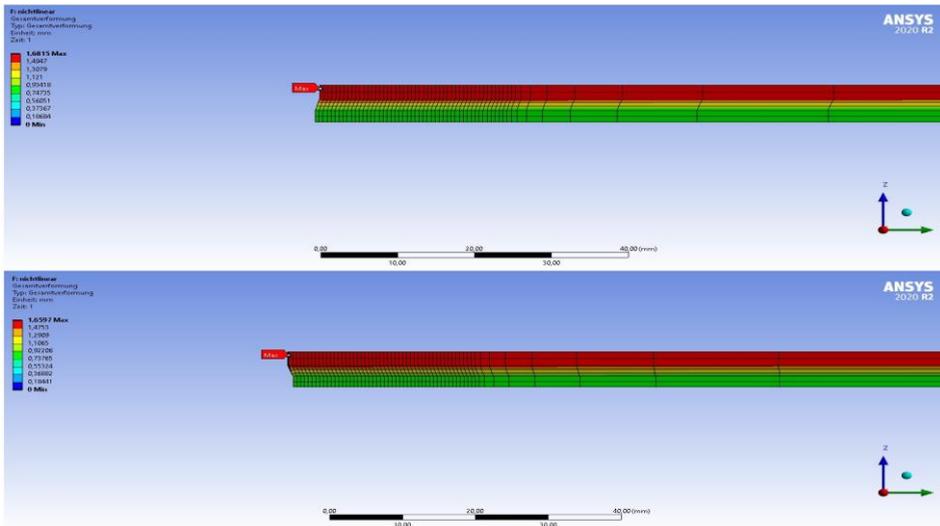


Bild 109

Verlauf der Gesamtverformung an einer Symmetriehälfte einer Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel bei einer Temperaturdifferenz von -40 K (oben) und +40 K (unten).

Bild 110 zeigt die Scherung der Zwischenschicht infolge einer Temperaturdifferenz von +40 K von +20 °C auf +60 °C in einer Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel. Grundsätzlich ist die Scherung bei geringem Schubmodul größer als bei hohem Schubmodul und erreicht bei einer Temperaturdifferenz von $\Delta T = +40$ K Werte zwischen 0,80 und 0,95. Zusätzlich beeinflusst die Dicke der Zwischenschicht die Scherung und nimmt für eine Dicke der Zwischenschicht von 1,85 mm jeweils den höchsten Wert an.

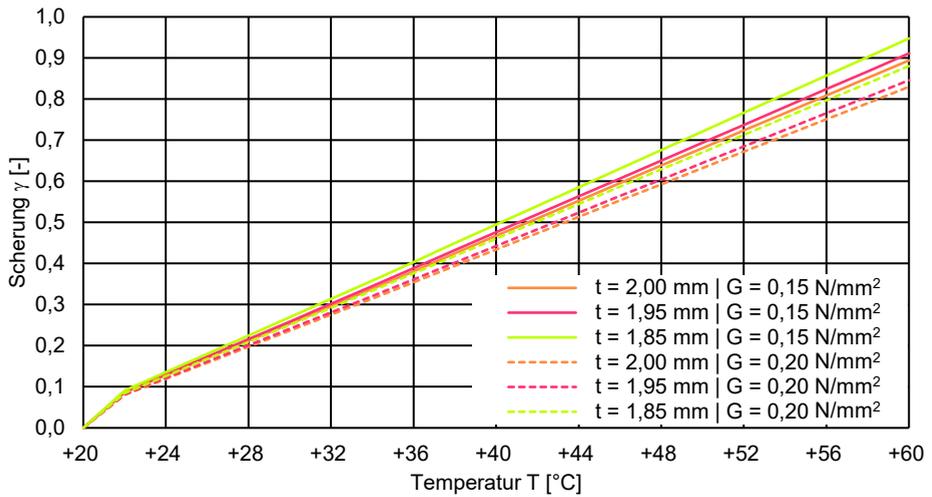


Bild 110

Darstellung der zusätzlichen Scherung der Zwischenschicht der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel der Widerstandsklasse P6B bei einer Temperaturdifferenz von +40 K bei einer Dicke der Zwischenschicht von 1,85 mm, 1,95 mm und 2,00 mm und unterschiedlichem Schubmodul.

Bild 111 zeigt die Scherung der Zwischenschicht infolge einer Temperaturdifferenz von -40 K auf -20 °C in einer Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel. Während bei einer Temperaturreduzierung auf +18 °C noch keine Scherung auftritt, steigt die Scherung bei weiterer Abkühlung an.

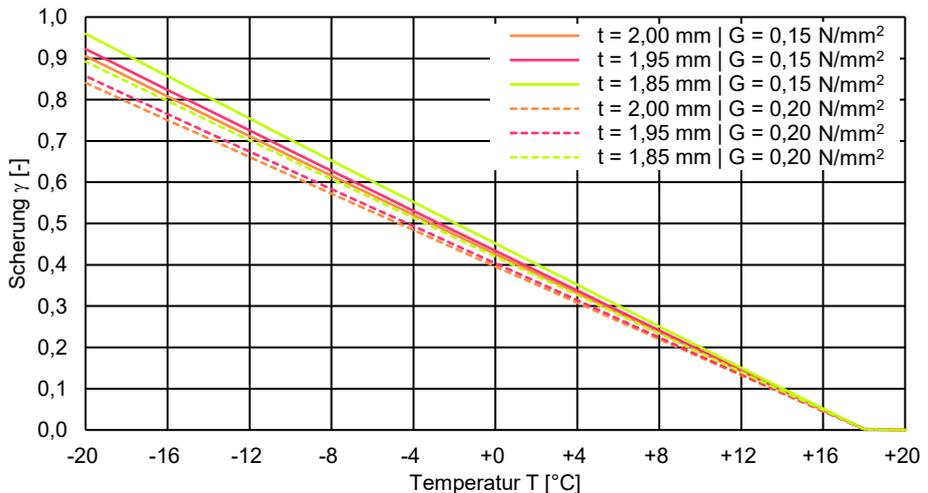


Bild 111

Darstellung der zusätzlichen Scherung der Zwischenschicht der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel der Widerstandsklasse P6B bei einer Temperaturdifferenz von -40 K bei einer Dicke der Zwischenschicht von 1,85 mm, 1,95 mm und 2,00 mm und unterschiedlichem Schubmodul.

Im Vergleich zwischen Verbundtafeln mit einer Nenndicke des Dünnglases von 0,5 mm und 2,0 mm zeigt sich nach Bild 112, dass die Scherung bei dünneren Glastafeln höher ausfallen.

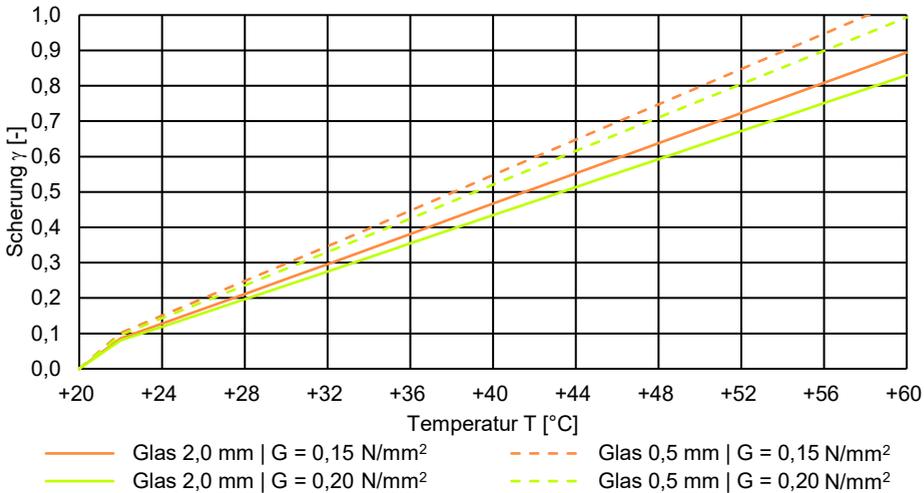


Bild 112

Darstellung der Scherung der der Zwischenschicht der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel der Widerstandsklasse P6B bei einer Temperaturerhöhung von +40 K bei einer Dicke der Glastafel von 0,5 mm im Vergleich zu 2,0 mm mit unterschiedlichem Schubmodul.

Der Schubmodul der Zwischenschicht ergibt sich direkt aus dem Elastizitätsmodul und beeinflusst den Schubverbund im Mehrschichtsystem. Ein hoher Schubmodul führt zu einem steiferen Querschnittsaufbau, es können Delaminationen infolge verminderter Haftung auftreten¹⁸⁹ Ein geringer Schubmodul steigert die Flexibilität der Verbundtafel, führt allerdings zu höheren Hauptzugspannungen im Glas und Durchbiegungen der Verbundtafel.

Bild 113 stellt die sich einstellenden Spannungen infolge unterschiedlichem Schubmodul der Zwischenschicht und Nenndicke der Glastafel dar. Es zeigt sich, dass bei der Verwendung eines Dünnglases von 0,5 mm Nenndicke Hauptzugspannungen etwa um den Faktor 4 größer eintreten als unter Verwendung von Glas mit der Nenndicke von 2,0 mm.

¹⁸⁹ Die Haftung der Zwischenschicht an Kalk-Natronsilikatglas ist an dieser Stelle nicht experimentell untersucht. Mit der Verwendung von Haftvermittlern auf dem Glas könnte sich die Haftung weiter steigern.

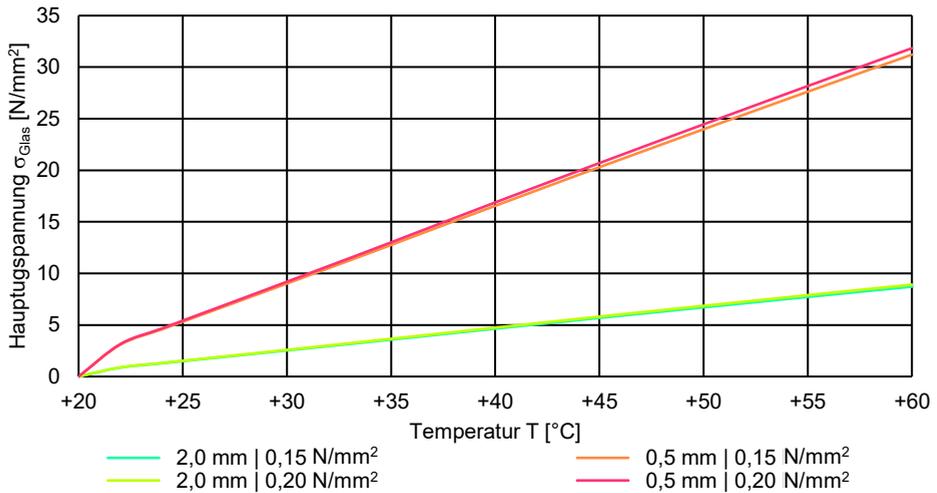


Bild 113

Darstellung der Hauptzugspannungen im Glas infolge zusätzlicher Dehnung in der Zwischenschicht der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel der Widerstandsklasse P6B bei einer Temperaturdifferenz von +40 K bei einer Dicke der Glastafel von 0,5 mm im Vergleich zu 2,0 mm mit unterschiedlichem Schubmodul.

Eine Temperaturdifferenz von ± 40 K führt im Verbund zu einer Ausdehnung der Polycarbonat- und der Glastafel. In Abhängigkeit des Schubmoduls der Zwischenschicht entsteht eine zusätzliche Scherung im thermoplastischen Polyurethan, die aufzunehmen und bei einer Anwendung der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel zu berücksichtigen ist. Im Vergleich zu einem herkömmlichen Verbundsicherheitsglas stellt sich somit eine dickere Schichtdicke des Polyurethans ein. Eine Begrenzung der maximalen Abmessung kann über eine Begrenzung der Scherung des thermoplastischen Polyurethans erfolgen. Die Anwendung der Verbundtafel als Sicherheitssonderverglasung sieht einen Einsatz im Innenbereich und in der Gebäudehülle vor. Während im Inneren vorwiegend ein Einfachglas eine Anwendung findet, erfordert der Einsatz in der Gebäudehülle ein Mehrscheiben-Isolierglas. Zur Vermeidung erhöhter Temperaturbeanspruchung ist die Anwendung als innenliegendes Glaspaket des Mehrscheiben-Isolierglases sinnvoll. Dadurch reduzieren sich die minimale und maximale Temperatur der Zwischenschicht, die Ausdehnung wird geringer. Bisherige Erfahrungen in der Praxis zeigen an großformatigen Verbundtafeln aus Dünnglas und Polycarbonat deshalb kein Versagen aufgrund der Temperaturdifferenz.

Europäisch genormt sind Anforderungen an die Tragsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit von Tragwerken. Ergänzt werden die Vorschriften über Nationale Anhänge und länderspezifische Fachnormen. DIN EN 1990 legt die Grundlagen der Tragwerksplanung fest und gibt Hinweise für die Nachweise in den entsprechenden Grenzzuständen. DIN 18008-1 beschreibt die Bemessungs- und Konstruktionsregeln für Glas im Bauwesen mit einem semiprobabilis-

tischen Teilsicherheitskonzept¹⁹⁰ und dem Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT), dem Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG) und dem Nachweis der Resttragfähigkeit.

Bei einer Glas-Polycarbonat-Verbundtafel sind Bemessungsempfehlungen für den statischen Nachweis in der ständigen Kombination im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) mit einem Spannungsnachweis und der charakteristischen Kombination im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG) mit einem Verformungs- und Dehnungsnachweis bereits beschrieben.¹⁹¹ Eine Begrenzung der Scherung der Verbundtafel unter Temperaturbeanspruchung lässt sich dem Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG) mit der charakteristischen Kombination zuordnen. Eine Beanspruchung E_d wird mit dem Gebrauchstauglichkeitskriterium C_d in Gleichung 39 verglichen.

$$E_d \leq C_d = \frac{\gamma}{\gamma_M}$$

Gleichung 39

Der charakteristische Wert der Scherung ergibt sich nach einer statistischen Auswertung aus dem arithmetischen Mittel der Ergebnisse aus Scherversuchen bei unterschiedlicher Temperatur. Dabei sind jeweils fünf Prüfkörpern als Glas-Glas-Verbund und Polycarbonat-Polycarbonat-Verbund mit Temperaturen von -25 °C , $\pm 0\text{ °C}$, $+25\text{ °C}$, $+50\text{ °C}$ und $+75\text{ °C}$ einer Scherbeanspruchung ausgesetzt und die Verformung und Kraft gemessen.¹⁹² Die Mittelwertkurven der Proben zeigen bis zu einer Scherung von 0,7 sowohl zur Glas- als auch Polycarbonatoberfläche eine gute Übereinstimmung.¹⁹³ Als Gebrauchstauglichkeitskriterium ergibt sich bei einem Sicherheitsbeiwert auf der Materialseite γ_M von 1,0 für eine erste Betrachtung ein Wert von 0,7. Anschließend lässt sich die Einwirkung aus der numerischen Berechnung mit dem Gebrauchstauglichkeitskriterium vergleichen und es kann eine Eingrenzung des Temperaturbereichs für die Anwendung der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln oder eine Einschränkung der maximalen Abmessungen erfolgen.

Tabelle 66 zeigt das Ergebnis der Auswertung für eine Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel als Einfachglas mit außenliegenden Dünnglastafeln der Nenndicke

¹⁹⁰ Das semiprobabilistische Teilsicherheitskonzept entspricht im Bauwesen dem Sicherheitskonzept der Bemessung in einer statischen Berechnung. Für Glas im Bauwesen sind die Nachweise entsprechend diesem Konzept zu führen. Dabei wird das Bauteil in der Form bemessen, dass es mit angemessener Zuverlässigkeit den planmäßigen Einwirkungen standhält und gebrauchstauglich bleibt. Vergleiche DIN EN 1990.

¹⁹¹ Vergleiche Weimar 2011, Seite 247 ff.

¹⁹² Vergleiche Weimar 2011, Seite 131.

¹⁹³ Unterschiede in der Schubspannung zwischen den beiden Prüfkörpern ist auf den Einfluss der Grenzschicht zwischen der Zwischenschicht und den Fügeteilen zurückzuführen. Die Mittelwertkurven zeigen gemittelte Ergebnisse. Insbesondere bei Raumtemperatur führen die Mittelwertkurven zu Abweichungen. Es empfiehlt sich eine erneute Untersuchung und Auswertung im Scherversuch durchzuführen, auch um das Temperaturspektrum zu erweitern.

2 mm, innenliegendem Polycarbonatkern der Nenndicke 5 mm, verbunden mit jeweils einer Zwischenschicht der Nenndicke 1,85 mm.¹⁹⁴

Tabelle 66

Anwendungsgrenzen für Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln bei einer Temperatur der Zwischenschicht von -20 °C bis +60 °C und unterschiedlichem Schubmodul.

Schubmodul der Zwischenschicht	Temperaturbereich der Zwischenschicht	Maximale Abmessungen der Verbundtafeln
0,15 N/mm ² 0,20 N/mm ²	-20 °C bis -8 °C -20 °C bis -10 °C	950 mm x 1.425 mm
0,15 N/mm ² 0,20 N/mm ²	-8 °C bis +48 °C -10 °C bis +50 °C	2.050 mm x 3.050 mm
0,15 N/mm ² 0,20 N/mm ²	+48 °C bis +60 °C +50 °C bis +60 °C	950 mm x 1.425 mm

Die Scherung der Zwischenschicht hängt von der Temperatur der einzelnen Komponenten der Verbundtafel ab. Es ist notwendig zu überprüfen, bei welcher Außentemperatur die Verbundtafel eine Temperatur von -20 °C beziehungsweise +60 °C erreicht. In der Ausführung finden sich Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln als angriffhemmende Verglasung überwiegend im Mehrscheiben-Isolierglas. Der Temperaturverlauf in einem Mehrscheiben-Isolierglas lässt sich mit dem Glaser-Verfahren¹⁹⁵ ermitteln. Dazu sind Berechnungen mit dem Programm WinSLT 7.26 von Sommer Informatik GmbH¹⁹⁶ an einem Zweischeiben-Isolierglas¹⁹⁷ durchgeführt.¹⁹⁸ Das Ziel ist die Bestimmung der Außentemperatur bei dem eine Oberflächentemperatur der Verbundtafel von -20 °C beziehungsweise +60 °C vorliegt. Zusätzlich ist die Außentemperatur angegeben, die zu einer Oberflächentemperatur der Verbundtafel der Anwendungsgrenzen hinsichtlich der Abmessungen aus Tabelle 66 führt.

Tabelle 67 zeigt die Ergebnisse der Berechnung der Oberflächentemperaturen mit WinSLT für eine innenliegende und außenliegende P6B-Verbundtafel in einem Zweischeiben-Isolierglas. Eine innenliegende Verbundtafel erreicht eine Temperatur von +60 °C bei einer Außentemperatur von +153 °C, während die Oberflächentemperatur von -20 °C bei einer Außentemperatur von -60 °C nicht

¹⁹⁴ Die Nenndicke der Zwischenschicht hat einen Einfluss auf das Ergebnis, da sich die Dicke der Zwischenschicht auf die Scherung nach Gleichung 38 auswirkt.

¹⁹⁵ Mit dem Glaser-Verfahren lässt sich feststellen, ob sich im Inneren eines Bauteils Tauwasser bildet. Dabei wird mit dem Verfahren die Oberflächentemperatur an einer Verglasung berechnet. Vergleiche Sommer Informatik GmbH 2021.

¹⁹⁶ Das Zweischeiben-Isolierglas besteht aus einem Floatglas der Nenndicke 8 mm, einem Scheibenzwischenraum der Nenndicke 14 mm mit 90 % Argonfüllung und einer Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel der Widerstandsklasse P6B gegen manuellen Angriff. Die Lage der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel variiert zwischen innen und außen.

¹⁹⁸ Die Strahlungsleistung ist mit 300 W/m² nach DIN EN ISO 12543-4, der äußere Wärmeübergangskoeffizient mit 25,0 W/(m²K) und der innere Wärmeübergangskoeffizient mit 7,7 W/(m²K) analog zu DIN EN 673 angenommen.

erreicht wird.¹⁹⁹ Die Anforderungen an die Verbundtafel mit einem Schubmodul von 0,15 N/mm² aus der Berechnung der zusätzlichen Scherung zeigen in Tabelle 66 engere Temperaturgrenzen von -8 °C bis +48 °C. Die Oberflächentemperaturen der Verbundtafel von -8 °C wird bei einer Außentemperatur von -60 °C nicht erreicht, für +48 °C an der Verbundtafel muss eine Außenlufttemperatur von +114 °C vorliegen. Beide Lufttemperaturen sind in bewohnten Gebieten nicht vorzufinden. Für eine im außenliegende Verbundtafel stellt sich eine Temperatur des Mehrschichtsystems von +60 °C bereits bei einer Außentemperatur von +76 °C und eine Temperatur von -20 °C bei einer Außentemperatur von -31 °C ein. Die Temperatur der Verbundtafel von -8 °C ist allerdings bereits bei -16 °C beziehungsweise von +48 °C bei +59 °C erreicht.

Tabelle 67

Auswertung der Oberflächentemperatur für ein Zweischeiben-Isolierglas aus 8 mm Floatglas, 14 mm Scheibenzwischenraum mit 90 % Argonfüllung und einer P6B-Verbundtafel auf der Innen- und Außenseite für unterschiedliche Außentemperaturen.

Lage P6B-Verbundtafel	Oberflächentemperatur P6B-Verbundtafel	Außentemperatur
innenliegend	+47,9 °C +60,0 °C	+114,0 °C +153,0 °C
innenliegend	+3,9 °C -8,0 °C	< -60,0 °C < -60,0 °C
außenliegend	+48,1 °C +60,0 °C	+59,0 °C +76,0 °C
außenliegend	-8,0 °C -20,0 °C	-16,0 °C -31,0 °C

In einem Mehrscheiben-Isolierglas als angriffhemmende Sicherheitssonderverglasung liegt die widerstandsfähige Verglasung im Querschnitt zum Innenraum. Die Analyse der auftretenden Oberflächentemperaturen bei der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit unterschiedlichen Außentemperaturen zeigt, dass Abmessungen von 2.050 mm auf 3.050 mm möglich sind. Die innen angebrachte Verbundtafel bietet einen effektiven Schutz vor manuellem Angriff und erfüllt gleichzeitig die geforderten Schutzfunktion gegen Stich- und Schnittverletzung durch eine Splitterbindung. Im Gegensatz dazu unterliegen außenliegende Verbundtafeln im Mehrscheiben-Isolierglas oder Einfachverglasungen mit Temperaturschwankungen von mehr als ±28 K einer Begrenzung der Abmessungen auf 950 mm auf 1.425 mm für den untersuchten Aufbau. Die kleinformatischen Abmessungen steht einer praktische Anwendung als Fassadenelement entgegen, die auf Modernität, Transparenz und Leichtigkeit einer verglasten Gebäudehülle abzielt.

¹⁹⁹ Der Minimalwert der Außenlufttemperatur in WinSLT ist mit -60 °C festgelegt.

9.8 Zusammenfassung

Über die Untersuchung der Zusatzanforderungen der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel sind weitere Eigenschaften bestimmbar. Der Verbund ermöglicht eine schlanke und leichte Sicherheitssonderverglasung mit einem Widerstand gegen manuellen Angriff. Mit dem Axtversuch ist der Querschnitt für die durchbruchhemmende Widerstandsklassen P6B und P8B bestimmt. Der Aufbau bildet die Grundlage für weitere Untersuchungen der lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Eigenschaften, des Wärme-, Brand und Schallschutzes sowie die Analyse der temperaturbedingten Scherung. In Bild 114 und Bild 115 sind die Ergebnisse zusammengefasst und mit einer herkömmlichen Sicherheitssonderverglasung gleicher Widerstandsklassen verglichen. Es zeigt sich, dass die Verbundtafel als leistungsstarke Alternative sowohl in der Widerstandsklasse P6B und P8B einsetzbar ist.

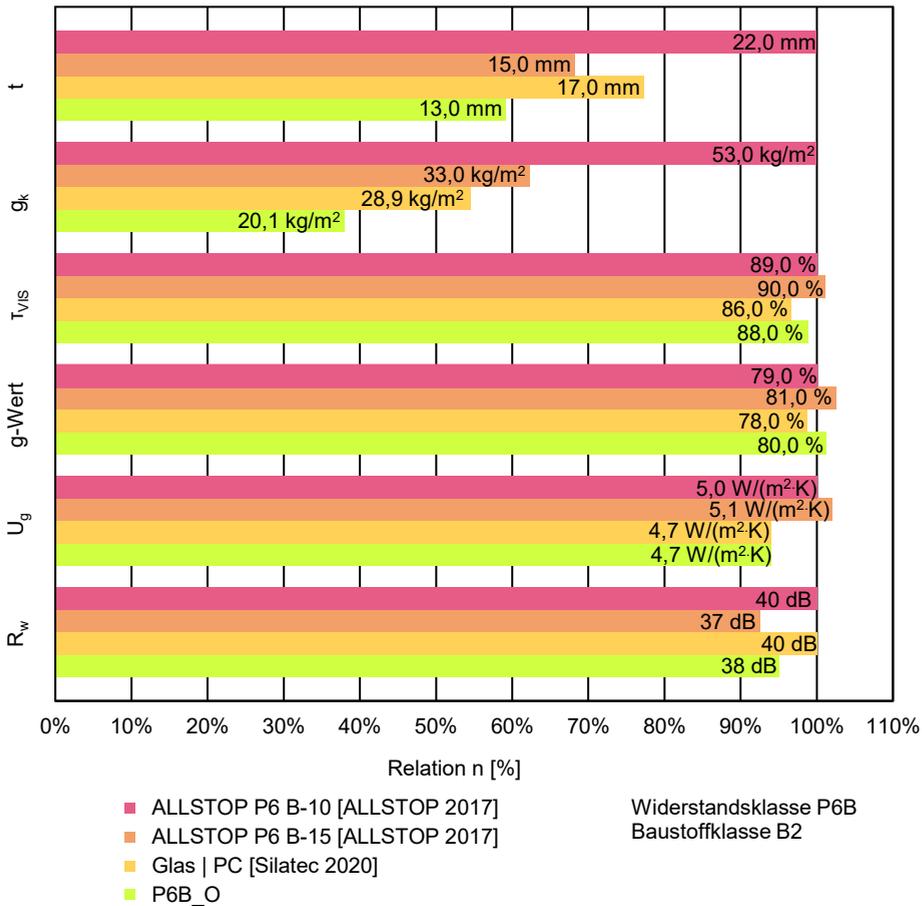


Bild 114

Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit Widerstandsklasse P6B gegen manuellen Angriff im Vergleich zu herkömmlicher Sicherheitssonderverglasung aus Glas-Verbund sowie Glas-Polycarbonat-Verbund mit Angabe der Nenndicke t , der Eigengewicht g_k , des Lichttransmissionsgrades τ_{vis} , des Energiedurchlassgrades g -Wert, des Wärmedurchgangskoeffizienten U_g und des Luftschalldämmmaßes R_w .

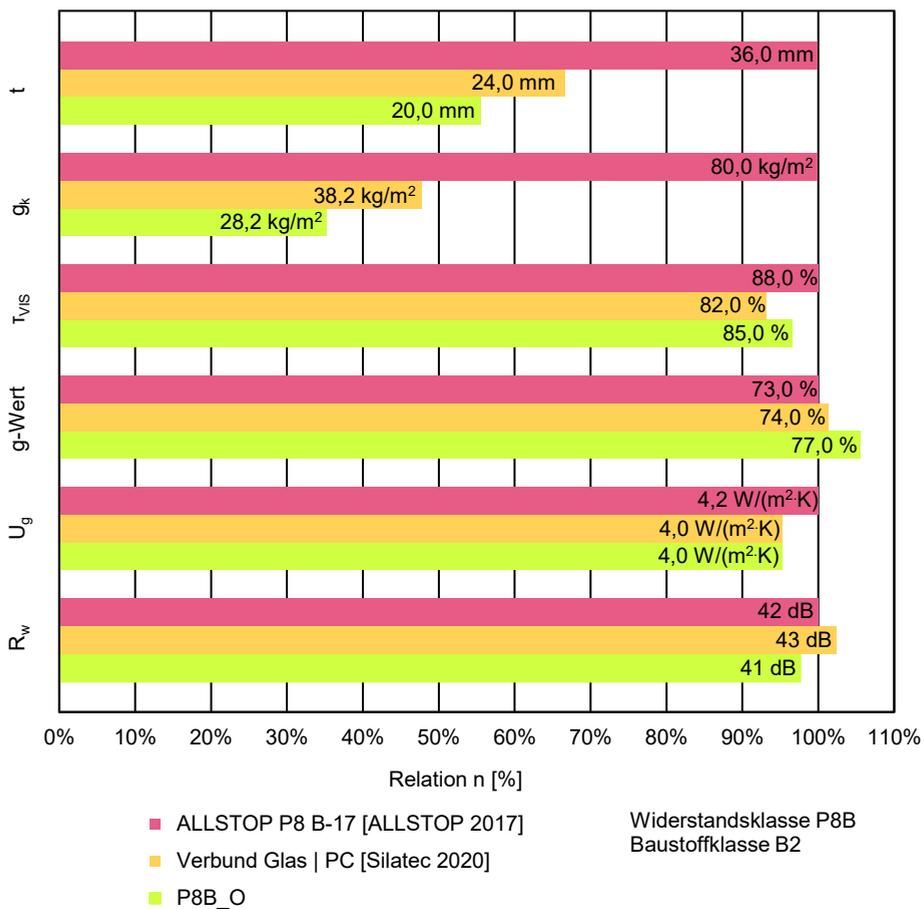


Bild 115

Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit Widerstandsklasse P8B gegen manuellen Angriff im Vergleich zu herkömmlicher Sicherheitssonderverglasung aus Glas-Verbund sowie Glas-Polycarbonat-Verbund mit Angabe der Nennstärke t , der Eigengewicht g_k , des Lichttransmissionsgrades τ_{vis} , des Energiedurchlassgrades g -Wert, des Wärmedurchgangskoeffizienten U_g und des Luftschalldämmmaßes R_w .

10 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit behandelt die Anwendung von Dünnglas im Bauwesen am Beispiel eines Verbundes aus Dünnglas, Polycarbonat und thermoplastischem Polyurethan in einer Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel. Das Mehrschichtsystem lässt sich als Verbundsicherheitsglas nachweisen werden. Trag- und Resttragverhalten sind analysiert und Zusatzanforderungen wie aktive Sicherheit, Wärme-, Schall- und Brandschutz sowie die lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kenngrößen untersucht. Analytische und numerische Berechnungsverfahren werden vorgestellt und angewendet.

Dünnglas weist eine niedrige Querschnittsteifigkeit auf, was bei geringer Belastung zu großen Verformungen und hohen Spannungen führt. Um die charakteristische Festigkeit zu erhöhen, wird eine chemische Vorspannung angewendet. Produktdatenblätter für chemisch vorgespanntes Glas geben hohe Festigkeitswerte als Mindestwerte an. Die Bestimmung der Festigkeit von Dünnglas noch nicht abschließend erforscht. Bei der Anwendung von Dünnglas im Bauwesen müssen konventionelle Anwendungen grundsätzlich neu überdacht werden. Die geringe Querschnittsteifigkeit der Dünnglastafel führt zu großen, unzulässigen und unpraktikablen Durchbiegungen. Daher begrenzt die maximale Verformung der Dünnglastafel die Spannweite und Anwendung. Die konzeptionelle Entwicklung in der Forschung nutzt die Verformbarkeit aus, um dadurch bewegliche Fassadenelemente und geometrische Aussteifungen zu erreichen. Dabei ist die Spannung des Glases für die Realisierbarkeit nicht ausschlaggebend. Die Dünnglastafel verformt sich mit großen Biegeradien und hohen Spannungen, ohne zu brechen. Alternativ lässt sich die Querschnittsteifigkeit der Dünnglastafel durch eine flächige Lamination mit Verglasungsmaterial aus Kunststoff wie Polymethylmethacrylat (PMMA) oder Polycarbonat (PC) erhöhen, während die Transparenz erhalten bleibt.

Eine Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel besteht aus zwei Dünnglastafeln und mindestens einer Polycarbonattafel im Kern, verbunden über eine Zwischenschicht aus thermoplastischem Polyurethan. Insgesamt sind Verbundtafeln mit dem nicht vorgespannten Kalk-Natronsilikatglas Optiwhite mit einer Nenndicke von 2,00 mm und den chemisch vorgespannten Alumo-Silikatgläsern Leoflex mit einer Nenndicke von 0,85 mm sowie Falcon mit einer Nenndicke von 0,50 mm, dem Polycarbonat Lexan 9030 in unterschiedlichen Nenndicken und der Zwischenschicht aus thermoplastischem Polyurethan untersucht. Der Kaltverbund mit einem Gießharz unter Aushärtung bei Raumtemperatur bietet sich an, um auftretende Zwangsspannungen infolge Abkühlung nach dem Warmverbund im Autoklaven zu vermeiden.

Die Verbundtafel erfüllt grundsätzlich die Anforderungen an ein Verbund- und Verbundsicherheitsglas. Für ein Verbundglas ist der experimentelle Nachweis der klimatischen Beständigkeit mit den Prüfungen bei hoher Temperatur, in der Feuchte und unter Bestrahlung zu führen. Verbundsicherheitsglas setzt höhere

Anforderungen an den Verbund und die mechanische Festigkeit mit der Kugelfallprüfung und dem Pendelschlagversuch. Die Verbundtafeln mit dem Dünnglas Optiwhite und dem Dünnglas Leoflex entsprechen den Anforderungen an ein Verbundsicherheitsglas. Für das Verbundglas Falcon ist die Beständigkeitsprüfung im Verbund bei hoher Temperatur aufgrund von auftretenden Delaminationen nicht erfüllt.

Die Untersuchungen zum Trag- und Resttragverhalten werden in Anlehnung an das Vierschneiden-Verfahren nach DIN EN 1288-3 im Vierpunkt-Biegeversuch im intakten Zustand I und im zerstörten Zustand III durchgeführt. Ein planmäßig zerstörter Zustand IIIp ermöglicht einen Vergleich der Resttragfähigkeit. Es werden Querschnittsaufbauten mit zwei Dünngläsern und unterschiedlicher Polycarbonatdicke untersucht. Dabei zeigt die Verbundtafel einen teilweisen Schubverbund mit einem experimentell ermittelten Schubmodul von $0,15 \text{ N/mm}^2$ bis $0,17 \text{ N/mm}^2$. Der Einfluss der Dünnglastafel auf das Tragverhalten und die Gesamtbiegesteifigkeit verringert sich mit steigender Polycarbonatdicke. Bei dem Dünnglas Leoflex als Deckschicht zeigt sich, dass der Spannungsverlauf innerhalb der Glastafel über die gesamte Nenndicke im Druckbereich oder Zugbereich verbleibt. Bei der Verwendung des Dünnglases Optiwhite stellt sich in jeder Glastafel sowohl ein Druck- als auch ein Zugbereich ein. Im Zustand III wird das Resttragverhalten und die Redundanz der Verbundtafel bei zerstörten Glastafeln analysiert. Das Zusammenwirken der Dicke und Größe der Glasbruchstücke in der Druckzone wirkt sich entscheidend auf die Resttragfähigkeit aus. Mit dem Dünnglas Optiwhite ist ein günstigeres Resttragverhalten als mit dem Dünnglas Leoflex nachgewiesen.

Die analytischen und numerischen Ergebnisse zeigen eine hohe Übereinstimmung mit den experimentellen Messwerten. Dabei wird zum Vergleich ein linear-elastisches Materialverhalten mit dem Hooke'schen Gesetz angenommen. Die Sandwichtheorie wird auf einen fünfschichtigen Aufbau mit Deckschichten aus Dünnglas erweitert und eine Näherungslösung für den Querschnitt abgeleitet. Die Ergebnisse aus den analytischen Berechnungen bilden bei linearem Tragverhalten die Verformung und Spannungen ausreichend genau ab. Geometrisch nicht-lineares Tragverhalten ist mit der numerischen Berechnung auf Grundlage der Finite-Elemente-Methode (FEM) berücksichtigt. Dabei werden die numerischen Programme SJ Mepla, RFEM RF-Glas und Ansys verwendet und die Ergebnisse mit denen aus den experimentellen Messungen verglichen. Eine Berechnung kann mit allen Programmen zuverlässig durchgeführt werden. Zusätzlich ermöglicht Ansys mit der Einbindung nichtlinearer Materialmodelle eine erweiterte Modellierungsmöglichkeit und eine realitätsnähere Abbildung des Mehrschichtsystems mit polymeren Werkstoffen.

Die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten von Dünnglas und Polycarbonat erfordern eine Betrachtung der Dehnung innerhalb der Zwischenschicht bei einer Temperaturdifferenz der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel. Dazu sind thermische Längenausdehnungskoeffizienten der Zwischenschicht aus thermoplastischem Polyurethan und des Polycarbonates experimentell bestimmt. Die

Scherung infolge einer Temperaturdifferenz von $\Delta T = \pm 40$ K ist numerisch mit Ansys auf Grundlage der Finite-Elemente-Methode (FEM) berechnet. Eine Parameterstudie zur Dicke und zum Schubmodul der Zwischenschicht ermöglicht eine Abschätzung zur Begrenzung der Abmessungen der Verbundtafel. Ein hoher Schubmodul wirkt sich günstig aus, führt allerdings zu höheren Spannungen im Querschnitt und könnte eine Delamination begünstigen. Der Haftverbund ist an dieser Stelle nicht betrachtet, zeigt allerdings aus der bisherigen Erfahrung in der Praxis für Kalk-Natronsilikatglas einen ausreichenden Verbund. In den Abmessungen 2.050 mm auf 3.050 mm ist eine Anwendung der Verbundtafel als innenliegendes Glaspaket in einem Mehrscheiben-Isolierglas in einem Temperaturbereich von -20 °C bis $+60$ °C möglich.

Nach Ablauf der Lebensdauer durch Abbruch oder Zerstörung entsteht ein Abfallprodukt, das nach dem Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) einer weiteren Verwendung zuzuführen ist. Zur Rezyklierung und Trennung der Materialien liegen bereits Konzepte vor, die auch auf eine Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel anwendbar sind. Über Prall- und Hammermühlen ist die mechanische Trennung von Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln ohne Einsatz von Chemikalien auch mit mehreren innenliegenden Polycarbonatplatten möglich. Eine anschließende Sortierung und Trennung der Störstoffe vom Glas kann eine hohe Qualität an Glasbruchstücken gewährleisten und dem Stoffkreislauf meist über eine Kaskadierung wieder hinzugefügt werden.

Die vorgestellten Untersuchungen zu Dünnglas und Polycarbonat als Anwendung im Bauwesen zeigen das Potential der Materialkombination. Zeitgleich ergeben sich weitere Untersuchungsmöglichkeiten hinsichtlich der nichtlinearen, temperatur-, zeit- und belastungsabhängigen Materialeigenschaften der polymeren Werkstoffe und deren Implementation in ein numerisches Modell. Über eine allgemeine Bauartengenehmigung (aBG) kann für die Zwischenschicht der Ansatz eines teilweisen Verbundes mit einem Schubmodul berücksichtigt werden, um die Berechnung der angriffshemmenden Verbundtafel effektiv durchzuführen. Dabei ist über eine ausreichende Anzahl an Scherversuchen bei unterschiedlicher Temperatur eine maximale Scherung zu bestimmen und gegebenenfalls die Abmessung der Verbundtafel anzupassen. Zur Bestimmung des Haftverbundes liegen aktuell keine quantitativen Ergebnisse und Prüfverfahren vor. Dabei spielt insbesondere die chemische Zusammensetzung und die Analyse der Bindung der Oberfläche der Zwischenschicht an das Dünnglas sowie an das Polycarbonat eine entscheidende Rolle, um Rückschlüsse auf einen möglichen Einsatz von Haftvermittlern zu geben.

Die Verbundtafel ist als Einfachglas untersucht. Aufgrund des Potentials für schlanke und leichte Querschnitte bei hoher Angriffshemmung eignet sich die Verbundtafel insbesondere als Vertikalverglasung. Auch ein nachträglicher Einbau, die Ertüchtigung bestehender Verglasungen zur Verbesserung des Einbruchschutzes und die Weiterentwicklung zu einem Mehrscheiben-Isolierglas sind denkbar. Mit dem schlagzähen und duktilen Polycarbonat ist die Aufnahme hoher Energie bei stoßartiger Beanspruchung möglich. Der erhöhte Polymeranteil im

Querschnitt verbessert zusätzlich den Wärme- und Schallschutz. Der Verbund als Einfachverglasung führt beispielsweise bei der höchsten Widerstandsklasse P8B gegen manuellen Angriff zu einem bis zu 44 % dünneren und bis zu 65 % leichteren Querschnittsaufbau im Vergleich zu einer herkömmlichen Sicherheitssonderverglasung aus einem Glas-Verbund. Gleichzeitig ist der Wärmedurchgangskoeffizient um bis zu 0,2 W/(m²·K) auf 4,0 W/(m²·K) verbessert. Trotz einer starken Reduktion der flächenbezogenen Masse bleibt das bewertete Luftschalldämm-Maß mit 41 dB annähernd gleich zu üblichen einbruchhemmenden Verglasungen. Ähnlich Ergebnisse lassen sich für die Widerstandsklasse P6B ableiten. Die Verbundtafeln eignen sich als leistungsstarke Sicherheitssonderverglasung an und stellen eine innovative, multifunktionale Alternative zu herkömmlichem Glas-Verbund dar.

11 Literatur

11.1 Bücher und Aufsätze

- Abts 2020 Abts, Georg: Kunststoff-Wissen für Einsteiger. Grundlagen, Eigenschaften und Recycling polymerer Werkstoffe. München: Hanser, 2020.
- Albert 2020 Albert, Andrej (Hrsg.): Bautabellen für Ingenieure. Mit Berechnungshinweisen und Beispielen. Bundesanzeiger Verlag. Köln: Reguvis, 2020.
- Albus 2015 Albus, Jutta; Robanus, Stefan: Glas in der Architektur - neue Entwicklungen. In: DETAIL Zeitschrift für Architekten. Heft 1/2, 2015. Seite 72-76.
- Allen 1969 Allen, Howard G.: Analysis and design of structural sandwich panels. Oxford: Pergamon Press Ltd., 1969.
- Barth 2013 Barth, Christian; Rustler, Walter: Finite Elemente in der Baustatik-Praxis. Mit vielen Anwendungsbeispielen. Berlin, Wien, Zürich: Beuth (Bauwerk), 2013.
- Blank 1993 Blank, Kurt; Dürkop, Detlev; Durchholz, Michael; Grüters, Hugo; Helmich, Gerd; Senger, Wolfgang: Strength tests of flat glass by means of four-point bending. In: Glastechnische Berichte 67. Heft 1, 1993. Seite 9-15.
- Blaumeiser 2016 Blaumeiser, Louisa; Schneider, Jens: Strength testing of thin glasses. In Schneider, Jens; Wellter, Bernhard (Hrsg.): Engineered Transparency 2016. Glass in Architecture and Structural Engineering. Berlin: Ernst & Sohn, 2016. Seite 459-468.
- Bohmann 2018 Bohmann, Dirk: Theorie Handbuch. Version 5.0. Aachen: SJ Software GmbH, 2018.
- Bohmann 2020 Bohmann, Dirk: Mepla. Software for Structural Glass Design. Handbuch zum Programm. Aachen: SJ Software GmbH, 2020.
- Brammer 2016 Brammer, Korinna: Glas neu erfunden. Pressemitteilung. KRD Sicherheitstechnik GmbH, 2016.
- BV Glas 2020 Bundesverband Glasindustrie e.V.: Jahresbericht 2020. Düsseldorf, 2020.
- Danzer 2002 Danzer, Robert; Lube, Tanja; Supancic, Peter; Damani, Monika; Börger, Andreas; Binder, Roland: Verfahren und Einrichtung zur Bestimmung der Bruchfestigkeit von spröden Werkstoffen. Anmeldedatum 14.05.2002. Anmelde Nummer AT 411 714 B. Österreich.
- Danzer 2009 Danzer, Robert; Supancic, Peter; Harrer, Walter: Der 4-Kugelversuch zur Ermittlung der biaxialen Biegefestigkeit spröder Werkstoffe. In: Kriegesmann, Jochen (Hrsg.): Technische keramische Werkstoffe. Ellerau: HvB-Verlag, 2009.
- Davies 1981 Davies, Mike: A Wall for All Seasons. In: RIBA Journal 88. Heft 2, 1981. Seite 55-57.
- Domininghaus 2012 Domininghaus, Hans; Elsner, Peter; Eyerer, Peter; Hirth, Thomas (Hrsg.): Kunststoffe. Eigenschaften und Anwendungen. Heidelberg: Springer, 2012.

- Ehrenstein 2003 Ehrenstein, Gottfried; Riedel, Gabriela; Trawiel, Pia: Praxis der thermischen Analyse von Kunststoffen. München: Carl Hanser Fachbuchverlag, 2003.
- Ehrenstein 2011 Ehrenstein, Gottfried: Polymer-Werkstoffe. Struktur ; Eigenschaften; Anwendung. München: Carl Hanser Fachbuchverlag, 2011.
- Gräf 2003 Gräf, Holger: Untersuchungen zum Tragverhalten von Verbundsicherheitsglas bei linienförmiger und punktförmiger Lagerung. Dissertation. TU München: München, 2003.
- Grellmann 2015 Grellmann, Wolfgang; Seidler, Sabine (Hrsg.): Kunststoffprüfung. München: Hanser, 2015.
- Griffith 1921 Griffith, A. Arnold: The Phenomena of Rupture and Flow in Solids. In: Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. Heft 221, 1921. Seite 163-198.
- Gross 2015 Gross, Dietmar; Seelig, Thomas: Bruchmechanik. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2016.
- Habenicht 2009 Habenicht, Gerd: Kleben. Grundlagen, Technologien, Anwendungen. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009.
- Hänig 2019 Hänig, Julian; Weller, Bernhard: Load-bearing behaviour of innovative lightweight glass-plastic-composite panels. In Glass Structures & Engineering. Heft 5, 2019. Seite 83-97.
- Heiß-Choquet 2014 Heiß-Choquet, Markus; Nattermann, Kurt; Ottermann, Clemens; Jotz, Matthias: Verfahren und Vorrichtung zur Bestimmung der Bruchfestigkeit der Ränder dünner Bahnen sprödebrüchigen Materials. Anmeldedatum: 31.07.2014. Anmeldeummer. DE102014110855B4. Deutschland.
- Herrlich 1999 Herrlich, Norbert: Kunststoffpraxis: Eigenschaften. Kirchhain, Augsburg: TDS Herrlich; WEKA-Fachverlag für technische Führungskräfte, 1999.
- Horn 2018 Horn, Birgit (Hrsg.): Visions. Glass technology live: the hub @ glasstec, 23 - 26 october 2018. Messe Düsseldorf GmbH. Essen: Woeste Druck, 2018.
- Inglis 1913 Inglis, Charles: Stresses in a Plate Due to the Presence of Cracks and Sharp Corners. In: Transactions of the Royal Institution of Naval Architects. Heft 55.1, 1913. Seite 219-241.
- Irwin 1957 Irwin, George: Analysis of Stresses and Strains near the End of a Crack Traversing a Plate. In: Journal of Applied Mechanics. Heft 24, 1957. Seite 361-364.
- Kaiser 2021 Kaiser, Wolfgang: Kunststoffchemie für Ingenieure. München: Hanser, 2021.
- Knack 2014 Knaack, Ulrich; Klein, Tillmann; Bilow, Marcel; Auer, Thomas: Fassaden. Prinzipien der Konstruktion. Basel: Birkhäuser, 2014.
- Kott 2006 Kott, Alexander: Zum Trag- und Resttragverhalten von Verbundsicherheitsglas. Dissertation. ETH Zürich: Zürich, 2006.
- Kuntsche 2015 Kuntsche, Johannes K.: Mechanisches Verhalten von Verbundglas unter zeitabhängiger Belastung und Explosionsbeanspruchung. Dissertation. TU Darmstadt: Darmstadt, 2015.

- Kuntsche 2019 Kuntsche, Johannes K.; Schuster, Miriam; Schneider, Jens: Engineering design of laminated safety glass considering the shear coupling: a review. In: Glass Structures & Engineering. Heft 4, 2019. Seite 209-228.
- Lambert 2013 Lambert, Harriet; O'Callaghan, James; O'Callaghan, Eckersley: Ultra-thin High Strength Glass Research and Potential Applications. In: Glass Performance Days. Tampere, 2013. Seite 95-99.
- Littleton 1923 Littleton, Jesse T.: A New Method for Measuring the Tensile Strength of Glass. In: Physical Review 22. Heft 5, 1923. Seite 510-516.
- Lohr 2020 Lohr, Katharina; Weller, Bernhard: Der Einfluss des Nachschleifens auf den thermischen Vorspannungszustand an der Glaskante. In: Weller, Bernhard; Tasche; Silke (Hrsg.): Glasbau 2020. Berlin: Ernst & Sohn, 2020. Seite 299-315.
- Louter 2019 Louter, Christian: Dünnglaskonzepte für architektonische Anwendungen. In: Weller, Bernhard; Tasche; Silke (Hrsg.): Glasbau 2019. Berlin: Ernst & Sohn, 2019. Seite 241-252.
- Maniatis 2016 Maniatis, Iris; Nehring, Gordon; Siebert, Geralt: Studies on determining the bending strength of thin glass. In: Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings 169. Heft 6, 2016. Seite 393-402.
- Neugebauer 2015 Neugebauer, Jürgen: A Moveable Canopy. In: International Conference on Building Envelope Design and Technology: Graz, 2016.
- Neugebauer 2016 Neugebauer, Jürgen: Investigation of different test set scenarios for determination of ultimate bending stress of thin glass. In: Schneider, Jens; Weller, Bernhard (Hrsg.): Engineered Transparency 2016. Glass in Architecture and Structural Engineering. Berlin: Ernst & Sohn, 2016. Seite 502-512.
- Neugebauer 2017 Neugebauer, Jürgen: Untersuchung alternativer Testszenarien zur Bestimmung der Biegezugfestigkeit von Dünnglas. In: Weller, Bernhard; Tasche; Silke (Hrsg.): Glasbau 2017. Berlin: Ernst & Sohn, 2017. Seite 197-209.
- Neugebauer 2018 Neugebauer, Jürgen; Kasumovic, Irma; Blazevic, Ivo: Theoretische Entwicklung geeigneter Versuchsszenarien zur Bestimmung der Biegezugfestigkeit von Dünnglas mit bzw. ohne Kanteneinfluss und deren experimentelle Umsetzung. In: Weller, Bernhard; Tasche; Silke (Hrsg.): Glasbau 2018. Berlin: Ernst & Sohn, 2018. Seite 135-144.
- Oliveira Santos 2018 Oliveira Santos, Francisco; Louter, Christian; Correia, João Ramôa: Exploring Thin Glass Strength Test Methodologies. Challenging Glass Conference Proceedings. Volume 6, 2018. Seite 713-724.
- Orowan 1934 Orowan, Egon: Die mechanischen Festigkeitseigenschaften und die Realstruktur der Kristalle. In: Zeitschrift für Kristallographie - Crystalline Materials 89. 1934.
- Overend 2014 Overend, Mauro; Butchart, Caroline; Lambert, H.; Prassas, Michel: The mechanical performance of laminated hybrid-glass units. In: Composite Structures 110, 2014. Seite 163-173.
- Pennetier 2019 Pennetier, Sophie; Ronfini, Alessandro; Stoddard, Josephine: Advances in Prototyping with Ultra-Thin Glass. In : Glass Performance Days. Tampere, 2019. Seite 302-308.

- Petzold 1990 Petzold, Armin; Marusch, Hubert; Schramm, Barbara: Der Baustoff Glas. Berlin: Schorndorf: Hofmann, 1990.
- Ribeiro Silveira 2018 Ribeiro Silveira, Rafael; Louter, Christian; Klein, Tillman: Flexible Transparency - a Study on Adaptive Thin Glass Façade Panels. In: Challenging Glass 6 - Conference on Architectural and Structural Applications of Glass. Delft, 2018. Seite 135-148.
- Roos 2017 Roos, Eberhard; Maile, Karl; Seidenfuß, Michael: Werkstoffkunde für Ingenieure. Grundlagen, Anwendung, Prüfung. Berlin: Springer Vieweg, 2018.
- Rubik 2020 Rubik, Frieder: Gesundheitliche Belastungen durch Umweltverschmutzung und Lärm - Ergebnisse der Umweltbewusstseinstudien. Umweltbundesamt. Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW). Dessau-Roßlau, 2020.
- Sack 2013 Sack, Norbert; Rose, Ansgar: Energieeffizientes Mehrscheiben-Isolierglas. Untersuchungen von technischen Maßnahmen zur Reduzierung des Flächengewichtes. Forschungsbericht Zukunft Bau F 2858. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verlag.
- Schittich 2006 Schittich, Christian: Glasbau-Atlas. Basel: Birkhäuser, 2006.
- Schneider 2016 Schneider, Jens; Kuntsche, Johannes; Schula, Sebastian; Schneider, Frank; Wörner, Johann-Dietrich: Glasbau. Berlin: Springer-Verlag 2016.
- Scholze 1988 Scholze, Horst: Glas. Berlin: Springer, 1988.
- Schuler 2003 Schuler, Christian: Einfluss des Materialverhaltens von Polyvinylbutyral auf das Tragverhalten von Verbund-sicherheitsglas in Abhängigkeit von Temperatur und Belastung. Dissertation. TU München: München, 2003.
- Schwarzl 1990 Schwarzl, Friedrich R.: Polymermechanik. Struktur und mechanisches Verhalten von Polymeren. Berlin, Heidelberg: Springer, 1990.
- Sedlacek 1999 Sedlacek, Gerhard; Blank, Kurt; Laufs, Wilfried; Güsgen, Joachim: Glas im konstruktiven Ingenieurbau. Berlin. Ernst & Sohn. 1999.
- Seidel 2018 Seidel, Wolfgang W.; Hahn, Frank: Werkstofftechnik. Werkstoffe - Eigenschaften - Prüfung – Anwendung. München: Hanser, 2018.
- Siebert 2012 Siebert, Geralt; Maniatis, Iris: Tragende Bauteile aus Glas. Berlin: Ernst & Sohn Verlag, 2012.
- Siebert 2013 Siebert, Geralt: Thin glass elements - a challenge for new applications. In: Glass Performance Days. Tampere, 2013. Seite 316-319.
- Stacherl 2015 Stacherl, Rudolf: Das Glaserhandwerk. Renningen: Expert Verlag, 2015.
- Stamm 1974 Stamm, Klaus; Witte, Horst: Sandwichkonstruktionen. Berechnung, Fertigung, Ausführung. Wien: Springer, 1974.
- Tammann 1933 Tammann, Gustav. Der Glaszustand. Leipzig: L. Voss Verlag, 1933.
- Weimar 2011 Weimar, Thorsten: Untersuchungen zu Glas-Polycarbonat-Verbundtafeln. Dissertation. TU Dresden: Dresden, 2011.
- Weimar 2018a Weimar, Thorsten; Andrés López, Sebastián; Hahn, Christoph: Entwicklung von Verbundtafeln aus innovativem Dünnglas und Polycarbonat. Forschungsbericht Zukunft Bau F 3077. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2018.

Weimar 2018b	Weimar, Thorsten; Vuylsteke, Laura: Entwicklung angriffshemmender Isoliergläser mit Glas-Polycarbonat-Verbundtafeln. Sachbericht (unveröffentlicht). Universität Siegen. Siegen. Lehrstuhl für Tragkonstruktion, 2018.
Weimar 2019	Weimar, Thorsten; Muschiol, Michael; Hammer, Christian (2019): Entwicklung einer innovativen Verbundtechnik für Verbundsicherheitsgläser. Sachbericht (unveröffentlicht). Berlin.
Weimar 2021a	Weimar, Thorsten; Andrés López, Sebastián; Hahn, Christoph: Untersuchung von linien- und punktförmig gelagerten Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln. BBSR-Online Publikation 28/2021. Bonn, 2021.
Weimar 2021b	Weimar, Thorsten; Andrés López, Sebastián; Vuylsteke, Laura: Innovative Sicherheitsondoverglasungen aus Dünnglas und Polycarbonat. In: Stahlbau. 90. Auflage, Heft 7, 2021. Seite 498-506.
Weimar 2021c	Weimar, Thorsten; Hammer, Christian: Anwendung faseroptischer Dehnungsmessung für die experimentelle Untersuchung von Verbundglas. In: Weller, Bernhard; Tasche, Silke (Hrsg.): Glasbau 2020. Berlin: Ernst & Sohn, 2021. Seite 199-209.
Weimar 2022	Weimar, Thorsten; Hammer, Christian: Determination and evaluation of the interlaminar shear modulus of polyvinyl butyral using fibre optic sensors. In: Glass Structures & Engineering 7. Heft 3, 2022. Seite 441-455.
Wilcox 2013	Wilcox, David I.; Akarapu, Ravindra K.; Gulati, Suresh T.; Widjaja, Sujanto; Antimonov, Mikhail: Biaxial Stress in Thin Glass during Ring-on-Ring Testing with Large Deflections. In: SID Symposium Digest of Technical Papers 44, 2013. Seite 874-876.
Wölfel 1987	Wölfel, Eilhard: Nachgiebiger Verbund. Eine Näherungslösung und deren Anwendungsmöglichkeiten. In: Stahlbau, 1987. Seite 173-180.
Zaccaria 2022	Zaccaria, Marco; Peters, Timon; Ebert, Jan; Lucca, Nero; Schneider, Jens; Louder, Christian: The clamp bender: a new testing equipment for thin glass. In: Glass Structures & Engineering 7. Heft 2, 2022. Seite 173-186.
Zachariasen 1931	Zachariasen, W. H.: The Atomic Arrangement in Glass. In Journal of the American Chemical Society, 1931. Seite 3841-3851.
Zenkert 1997	Zenkert, Dan (Hrsg.): The handbook of sandwich construction. West Midlands: Engineering Materials Advisory Services Ltd. (EMAS), 1997.

11.2 Normen und Richtlinien

DIN 1259-1	DIN 1259-1:2001: Glas. Teil 1: Begriffe für Glasarten und Glasgruppen. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2001.
DIN 4102	DIN 4102-1: 1998: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 1: Baustoffe; Begriffe, Anforderungen und Prüfungen. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 1998.
DIN 4109-1	DIN 4109-1: 2018: Schallschutz im Hochbau - Teil 1: Mindestanforderungen. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2018.

DIN 18008-1	DIN 18008-1: 2020: Glas im Bauwesen - Bemessungs- und Konstruktionsregeln - Teil 1: Begriffe und allgemeine Grundlagen. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2020.
DIN 18008-2	DIN 18008-2: Glas im Bauwesen – Bemessungs- und Konstruktionsregeln – Teil 2: Linienförmig gelagerte Verglasungen. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2020.
DIN 18008-3	DIN 18008-3: Glas im Bauwesen – Bemessungs- und Konstruktionsregeln – Teil 3: Punktförmig gelagerte Verglasungen. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2013.
DIN 18008-4	DIN 18008-4: Glas im Bauwesen – Bemessungs- und Konstruktionsregeln – Teil 4: Zusatzanforderungen an absturzsichernde Verglasungen. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2013.
DIN 18008-5	DIN 18008-5: Glas im Bauwesen – Bemessungs- und Konstruktionsregeln – Teil 5: Zusatzanforderungen an begehbare Verglasungen. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2013.
DIN 18008-6	DIN 18008-6: Glas im Bauwesen – Bemessungs- und Konstruktionsregeln – Teil 6: Zusatzanforderungen an zu Instandhaltungsmaßnahmen betretbare Verglasungen und an durchsturzsichere Verglasungen. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2018.
DIN 53752	DIN 53752: 1980: Prüfung von Kunststoffen. Bestimmung des thermischen Längenausdehnungskoeffizienten. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 1980.
DIN EN 356	DIN EN 356: 2002: Glas im Bauwesen - Sicherheitssonderverglasung - Prüfverfahren und Klasseneinteilung des Widerstandes gegen manuellen Angriff. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2002.
DIN EN 410	DIN EN 410: 2011: Glas im Bauwesen - Bestimmung der lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kenngrößen von Verglasungen. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2011.
DIN EN 572-1	DIN EN 572-1: 2016: Glas im Bauwesen - Basis-Erzeugnisse aus Kalk-Natronsilicatglas. Definitionen und allgemeine physikalische und mechanische Eigenschaften. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2016.
DIN EN 673	DIN EN 673: 2011: Glas im Bauwesen - Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) - Berechnungsverfahren. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2011.
DIN EN 674	DIN EN 674: 2011: Glas im Bauwesen - Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) - Verfahren mit dem Plattengerät. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2011.
DIN EN 675	DIN EN 675: 2011: Glas im Bauwesen - Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) - Wärmestrommesser-Verfahren. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2011.
DIN EN 1063	DIN EN 1063: 2001: Glas im Bauwesen - Sicherheitssonderverglasung - Prüfverfahren und Klasseneinteilung für den Widerstand gegen Beschuss. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2001.
DIN EN 1288-2	DIN EN 1288-2: 2000: Glas im Bauwesen - Bestimmung der Biegefestigkeit von Glas - Teil 2: Doppelring-Biegeversuch an plattenförmigen Proben mit großen Prüfflächen. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2000.

DIN EN 1288-3	DIN EN 1288-3: 2000: 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 1288-5	DIN EN 1288-5: 2009: Glas im Bauwesen - Bestimmung der Biegefestigkeit von Glas - Teil 5: Doppelring-Biegeversuch an plattenförmigen Proben mit kleinen Prüfflächen. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2009.
DIN EN 1748-1-1	DIN EN 1748-1-1: 2014: Glas im Bauwesen - Spezielle Basiserzeugnisse - Borosilicatgläser - Teil 1-1: Definitionen und allgemeine physikalische und mechanische Eigenschaften. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2014.
DIN EN 1863-1	DIN EN 1863-1: 2012: Glas im Bauwesen - Teilvorgespanntes Kalknatronglas - Teil 1: Definition und Beschreibung. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2012.
DIN EN 1990	DIN EN 1990: 2021: Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2021.
DIN EN 12150-1	DIN EN 12150-1: 2015: Glas im Bauwesen - Thermisch vorgespanntes Kalknatron-Einscheiben-Sicherheitsglas - Teil 1: Definition und Beschreibung. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2015.
DIN EN 12337-1	DIN EN 12337-1: 2000: Glas im Bauwesen - Chemisch vorgespanntes Kalknatronglas - Teil 1: Definition und Beschreibung. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2000.
DIN EN 12600	DIN EN 12600: 2003: Glas im Bauwesen - Pendelschlagversuch - Verfahren für die Stoßprüfung und Klassifizierung von Flachglas. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2003.
DIN EN 12758	DIN EN 12758: 2019: Glas im Bauwesen - Glas und Luftschalldämmung - Produktbeschreibungen, Bestimmung der Eigenschaften und Erweiterungsregeln. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2019.
DIN EN 13541	DIN EN 13541: 2012: Glas im Bauwesen - Sicherheitssonderversglasung - Prüfverfahren und Klasseneinteilung des Widerstandes gegen Sprengwirkung. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2012.
DIN EN 14449	DIN EN 14449: 2005: Glas im Bauwesen - Verbundglas und Verbund-Sicherheitsglas - Konformitätsbewertung/Produktnorm. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2005.
DIN EN 15681-1	DIN EN 15681-1: 2016: Glas im Bauwesen - Glaserzeugnisse aus Alumo-Silicatglas - Teil 1: Definitionen und allgemeine physikalische und mechanische Eigenschaften. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2016.
DIN EN 16613	DIN EN 16613: 2019: Glas im Bauwesen - Verbundglas und Verbundsicherheitsglas - Bestimmung der mechanischen Eigenschaften von Zwischenschichten. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2019.
DIN EN ISO 717-1	DIN EN ISO 717-1: 2013: Akustik - Bewertung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen - Teil 1: Luftschalldämmung. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2013.
DIN EN ISO 10140-2	DIN EN ISO 10140-2: 2010: Akustik - Messung der Schalldämmung von Bauteilen im Prüfstand - Teil 2: Messung der Luftschalldämmung. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2010.

DIN EN ISO 12543-1	DIN EN ISO 12543-1: 2011: Glas im Bauwesen - Verbundglas und Verbund-Sicherheitsglas. Teil 1: Definition und Beschreibung von Bestandteilen. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2011.
DIN EN ISO 12543-2	DIN EN ISO 12543-2: 2011: Glas im Bauwesen - Verbundglas und Verbund-Sicherheitsglas. Teil 2: Verbund-Sicherheitsglas. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2011.
DIN EN ISO 12543-3	DIN EN ISO 12543-3: 2012: Glas im Bauwesen - Verbundglas und Verbund-Sicherheitsglas - Teil 3: Verbundglas. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2012.
DIN EN ISO 12543-4	DIN EN ISO 12543-4: 2011: Glas im Bauwesen - Verbundglas und Verbund-Sicherheitsglas - Teil 4: Verfahren zur Prüfung der Beständigkeit. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2011.
DIN ISO 226	DIN ISO 226: 2006: Akustik - Normalkurven gleicher Lautstärkepegel. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2006.
KrWG	Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG). Letzte Änderung vom 10.08.2021.
VdS 2163	VdS 2163: 2016: Einbruchhemmende Verglasungen. Anforderungen und Prüfmethoden.
EuGH C 100/13	EuGH C 100/13 Urteil des Europäischen Gerichtshofes (EuGH): Vertragsverletzung eines Mitgliedstaats – Freier Warenverkehr – Regelung eines Mitgliedstaats, nach der bestimmte Bauprodukte, die mit der Konformitätskennzeichnung CE versehen sind, zusätzlichen nationalen Normen entsprechen müssen – Bauregellisten. 10. Kammer. Urteil vom 16.10.2014. Luxemburg: 2014.
ISO 6721-11	ISO 6721-11: Plastics – Determination of dynamic mechanical properties. Part 11: Glass transition temperature. Genf: 2019.

11.3 Datenblätter

Z-70.3-170	Allgemein bauaufsichtliche Zulassung Z-70.3-170: 2016: Verbund-Sicherheitsglas aus SentryGlas® SGP 5000 mit Schubverbund.
Z-70.3-197	Allgemein bauaufsichtliche Zulassung Z-70.3-197: 2016: Verbund-Sicherheitsglas mit einer Verbundfolie der Produktfamilie EVASAFE mit Ansatz eines Schubverbundes.
ALLSTOP	Flachglas Markenkreis ALLSTOP Sicherheitsglas. Datenblatt, 2017.
Exolon GP	Exolon Group NV: Exolon GP. Datenblatt, 2021.
Falcon	AGC: Falcon. Datenblatt, 2020.
Leoflex	AGC: Leoflex. Datenblatt, 2016.
Lexan 9030	Sabic: Lexan 9030. Datenblatt, 2018.
Makrolon GP	Covestro AG: Makrolon GP. Datenblatt, 2013.
Optiwhite	Pilkington: Optiwhite. Datenblatt, 2021.

11.4 Internet

Ansys 2022	Ansys, Inc.: SOLID186. https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?return-url=/Views/Secured/corp/v222/en/ans_elem/Hlp_E_SO-LID186.html?q=solid . Überprüft am 09.11.2022.
Handelsblatt 2022	Handelsblatt: Weltleitmesse für Glas kehrt im September 2022 zurück. https://www.handwerksblatt.de/themen-specials/messen-fuer-das-handwerk/weltleitmesse-fuer-glas-kehrt-im-september-2022-zurueck . Überprüft am 02.11.2022.
Umweltbundesamt 2020	Umweltbundesamt: Lärmwirkungen. https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/laermwirkungen . Überprüft am 25.02.2020.

11.5 Programme

Ansys Inc. 2020	Ansys, Inc.: Ansys Multiphysics Campus 2020 R2. 2020.
Dlupal GmbH 2018	Dlupal GmbH: Zusatzmodul RF-Glas. Berechnung und Bemessung von Glasflächen. Programmbeschreibung. 2018.
Dlupal GmbH 2019	Dlupal GmbH: RFEM 5: Benutzer-Handbuch. 2019.
SJ Software GmbH 2022	SJ Software GmbH: SJ Mepla 5.0.11. 2022.
Sommer Informatik GmbH 2021	Sommer Informatik GmbH: SommerGlobal 7.26. WinSLT Experte. 2021.

12 Bezeichnungen

12.1 Formelzeichen

Große lateinische Buchstaben

B	Gesamtbiegesteifigkeit
B_i	lokale Biegesteifigkeit der Schicht i mit $i = u, m, o$ (untere, mittlere, obere Schicht) mit $i = G, PC$ (Glas, Polycarbonat)
B_s	Verbundbiegesteifigkeit
\bar{B}_s	äquivalente Verbundbiegesteifigkeit
C_1, C_2	universelle Konstanten
C, C_{tr}	Anpassungsbeiwerte des Luftschalldämm-Maßes
C_d	Gebrauchstauglichkeitskriterium
E	Elastizitätsmodul
E_i	Elastizitätsmodul der Schicht i mit $i = u, m, o$ (untere, mittlere, obere Schicht) mit $i = G, PC, TPU$ (Glas, Polycarbonat, thermoplastisches Polyurethan)
E^*	komplexer Elastizitätsmodul
E'	Speichermodul
E''	Verlustmodul
E_a	Aktivierungsenergie
E_d	Einwirkung
F	Kraft
G_{TPU}	Schubmodul der Zwischenschicht
GA_s	Schubsteifigkeit
I_i	Flächenträgheitsmoment mit $i = u, m, o$ (untere, mittlere, obere Schicht) mit $i = G, PC$ (Glas, Polycarbonat)
K_I	Spannungsintensitätsfaktor im Modus I
K_{Ic}	kritischer Spannungsintensitätsfaktor im Modus I, Bruchzähigkeit
L	Geometrieangaben
M	Biegemoment
M_i	Teilmoment auf die Verbundtafel mit $i = G, PC, s$ (Glas, Polycarbonat, Verbund)
Q	Querkraft
R	Wärmedurchgangswiderstand
R_w	Luftschalldämm-Maß
T	Temperatur
T_0	Referenztemperatur
T_1	untere Grenze des Glasübergangsbereichs
T_2	obere Grenze des Glasübergangsbereichs
T_g	Glasübergangstemperatur
T_{real}	gemessene Temperatur
T_s	Schmelztemperatur

T_{sol}	geforderte Temperatur
U_g	Wärmeübergangskoeffizient der Verglasung
U_R	Wärmedurchgangskoeffizient des Rahmens
Y	Korrekturfaktor für die Geometrie

Kleine lateinische Buchstaben

a	Risstiefe
b	Breite
d	halbe Breite der Kerbe
d_0	Ionenabstand
d_G	Abstand der Schwereachsen des Glases
f	Frequenz
f_k	charakteristische Festigkeit
h_e	äußerer Wärmeübergangskoeffizient
h_i	innerer Wärmedurchgangskoeffizient
h_t	Gesamtwärmedurchlasskoeffizient der Verglasung
i	imaginäre Einheit
k	Verhältnis zwischen Querkraft- und Momentenverformung
l	Risslänge
$\log \alpha_T$	Verschiebungsfaktor der WLF-Gleichung
p	Druck
q	Flächen- oder Linienlast
r	Atomradius
r	Krümmung ($r = d^2/a$ und $r_{\text{max}} = d_{\text{min}}^2/a$)
r	Radius im Doppelring-Biegeversuch
t_i	Nennstärke einer Schicht mit $i = G, PC, TPU$ (Glas, Polycarbonat, thermoplastisches Polyurethan)
t	Zeit
$\tan \delta$	Verlustfaktor
w	Verformung
w_i	Verformung im Zustand i
z_i	Abstand der Gesamtschwereachse zur auswertbaren Stelle im Querschnitt

Große griechische Buchstaben

ΔT	Temperaturdifferenz
------------	---------------------

Kleine griechische Buchstaben

α	Absorptionsgrad
α	Hilfswert der Sandwichtheorie
α_T	thermischer Wärmeausdehnungskoeffizient
β	Hilfswert der Sandwichtheorie
β_i	Anteil der Biegesteifigkeit der Schicht i an der Gesamtbiegesteifigkeit mit $i = G, PC$ (Glas, Polycarbonat)
γ_0	spezifische Oberflächenenergie

γ	Scherung
γ_M	Sicherheitsbeiwert für das Material
δ	Phasenverschiebung
ε	Dehnung
ε_i	Hilfswert der Sandwichtheorie
$\varepsilon_{x,i}$	Dehnung der Schicht i in Längsrichtung mit i = G, PC (Glas, Polycarbonat)
$\varepsilon_{y,i}$	Dehnung der Schicht i in Querrichtung mit i = G, PC (Glas, Polycarbonat)
η_i	Verhältnis des jeweiligen Zustands der Verbundtafel zu Zustand I
λ	Hilfswert der Sandwichtheorie
λ_i	Wärmeleitfähigkeit der Schicht i mit i = G, PC, TPU (Glas, Polycarbonat, thermoplastisches Polyurethan)
μ_i	Querdehnzahl der Schicht i mit i = G, PC, TPU (Glas, Polycarbonat, thermoplastisches Polyurethan)
ξ	Hilfswert der Sandwichtheorie
π	Pi
ρ	Reflexionsgrad
σ_0	Spannung
σ_a	einwirkende Spannung
σ_f	Bruchspannung
σ_i	Spannung der Schicht i mit i = u, m, o (untere, mittlere, obere Schicht)
σ_{th}	theoretische Festigkeit
σ_r	Spannung am Kerbgrund
$\sigma_{x,i}$	Spannung der Schicht i in Längsrichtung mit i = G, PC (Glas, Polycarbonat)
$\sigma_{y,i}$	Spannung der Schicht i in Querrichtung mit i = G, PC (Glas, Polycarbonat)
τ	Transmissionsgrad
τ_{VIS}	Lichttransmissionsgrad
φ	relative Luftfeuchtigkeit
φ_{real}	gemessene relative Luftfeuchtigkeit
φ_{Soll}	geforderte relative Luftfeuchtigkeit
ψ	Anteil des Randverbundes am Wärmedurchgangskoeffizienten

12.2 Abkürzungen

aBG	allgemeine Bauartengenehmigung
abZ	allgemein bauaufsichtliche Zulassung
AG	Aktiengesellschaft
AGC	Asahi Glass Co., Ltd.
Co.	Company
CVG	chemisch vorgespanntes Glas
DIL	Dilatometrie
DMA	dynamisch-mechanischer Analysator

DMTA	dynamisch-mechanisch-thermische Analyse
DIN	Deutsches Institut für Normung
EN	Europäische Norm
ESG	Einscheibensicherheitsglas
f.	folgende
ff.	fortfolgende
FEM	Finite-Elemente-Methode
FG	Floatglas
GZT	Grenzzustand der Tragfähigkeit
GZG	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit
IR	infrarot
Ltd.	Limited (Kapitalgesellschaft)
MVV TB	Musterverwaltungsvorschrift Technische Baubestimmung
Sabic	Saudi Basic Industries Corporation
TVG	Teilvorgespanntes Glas
TPU	Thermoplastisches Polyurethan
UV	ultraviolett
VIS	visible, sichtbar
WLF	Williams-Landel-Ferry
ZTV	Zeit-Temperatur-Verschiebungsprinzip

13 Abbildungsnachweis

Bild 1	nach Petzold 1990, Seite 31
Bild 2	nach Petzold 1990, Seite 33
Bild 3	nach Sedlacek 1999, Seite 17
Bild 4	nach Petzold 1990, Seite 36
Bild 5	nach DIN EN 1288-3
Bild 6	nach DIN EN 1288-2
Bild 7	nach DIN EN 1288-5
Bild 10	nach Schneider 2016, Seite 31
Bild 11	nach Schneider 2016, Seite 33
Bild 12	nach Schneider 2016, Seite 35
Bild 18	Sophie Pennetier, Enclos Corp, USA, 2021
Bild 19	Christian Louter, TU Dresden, 2020
Bild 20	nach Schneider 2016, Seite 190
Bild 21	nach Neugebauer 2015
Bild 22	Handelsblatt 2022, Messe Düsseldorf / ctillmann
Bild 23	Christian Louter, TU Dresden, 2020
Bild 24	KRD Coatings GmbH, Bardowick
Bild 26	nach Kuntsche 2015, Seite 38
Bild 27	nach Habenicht 2009, Seite 809
Bild 29	nach Seidel 2018, Seite 326
Bild 46	nach DIN EN 1288-3
Bild 60	nach DIN EN 1288-3
Bild 72	nach Bohmann 2018, Seite 7
Bild 74	nach Barth 2013, Seite 55
Bild 77	nach Ansys 2022, Bild 186.1

Die restlichen Bilder und Tabellen stammen aus dem Archiv des Autors.

A Anhang

A.1 Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel

A 1.1 Polycarbonat

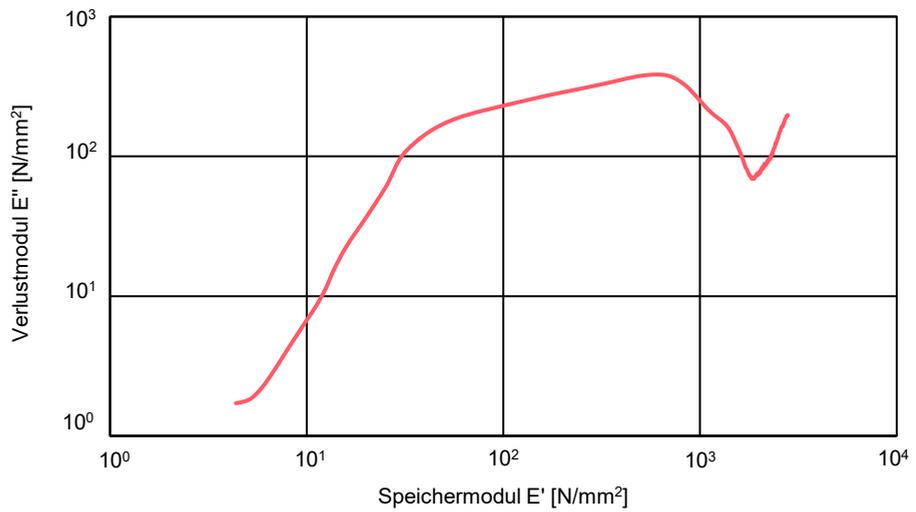


Bild A.1

Cole-Cole-Diagramm für Polycarbonat Lexan 9030 von Sabic.

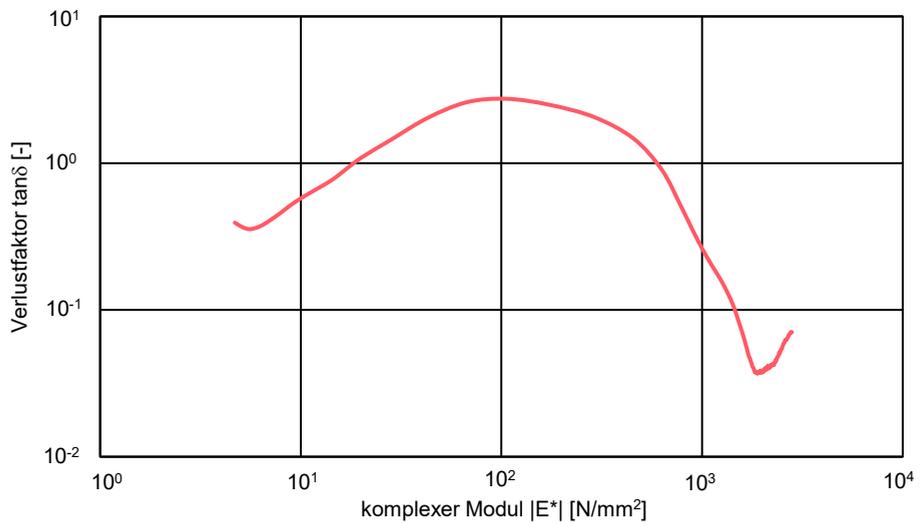


Bild A.2

Van-Gurp Palmén-Diagramm für Polycarbonat Lexan 9030 von Sabic.

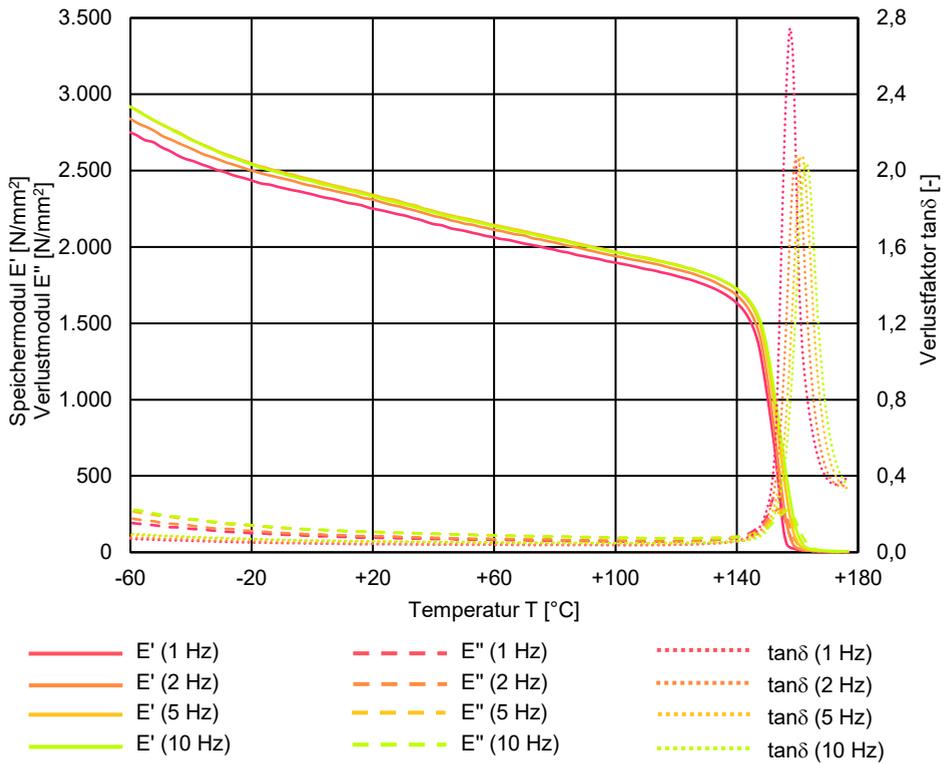


Bild A.3

Speichermodul E' , Verlustmodul E'' und Verlustfaktor $\tan\delta$ für Polycarbonat in Abhängigkeit der Temperatur T und der Frequenz f für Polycarbonat im Zugversuch mit einer dynamisch-mechanisch-thermischen Analyse (DMTA).

A 1.2 Polyurethan

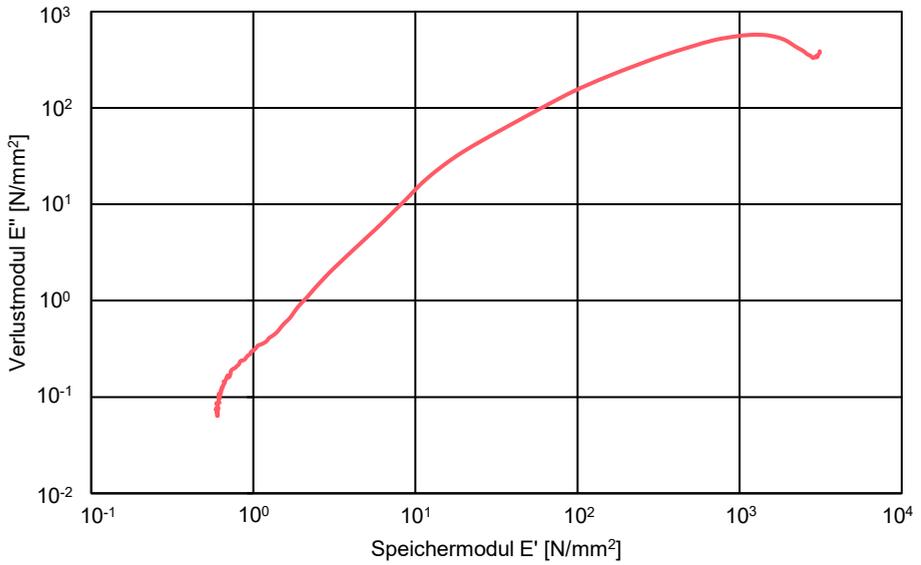


Bild A.4

Cole-Cole-Diagramm für Polycarbonat Lexan 9030 von Sabic.

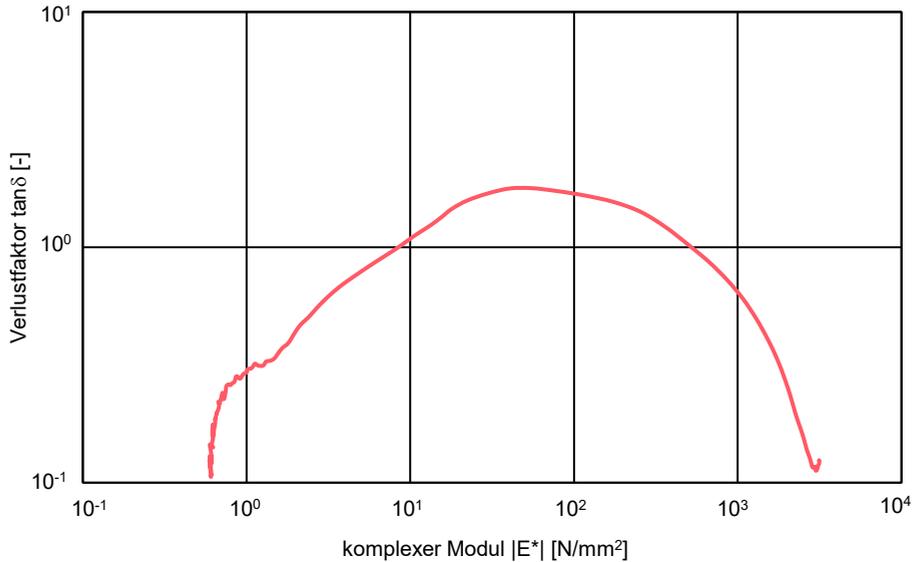


Bild A.5

Van-Gurp Palmén-Diagramm für Polycarbonat Lexan 9030 von Sabic.

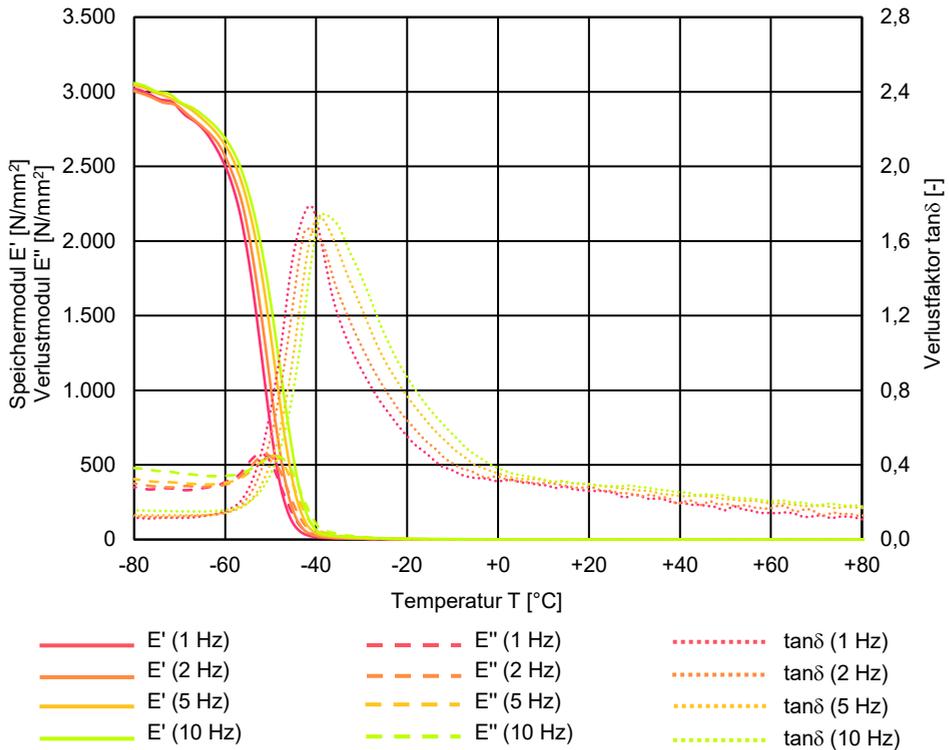


Bild A.6

Speichermodul E' Verlustmodul E'' und Verlustfaktor $\tan\delta$ für Polyurethan in Abhängigkeit der Temperatur T und der Frequenz f für Polycarbonat im Zugversuch mit einer dynamisch-mechanisch-thermischen Analyse (DMTA).

A.2 Klimatische Beanspruchung

A 2.1 Prüfung bei hoher Temperatur

Tabelle A.1

Ergebnisse der Prüfkörper zur Prüfung der Beständigkeit bei hoher Temperatur von +100 °C für 2 h.

Prüfkörper	T_F_s	T_L_s	T_O_s	T_O_t
Glas	Falcon	Leoflex	Optiwhite	Optiwhite
Butylband	schwarz	schwarz	schwarz	transparent
Nennstärke	7,0 mm	7,7 mm	10,0 mm	10,0 mm
Realdicke				
PK 01	7,1 mm	7,5 mm	9,9 mm	10,0 mm
PK 02	7,4 mm	7,7 mm	9,7 mm	10,1 mm
PK 03	7,4 mm	7,6 mm	9,8 mm	9,8 mm
Mittelwert	7,3 mm	7,6 mm	9,8 mm	10,0 mm
Standardabweichung	0,1 mm	0,1 mm	0,1 mm	0,1 mm
Temperatur und Zeit				
Mittelwert	+101,1 °C	+99,4 °C	+101,0 °C	+100,1 °C
Standardabweichung	0,1 °C	< 0,1 °C	0,2 °C	0,2 °C
Zeit	2 h	2 h	2 h	2 h

A 2.2 Prüfung in der Feuchte

Tabelle A.2

Ergebnisse der Prüfkörper zur Prüfung der Beständigkeit in der Feuchte bei +50 °C für 14 d.

Prüfkörper	T_F_s	T_L_s	T_O_s	T_O_t
Glas	Falcon	Leoflex	Optiwhite	Optiwhite
Butylband	schwarz	schwarz	schwarz	transparent
Nenn Dicke	7,0 mm	7,7 mm	10,0 mm	10,0 mm
Realdicke				
PK 01	7,0 mm	7,4 mm	10,2 mm	10,0 mm
PK 02	7,0 mm	7,4 mm	10,1 mm	10,0 mm
PK 03	7,0 mm	7,5 mm	10,2 mm	10,1 mm
Mittelwert	7,0 mm	7,4 mm	10,1 mm	10,1 mm
Standardabweichung	< 0,1 mm	0,1 mm	< 0,1 mm	< 0,1 mm
Temperatur				
Mittelwert	+52,5 °C	+53,3 °C	+53,3 °C	+50,4 °C
Standardabweichung	0,1 °C	1,0 °C	1,0 °C	1,3 °C
Luftfeuchtigkeit				
Mittelwert	99,1 % rF	99,9 % rF	99,9 % rF	98,2 % rF
Standardabweichung	0,4 % rF	< 0,1 % rF	< 0,1 % rF	0,7 % rF
Zeit				
Zeit	14 d	14 d	14 d	14 d

A 2.3 Bestrahlungsprüfung

Tabelle A.3

Ergebnisse der Prüfkörper zur Prüfung der Beständigkeit unter Bestrahlung bei +45 °C.

Prüfkörper	B_F_s	B_L_s	B_O_s	B_O_t
Glas	Falcon	Leoflex	Optiwhite	Optiwhite
Butylband	schwarz	schwarz	schwarz	transparent
Nennstärke	7,0 mm	7,7 mm	10,0 mm	10,0 mm
Realdicke				
PK 01	7,3 mm	7,7 mm	10,0 mm	10,1 mm
PK 02	7,4 mm	7,7 mm	10,1 mm	10,0 mm
PK 3	7,5 mm	7,5 mm	10,2 mm	9,9 mm
Mittelwert	7,4 mm	7,6 mm	10,1 mm	10,0 mm
Standardabweichung	< 0,1 mm	0,1 mm	0,1 mm	< 0,1 mm
Temperatur				
Mittelwert	+45,5 °C	+45,5 °C	keine Angabe	+45,5 °C
Standardabweichung	1,8 °C	1,8 °C	keine Angabe	1,8 °C

Tabelle A.4

Ergebnisse der Prüfkörper zur Prüfung der Beständigkeit unter Bestrahlung. Auswertung des Lichttransmissionsgrades. Wert vor der Prüfung (oben, Wert nach der Prüfung (mittig) und Differenz (unten).

oben: Wert vor Prüfung

mittig: Wert nach Prüfung

unten: Differenz

Prüfkörper	B_F_s	B_L_s	B_O_s	B_O_t
PK 01	+89,3 %	+89,3 %	+88,9 %	+89,2 %
	+89,1 %	+88,4 %	+88,8 %	+89,0 %
	0,4 %	0,7 %	0,1 %	0,2 %
PK 02	+89,4 %	+89,1 %	+89,6 %	+89,1 %
	+89,2 %	+88,7 %	+89,5 %	+89,0 %
	0,2 %	0,4 %	0,1 %	0,1 %
PK 3	+89,5 %	+89,1 %	+89,4 %	+89,2 %
	+89,4 %	+88,7 %	+89,1 %	+89,0 %
	0,3 %	0,4 %	0,3 %	0,2 %
Mittelwert	+89,4 %	+89,2 %	+89,3 %	+89,2 %
	+89,2 %	+88,6 %	+89,1 %	+89,0 %
	0,3%	0,6 %	0,2 %	0,2 %
Standardabweichung	0,1 %	0,1 %	0,3 %	< 0,1 %
	0,1 %	0,1 %	0,3 %	< 0,1 %
Zeit	2.000 h	2.000 h	2.000 h	2.000 h

A.3 Mechanische Beanspruchung

A 3.1 Kugelfallprüfung

Tabelle A.5

Ergebnisse der Kugelfallprüfung nach DIN EN 14449 für Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit dem Dünnglas Falcon (KF_F).

Prüfkörper	Nenn Dicke	Realdicke	Fallhöhe	Splittermasse
KF_F_01	7,0 mm	7,6 mm	4.040 mm	+0,0 g
KF_F_02	7,0 mm	7,3 mm	4.040 mm	+0,0 g
KF_F_03	7,0 mm	7,5 mm	4.040 mm	+0,0 g
KF_F_04	7,0 mm	7,4 mm	4.040 mm	+0,0 g
KF_F_05	7,0 mm	7,3 mm	4.040 mm	+0,5 g
Mittelwert		7,4 mm	4.040 mm	+0,1 g
Standardabweichung		0,1 mm	0 mm	0,2 g
Temperatur Luftfeuchtigkeit		+19,8 °C 48,0 % rF		

Tabelle A.6

Ergebnisse der Kugelfallprüfung nach DIN EN 14449 für Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit dem Dünnglas Leoflex (KF_L).

Prüfkörper	Nenn Dicke	Realdicke	Fallhöhe	Splittermasse
KF_L_01	7,7 mm	7,4 mm	4.040 mm	+0,0 g
KF_L_02	7,7 mm	7,4 mm	4.040 mm	+0,0 g
KF_L_03	7,7 mm	7,3 mm	4.040 mm	+0,0 g
KF_L_04	7,7 mm	7,4 mm	4.040 mm	+0,0 g
KF_L_05	7,7 mm	7,3 mm	4.040 mm	+0,0 g
Mittelwert		7,3 mm	4.040 mm	+0,0 g
Standardabweichung		< 0,1 mm	0 mm	0,0 g
Temperatur Luftfeuchtigkeit		+20,5 °C 35,0 % rF		

Tabelle A.7

Ergebnisse der Kugelfallprüfung nach DIN EN 14449 für Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit dem Dünnglas Optiwhite (KF_O).

Prüfkörper	Nenn Dicke	Realdicke	Fallhöhe	Splittermasse
KF_O_01	10,0 mm	9,8 mm	4.040 mm	+1,5 g
KF_O_02	10,0 mm	9,7 mm	4.040 mm	+1,0 g
KF_O_03	10,0 mm	9,7 mm	4.040 mm	+1,0 g
KF_O_04	10,0 mm	9,7 mm	4.040 mm	+1,5 g
KF_O_05	10,0 mm	9,6 mm	4.040 mm	+2,0 g
Mittelwert		9,7 mm	4.040 mm	+1,4 g
Standardabweichung		< 0,1 mm	0 mm	0,4 g
Temperatur Luftfeuchtigkeit		+24,0 °C 45,0 % rF		

A 3.2 Pendelschlagversuch

Tabelle A.8

Ergebnisse des Pendelschlagversuchs nach DIN EN 12600 für Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit dem Dünnglas Falcon (PS_F) und dem Dünnglas Optiwhite (PS_O).

Prüfkörper	Nennstärke	Fallhöhe	Bruch	Bruchverhalten
PS_F_01	6,0 mm	190 mm 450 mm 1.200 mm	Ja - -	Typ B - -
PS_F_02	6,0 mm	190 mm 450 mm 1.200 mm	Ja - -	Typ B - -
PS_F_03	6,0 mm	190 mm 450 mm 1.200 mm	Ja - -	Typ B - -
PS_F_04	6,0 mm	190 mm 450 mm 1.200 mm	Nein Ja -	- Typ B -
PS_F	Widerstandsklasse 3 (B) 3			
PS_O_01	9,0 mm	190 mm 450 mm 1.200 mm	Nein Nein Ja	- - Typ B
PS_O_02	9,0 mm	190 mm 450 mm 1.200 mm	Ja - -	Typ B - -
PS_O_03	9,0 mm	190 mm 450 mm 1.200 mm	Nein Ja -	- Typ B -
PS_O_04	9,0 mm	190 mm 450 mm 1.200 mm	Ja - -	Typ B - -
PS_O	Widerstandsklasse 3 (B) 3 (Widerstandsklasse 1 (B) 1 möglich)			
PS_L	Das Dünnglas Leoflex stand nicht für den Pendelschlagversuch zur Verfügung, da das Produkt während der Bearbeitungszeit dieser Arbeit eingestellt wurde.			
Anmerkung: Die Polycarbonatplatte bricht infolge eines Pendelaufpralls nicht. Die Verbundplatte drückt sich im Versagensfall aus der Prüfkörperhalterung				

A.4 Tragverhalten

A.4.1 Dehnungen im Kurzzeitversuch – Zustand I

Tabelle A.9

Verformung der Prüfkörper im Kurzzeitversuch für Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit dem Dünnglas Leoflex.

Prüfkörper	L_04_K	L_08_K	L_12_K
T_01_K PK 1	62,0 mm	23,5 mm	13,1 mm
T_02_K PK 1	58,1 mm	22,4 mm	12,9 mm
T_01_K PK 2	70,6 mm	23,6 mm	12,0 mm
T_02_K PK 2	67,7 mm	23,5 mm	11,4 mm
T_01_K PK 3	50,2 mm	31,0 mm	12,1 mm
T_02_K PK 3	48,2 mm	30,3 mm	12,3 mm
Mittelwert	59,5 mm	25,7 mm	12,3 mm
Standardabweichung	8,3 mm	3,5 mm	0,6 mm

Tabelle A.10

Verformung der Prüfkörper im Kurzzeitversuch für Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit dem Dünnglas Optiwhite.

Prüfkörper	O_04_K	O_08_K	O_12_K
T_01_K PK 1	-	18,7 mm	10,6 mm
T_02_K PK 1	33,8 mm	18,7 mm	10,4 mm
T_01_K PK 2	-	18,1 mm	11,0 mm
T_02_K PK 2	40,3 mm	18,0 mm	11,0 mm
T_01_K PK 3	-	20,8 mm	11,1 mm
T_02_K PK 3	32,9 mm	21,8 mm	10,7 mm
Mittelwert	35,7 mm	19,3 mm	10,8 mm
Standardabweichung	3,3 mm	1,4 mm	0,2 mm

Tabelle A.11Dehnungen ϵ_x in Plattenmitte unter einer Belastung von 300 N für Prüfkörper L_04_K.

Prüfkörper	Dehnung Glas 1 oben	Dehnung Polycarbonat	Dehnung Glas 2 unten
T_01_K PK 1	-512 $\mu\text{m/m}$ -122 $\mu\text{m/m}$	-912 $\mu\text{m/m}$ +652 $\mu\text{m/m}$	+125 $\mu\text{m/m}$ +515 $\mu\text{m/m}$
T_02_K PK 1	-485 $\mu\text{m/m}$ -123 $\mu\text{m/m}$	-828 $\mu\text{m/m}$ +592 $\mu\text{m/m}$	+130 $\mu\text{m/m}$ +488 $\mu\text{m/m}$
T_01_K PK 2	-582 $\mu\text{m/m}$ -106 $\mu\text{m/m}$	-566 $\mu\text{m/m}$ +1.263 $\mu\text{m/m}$	+57 $\mu\text{m/m}$ +522 $\mu\text{m/m}$
T_02_K PK 2	-567 $\mu\text{m/m}$ -107 $\mu\text{m/m}$	-526 $\mu\text{m/m}$ +1.193 $\mu\text{m/m}$	+57 $\mu\text{m/m}$ +497 $\mu\text{m/m}$
T_01_K PK 3	-447 $\mu\text{m/m}$ -213 $\mu\text{m/m}$	-789 $\mu\text{m/m}$ +181 $\mu\text{m/m}$	+241 $\mu\text{m/m}$ +478 $\mu\text{m/m}$
T_02_K PK 3	-438 $\mu\text{m/m}$ -210 $\mu\text{m/m}$	-749 $\mu\text{m/m}$ +157 $\mu\text{m/m}$	+235 $\mu\text{m/m}$ +453 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	-505 $\mu\text{m/m}$ -147 $\mu\text{m/m}$	-728 $\mu\text{m/m}$ +673 $\mu\text{m/m}$	+141 $\mu\text{m/m}$ +492 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	55 $\mu\text{m/m}$ 46 $\mu\text{m/m}$	139 $\mu\text{m/m}$ 435 $\mu\text{m/m}$	74 $\mu\text{m/m}$ 23 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.12Dehnungen ϵ_x am Plattenrand unter einer Belastung von 300 N für Prüfkörper L_04_K.

Prüfkörper	Dehnung Glas 1 oben	Dehnung Polycarbonat	Dehnung Glas 2 unten
T_01_K PK 1	-424 $\mu\text{m/m}$ -91 $\mu\text{m/m}$	-741 $\mu\text{m/m}$ +597 $\mu\text{m/m}$	+109 $\mu\text{m/m}$ +431 $\mu\text{m/m}$
T_02_K PK 1	-395 $\mu\text{m/m}$ -102 $\mu\text{m/m}$	-639 $\mu\text{m/m}$ +509 $\mu\text{m/m}$	+121 $\mu\text{m/m}$ +400 $\mu\text{m/m}$
T_01_K PK 2	-446 $\mu\text{m/m}$ -34 $\mu\text{m/m}$	-479 $\mu\text{m/m}$ +1.088 $\mu\text{m/m}$	+8 $\mu\text{m/m}$ +382 $\mu\text{m/m}$
T_02_K PK 2	-436 $\mu\text{m/m}$ -21 $\mu\text{m/m}$	-484 $\mu\text{m/m}$ +1.053 $\mu\text{m/m}$	-2 $\mu\text{m/m}$ +367 $\mu\text{m/m}$
T_01_K PK 3	-318 $\mu\text{m/m}$ -143 $\mu\text{m/m}$	-659 $\mu\text{m/m}$ +84 $\mu\text{m/m}$	+186 $\mu\text{m/m}$ +358 $\mu\text{m/m}$
T_02_K PK 3	-307 $\mu\text{m/m}$ -141 $\mu\text{m/m}$	-606 $\mu\text{m/m}$ +60 $\mu\text{m/m}$	+177 $\mu\text{m/m}$ +337 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	-388 $\mu\text{m/m}$ -89 $\mu\text{m/m}$	-601 $\mu\text{m/m}$ +565 $\mu\text{m/m}$	+100 $\mu\text{m/m}$ +379 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	55 $\mu\text{m/m}$ 47 $\mu\text{m/m}$	94 $\mu\text{m/m}$ 409 $\mu\text{m/m}$	74 $\mu\text{m/m}$ 30 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.13Dehnungen ε_y in Plattenmitte unter einer Belastung von 300 N für Prüfkörper L_04_K.

Prüfkörper	Dehnung Glas 1 oben	Dehnung Polycarbonat	Dehnung Glas 2 unten
T_01_K PK 1	+62 $\mu\text{m/m}$ +46 $\mu\text{m/m}$	+69 $\mu\text{m/m}$ +23 $\mu\text{m/m}$	-66 $\mu\text{m/m}$ -63 $\mu\text{m/m}$
T_02_K PK 1	+60 $\mu\text{m/m}$ +49 $\mu\text{m/m}$	+53 $\mu\text{m/m}$ +25 $\mu\text{m/m}$	-65 $\mu\text{m/m}$ -63 $\mu\text{m/m}$
T_01_K PK 2	+72 $\mu\text{m/m}$ +59 $\mu\text{m/m}$	-102 $\mu\text{m/m}$ -153 $\mu\text{m/m}$	-58 $\mu\text{m/m}$ -58 $\mu\text{m/m}$
T_02_K PK 2	+70 $\mu\text{m/m}$ +56 $\mu\text{m/m}$	-104 $\mu\text{m/m}$ -148 $\mu\text{m/m}$	-55 $\mu\text{m/m}$ -65 $\mu\text{m/m}$
T_01_K PK 3	+76 $\mu\text{m/m}$ +49 $\mu\text{m/m}$	+112 $\mu\text{m/m}$ +49 $\mu\text{m/m}$	-85 $\mu\text{m/m}$ -81 $\mu\text{m/m}$
T_02_K PK 3	+72 $\mu\text{m/m}$ +43 $\mu\text{m/m}$	+121 $\mu\text{m/m}$ +37 $\mu\text{m/m}$	-85 $\mu\text{m/m}$ -90 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	+69 $\mu\text{m/m}$ +50 $\mu\text{m/m}$	+25 $\mu\text{m/m}$ -28 $\mu\text{m/m}$	-69 $\mu\text{m/m}$ -70 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	6 $\mu\text{m/m}$ 5 $\mu\text{m/m}$	93 $\mu\text{m/m}$ 87 $\mu\text{m/m}$	12 $\mu\text{m/m}$ 11 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.14Dehnungen ε_y am Plattenrand unter einer Belastung von 300 N für Prüfkörper L_04_K.

Prüfkörper	Dehnung Glas 1 oben	Dehnung Polycarbonat	Dehnung Glas 2 unten
T_01_K PK 1	94 $\mu\text{m/m}$ +13 $\mu\text{m/m}$	+216 $\mu\text{m/m}$ -178 $\mu\text{m/m}$	-14 $\mu\text{m/m}$ -96 $\mu\text{m/m}$
T_02_K PK 1	+90 $\mu\text{m/m}$ +17 $\mu\text{m/m}$	+203 $\mu\text{m/m}$ -166 $\mu\text{m/m}$	-19 $\mu\text{m/m}$ -98 $\mu\text{m/m}$
T_01_K PK 2	+102 $\mu\text{m/m}$ +3 $\mu\text{m/m}$	+115 $\mu\text{m/m}$ -354 $\mu\text{m/m}$	+14 $\mu\text{m/m}$ -81 $\mu\text{m/m}$
T_02_K PK 2	+102 $\mu\text{m/m}$ +1 $\mu\text{m/m}$	+122 $\mu\text{m/m}$ -344 $\mu\text{m/m}$	+7 $\mu\text{m/m}$ -88 $\mu\text{m/m}$
T_01_K PK 3	+78 $\mu\text{m/m}$ +8 $\mu\text{m/m}$	+246 $\mu\text{m/m}$ -55 $\mu\text{m/m}$	-15 $\mu\text{m/m}$ -88 $\mu\text{m/m}$
T_02_K PK 3	+72 $\mu\text{m/m}$ +6 $\mu\text{m/m}$	+239 $\mu\text{m/m}$ -62 $\mu\text{m/m}$	-28 $\mu\text{m/m}$ -97 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	+90 $\mu\text{m/m}$ +8 $\mu\text{m/m}$	+190 $\mu\text{m/m}$ -193 $\mu\text{m/m}$	-9 $\mu\text{m/m}$ -92 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	11 $\mu\text{m/m}$ 5 $\mu\text{m/m}$	53 $\mu\text{m/m}$ 120 $\mu\text{m/m}$	15 $\mu\text{m/m}$ 6 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.15Dehnungen ϵ_x in Plattenmitte unter einer Belastung von 300 N für Prüfkörper L_08_K.

Prüfkörper	Dehnung Glas 1 oben	Dehnung Polycarbonat	Dehnung Glas 2 unten
T_01_K PK 1	-314 $\mu\text{m/m}$ -113 $\mu\text{m/m}$	-744 $\mu\text{m/m}$ +886 $\mu\text{m/m}$	+77 $\mu\text{m/m}$ +270 $\mu\text{m/m}$
T_02_K PK 1	-312 $\mu\text{m/m}$ -114 $\mu\text{m/m}$	-741 $\mu\text{m/m}$ +866 $\mu\text{m/m}$	+76 $\mu\text{m/m}$ +273 $\mu\text{m/m}$
T_01_K PK 2	-290 $\mu\text{m/m}$ -93 $\mu\text{m/m}$	-796 $\mu\text{m/m}$ +784 $\mu\text{m/m}$	+102 $\mu\text{m/m}$ +295 $\mu\text{m/m}$
T_02_K PK 2	-297 $\mu\text{m/m}$ -98 $\mu\text{m/m}$	-821 $\mu\text{m/m}$ +795 $\mu\text{m/m}$	+104 $\mu\text{m/m}$ +311 $\mu\text{m/m}$
T_01_K PK 3	-320 $\mu\text{m/m}$ -53 $\mu\text{m/m}$	-1.177 $\mu\text{m/m}$ +960 $\mu\text{m/m}$	+69 $\mu\text{m/m}$ +338 $\mu\text{m/m}$
T_02_K PK 3	-318 $\mu\text{m/m}$ -50 $\mu\text{m/m}$	-1.169 $\mu\text{m/m}$ +969 $\mu\text{m/m}$	+77 $\mu\text{m/m}$ +345 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	-309 $\mu\text{m/m}$ -87 $\mu\text{m/m}$	-908 $\mu\text{m/m}$ +877 $\mu\text{m/m}$	+84 $\mu\text{m/m}$ +305 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	11 $\mu\text{m/m}$ 26 $\mu\text{m/m}$	190 $\mu\text{m/m}$ 72 $\mu\text{m/m}$	14 $\mu\text{m/m}$ 29 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.16Dehnungen ϵ_x am Plattenrand unter einer Belastung von 300 N für Prüfkörper L_08_K.

Prüfkörper	Dehnung Glas 1 oben	Dehnung Polycarbonat	Dehnung Glas 2 unten
T_01_K PK 1	-252 $\mu\text{m/m}$ -56 $\mu\text{m/m}$	-697 $\mu\text{m/m}$ +877 $\mu\text{m/m}$	+71 $\mu\text{m/m}$ +260 $\mu\text{m/m}$
T_02_K PK 1	-244 $\mu\text{m/m}$ -54 $\mu\text{m/m}$	-660 $\mu\text{m/m}$ +845 $\mu\text{m/m}$	+85 $\mu\text{m/m}$ +268 $\mu\text{m/m}$
T_01_K PK 2	-227 $\mu\text{m/m}$ -21 $\mu\text{m/m}$	-845 $\mu\text{m/m}$ +806 $\mu\text{m/m}$	+65 $\mu\text{m/m}$ +260 $\mu\text{m/m}$
T_02_K PK 2	-230 $\mu\text{m/m}$ -28 $\mu\text{m/m}$	-845 $\mu\text{m/m}$ +784 $\mu\text{m/m}$	+78 $\mu\text{m/m}$ +273 $\mu\text{m/m}$
T_01_K PK 3	-241 $\mu\text{m/m}$ +34 $\mu\text{m/m}$	-1.182 $\mu\text{m/m}$ +1.032 $\mu\text{m/m}$	+32 $\mu\text{m/m}$ +295 $\mu\text{m/m}$
T_02_K PK 3	-236 $\mu\text{m/m}$ +35 $\mu\text{m/m}$	-1.147 $\mu\text{m/m}$ +1.013 $\mu\text{m/m}$	+49 $\mu\text{m/m}$ +307 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	-238 $\mu\text{m/m}$ -15 $\mu\text{m/m}$	-896 $\mu\text{m/m}$ +893 $\mu\text{m/m}$	+63 $\mu\text{m/m}$ +277 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	9 $\mu\text{m/m}$ 37 $\mu\text{m/m}$	202 $\mu\text{m/m}$ 96 $\mu\text{m/m}$	18 $\mu\text{m/m}$ 18 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.17Dehnungen ϵ_y in Plattenmitte unter einer Belastung von 300 N für Prüfkörper L_08_K.

Prüfkörper	Dehnung Glas 1 oben	Dehnung Polycarbonat	Dehnung Glas 2 unten
T_01_K PK 1	+39 $\mu\text{m/m}$ +43 $\mu\text{m/m}$	-52 $\mu\text{m/m}$ -15 $\mu\text{m/m}$	-50 $\mu\text{m/m}$ -42 $\mu\text{m/m}$
T_02_K PK 1	+40 $\mu\text{m/m}$ +45 $\mu\text{m/m}$	-50 $\mu\text{m/m}$ -10 $\mu\text{m/m}$	-49 $\mu\text{m/m}$ -34 $\mu\text{m/m}$
T_01_K PK 2	+22 $\mu\text{m/m}$ +46 $\mu\text{m/m}$	-84 $\mu\text{m/m}$ +102 $\mu\text{m/m}$	-54 $\mu\text{m/m}$ -24 $\mu\text{m/m}$
T_02_K PK 2	+23 $\mu\text{m/m}$ +46 $\mu\text{m/m}$	-78 $\mu\text{m/m}$ +102 $\mu\text{m/m}$	-56 $\mu\text{m/m}$ -17 $\mu\text{m/m}$
T_01_K PK 3	+18 $\mu\text{m/m}$ +40 $\mu\text{m/m}$	-85 $\mu\text{m/m}$ +158 $\mu\text{m/m}$	-56 $\mu\text{m/m}$ -20 $\mu\text{m/m}$
T_02_K PK 3	+24 $\mu\text{m/m}$ +45 $\mu\text{m/m}$	-83 $\mu\text{m/m}$ +151 $\mu\text{m/m}$	-52 $\mu\text{m/m}$ -15 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	+28 $\mu\text{m/m}$ +44 $\mu\text{m/m}$	-72 $\mu\text{m/m}$ +81 $\mu\text{m/m}$	-53 $\mu\text{m/m}$ -25 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	9 $\mu\text{m/m}$ 2 $\mu\text{m/m}$	15 $\mu\text{m/m}$ 70 $\mu\text{m/m}$	3 $\mu\text{m/m}$ 10 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.18Dehnungen ϵ_y am Plattenrand unter einer Belastung von 300 N für Prüfkörper L_08_K.

Prüfkörper	Dehnung Glas 1 oben	Dehnung Polycarbonat	Dehnung Glas 2 unten
T_01_K PK 1	+67 $\mu\text{m/m}$ -6 $\mu\text{m/m}$	+240 $\mu\text{m/m}$ -327 $\mu\text{m/m}$	0 $\mu\text{m/m}$ -71 $\mu\text{m/m}$
T_02_K PK 1	+67 $\mu\text{m/m}$ -3 $\mu\text{m/m}$	+238 $\mu\text{m/m}$ -324 $\mu\text{m/m}$	+2 $\mu\text{m/m}$ -67 $\mu\text{m/m}$
T_01_K PK 2	+61 $\mu\text{m/m}$ -10 $\mu\text{m/m}$	+297 $\mu\text{m/m}$ -292 $\mu\text{m/m}$	+6 $\mu\text{m/m}$ -67 $\mu\text{m/m}$
T_02_K PK 2	+61 $\mu\text{m/m}$ -7 $\mu\text{m/m}$	+300 $\mu\text{m/m}$ -295 $\mu\text{m/m}$	+12 $\mu\text{m/m}$ -62 $\mu\text{m/m}$
T_01_K PK 3	+59 $\mu\text{m/m}$ -31 $\mu\text{m/m}$	+398 $\mu\text{m/m}$ -359 $\mu\text{m/m}$	+16 $\mu\text{m/m}$ -76 $\mu\text{m/m}$
T_02_K PK 3	+61 $\mu\text{m/m}$ -21 $\mu\text{m/m}$	+404 $\mu\text{m/m}$ -360 $\mu\text{m/m}$	+19 $\mu\text{m/m}$ -70 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	+62 $\mu\text{m/m}$ -13 $\mu\text{m/m}$	+313 $\mu\text{m/m}$ -326 $\mu\text{m/m}$	+9 $\mu\text{m/m}$ -69 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	3 $\mu\text{m/m}$ 10 $\mu\text{m/m}$	67 $\mu\text{m/m}$ 27 $\mu\text{m/m}$	7 $\mu\text{m/m}$ 4 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.19Dehnungen ϵ_x in Plattenmitte unter einer Belastung von 300 N für Prüfkörper L_12_K.

Prüfkörper	Dehnung Glas 1 oben	Dehnung Polycarbonat	Dehnung Glas 2 unten
T_01_K PK 1	-215 $\mu\text{m/m}$ -103 $\mu\text{m/m}$	-700 $\mu\text{m/m}$ +701 $\mu\text{m/m}$	+52 $\mu\text{m/m}$ +178 $\mu\text{m/m}$
T_02_K PK 1	-216 $\mu\text{m/m}$ -102 $\mu\text{m/m}$	-702 $\mu\text{m/m}$ +698 $\mu\text{m/m}$	+54 $\mu\text{m/m}$ +169 $\mu\text{m/m}$
T_01_K PK 2	-214 $\mu\text{m/m}$ -115 $\mu\text{m/m}$	-635 $\mu\text{m/m}$ +596 $\mu\text{m/m}$	+44 $\mu\text{m/m}$ +139 $\mu\text{m/m}$
T_02_K PK 2	-203 $\mu\text{m/m}$ -105 $\mu\text{m/m}$	-615 $\mu\text{m/m}$ +592 $\mu\text{m/m}$	+53 $\mu\text{m/m}$ +148 $\mu\text{m/m}$
T_01_K PK 3	-197 $\mu\text{m/m}$ -92 $\mu\text{m/m}$	-655 $\mu\text{m/m}$ +605 $\mu\text{m/m}$	+57 $\mu\text{m/m}$ +162 $\mu\text{m/m}$
T_02_K PK 3	-205 $\mu\text{m/m}$ -95 $\mu\text{m/m}$	-679 $\mu\text{m/m}$ +623 $\mu\text{m/m}$	+59 $\mu\text{m/m}$ +178 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	-209 $\mu\text{m/m}$ -102 $\mu\text{m/m}$	-664 $\mu\text{m/m}$ +636 $\mu\text{m/m}$	+53 $\mu\text{m/m}$ +163 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	7 $\mu\text{m/m}$ 7 $\mu\text{m/m}$	32 $\mu\text{m/m}$ 46 $\mu\text{m/m}$	5 $\mu\text{m/m}$ 15 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.20Dehnungen ϵ_x am Plattenrand unter einer Belastung von 300 N für Prüfkörper L_12_K.

Prüfkörper	Dehnung Glas 1 oben	Dehnung Polycarbonat	Dehnung Glas 2 unten
T_01_K PK 1	-158 $\mu\text{m/m}$ -36 $\mu\text{m/m}$	-682 $\mu\text{m/m}$ +786 $\mu\text{m/m}$	+77 $\mu\text{m/m}$ +202 $\mu\text{m/m}$
T_02_K PK 1	-155 $\mu\text{m/m}$ -35 $\mu\text{m/m}$	-668 $\mu\text{m/m}$ +778 $\mu\text{m/m}$	+75 $\mu\text{m/m}$ +193 $\mu\text{m/m}$
T_01_K PK 2	-172 $\mu\text{m/m}$ -61 $\mu\text{m/m}$	-630 $\mu\text{m/m}$ +689 $\mu\text{m/m}$	+68 $\mu\text{m/m}$ +180 $\mu\text{m/m}$
T_02_K PK 2	-161 $\mu\text{m/m}$ -53 $\mu\text{m/m}$	-595 $\mu\text{m/m}$ +672 $\mu\text{m/m}$	+78 $\mu\text{m/m}$ +186 $\mu\text{m/m}$
T_01_K PK 3	-152 $\mu\text{m/m}$ -42 $\mu\text{m/m}$	-664 $\mu\text{m/m}$ +701 $\mu\text{m/m}$	+42 $\mu\text{m/m}$ +192 $\mu\text{m/m}$
T_02_K PK 3	-158 $\mu\text{m/m}$ -44 $\mu\text{m/m}$	-664 $\mu\text{m/m}$ +704 $\mu\text{m/m}$	+56 $\mu\text{m/m}$ +212 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	-160 $\mu\text{m/m}$ -45 $\mu\text{m/m}$	-650 $\mu\text{m/m}$ +721 $\mu\text{m/m}$	+66 $\mu\text{m/m}$ +194 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	6 $\mu\text{m/m}$ 9 $\mu\text{m/m}$	29 $\mu\text{m/m}$ 44 $\mu\text{m/m}$	13 $\mu\text{m/m}$ 10 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.21Dehnungen ε_y in Plattenrand unter einer Belastung von 300 N für Prüfkörper L_12_K.

Prüfkörper	Dehnung Glas 1 oben	Dehnung Polycarbonat	Dehnung Glas 2 unten
T_01_K PK 1	+30 $\mu\text{m/m}$ +29 $\mu\text{m/m}$	-38 $\mu\text{m/m}$ +16 $\mu\text{m/m}$	-33 $\mu\text{m/m}$ -13 $\mu\text{m/m}$
T_02_K PK 1	+33 $\mu\text{m/m}$ +32 $\mu\text{m/m}$	-21 $\mu\text{m/m}$ +17 $\mu\text{m/m}$	-31 $\mu\text{m/m}$ -22 $\mu\text{m/m}$
T_01_K PK 2	+9 $\mu\text{m/m}$ +16 $\mu\text{m/m}$	-54 $\mu\text{m/m}$ +28 $\mu\text{m/m}$	-46 $\mu\text{m/m}$ -24 $\mu\text{m/m}$
T_02_K PK 2	+18 $\mu\text{m/m}$ +25 $\mu\text{m/m}$	-44 $\mu\text{m/m}$ +33 $\mu\text{m/m}$	-36 $\mu\text{m/m}$ -18 $\mu\text{m/m}$
T_01_K PK 3	+22 $\mu\text{m/m}$ +28 $\mu\text{m/m}$	-41 $\mu\text{m/m}$ +53 $\mu\text{m/m}$	-33 $\mu\text{m/m}$ -22 $\mu\text{m/m}$
T_02_K PK 3	+28 $\mu\text{m/m}$ +31 $\mu\text{m/m}$	-22 $\mu\text{m/m}$ +36 $\mu\text{m/m}$	-32 $\mu\text{m/m}$ -15 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	+23 $\mu\text{m/m}$ +27 $\mu\text{m/m}$	-36 $\mu\text{m/m}$ +30 $\mu\text{m/m}$	-35 $\mu\text{m/m}$ -19 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	8 $\mu\text{m/m}$ 5 $\mu\text{m/m}$	12 $\mu\text{m/m}$ 13 $\mu\text{m/m}$	5 $\mu\text{m/m}$ 4 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.22Dehnungen ε_y am Plattenrand unter einer Belastung von 300 N für Prüfkörper L_12_K.

Prüfkörper	Dehnung Glas 1 oben	Dehnung Polycarbonat	Dehnung Glas 2 unten
T_01_K PK 1	+41 $\mu\text{m/m}$ -6 $\mu\text{m/m}$	+241 $\mu\text{m/m}$ -297 $\mu\text{m/m}$	+7 $\mu\text{m/m}$ -45 $\mu\text{m/m}$
T_02_K PK 1	+41 $\mu\text{m/m}$ -3 $\mu\text{m/m}$	+237 $\mu\text{m/m}$ -290 $\mu\text{m/m}$	-3 $\mu\text{m/m}$ -52 $\mu\text{m/m}$
T_01_K PK 2	+27 $\mu\text{m/m}$ -14 $\mu\text{m/m}$	+207 $\mu\text{m/m}$ -274 $\mu\text{m/m}$	-8 $\mu\text{m/m}$ -53 $\mu\text{m/m}$
T_02_K PK 2	+34 $\mu\text{m/m}$ -3 $\mu\text{m/m}$	+206 $\mu\text{m/m}$ -257 $\mu\text{m/m}$	-7 $\mu\text{m/m}$ -47 $\mu\text{m/m}$
T_01_K PK 3	+39 $\mu\text{m/m}$ +0 $\mu\text{m/m}$	+231 $\mu\text{m/m}$ -257 $\mu\text{m/m}$	-4 $\mu\text{m/m}$ -52 $\mu\text{m/m}$
T_02_K PK 3	+43 $\mu\text{m/m}$ +0 $\mu\text{m/m}$	+238 $\mu\text{m/m}$ -261 $\mu\text{m/m}$	+3 $\mu\text{m/m}$ -45 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	+38 $\mu\text{m/m}$ -4 $\mu\text{m/m}$	+227 $\mu\text{m/m}$ -273 $\mu\text{m/m}$	-2 $\mu\text{m/m}$ -49 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	6 $\mu\text{m/m}$ 5 $\mu\text{m/m}$	15 $\mu\text{m/m}$ 16 $\mu\text{m/m}$	5 $\mu\text{m/m}$ 3 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.23Dehnungen ϵ_x in Plattenmitte unter einer Belastung von 300 N für Prüfkörper O_04_K.

Prüfkörper	Dehnung Glas 1 oben	Dehnung Polycarbonat	Dehnung Glas 2 unten
T_01_K PK 1	-	-	-
T_02_K PK 1	-414 $\mu\text{m/m}$ +255 $\mu\text{m/m}$	+944 $\mu\text{m/m}$ +641 $\mu\text{m/m}$	-250 $\mu\text{m/m}$ +404 $\mu\text{m/m}$
T_01_K PK 2	-	-	-
T_02_K PK 2	-433 $\mu\text{m/m}$ +307 $\mu\text{m/m}$	-498 $\mu\text{m/m}$ +979 $\mu\text{m/m}$	-303 $\mu\text{m/m}$ +456 $\mu\text{m/m}$
T_01_K PK 3	-	-	-
T_02_K PK 3	-421 $\mu\text{m/m}$ +229 $\mu\text{m/m}$	-608 $\mu\text{m/m}$ +685 $\mu\text{m/m}$	-220 $\mu\text{m/m}$ +427 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	-423 $\mu\text{m/m}$ +264 $\mu\text{m/m}$	-553 $\mu\text{m/m}$ +768 $\mu\text{m/m}$	-258 $\mu\text{m/m}$ +429 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	8 $\mu\text{m/m}$ 32 $\mu\text{m/m}$	55 $\mu\text{m/m}$ 150 $\mu\text{m/m}$	34 $\mu\text{m/m}$ 21 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.24Dehnungen ϵ_x am Plattenrand unter einer Belastung von 300 N für Prüfkörper O_04_K.

Prüfkörper	Dehnung Glas 1 oben	Dehnung Polycarbonat	Dehnung Glas 2 unten
T_01_K PK 1	-	-	-
T_02_K PK 1	-389 $\mu\text{m/m}$ +233 $\mu\text{m/m}$	-618 $\mu\text{m/m}$ +568 $\mu\text{m/m}$	0 $\mu\text{m/m}$ 386 $\mu\text{m/m}$
T_01_K PK 2	-	-	-
T_02_K PK 2	-450 $\mu\text{m/m}$ +299 $\mu\text{m/m}$	-514 $\mu\text{m/m}$ +923 $\mu\text{m/m}$	-297 $\mu\text{m/m}$ +434 $\mu\text{m/m}$
T_01_K PK 3	-	-	-
T_02_K PK 3	-309 $\mu\text{m/m}$ +248 $\mu\text{m/m}$	-619 $\mu\text{m/m}$ +636 $\mu\text{m/m}$	-239 $\mu\text{m/m}$ +356 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	-383 $\mu\text{m/m}$ +260 $\mu\text{m/m}$	-583 $\mu\text{m/m}$ +709 $\mu\text{m/m}$	-268 $\mu\text{m/m}$ +395 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	58 $\mu\text{m/m}$ 28 $\mu\text{m/m}$	49 $\mu\text{m/m}$ 154 $\mu\text{m/m}$	29 $\mu\text{m/m}$ 39 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.25Dehnungen ε_y in Plattenmitte unter einer Belastung von 300 N für Prüfkörper O_04_K.

Prüfkörper	Dehnung Glas 1 oben	Dehnung Polycarbonat	Dehnung Glas 2 unten
T_01_K PK 1	-	-	-
T_02_K PK 1	+2 $\mu\text{m/m}$ +32 $\mu\text{m/m}$	-34 $\mu\text{m/m}$ +23 $\mu\text{m/m}$	-31 $\mu\text{m/m}$ -6 $\mu\text{m/m}$
T_01_K PK 2	-	-	-
T_02_K PK 2	+8 $\mu\text{m/m}$ +26 $\mu\text{m/m}$	-93 $\mu\text{m/m}$ -68 $\mu\text{m/m}$	-19 $\mu\text{m/m}$ 0 $\mu\text{m/m}$
T_01_K PK 3	-	-	-
T_02_K PK 3	+1 $\mu\text{m/m}$ +37 $\mu\text{m/m}$	-41 $\mu\text{m/m}$ +23 $\mu\text{m/m}$	-43 $\mu\text{m/m}$ 0 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	+4 $\mu\text{m/m}$ +32 $\mu\text{m/m}$	-56 $\mu\text{m/m}$ -7 $\mu\text{m/m}$	-31 $\mu\text{m/m}$ -2 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	3 $\mu\text{m/m}$ 4 $\mu\text{m/m}$	26 $\mu\text{m/m}$ 43 $\mu\text{m/m}$	10 $\mu\text{m/m}$ 3 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.26Dehnungen ε_y am Plattenrand unter einer Belastung von 300 N für Prüfkörper O_04_K.

Prüfkörper	Dehnung Glas 1 oben	Dehnung Polycarbonat	Dehnung Glas 2 unten
T_01_K PK 1	-	-	-
T_02_K PK 1	+76 $\mu\text{m/m}$ +433 $\mu\text{m/m}$	+137 $\mu\text{m/m}$ -110 $\mu\text{m/m}$	+30 $\mu\text{m/m}$ +0 $\mu\text{m/m}$
T_01_K PK 2	-	-	-
T_02_K PK 2	+89 $\mu\text{m/m}$ -49 $\mu\text{m/m}$	+74 $\mu\text{m/m}$ -230 $\mu\text{m/m}$	+50 $\mu\text{m/m}$ -81 $\mu\text{m/m}$
T_01_K PK 3	-	-	-
T_02_K PK 3	+76 $\mu\text{m/m}$ -46 $\mu\text{m/m}$	+125 $\mu\text{m/m}$ -133 $\mu\text{m/m}$	+41 $\mu\text{m/m}$ -73 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	+80 $\mu\text{m/m}$ -48 $\mu\text{m/m}$	+112 $\mu\text{m/m}$ -158 $\mu\text{m/m}$	+46 $\mu\text{m/m}$ -77 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	6 $\mu\text{m/m}$ 1 $\mu\text{m/m}$	28 $\mu\text{m/m}$ 52 $\mu\text{m/m}$	4 $\mu\text{m/m}$ 4 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.27Dehnungen ϵ_x in Plattenmitte unter einer Belastung von 300 N für Prüfkörper O_08_K.

Prüfkörper	Dehnung Glas 1 oben	Dehnung Polycarbonat	Dehnung Glas 2 unten
T_01_K PK 1	-269 $\mu\text{m/m}$ +93 $\mu\text{m/m}$	-668 $\mu\text{m/m}$ +673 $\mu\text{m/m}$	-97 $\mu\text{m/m}$ +251 $\mu\text{m/m}$
T_02_K PK 1	-276 $\mu\text{m/m}$ +88 $\mu\text{m/m}$	-683 $\mu\text{m/m}$ +673 $\mu\text{m/m}$	-105 $\mu\text{m/m}$ +263 $\mu\text{m/m}$
T_01_K PK 2	-273 $\mu\text{m/m}$ +82 $\mu\text{m/m}$	-647 $\mu\text{m/m}$ +693 $\mu\text{m/m}$	-124 $\mu\text{m/m}$ +232 $\mu\text{m/m}$
T_02_K PK 2	-266 $\mu\text{m/m}$ +86 $\mu\text{m/m}$	-639 $\mu\text{m/m}$ +693 $\mu\text{m/m}$	-120 $\mu\text{m/m}$ +231 $\mu\text{m/m}$
T_01_K PK 3	-291 $\mu\text{m/m}$ +111 $\mu\text{m/m}$	-680 $\mu\text{m/m}$ +871 $\mu\text{m/m}$	-130 $\mu\text{m/m}$ +261 $\mu\text{m/m}$
T_02_K PK 3	-298 $\mu\text{m/m}$ +119 $\mu\text{m/m}$	-703 $\mu\text{m/m}$ +912 $\mu\text{m/m}$	-133 $\mu\text{m/m}$ +279 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	-279 $\mu\text{m/m}$ +96 $\mu\text{m/m}$	-670 $\mu\text{m/m}$ +753 $\mu\text{m/m}$	-118 $\mu\text{m/m}$ +253 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	12 $\mu\text{m/m}$ 14 $\mu\text{m/m}$	22 $\mu\text{m/m}$ 99 $\mu\text{m/m}$	13 $\mu\text{m/m}$ 17 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.28Dehnungen ϵ_x am Plattenrand unter einer Belastung von 300 N für Prüfkörper O_08_K.

Prüfkörper	Dehnung Glas 1 oben	Dehnung Polycarbonat	Dehnung Glas 2 unten
T_01_K PK 1	-232 $\mu\text{m/m}$ +148 $\mu\text{m/m}$	-683 $\mu\text{m/m}$ +707 $\mu\text{m/m}$	-121 $\mu\text{m/m}$ +239 $\mu\text{m/m}$
T_02_K PK 1	-239 $\mu\text{m/m}$ +143 $\mu\text{m/m}$	-702 $\mu\text{m/m}$ +705 $\mu\text{m/m}$	-116 $\mu\text{m/m}$ +249 $\mu\text{m/m}$
T_01_K PK 2	-247 $\mu\text{m/m}$ +110 $\mu\text{m/m}$	-657 $\mu\text{m/m}$ +721 $\mu\text{m/m}$	-102 $\mu\text{m/m}$ +250 $\mu\text{m/m}$
T_02_K PK 2	-236 $\mu\text{m/m}$ +112 $\mu\text{m/m}$	-632 $\mu\text{m/m}$ +713 $\mu\text{m/m}$	-96 $\mu\text{m/m}$ +252 $\mu\text{m/m}$
T_01_K PK 3	-252 $\mu\text{m/m}$ +158 $\mu\text{m/m}$	-667 $\mu\text{m/m}$ +891 $\mu\text{m/m}$	-143 $\mu\text{m/m}$ +262 $\mu\text{m/m}$
T_02_K PK 3	-256 $\mu\text{m/m}$ +162 $\mu\text{m/m}$	-679 $\mu\text{m/m}$ +915 $\mu\text{m/m}$	-135 $\mu\text{m/m}$ +279 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	-243 $\mu\text{m/m}$ +139 $\mu\text{m/m}$	-670 $\mu\text{m/m}$ +775 $\mu\text{m/m}$	-119 $\mu\text{m/m}$ +255 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	8 $\mu\text{m/m}$ 21 $\mu\text{m/m}$	22 $\mu\text{m/m}$ 91 $\mu\text{m/m}$	17 $\mu\text{m/m}$ 13 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.29Dehnungen ε_y in Plattenmitte unter einer Belastung von 300 N für Prüfkörper O_08_K.

Prüfkörper	Dehnung Glas 1 oben	Dehnung Polycarbonat	Dehnung Glas 2 unten
T_01_K PK 1	-3 $\mu\text{m/m}$ +29 $\mu\text{m/m}$	-58 $\mu\text{m/m}$ +59 $\mu\text{m/m}$	-36 $\mu\text{m/m}$ -2 $\mu\text{m/m}$
T_02_K PK 1	-6 $\mu\text{m/m}$ +21 $\mu\text{m/m}$	-62 $\mu\text{m/m}$ +44 $\mu\text{m/m}$	-41 $\mu\text{m/m}$ +9 $\mu\text{m/m}$
T_01_K PK 2	-5 $\mu\text{m/m}$ +10 $\mu\text{m/m}$	-52 $\mu\text{m/m}$ +4 $\mu\text{m/m}$	-36 $\mu\text{m/m}$ -14 $\mu\text{m/m}$
T_02_K PK 2	+3 $\mu\text{m/m}$ +15 $\mu\text{m/m}$	-39 $\mu\text{m/m}$ +3 $\mu\text{m/m}$	-29 $\mu\text{m/m}$ -9 $\mu\text{m/m}$
T_01_K PK 3	-1 $\mu\text{m/m}$ +28 $\mu\text{m/m}$	-92 $\mu\text{m/m}$ +28 $\mu\text{m/m}$	-32 $\mu\text{m/m}$ -1 $\mu\text{m/m}$
T_02_K PK 3	+3 $\mu\text{m/m}$ +29 $\mu\text{m/m}$	-90 $\mu\text{m/m}$ +13 $\mu\text{m/m}$	-30 $\mu\text{m/m}$ +3 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	-1 $\mu\text{m/m}$ +22 $\mu\text{m/m}$	-66 $\mu\text{m/m}$ +25 $\mu\text{m/m}$	-34 $\mu\text{m/m}$ -2 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	4 $\mu\text{m/m}$ 7 $\mu\text{m/m}$	19 $\mu\text{m/m}$ 21 $\mu\text{m/m}$	4 $\mu\text{m/m}$ 7 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.30Dehnungen ε_y am Plattenrand unter einer Belastung von 300 N für Prüfkörper O_08_K.

Prüfkörper	Dehnung Glas 1 oben	Dehnung Polycarbonat	Dehnung Glas 2 unten
T_01_K PK 1	+56 $\mu\text{m/m}$ -45 $\mu\text{m/m}$	+199 $\mu\text{m/m}$ -219 $\mu\text{m/m}$	+34 $\mu\text{m/m}$ -63 $\mu\text{m/m}$
T_02_K PK 1	+52 $\mu\text{m/m}$ -52 $\mu\text{m/m}$	+197 $\mu\text{m/m}$ -228 $\mu\text{m/m}$	+43 $\mu\text{m/m}$ -56 $\mu\text{m/m}$
T_01_K PK 2	+50 $\mu\text{m/m}$ -51 $\mu\text{m/m}$	+180 $\mu\text{m/m}$ -240 $\mu\text{m/m}$	+32 $\mu\text{m/m}$ -70 $\mu\text{m/m}$
T_02_K PK 2	+56 $\mu\text{m/m}$ -46 $\mu\text{m/m}$	+183 $\mu\text{m/m}$ -233 $\mu\text{m/m}$	+30 $\mu\text{m/m}$ -68 $\mu\text{m/m}$
T_01_K PK 3	+62 $\mu\text{m/m}$ -49 $\mu\text{m/m}$	+181 $\mu\text{m/m}$ -279 $\mu\text{m/m}$	+41 $\mu\text{m/m}$ -65 $\mu\text{m/m}$
T_02_K PK 3	+71 $\mu\text{m/m}$ -48 $\mu\text{m/m}$	+193 $\mu\text{m/m}$ -293 $\mu\text{m/m}$	+54 $\mu\text{m/m}$ -64 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	+58 $\mu\text{m/m}$ -49 $\mu\text{m/m}$	+189 $\mu\text{m/m}$ -249 $\mu\text{m/m}$	+39 $\mu\text{m/m}$ -64 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	7 $\mu\text{m/m}$ 3 $\mu\text{m/m}$	8 $\mu\text{m/m}$ 27 $\mu\text{m/m}$	8 $\mu\text{m/m}$ 5 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.31Dehnungen ϵ_x in Plattenmitte unter einer Belastung von 300 N für Prüfkörper O_12_K.

Prüfkörper	Dehnung Glas 1 oben	Dehnung Polycarbonat	Dehnung Glas 2 unten
T_01_K PK 1	-173 $\mu\text{m/m}$ +34 $\mu\text{m/m}$	-611 $\mu\text{m/m}$ +570 $\mu\text{m/m}$	-58 $\mu\text{m/m}$ +156 $\mu\text{m/m}$
T_02_K PK 1	-168 $\mu\text{m/m}$ +37 $\mu\text{m/m}$	-602 $\mu\text{m/m}$ +566 $\mu\text{m/m}$	-51 $\mu\text{m/m}$ +150 $\mu\text{m/m}$
T_01_K PK 2	-171 $\mu\text{m/m}$ +40 $\mu\text{m/m}$	-589 $\mu\text{m/m}$ +604 $\mu\text{m/m}$	-68 $\mu\text{m/m}$ +138 $\mu\text{m/m}$
T_02_K PK 2	-177 $\mu\text{m/m}$ +41 $\mu\text{m/m}$	-605 $\mu\text{m/m}$ +616 $\mu\text{m/m}$	-68 $\mu\text{m/m}$ +150 $\mu\text{m/m}$
T_01_K PK 3	-182 $\mu\text{m/m}$ +31 $\mu\text{m/m}$	-583 $\mu\text{m/m}$ +628 $\mu\text{m/m}$	-73 $\mu\text{m/m}$ +140 $\mu\text{m/m}$
T_02_K PK 3	-180 $\mu\text{m/m}$ +27 $\mu\text{m/m}$	-568 $\mu\text{m/m}$ +612 $\mu\text{m/m}$	-73 $\mu\text{m/m}$ +142 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	-175 $\mu\text{m/m}$ +35 $\mu\text{m/m}$	-593 $\mu\text{m/m}$ +599 $\mu\text{m/m}$	-65 $\mu\text{m/m}$ +146 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	5 $\mu\text{m/m}$ 5 $\mu\text{m/m}$	15 $\mu\text{m/m}$ 24 $\mu\text{m/m}$	8 $\mu\text{m/m}$ 6 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.32Dehnungen ϵ_y am Plattenrand unter einer Belastung von 300 N für Prüfkörper O_12_K.

Prüfkörper	Dehnung Glas 1 oben	Dehnung Polycarbonat	Dehnung Glas 2 unten
T_01_K PK 1	-141 $\mu\text{m/m}$ +81 $\mu\text{m/m}$	-627 $\mu\text{m/m}$ +627 $\mu\text{m/m}$	-42 $\mu\text{m/m}$ +169 $\mu\text{m/m}$
T_02_K PK 1	-134 $\mu\text{m/m}$ +86 $\mu\text{m/m}$	-616 $\mu\text{m/m}$ +623 $\mu\text{m/m}$	-49 $\mu\text{m/m}$ +162 $\mu\text{m/m}$
T_01_K PK 2	-145 $\mu\text{m/m}$ +73 $\mu\text{m/m}$	-584 $\mu\text{m/m}$ +658 $\mu\text{m/m}$	-50 $\mu\text{m/m}$ +165 $\mu\text{m/m}$
T_02_K PK 2	-148 $\mu\text{m/m}$ +74 $\mu\text{m/m}$	-593 $\mu\text{m/m}$ +658 $\mu\text{m/m}$	-43 $\mu\text{m/m}$ +177 $\mu\text{m/m}$
T_01_K PK 3	-144 $\mu\text{m/m}$ +75 $\mu\text{m/m}$	-578 $\mu\text{m/m}$ +685 $\mu\text{m/m}$	-49 $\mu\text{m/m}$ +168 $\mu\text{m/m}$
T_02_K PK 3	-141 $\mu\text{m/m}$ +67 $\mu\text{m/m}$	-548 $\mu\text{m/m}$ +654 $\mu\text{m/m}$	-44 $\mu\text{m/m}$ +165 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	-142 $\mu\text{m/m}$ +76 $\mu\text{m/m}$	-591 $\mu\text{m/m}$ +652 $\mu\text{m/m}$	-46 $\mu\text{m/m}$ +168 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	4 $\mu\text{m/m}$ 6 $\mu\text{m/m}$	26 $\mu\text{m/m}$ 22 $\mu\text{m/m}$	3 $\mu\text{m/m}$ 5 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.33Dehnungen ε_y in Plattenmitte unter einer Belastung von 300 N für Prüfkörper O_12_K.

Prüfkörper	Dehnung Glas 1 oben	Dehnung Polycarbonat	Dehnung Glas 2 unten
T_01_K PK 1	+5 $\mu\text{m/m}$ +10 $\mu\text{m/m}$	-20 $\mu\text{m/m}$ +20 $\mu\text{m/m}$	-21 $\mu\text{m/m}$ -2 $\mu\text{m/m}$
T_02_K PK 1	+10 $\mu\text{m/m}$ +15 $\mu\text{m/m}$	-15 $\mu\text{m/m}$ +20 $\mu\text{m/m}$	-15 $\mu\text{m/m}$ -8 $\mu\text{m/m}$
T_01_K PK 2	+8 $\mu\text{m/m}$ +12 $\mu\text{m/m}$	-17 $\mu\text{m/m}$ -2 $\mu\text{m/m}$	-15 $\mu\text{m/m}$ -9 $\mu\text{m/m}$
T_02_K PK 2	+8 $\mu\text{m/m}$ +13 $\mu\text{m/m}$	-18 $\mu\text{m/m}$ -4 $\mu\text{m/m}$	-14 $\mu\text{m/m}$ -3 $\mu\text{m/m}$
T_01_K PK 3	+4 $\mu\text{m/m}$ +16 $\mu\text{m/m}$	-53 $\mu\text{m/m}$ +17 $\mu\text{m/m}$	-20 $\mu\text{m/m}$ -5 $\mu\text{m/m}$
T_02_K PK 3	+3 $\mu\text{m/m}$ +13 $\mu\text{m/m}$	-49 $\mu\text{m/m}$ +9 $\mu\text{m/m}$	-21 $\mu\text{m/m}$ -2 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	+6 $\mu\text{m/m}$ +13 $\mu\text{m/m}$	-29 $\mu\text{m/m}$ +10 $\mu\text{m/m}$	-18 $\mu\text{m/m}$ -5 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	3 $\mu\text{m/m}$ 2 $\mu\text{m/m}$	16 $\mu\text{m/m}$ 10 $\mu\text{m/m}$	3 $\mu\text{m/m}$ 3 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.34Dehnungen ε_y am Plattenrand unter einer Belastung von 300 N für Prüfkörper O_12_K.

Prüfkörper	Dehnung Glas 1 oben	Dehnung Polycarbonat	Dehnung Glas 2 unten
T_01_K PK 1	+34 $\mu\text{m/m}$ -35 $\mu\text{m/m}$	+203 $\mu\text{m/m}$ -225 $\mu\text{m/m}$	+27 $\mu\text{m/m}$ -40 $\mu\text{m/m}$
T_02_K PK 1	+39 $\mu\text{m/m}$ -29 $\mu\text{m/m}$	+205 $\mu\text{m/m}$ -217 $\mu\text{m/m}$	+22 $\mu\text{m/m}$ -47 $\mu\text{m/m}$
T_01_K PK 2	+40 $\mu\text{m/m}$ -33 $\mu\text{m/m}$	+190 $\mu\text{m/m}$ -228 $\mu\text{m/m}$	+17 $\mu\text{m/m}$ -48 $\mu\text{m/m}$
T_02_K PK 2	+40 $\mu\text{m/m}$ -31 $\mu\text{m/m}$	+192 $\mu\text{m/m}$ -234 $\mu\text{m/m}$	+29 $\mu\text{m/m}$ -43 $\mu\text{m/m}$
T_01_K PK 3	+38 $\mu\text{m/m}$ -31 $\mu\text{m/m}$	+187 $\mu\text{m/m}$ -245 $\mu\text{m/m}$	+19 $\mu\text{m/m}$ -51 $\mu\text{m/m}$
T_02_K PK 3	+36 $\mu\text{m/m}$ -31 $\mu\text{m/m}$	+179 $\mu\text{m/m}$ -238 $\mu\text{m/m}$	+23 $\mu\text{m/m}$ -45 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	+38 $\mu\text{m/m}$ -32 $\mu\text{m/m}$	+193 $\mu\text{m/m}$ -231 $\mu\text{m/m}$	+23 $\mu\text{m/m}$ -46 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	2 $\mu\text{m/m}$ 2 $\mu\text{m/m}$	9 $\mu\text{m/m}$ 9 $\mu\text{m/m}$	4 $\mu\text{m/m}$ 4 $\mu\text{m/m}$

A.4.2 Dehnungen im Kurzzeitversuch – Bruchverhalten

Tabelle A.35

Kraft (oben) und Verformung (unten) der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel mit dem Dünnglas Leoflex ohne Bruch bei maximalem Maschinenweg.

Prüfkörper	L_04_K	L_08_K	L_12_K
T_03_K PK 1	694 N > 100 mm	1.746 N > 100 mm	3.037 N > 100 mm
T_03_K PK 2	597 N > 100 mm	1.672 N > 100 mm	3.158 N > 100 mm
T_03_K PK 3	817 N > 100 mm	1.183 N > 100 mm	3.330 N > 100 mm
Mittelwert	703 N > 100 mm	1.534 N > 100 mm	3.175 N > 100 mm
Standardabweichung	90 N -	250 N -	120 N -

Tabelle A.36

Kraft (oben) und Verformung (unten) der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel mit dem Dünnglas Leoflex ohne Bruch bei einer Verformung von 100 mm.

Prüfkörper	L_04_K	L_08_K	L_12_K
T_03_K PK 1	545 N 99,3 mm	1.293 N 101,0 mm	2.278 N 101,1 mm
T_03_K PK 2	476 N 105,6 mm	1.208 N 100,6 mm	2.471 N 102,3 mm
T_03_K PK 3	554 N 108,1 mm	960 N 101,4 mm	2.348 N 101,9 mm
Mittelwert	525 N 104,4 mm	1.154 N 101,0 mm	2.366 N 101,8 mm
Standardabweichung	35 N 3,7 mm	141 N 0,3 mm	80 N 0,5 mm

Tabelle A.37

Kraft (oben) und Verformung (unten) der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel mit dem Dünnglas Optiwhite mit Bruch.

Prüfkörper	O_04_K	O_08_K	O_12_K
T_03_K PK 1	396 N 46,9 mm	911 N 54,9 mm	1.642 N 55,3 m
T_03_K PK 2	299 N 40,4 mm	910 N 53,3 mm	1.326 N 47,3 mm
T_03_K PK 3	299 N 33,1 mm	911 N 63,9 mm	1.400 N 50,9 mm
Mittelwert	332 N 40,1 mm	911 N 57,3 mm	1.456 N 51,2 mm
Standardabweichung	46 N 5,6 mm	1 N 4,7 mm	135 N 3,3 mm

Tabelle A.38

Dehnungen ϵ_x in Plattenmitte unter maximalem Maschinenweg für Prüfkörper L_04_K.

Prüfkörper	Dehnung Glas 1 oben	Dehnung Polycarbonat	Dehnung Glas 2 unten
T_03_K PK 1	-1.090 $\mu\text{m/m}$ -319 $\mu\text{m/m}$	-1.805 $\mu\text{m/m}$ +1.248 $\mu\text{m/m}$	+356 $\mu\text{m/m}$ +1.122 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 2	-1.129 $\mu\text{m/m}$ -247 $\mu\text{m/m}$	-985 $\mu\text{m/m}$ +2.373 $\mu\text{m/m}$	+144 $\mu\text{m/m}$ +991 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 3	-1.196 $\mu\text{m/m}$ -600 $\mu\text{m/m}$	-2.063 $\mu\text{m/m}$ +380 $\mu\text{m/m}$	+674 $\mu\text{m/m}$ +1.251 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	-1.138 $\mu\text{m/m}$ -389 $\mu\text{m/m}$	-1.618 $\mu\text{m/m}$ +1.334 $\mu\text{m/m}$	+392 $\mu\text{m/m}$ +1.121 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	44 $\mu\text{m/m}$ 152 $\mu\text{m/m}$	460 $\mu\text{m/m}$ 816 $\mu\text{m/m}$	218 $\mu\text{m/m}$ 106 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.39

Dehnungen ϵ_x in Plattenrand unter maximalem Maschinenweg für Prüfkörper L_04_K.

Prüfkörper	Dehnung Glas 1 oben	Dehnung Polycarbonat	Dehnung Glas 2 unten
T_03_K PK 1	-922 $\mu\text{m/m}$ -259 $\mu\text{m/m}$	-1.470 $\mu\text{m/m}$ +1.124 $\mu\text{m/m}$	+270 $\mu\text{m/m}$ +913 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 2	-871 $\mu\text{m/m}$ -92 $\mu\text{m/m}$	-860 $\mu\text{m/m}$ +2.050 $\mu\text{m/m}$	+17 $\mu\text{m/m}$ +725 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 3	-831 $\mu\text{m/m}$ -412 $\mu\text{m/m}$	-1.659 $\mu\text{m/m}$ +94 $\mu\text{m/m}$	+509 $\mu\text{m/m}$ +925 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	-875 $\mu\text{m/m}$ -254 $\mu\text{m/m}$	-1.330 $\mu\text{m/m}$ +1.090 $\mu\text{m/m}$	+266 $\mu\text{m/m}$ +854 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	37 $\mu\text{m/m}$ 131 $\mu\text{m/m}$	341 $\mu\text{m/m}$ 799 $\mu\text{m/m}$	201 $\mu\text{m/m}$ 91 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.40Dehnungen ϵ_y in Plattenmitte unter maximalem Maschinenweg für Prüfkörper L_04_K.

Prüfkörper	Dehnung Glas 1 oben	Dehnung Polycarbonat	Dehnung Glas 2 unten
T_03_K PK 1	+145 $\mu\text{m/m}$ +123 $\mu\text{m/m}$	+142 $\mu\text{m/m}$ +86 $\mu\text{m/m}$	-152 $\mu\text{m/m}$ -154 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 2	+146 $\mu\text{m/m}$ +123 $\mu\text{m/m}$	-203 $\mu\text{m/m}$ -298 $\mu\text{m/m}$	-113 $\mu\text{m/m}$ -137 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 3	+211 $\mu\text{m/m}$ +151 $\mu\text{m/m}$	+338 $\mu\text{m/m}$ +179 $\mu\text{m/m}$	-223 $\mu\text{m/m}$ -232 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	+167 $\mu\text{m/m}$ +132 $\mu\text{m/m}$	+93 $\mu\text{m/m}$ -11 $\mu\text{m/m}$	-162 $\mu\text{m/m}$ -174 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	31 $\mu\text{m/m}$ 13 $\mu\text{m/m}$	224 $\mu\text{m/m}$ 207 $\mu\text{m/m}$	45 $\mu\text{m/m}$ 41 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.41Dehnungen ϵ_y in Plattenrand unter maximalem Maschinenweg für Prüfkörper L_04_K.

Prüfkörper	Dehnung Glas 1 oben	Dehnung Polycarbonat	Dehnung Glas 2 unten
T_03_K PK 1	+192 $\mu\text{m/m}$ +70 $\mu\text{m/m}$	+398 $\mu\text{m/m}$ -266 $\mu\text{m/m}$	-72 $\mu\text{m/m}$ -198 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 2	+184 $\mu\text{m/m}$ +32 $\mu\text{m/m}$	+162 $\mu\text{m/m}$ -609 $\mu\text{m/m}$	-13 $\mu\text{m/m}$ -156 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 3	+196 $\mu\text{m/m}$ +53 $\mu\text{m/m}$	+611 $\mu\text{m/m}$ -56 $\mu\text{m/m}$	-97 $\mu\text{m/m}$ -242 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	+191 $\mu\text{m/m}$ +51 $\mu\text{m/m}$	+390 $\mu\text{m/m}$ -310 $\mu\text{m/m}$	-61 $\mu\text{m/m}$ -199 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	5 $\mu\text{m/m}$ 15 $\mu\text{m/m}$	183 $\mu\text{m/m}$ 228 $\mu\text{m/m}$	35 $\mu\text{m/m}$ 35 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.42Dehnungen ϵ_x in Plattenmitte unter maximalem Maschinenweg für Prüfkörper L_08_K.

Prüfkörper	Dehnung Glas 1 oben	Dehnung Polycarbonat	Dehnung Glas 2 unten
T_03_K PK 1	-1.850 $\mu\text{m/m}$ -631 $\mu\text{m/m}$	-4.347 $\mu\text{m/m}$ +5.590 $\mu\text{m/m}$	+517 $\mu\text{m/m}$ +1.689 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 2	-1.724 $\mu\text{m/m}$ -531 $\mu\text{m/m}$	-4.781 $\mu\text{m/m}$ +4.932 $\mu\text{m/m}$	+619 $\mu\text{m/m}$ +1.799 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 3	-1.429 $\mu\text{m/m}$ -172 $\mu\text{m/m}$	-5.256 $\mu\text{m/m}$ +4.652 $\mu\text{m/m}$	+346 $\mu\text{m/m}$ +1.571 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	-1.668 $\mu\text{m/m}$ -445 $\mu\text{m/m}$	-4.795 $\mu\text{m/m}$ +5.058 $\mu\text{m/m}$	+494 $\mu\text{m/m}$ +1.687 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	177 $\mu\text{m/m}$ 197 $\mu\text{m/m}$	371 $\mu\text{m/m}$ 393 $\mu\text{m/m}$	113 $\mu\text{m/m}$ 93 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.43Dehnungen ε_x in Plattenrand unter maximalem Maschinenweg für Prüfkörper L_08_K.

Prüfkörper	Dehnung Glas 1 oben	Dehnung Polycarbonat	Dehnung Glas 2 unten
T_03_K PK 1	-1.620 $\mu\text{m/m}$ -441 $\mu\text{m/m}$	-4.113 $\mu\text{m/m}$ +5.263 $\mu\text{m/m}$	+310 $\mu\text{m/m}$ +1.460 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 2	-1.434 $\mu\text{m/m}$ -249 $\mu\text{m/m}$	-4.966 $\mu\text{m/m}$ +4.607 $\mu\text{m/m}$	+279 $\mu\text{m/m}$ +1.437 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 3	-1.184 $\mu\text{m/m}$ +69 $\mu\text{m/m}$	-5.282 $\mu\text{m/m}$ +4.631 $\mu\text{m/m}$	+31 $\mu\text{m/m}$ +1.223 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	-1.413 $\mu\text{m/m}$ -207 $\mu\text{m/m}$	-4.787 $\mu\text{m/m}$ +4.834 $\mu\text{m/m}$	+207 $\mu\text{m/m}$ +1.373 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	179 $\mu\text{m/m}$ 211 $\mu\text{m/m}$	494 $\mu\text{m/m}$ 304 $\mu\text{m/m}$	125 $\mu\text{m/m}$ 107 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.44Dehnungen ε_y in Plattenmitte unter maximalem Maschinenweg für Prüfkörper L_08_K.

Prüfkörper	Dehnung Glas 1 oben	Dehnung Polycarbonat	Dehnung Glas 2 unten
T_03_K PK 1	+276 $\mu\text{m/m}$ +265 $\mu\text{m/m}$	-160 $\mu\text{m/m}$ -177 $\mu\text{m/m}$	-250 $\mu\text{m/m}$ -251 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 2	+215 $\mu\text{m/m}$ +221 $\mu\text{m/m}$	+77 $\mu\text{m/m}$ +80 $\mu\text{m/m}$	-264 $\mu\text{m/m}$ -232 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 3	+155 $\mu\text{m/m}$ +147 $\mu\text{m/m}$	+141 $\mu\text{m/m}$ +215 $\mu\text{m/m}$	-187 $\mu\text{m/m}$ -168 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	+215 $\mu\text{m/m}$ +211 $\mu\text{m/m}$	+19 $\mu\text{m/m}$ +39 $\mu\text{m/m}$	-234 $\mu\text{m/m}$ -217 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	50 $\mu\text{m/m}$ 48 $\mu\text{m/m}$	129 $\mu\text{m/m}$ 163 $\mu\text{m/m}$	33 $\mu\text{m/m}$ 36 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.45Dehnungen ε_y in Plattenrand unter maximalem Maschinenweg für Prüfkörper L_08_K.

Prüfkörper	Dehnung Glas 1 oben	Dehnung Polycarbonat	Dehnung Glas 2 unten
T_03_K PK 1	+401 $\mu\text{m/m}$ +62 $\mu\text{m/m}$	+1.197 $\mu\text{m/m}$ -1.575 $\mu\text{m/m}$	-63 $\mu\text{m/m}$ -315 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 2	+342 $\mu\text{m/m}$ +47 $\mu\text{m/m}$	+1.448 $\mu\text{m/m}$ -1.276 $\mu\text{m/m}$	-24 $\mu\text{m/m}$ -322 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 3	+264 $\mu\text{m/m}$ -35 $\mu\text{m/m}$	+1.569 $\mu\text{m/m}$ -1.221 $\mu\text{m/m}$	+23 $\mu\text{m/m}$ -263 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	+336 $\mu\text{m/m}$ +25 $\mu\text{m/m}$	+1.404 $\mu\text{m/m}$ -1.358 $\mu\text{m/m}$	-21 $\mu\text{m/m}$ -300 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	56 $\mu\text{m/m}$ 43 $\mu\text{m/m}$	155 $\mu\text{m/m}$ 156 $\mu\text{m/m}$	35 $\mu\text{m/m}$ 26 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.46Dehnungen ϵ_x in Plattenmitte unter maximalem Maschinenweg für Prüfkörper L_12_K.

Prüfkörper	Dehnung Glas 1 oben	Dehnung Polycarbonat	Dehnung Glas 2 unten
T_03_K PK 1	-2.216 $\mu\text{m/m}$ -869 $\mu\text{m/m}$	-7.643 $\mu\text{m/m}$ +8.822 $\mu\text{m/m}$	+760 $\mu\text{m/m}$ +2.081 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 2	-2.188 $\mu\text{m/m}$ -892 $\mu\text{m/m}$	-7.660 $\mu\text{m/m}$ +8.107 $\mu\text{m/m}$	+827 $\mu\text{m/m}$ +1.991 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 3	-2.160 $\mu\text{m/m}$ -798 $\mu\text{m/m}$	-7.812 $\mu\text{m/m}$ +8.207 $\mu\text{m/m}$	+924 $\mu\text{m/m}$ +2.222 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	-2.188 $\mu\text{m/m}$ -853 $\mu\text{m/m}$	-7.705 $\mu\text{m/m}$ +8.379 $\mu\text{m/m}$	+837 $\mu\text{m/m}$ +2.098 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	23 $\mu\text{m/m}$ 40 $\mu\text{m/m}$	76 $\mu\text{m/m}$ 316 $\mu\text{m/m}$	67 $\mu\text{m/m}$ 95 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.47Dehnungen ϵ_x in Plattenrand unter maximalem Maschinenweg für Prüfkörper L_12_K.

Prüfkörper	Dehnung Glas 1 oben	Dehnung Polycarbonat	Dehnung Glas 2 unten
T_03_K PK 1	-1.915 $\mu\text{m/m}$ -548 $\mu\text{m/m}$	-7.411 $\mu\text{m/m}$ +8.844 $\mu\text{m/m}$	+588 $\mu\text{m/m}$ +1.897 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 2	-1.946 $\mu\text{m/m}$ -587 $\mu\text{m/m}$	-7.350 $\mu\text{m/m}$ +8.172 $\mu\text{m/m}$	+605 $\mu\text{m/m}$ +2.000 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 3	-1.986 $\mu\text{m/m}$ -680 $\mu\text{m/m}$	-7.753 $\mu\text{m/m}$ +8.349 $\mu\text{m/m}$	+521 $\mu\text{m/m}$ +2.101 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	-1.949 $\mu\text{m/m}$ -605 $\mu\text{m/m}$	-7.505 $\mu\text{m/m}$ +8.455 $\mu\text{m/m}$	+571 $\mu\text{m/m}$ +1.999 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	29 $\mu\text{m/m}$ 55 $\mu\text{m/m}$	177 $\mu\text{m/m}$ 284 $\mu\text{m/m}$	36 $\mu\text{m/m}$ 83 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.48Dehnungen ϵ_y in Plattenmitte unter maximalem Maschinenweg für Prüfkörper L_12_K.

Prüfkörper	Dehnung Glas 1 oben	Dehnung Polycarbonat	Dehnung Glas 2 unten
T_03_K PK 1	+329 $\mu\text{m/m}$ +349 $\mu\text{m/m}$	-388 $\mu\text{m/m}$ +245 $\mu\text{m/m}$	-311 $\mu\text{m/m}$ -274 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 2	+278 $\mu\text{m/m}$ +312 $\mu\text{m/m}$	-253 $\mu\text{m/m}$ +360 $\mu\text{m/m}$	-350 $\mu\text{m/m}$ -292 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 3	+318 $\mu\text{m/m}$ +350 $\mu\text{m/m}$	-212 $\mu\text{m/m}$ +426 $\mu\text{m/m}$	-332 $\mu\text{m/m}$ -283 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	+308 $\mu\text{m/m}$ +337 $\mu\text{m/m}$	-284 $\mu\text{m/m}$ +344 $\mu\text{m/m}$	-331 $\mu\text{m/m}$ -283 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	22 $\mu\text{m/m}$ 17 $\mu\text{m/m}$	75 $\mu\text{m/m}$ 74 $\mu\text{m/m}$	16 $\mu\text{m/m}$ 7 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.49Dehnungen ε_y in Plattenrand unter maximalem Maschinenweg für Prüfkörper L_12_K.

Prüfkörper	Dehnung Glas 1 oben	Dehnung Polycarbonat	Dehnung Glas 2 unten
T_03_K PK 1	+417 $\mu\text{m/m}$ +77 $\mu\text{m/m}$	+2.361 $\mu\text{m/m}$ -2.658 $\mu\text{m/m}$	-62 $\mu\text{m/m}$ -502 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 2	+457 $\mu\text{m/m}$ +65 $\mu\text{m/m}$	+2.432 $\mu\text{m/m}$ -2.581 $\mu\text{m/m}$	-99 $\mu\text{m/m}$ -496 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 3	+506 $\mu\text{m/m}$ +109 $\mu\text{m/m}$	+2.420 $\mu\text{m/m}$ -2.335 $\mu\text{m/m}$	-94 $\mu\text{m/m}$ -541 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	+478 $\mu\text{m/m}$ +84 $\mu\text{m/m}$	+2.404 $\mu\text{m/m}$ -2.525 $\mu\text{m/m}$	-85 $\mu\text{m/m}$ -513 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	21 $\mu\text{m/m}$ 19 $\mu\text{m/m}$	31 $\mu\text{m/m}$ 138 $\mu\text{m/m}$	16 $\mu\text{m/m}$ 20 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.50Dehnungen ε_x in Plattenmitte unter einer Verformung von 100 mm für Prüfkörper L_04_K.

Prüfkörper	Dehnung Glas 1 oben	Dehnung Polycarbonat	Dehnung Glas 2 unten
T_03_K PK 1	-795 $\mu\text{m/m}$ -235 $\mu\text{m/m}$	-1.297 $\mu\text{m/m}$ +902 $\mu\text{m/m}$	+259 $\mu\text{m/m}$ +815 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 2	-865 $\mu\text{m/m}$ -197 $\mu\text{m/m}$	-749 $\mu\text{m/m}$ +1.739 $\mu\text{m/m}$	+122 $\mu\text{m/m}$ +764 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 3	-763 $\mu\text{m/m}$ -390 $\mu\text{m/m}$	-1.258 $\mu\text{m/m}$ +241 $\mu\text{m/m}$	+421 $\mu\text{m/m}$ +793 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	-808 $\mu\text{m/m}$ -274 $\mu\text{m/m}$	-1.101 $\mu\text{m/m}$ +961 $\mu\text{m/m}$	+267 $\mu\text{m/m}$ +791 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	42 $\mu\text{m/m}$ 83 $\mu\text{m/m}$	250 $\mu\text{m/m}$ 613 $\mu\text{m/m}$	122 $\mu\text{m/m}$ 21 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.51Dehnungen ε_x in Plattenrand unter einer Verformung von 100 mm für Prüfkörper L_04_K.

Prüfkörper	Dehnung Glas 1 oben	Dehnung Polycarbonat	Dehnung Glas 2 unten
T_03_K PK 1	-668 $\mu\text{m/m}$ -191 $\mu\text{m/m}$	-1.043 $\mu\text{m/m}$ +814 $\mu\text{m/m}$	+208 $\mu\text{m/m}$ +666 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 2	-671 $\mu\text{m/m}$ -82 $\mu\text{m/m}$	-639 $\mu\text{m/m}$ +1.479 $\mu\text{m/m}$	+38 $\mu\text{m/m}$ +550 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 3	-539 $\mu\text{m/m}$ -268 $\mu\text{m/m}$	-1.014 $\mu\text{m/m}$ +80 $\mu\text{m/m}$	+326 $\mu\text{m/m}$ +591 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	-626 $\mu\text{m/m}$ -180 $\mu\text{m/m}$	-899 $\mu\text{m/m}$ +791 $\mu\text{m/m}$	+191 $\mu\text{m/m}$ +603 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	61 $\mu\text{m/m}$ 76 $\mu\text{m/m}$	184 $\mu\text{m/m}$ 571 $\mu\text{m/m}$	118 $\mu\text{m/m}$ 48 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.52Dehnungen ε_y in Plattenmitte unter einer Verformung von 100 mm für Prüfkörper L_04_K.

Prüfkörper	Dehnung Glas 1 oben	Dehnung Polycarbonat	Dehnung Glas 2 unten
T_03_K PK 1	+105 $\mu\text{m/m}$ +89 $\mu\text{m/m}$	+94 $\mu\text{m/m}$ +53 $\mu\text{m/m}$	-108 $\mu\text{m/m}$ -112 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 2	+111 $\mu\text{m/m}$ +91 $\mu\text{m/m}$	-143 $\mu\text{m/m}$ -217 $\mu\text{m/m}$	-85 $\mu\text{m/m}$ -106 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 3	+126 $\mu\text{m/m}$ +83 $\mu\text{m/m}$	+202 $\mu\text{m/m}$ +77 $\mu\text{m/m}$	-147 $\mu\text{m/m}$ -152 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	+114 $\mu\text{m/m}$ +88 $\mu\text{m/m}$	+51 $\mu\text{m/m}$ -29 $\mu\text{m/m}$	-114 $\mu\text{m/m}$ -123 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	9 $\mu\text{m/m}$ 3 $\mu\text{m/m}$	144 $\mu\text{m/m}$ 133 $\mu\text{m/m}$	25 $\mu\text{m/m}$ 20 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.53Dehnungen ε_y in Plattenrand unter einer Verformung von 100 mm für Prüfkörper L_04_K.

Prüfkörper	Dehnung Glas 1 oben	Dehnung Polycarbonat	Dehnung Glas 2 unten
T_03_K PK 1	+145 $\mu\text{m/m}$ +43 $\mu\text{m/m}$	+303 $\mu\text{m/m}$ -225 $\mu\text{m/m}$	-46 $\mu\text{m/m}$ -154 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 2	+136 $\mu\text{m/m}$ +23 $\mu\text{m/m}$	+156 $\mu\text{m/m}$ -471 $\mu\text{m/m}$	-6 $\mu\text{m/m}$ -126 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 3	+122 $\mu\text{m/m}$ +21 $\mu\text{m/m}$	+383 $\mu\text{m/m}$ -78 $\mu\text{m/m}$	-57 $\mu\text{m/m}$ -162 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	+134 $\mu\text{m/m}$ +29 $\mu\text{m/m}$	+281 $\mu\text{m/m}$ -258 $\mu\text{m/m}$	-36 $\mu\text{m/m}$ -148 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	9 $\mu\text{m/m}$ 10 $\mu\text{m/m}$	94 $\mu\text{m/m}$ 162 $\mu\text{m/m}$	22 $\mu\text{m/m}$ 15 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.54Dehnungen ε_x in Plattenmitte unter einer Verformung von 100 mm für Prüfkörper L_08_K.

Prüfkörper	Dehnung Glas 1 oben	Dehnung Polycarbonat	Dehnung Glas 2 unten
T_03_K PK 1	-1.272 $\mu\text{m/m}$ -437 $\mu\text{m/m}$	-3.011 $\mu\text{m/m}$ +3.744 $\mu\text{m/m}$	+370 $\mu\text{m/m}$ +1.171 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 2	-1.178 $\mu\text{m/m}$ -365 $\mu\text{m/m}$	-3.237 $\mu\text{m/m}$ +3.283 $\mu\text{m/m}$	+437 $\mu\text{m/m}$ +1.244 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 3	-1.001 $\mu\text{m/m}$ -136 $\mu\text{m/m}$	-3.637 $\mu\text{m/m}$ +3.175 $\mu\text{m/m}$	+269 $\mu\text{m/m}$ +1.115 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	-1.150 $\mu\text{m/m}$ -313 $\mu\text{m/m}$	-3.295 $\mu\text{m/m}$ +3.401 $\mu\text{m/m}$	+359 $\mu\text{m/m}$ +1.177 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	113 $\mu\text{m/m}$ 129 $\mu\text{m/m}$	259 $\mu\text{m/m}$ 247 $\mu\text{m/m}$	69 $\mu\text{m/m}$ 53 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.55Dehnungen ε_x in Plattenrand unter einer Verformung von 100 mm für Prüfkörper L_08_K.

Prüfkörper	Dehnung Glas 1 oben	Dehnung Polycarbonat	Dehnung Glas 2 unten
T_03_K PK 1	-1.091 $\mu\text{m/m}$ -289 $\mu\text{m/m}$	-2.806 $\mu\text{m/m}$ +3.549 $\mu\text{m/m}$	+258 $\mu\text{m/m}$ +1.034 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 2	-960 $\mu\text{m/m}$ -161 $\mu\text{m/m}$	-3.343 $\mu\text{m/m}$ +3.090 $\mu\text{m/m}$	+232 $\mu\text{m/m}$ +1.007 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 3	-818 $\mu\text{m/m}$ +44 $\mu\text{m/m}$	-3.633 $\mu\text{m/m}$ +3.163 $\mu\text{m/m}$	+76 $\mu\text{m/m}$ +894 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	-956 $\mu\text{m/m}$ -135 $\mu\text{m/m}$	-3.261 $\mu\text{m/m}$ +3.267 $\mu\text{m/m}$	+189 $\mu\text{m/m}$ +978 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	112 $\mu\text{m/m}$ 137 $\mu\text{m/m}$	342 $\mu\text{m/m}$ 201 $\mu\text{m/m}$	80 $\mu\text{m/m}$ 61 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.56Dehnungen ε_y in Plattenmitte unter einer Verformung von 100 mm für Prüfkörper L_08_K.

Prüfkörper	Dehnung Glas 1 oben	Dehnung Polycarbonat	Dehnung Glas 2 unten
T_03_K PK 1	+183 $\mu\text{m/m}$ +186 $\mu\text{m/m}$	-157 $\mu\text{m/m}$ -77 $\mu\text{m/m}$	-180 $\mu\text{m/m}$ -168 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 2	+139 $\mu\text{m/m}$ +156 $\mu\text{m/m}$	-18 $\mu\text{m/m}$ +113 $\mu\text{m/m}$	-186 $\mu\text{m/m}$ -146 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 3	+104 $\mu\text{m/m}$ +111 $\mu\text{m/m}$	+17 $\mu\text{m/m}$ +205 $\mu\text{m/m}$	-138 $\mu\text{m/m}$ -105 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	+142 $\mu\text{m/m}$ +151 $\mu\text{m/m}$	-53 $\mu\text{m/m}$ +80 $\mu\text{m/m}$	-168 $\mu\text{m/m}$ -140 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	32 $\mu\text{m/m}$ 31 $\mu\text{m/m}$	75 $\mu\text{m/m}$ 117 $\mu\text{m/m}$	21 $\mu\text{m/m}$ 26 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.57Dehnungen ε_y in Plattenrand unter einer Verformung von 100 mm für Prüfkörper L_08_K.

Prüfkörper	Dehnung Glas 1 oben	Dehnung Polycarbonat	Dehnung Glas 2 unten
T_03_K PK 1	+277 $\mu\text{m/m}$ +33 $\mu\text{m/m}$	+878 $\mu\text{m/m}$ -1.152 $\mu\text{m/m}$	-29 $\mu\text{m/m}$ -248 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 2	+238 $\mu\text{m/m}$ +13 $\mu\text{m/m}$	+1.046 $\mu\text{m/m}$ +964 $\mu\text{m/m}$	-5 $\mu\text{m/m}$ -239 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 3	+188 $\mu\text{m/m}$ -33 $\mu\text{m/m}$	+1.139 $\mu\text{m/m}$ -1.221 $\mu\text{m/m}$	+25 $\mu\text{m/m}$ -205 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	+234 $\mu\text{m/m}$ +4 $\mu\text{m/m}$	+1.021 $\mu\text{m/m}$ -1.112 $\mu\text{m/m}$	-3 $\mu\text{m/m}$ -231 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	37 $\mu\text{m/m}$ 28 $\mu\text{m/m}$	108 $\mu\text{m/m}$ 109 $\mu\text{m/m}$	22 $\mu\text{m/m}$ 18 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.58Dehnungen ϵ_x in Plattenmitte unter einer Verformung von 100 mm für Prüfkörper L_12_K.

Prüfkörper	Dehnung Glas 1 oben	Dehnung Polycarbonat	Dehnung Glas 2 unten
T_03_K PK 1	-1.503 $\mu\text{m/m}$ -621 $\mu\text{m/m}$	-5.085 $\mu\text{m/m}$ +5.635 $\mu\text{m/m}$	+495 $\mu\text{m/m}$ +1.363 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 2	-1.549 $\mu\text{m/m}$ -690 $\mu\text{m/m}$	-5.085 $\mu\text{m/m}$ +5.401 $\mu\text{m/m}$	+553 $\mu\text{m/m}$ +1.312 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 3	-1.460 $\mu\text{m/m}$ -571 $\mu\text{m/m}$	-5.160 $\mu\text{m/m}$ +5.232 $\mu\text{m/m}$	+572 $\mu\text{m/m}$ +1.435 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	-1.504 $\mu\text{m/m}$ -628 $\mu\text{m/m}$	-5.110 $\mu\text{m/m}$ +5.423 $\mu\text{m/m}$	+540 $\mu\text{m/m}$ +1.370 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	36 $\mu\text{m/m}$ 49 $\mu\text{m/m}$	35 $\mu\text{m/m}$ 165 $\mu\text{m/m}$	33 $\mu\text{m/m}$ 50 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.59Dehnungen ϵ_x in Plattenrand unter einer Verformung von 100 mm für Prüfkörper L_12_K.

Prüfkörper	Dehnung Glas 1 oben	Dehnung Polycarbonat	Dehnung Glas 2 unten
T_03_K PK 1	-1.219 $\mu\text{m/m}$ -323 $\mu\text{m/m}$	-4.850 $\mu\text{m/m}$ +5.754 $\mu\text{m/m}$	+454 $\mu\text{m/m}$ +1.326 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 2	-1.343 $\mu\text{m/m}$ -440 $\mu\text{m/m}$	-4.793 $\mu\text{m/m}$ +5.585 $\mu\text{m/m}$	+529 $\mu\text{m/m}$ +1.418 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 3	-1.265 $\mu\text{m/m}$ -406 $\mu\text{m/m}$	-5.046 $\mu\text{m/m}$ +5.401 $\mu\text{m/m}$	+315 $\mu\text{m/m}$ +1.444 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	-1.275 $\mu\text{m/m}$ -390 $\mu\text{m/m}$	-4.896 $\mu\text{m/m}$ +5.580 $\mu\text{m/m}$	+433 $\mu\text{m/m}$ +1.396 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	51 $\mu\text{m/m}$ 49 $\mu\text{m/m}$	108 $\mu\text{m/m}$ 144 $\mu\text{m/m}$	89 $\mu\text{m/m}$ 51 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.60Dehnungen ϵ_y in Plattenmitte unter einer Verformung von 100 mm für Prüfkörper L_12_K.

Prüfkörper	Dehnung Glas 1 oben	Dehnung Polycarbonat	Dehnung Glas 2 unten
T_03_K PK 1	+206 $\mu\text{m/m}$ +239 $\mu\text{m/m}$	-382 $\mu\text{m/m}$ +284 $\mu\text{m/m}$	-225 $\mu\text{m/m}$ -171 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 2	+178 $\mu\text{m/m}$ +224 $\mu\text{m/m}$	-336 $\mu\text{m/m}$ +312 $\mu\text{m/m}$	-253 $\mu\text{m/m}$ -188 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 3	+200 $\mu\text{m/m}$ 243 $\mu\text{m/m}$	-280 $\mu\text{m/m}$ +408 $\mu\text{m/m}$	-235 $\mu\text{m/m}$ -174 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	+194 $\mu\text{m/m}$ +235 $\mu\text{m/m}$	-333 $\mu\text{m/m}$ +335 $\mu\text{m/m}$	-238 $\mu\text{m/m}$ -178 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	12 $\mu\text{m/m}$ 8 $\mu\text{m/m}$	41 $\mu\text{m/m}$ 53 $\mu\text{m/m}$	12 $\mu\text{m/m}$ 8 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.61Dehnungen ε_y in Plattenrand unter einer Verformung von 100 mm für Prüfkörper L_12_K.

Prüfkörper	Dehnung Glas 1 oben	Dehnung Polycarbonat	Dehnung Glas 2 unten
T_03_K PK 1	+307 $\mu\text{m/m}$ +23 $\mu\text{m/m}$	+1.630 $\mu\text{m/m}$ -1.902 $\mu\text{m/m}$	-45 $\mu\text{m/m}$ -367 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 2	+321 $\mu\text{m/m}$ +37 $\mu\text{m/m}$	+1.631 $\mu\text{m/m}$ -1.901 $\mu\text{m/m}$	-78 $\mu\text{m/m}$ -373 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 3	+330 $\mu\text{m/m}$ +47 $\mu\text{m/m}$	+1.673 $\mu\text{m/m}$ -1.700 $\mu\text{m/m}$	-55 $\mu\text{m/m}$ -379 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	+319 $\mu\text{m/m}$ +35 $\mu\text{m/m}$	+1.645 $\mu\text{m/m}$ -1.834 $\mu\text{m/m}$	-59 $\mu\text{m/m}$ -373 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	10 $\mu\text{m/m}$ 10 $\mu\text{m/m}$	20 $\mu\text{m/m}$ 95 $\mu\text{m/m}$	14 $\mu\text{m/m}$ 5 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.62Dehnungen ε_x in Plattenmitte bei Bruch für Prüfkörper O_04_K.

Prüfkörper	Dehnung Glas 1 oben	Dehnung Polycarbonat	Dehnung Glas 2 unten
T_03_K PK 1	-565 $\mu\text{m/m}$ +349 $\mu\text{m/m}$	2.065 $\mu\text{m/m}$ 877 $\mu\text{m/m}$	-341 $\mu\text{m/m}$ 550 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 2	-467 $\mu\text{m/m}$ +309 $\mu\text{m/m}$	-495 $\mu\text{m/m}$ +985 $\mu\text{m/m}$	-305 $\mu\text{m/m}$ +457 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 3	-423 $\mu\text{m/m}$ +233 $\mu\text{m/m}$	-613 $\mu\text{m/m}$ +693 $\mu\text{m/m}$	-223 $\mu\text{m/m}$ +431 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	-485 $\mu\text{m/m}$ +297 $\mu\text{m/m}$	-554 $\mu\text{m/m}$ +852 $\mu\text{m/m}$	-289 $\mu\text{m/m}$ +479 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	59 $\mu\text{m/m}$ 48 $\mu\text{m/m}$	59 $\mu\text{m/m}$ 121 $\mu\text{m/m}$	50 $\mu\text{m/m}$ 51 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.63Dehnungen ε_x am Plattenrand bei Bruch für Prüfkörper O_04_K.

Prüfkörper	Dehnung Glas 1 oben	Dehnung Polycarbonat	Dehnung Glas 2 unten
T_03_K PK 1	-538 $\mu\text{m/m}$ +314 $\mu\text{m/m}$	-850 $\mu\text{m/m}$ +778 $\mu\text{m/m}$	0 $\mu\text{m/m}$ 524 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 2	-450 $\mu\text{m/m}$ +302 $\mu\text{m/m}$	-512 $\mu\text{m/m}$ +930 $\mu\text{m/m}$	-299 $\mu\text{m/m}$ +435 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 3	-312 $\mu\text{m/m}$ +253 $\mu\text{m/m}$	-624 $\mu\text{m/m}$ +643 $\mu\text{m/m}$	-242 $\mu\text{m/m}$ +360 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	-433 $\mu\text{m/m}$ +277 $\mu\text{m/m}$	-662 $\mu\text{m/m}$ +784 $\mu\text{m/m}$	-271 $\mu\text{m/m}$ +397 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	93 $\mu\text{m/m}$ 24 $\mu\text{m/m}$	140 $\mu\text{m/m}$ 117 $\mu\text{m/m}$	29 $\mu\text{m/m}$ 38 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.64Dehnungen ε_y in Plattenmitte bei Bruch für Prüfkörper O_04_K.

Prüfkörper	Dehnung Glas 1 oben	Dehnung Polycarbonat	Dehnung Glas 2 unten
T_03_K PK 1	+7 $\mu\text{m/m}$ +40 $\mu\text{m/m}$	-44 $\mu\text{m/m}$ +23 $\mu\text{m/m}$	-37 $\mu\text{m/m}$ -13 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 2	+8 $\mu\text{m/m}$ +26 $\mu\text{m/m}$	-94 $\mu\text{m/m}$ -69 $\mu\text{m/m}$	-18 $\mu\text{m/m}$ 0 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 3	+2 $\mu\text{m/m}$ +36 $\mu\text{m/m}$	-41 $\mu\text{m/m}$ +23 $\mu\text{m/m}$	-42 $\mu\text{m/m}$ 0 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	+6 $\mu\text{m/m}$ +34 $\mu\text{m/m}$	-60 $\mu\text{m/m}$ -7 $\mu\text{m/m}$	-33 $\mu\text{m/m}$ -13 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	3 $\mu\text{m/m}$ 6 $\mu\text{m/m}$	24 $\mu\text{m/m}$ 44 $\mu\text{m/m}$	10 $\mu\text{m/m}$ 0 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.65Dehnungen ε_x am Plattenrand bei Bruch für Prüfkörper O_04_K.

Prüfkörper	Dehnung Glas 1 oben	Dehnung Polycarbonat	Dehnung Glas 2 unten
T_03_K PK 1	+102 $\mu\text{m/m}$ +287 $\mu\text{m/m}$	+184 $\mu\text{m/m}$ -142 $\mu\text{m/m}$	+39 $\mu\text{m/m}$ 0 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 2	+90 $\mu\text{m/m}$ -49 $\mu\text{m/m}$	+73 $\mu\text{m/m}$ -233 $\mu\text{m/m}$	+50 $\mu\text{m/m}$ -79 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 3	+76 $\mu\text{m/m}$ -47 $\mu\text{m/m}$	+126 $\mu\text{m/m}$ -135 $\mu\text{m/m}$	+39 $\mu\text{m/m}$ -73 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	+89 $\mu\text{m/m}$ -48 $\mu\text{m/m}$	+128 $\mu\text{m/m}$ -170 $\mu\text{m/m}$	+45 $\mu\text{m/m}$ -76 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	11 $\mu\text{m/m}$ 1 $\mu\text{m/m}$	45 $\mu\text{m/m}$ 44 $\mu\text{m/m}$	6 $\mu\text{m/m}$ 3 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.66Dehnungen ε_x in Plattenmitte bei Bruch für Prüfkörper O_08_K.

Prüfkörper	Dehnung Glas 1 oben	Dehnung Polycarbonat	Dehnung Glas 2 unten
T_03_K PK 1	-782 $\mu\text{m/m}$ +286 $\mu\text{m/m}$	-1.946 $\mu\text{m/m}$ +2.002 $\mu\text{m/m}$	-273 $\mu\text{m/m}$ +765 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 2	-749 $\mu\text{m/m}$ +277 $\mu\text{m/m}$	-1.808 $\mu\text{m/m}$ +2.038 $\mu\text{m/m}$	-320 $\mu\text{m/m}$ +692 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 3	-835 $\mu\text{m/m}$ +361 $\mu\text{m/m}$	-1.951 $\mu\text{m/m}$ +2.633 $\mu\text{m/m}$	-368 $\mu\text{m/m}$ +799 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	-789 $\mu\text{m/m}$ +308 $\mu\text{m/m}$	-1.902 $\mu\text{m/m}$ +2.225 $\mu\text{m/m}$	-320 $\mu\text{m/m}$ +752 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	35 $\mu\text{m/m}$ 38 $\mu\text{m/m}$	66 $\mu\text{m/m}$ 290 $\mu\text{m/m}$	39 $\mu\text{m/m}$ 45 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.67Dehnungen ε_x am Plattenrand bei Bruch für Prüfkörper O_08_K.

Prüfkörper	Dehnung Glas 1 oben	Dehnung Polycarbonat	Dehnung Glas 2 unten
T_03_K PK 1	-694 $\mu\text{m/m}$ +403 $\mu\text{m/m}$	-1.966 $\mu\text{m/m}$ +2.014 $\mu\text{m/m}$	-353 $\mu\text{m/m}$ +687 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 2	-691 $\mu\text{m/m}$ +308 $\mu\text{m/m}$	-1.792 $\mu\text{m/m}$ +2.023 $\mu\text{m/m}$	-301 $\mu\text{m/m}$ +699 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 3	-747 $\mu\text{m/m}$ +432 $\mu\text{m/m}$	-1.894 $\mu\text{m/m}$ +2.550 $\mu\text{m/m}$	-421 $\mu\text{m/m}$ +750 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	-711 $\mu\text{m/m}$ +381 $\mu\text{m/m}$	-1.884 $\mu\text{m/m}$ +2.196 $\mu\text{m/m}$	-359 $\mu\text{m/m}$ +712 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	26 $\mu\text{m/m}$ 53 $\mu\text{m/m}$	71 $\mu\text{m/m}$ 251 $\mu\text{m/m}$	49 $\mu\text{m/m}$ 27 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.68Dehnungen ε_y in Plattenmitte bei Bruch für Prüfkörper O_08_K.

Prüfkörper	Dehnung Glas 1 oben	Dehnung Polycarbonat	Dehnung Glas 2 unten
T_03_K PK 1	+12 $\mu\text{m/m}$ +54 $\mu\text{m/m}$	-93 $\mu\text{m/m}$ +69 $\mu\text{m/m}$	-87 $\mu\text{m/m}$ -18 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 2	+17 $\mu\text{m/m}$ +48 $\mu\text{m/m}$	-106 $\mu\text{m/m}$ +21 $\mu\text{m/m}$	-75 $\mu\text{m/m}$ -30 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 3	+24 $\mu\text{m/m}$ +67 $\mu\text{m/m}$	-198 $\mu\text{m/m}$ -21 $\mu\text{m/m}$	-69 $\mu\text{m/m}$ -26 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	+18 $\mu\text{m/m}$ +56 $\mu\text{m/m}$	-132 $\mu\text{m/m}$ +23 $\mu\text{m/m}$	-77 $\mu\text{m/m}$ -25 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	5 $\mu\text{m/m}$ 8 $\mu\text{m/m}$	47 $\mu\text{m/m}$ 37 $\mu\text{m/m}$	7 $\mu\text{m/m}$ 5 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.69Dehnungen ε_y am Plattenrand bei Bruch für Prüfkörper O_08_K.

Prüfkörper	Dehnung Glas 1 oben	Dehnung Polycarbonat	Dehnung Glas 2 unten
T_03_K PK 1	+149 $\mu\text{m/m}$ -116 $\mu\text{m/m}$	+541 $\mu\text{m/m}$ -595 $\mu\text{m/m}$	+89 $\mu\text{m/m}$ -149 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 2	+159 $\mu\text{m/m}$ -106 $\mu\text{m/m}$	+514 $\mu\text{m/m}$ -615 $\mu\text{m/m}$	+68 $\mu\text{m/m}$ -173 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 3	+184 $\mu\text{m/m}$ -113 $\mu\text{m/m}$	+503 $\mu\text{m/m}$ -759 $\mu\text{m/m}$	+111 $\mu\text{m/m}$ -167 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	+164 $\mu\text{m/m}$ -111 $\mu\text{m/m}$	+520 $\mu\text{m/m}$ -656 $\mu\text{m/m}$	+89 $\mu\text{m/m}$ -163 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	15 $\mu\text{m/m}$ 4 $\mu\text{m/m}$	16 $\mu\text{m/m}$ 73 $\mu\text{m/m}$	17 $\mu\text{m/m}$ 10 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.70Dehnungen ϵ_x in Plattenmitte bei Bruch für Prüfkörper O_12_K.

Prüfkörper	Dehnung Glas 1 oben	Dehnung Polycarbonat	Dehnung Glas 2 unten
T_03_K PK 1	-872 $\mu\text{m/m}$ +242 $\mu\text{m/m}$	-3.124 $\mu\text{m/m}$ +3.107 $\mu\text{m/m}$	-249 $\mu\text{m/m}$ +819 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 2	-722 $\mu\text{m/m}$ +217 $\mu\text{m/m}$	-2.518 $\mu\text{m/m}$ +2.673 $\mu\text{m/m}$	-266 $\mu\text{m/m}$ +635 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 3	-784 $\mu\text{m/m}$ +191 $\mu\text{m/m}$	-2.558 $\mu\text{m/m}$ +2.925 $\mu\text{m/m}$	-162 $\mu\text{m/m}$ +679 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	-793 $\mu\text{m/m}$ +216 $\mu\text{m/m}$	-2.733 $\mu\text{m/m}$ +2.902 $\mu\text{m/m}$	-226 $\mu\text{m/m}$ +711 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	62 $\mu\text{m/m}$ 21 $\mu\text{m/m}$	277 $\mu\text{m/m}$ 178 $\mu\text{m/m}$	45 $\mu\text{m/m}$ 78 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.71Dehnungen ϵ_x am Plattenmitte bei Bruch für Prüfkörper O_12_K.

Prüfkörper	Dehnung Glas 1 oben	Dehnung Polycarbonat	Dehnung Glas 2 unten
T_03_K PK 1	-706 $\mu\text{m/m}$ +434 $\mu\text{m/m}$	-3.127 $\mu\text{m/m}$ +3.217 $\mu\text{m/m}$	-270 $\mu\text{m/m}$ +816 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 2	-617 $\mu\text{m/m}$ +307 $\mu\text{m/m}$	-2.418 $\mu\text{m/m}$ +2.759 $\mu\text{m/m}$	-207 $\mu\text{m/m}$ +697 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 3	-646 $\mu\text{m/m}$ +315 $\mu\text{m/m}$	-2.454 $\mu\text{m/m}$ +2.759 $\mu\text{m/m}$	-230 $\mu\text{m/m}$ +718 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	-656 $\mu\text{m/m}$ +352 $\mu\text{m/m}$	-2.667 $\mu\text{m/m}$ +3.134 $\mu\text{m/m}$	-236 $\mu\text{m/m}$ +743 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	37 $\mu\text{m/m}$ 58 $\mu\text{m/m}$	326 $\mu\text{m/m}$ 279 $\mu\text{m/m}$	26 $\mu\text{m/m}$ 52 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.72Dehnungen ϵ_y in Plattenmitte bei Bruch für Prüfkörper O_12_K.

Prüfkörper	Dehnung Glas 1 oben	Dehnung Polycarbonat	Dehnung Glas 2 unten
T_03_K PK 1	+34 $\mu\text{m/m}$ +93 $\mu\text{m/m}$	-176 $\mu\text{m/m}$ +207 $\mu\text{m/m}$	-98 $\mu\text{m/m}$ -36 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 2	+21 $\mu\text{m/m}$ +79 $\mu\text{m/m}$	-192 $\mu\text{m/m}$ +116 $\mu\text{m/m}$	-73 $\mu\text{m/m}$ -14 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 3	+16 $\mu\text{m/m}$ +90 $\mu\text{m/m}$	-284 $\mu\text{m/m}$ +133 $\mu\text{m/m}$	-66 $\mu\text{m/m}$ -7 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	+23 $\mu\text{m/m}$ +87 $\mu\text{m/m}$	-217 $\mu\text{m/m}$ +152 $\mu\text{m/m}$	-79 $\mu\text{m/m}$ -19 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	8 $\mu\text{m/m}$ 6 $\mu\text{m/m}$	47 $\mu\text{m/m}$ 39 $\mu\text{m/m}$	14 $\mu\text{m/m}$ 12 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.73Dehnungen ε_y am Plattenrand bei Bruch für Prüfkörper O_12_K.

Prüfkörper	Dehnung Glas 1 oben	Dehnung Polycarbonat	Dehnung Glas 2 unten
T_03_K PK 1	+195 $\mu\text{m/m}$ -138 $\mu\text{m/m}$	+1.036 $\mu\text{m/m}$ -1.071 $\mu\text{m/m}$	+83 $\mu\text{m/m}$ -219 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 2	+172 $\mu\text{m/m}$ -109 $\mu\text{m/m}$	+779 $\mu\text{m/m}$ -918 $\mu\text{m/m}$	+85 $\mu\text{m/m}$ -184 $\mu\text{m/m}$
T_03_K PK 3	+176 $\mu\text{m/m}$ -115 $\mu\text{m/m}$	+820 $\mu\text{m/m}$ -1.272 $\mu\text{m/m}$	+81 $\mu\text{m/m}$ -193 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	+181 $\mu\text{m/m}$ -121 $\mu\text{m/m}$	+879 $\mu\text{m/m}$ -1.087 $\mu\text{m/m}$	+83 $\mu\text{m/m}$ -198 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	10 $\mu\text{m/m}$ 13 $\mu\text{m/m}$	113 $\mu\text{m/m}$ 145 $\mu\text{m/m}$	1 $\mu\text{m/m}$ 15 $\mu\text{m/m}$

A.5 Resttragverhalten

A.5.1 Dehnungen im Kurzzeitversuch – Zustand III

Tabelle A.74

Kraft (oben) und Verformung (unten) der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel mit dem Dünnglas Le-flex im Zustand III.

Prüfkörper	L_04_R_III	L_08_R_III	L_12_R_III
T_R_III PK 1	202,5 N 86,5 mm	200,0 N 30,1 mm	200,2 N 12,0 mm
T_R_III PK 2	200,1 N 98,3 mm	200,1 N 34,4 mm	200,0 N 14,3 mm
T_R_III PK 3	201,8 N 102,0 mm	200,2 N 42,4 mm	200,3 N 15,6 mm
Mittelwert	201,5 N 95,6 mm	200,1 N 35,7 mm	200,1 N 14,0 mm
Standardabweichung	1,0 N 6,6 mm	0,1 N 5,1 mm	0,1 N 1,5 mm

Tabelle A.75

Kraft (oben) und Verformung (unten) der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel mit dem Dünnglas Optiwhite im Zustand III.

Prüfkörper	O_04_R_III	O_08_R_III	O_12_R_III
T_R_III PK 1	201,7 N 69,2 mm	200,3 N 27,7 mm	200,6 N 12,8 mm
T_R_III PK 2	201,7 N 65,1 mm	200,1 N 26,2 mm	200,7 N 10,8 mm
T_R_III PK 3	200,2 N 47,2 mm	200,4 N 27,4 mm	200,5 N 0,1 mm
Mittelwert	201,0 N 56,2 mm	200,3 N 27,1 mm	200,6 N 12,1 mm
Standardabweichung	0,8 N 9,0 mm	0,1 N 0,6 mm	0,1 N 0,9 mm

Tabelle A.76

Dehnungen ε_x in Plattenmitte und am Plattenrand unter einer Belastung von 200 N für Prüfkörper L_04_R_III.

Prüfkörper	Dehnung Mitte Polycarbonat	Dehnung Rand Polycarbonat
T_R_III PK 1	+35 $\mu\text{m/m}$ +3.751 $\mu\text{m/m}$	-256 $\mu\text{m/m}$ +4.366 $\mu\text{m/m}$
T_R_III PK 2	-14 $\mu\text{m/m}$ +5.215 $\mu\text{m/m}$	+292 $\mu\text{m/m}$ +4.041 $\mu\text{m/m}$
T_R_III PK 3	+355 $\mu\text{m/m}$ +3.179 $\mu\text{m/m}$	+893 $\mu\text{m/m}$ +2.751 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	+125 $\mu\text{m/m}$ +4.048 $\mu\text{m/m}$	+310 $\mu\text{m/m}$ +3.719 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	163 $\mu\text{m/m}$ 857 $\mu\text{m/m}$	469 $\mu\text{m/m}$ 697 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.77

Dehnungen ε_y in Plattenmitte und am Plattenrand unter einer Belastung von 200 N für Prüfkörper L_04_R_III.

Prüfkörper	Dehnung Mitte Polycarbonat	Dehnung Rand Polycarbonat
T_R_III PK 1	-577 $\mu\text{m/m}$ -428 $\mu\text{m/m}$	-434 $\mu\text{m/m}$ -1.103 $\mu\text{m/m}$
T_R_III PK 2	-757 $\mu\text{m/m}$ -732 $\mu\text{m/m}$	-361 $\mu\text{m/m}$ -1.256 $\mu\text{m/m}$
T_R_III PK 3	-496 $\mu\text{m/m}$ -619 $\mu\text{m/m}$	-382 $\mu\text{m/m}$ -984 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	-610 $\mu\text{m/m}$ -593 $\mu\text{m/m}$	-392 $\mu\text{m/m}$ -1.114 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	109 $\mu\text{m/m}$ 125 $\mu\text{m/m}$	31 $\mu\text{m/m}$ 111 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.78

Dehnungen ε_x in Plattenmitte und am Plattenrand unter einer Belastung von 200 N für Prüfkörper L_08_R_III.

Prüfkörper	Dehnung Mitte Polycarbonat	Dehnung Rand Polycarbonat
T_R_III PK 1	-549 $\mu\text{m/m}$ +1.577 $\mu\text{m/m}$	-386 $\mu\text{m/m}$ +1.497 $\mu\text{m/m}$
T_R_III PK 2	-842 $\mu\text{m/m}$ +2.053 $\mu\text{m/m}$	-849 $\mu\text{m/m}$ +2.069 $\mu\text{m/m}$
T_R_III PK 3	-1.254 $\mu\text{m/m}$ +2.173 $\mu\text{m/m}$	-1.107 $\mu\text{m/m}$ +2.210 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	-882 $\mu\text{m/m}$ +1.934 $\mu\text{m/m}$	-780 $\mu\text{m/m}$ +1.925 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	289 $\mu\text{m/m}$ 257 $\mu\text{m/m}$	298 $\mu\text{m/m}$ 308 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.79

Dehnungen ε_y in Plattenmitte und am Plattenrand unter einer Belastung von 200 N für Prüfkörper L_08_R_III.

Prüfkörper	Dehnung Mitte Polycarbonat	Dehnung Rand Polycarbonat
T_R_III PK 1	-289 $\mu\text{m/m}$ -120 $\mu\text{m/m}$	+118 $\mu\text{m/m}$ -564 $\mu\text{m/m}$
T_R_III PK 2	-356 $\mu\text{m/m}$ -42 $\mu\text{m/m}$	+249 $\mu\text{m/m}$ -752 $\mu\text{m/m}$
T_R_III PK 3	-455 $\mu\text{m/m}$ +98 $\mu\text{m/m}$	+337 $\mu\text{m/m}$ -786 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	-367 $\mu\text{m/m}$ -22 $\mu\text{m/m}$	+235 $\mu\text{m/m}$ -701 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	68 $\mu\text{m/m}$ 90 $\mu\text{m/m}$	90 $\mu\text{m/m}$ 98 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.80

Dehnungen ε_x in Plattenmitte und am Plattenrand unter einer Belastung von 200 N für Prüfkörper L_12_R_III.

Prüfkörper	Dehnung Mitte Polycarbonat	Dehnung Rand Polycarbonat
T_R_III PK 1	-605 $\mu\text{m/m}$ +836 $\mu\text{m/m}$	-619 $\mu\text{m/m}$ +756 $\mu\text{m/m}$
T_R_III PK 2	-579 $\mu\text{m/m}$ +980 $\mu\text{m/m}$	-508 $\mu\text{m/m}$ +1.085 $\mu\text{m/m}$
T_R_III PK 3	-659 $\mu\text{m/m}$ +1.032 $\mu\text{m/m}$	-601 $\mu\text{m/m}$ +1.196 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	-614 $\mu\text{m/m}$ +949 $\mu\text{m/m}$	-576 $\mu\text{m/m}$ +1.012 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	33 $\mu\text{m/m}$ 83 $\mu\text{m/m}$	49 $\mu\text{m/m}$ 187 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.81

Dehnungen ε_y in Plattenmitte und am und Plattenrand unter einer Belastung von 200 N für Prüfkörper L_12_R_III.

Prüfkörper	Dehnung Mitte Polycarbonat	Dehnung Rand Polycarbonat
T_R_III PK 1	-83 $\mu\text{m/m}$ -21 $\mu\text{m/m}$	+227 $\mu\text{m/m}$ -294 $\mu\text{m/m}$
T_R_III PK 2	-99 $\mu\text{m/m}$ -70 $\mu\text{m/m}$	+168 $\mu\text{m/m}$ -415 $\mu\text{m/m}$
T_R_III PK 3	-40 $\mu\text{m/m}$ -114 $\mu\text{m/m}$	+189 $\mu\text{m/m}$ -440 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	-74 $\mu\text{m/m}$ -68 $\mu\text{m/m}$	+195 $\mu\text{m/m}$ -383 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	25 $\mu\text{m/m}$ 38 $\mu\text{m/m}$	24 $\mu\text{m/m}$ 64 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.82

Dehnungen ε_x in Plattenmitte und am Plattenrand unter einer Belastung von 200 N für Prüfkörper O_04_R_III.

Prüfkörper	Dehnung Mitte Polycarbonat	Dehnung Rand Polycarbonat
T_R_III PK 1	-522 $\mu\text{m/m}$ +3.805 $\mu\text{m/m}$	+531 $\mu\text{m/m}$ +2.013 $\mu\text{m/m}$
T_R_III PK 2	+385 $\mu\text{m/m}$ +2.565 $\mu\text{m/m}$	+322 $\mu\text{m/m}$ +2.025 $\mu\text{m/m}$
T_R_III PK 3	-31 $\mu\text{m/m}$ +1.297 $\mu\text{m/m}$	-22 $\mu\text{m/m}$ +1.308 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	+177 $\mu\text{m/m}$ +1.931 $\mu\text{m/m}$	+150 $\mu\text{m/m}$ +1.666 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	208 $\mu\text{m/m}$ 634 $\mu\text{m/m}$	172 $\mu\text{m/m}$ 358 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.83

Dehnungen ε_y in Plattenmitte und am Plattenrand unter einer Belastung von 200 N für Prüfkörper O_04_R_III.

Prüfkörper	Dehnung Mitte Polycarbonat	Dehnung Rand Polycarbonat
T_01_K PK 1	-588 $\mu\text{m/m}$ -360 $\mu\text{m/m}$	-275 $\mu\text{m/m}$ -638 $\mu\text{m/m}$
T_02_K PK 1	-420 $\mu\text{m/m}$ -429 $\mu\text{m/m}$	-243 $\mu\text{m/m}$ -578 $\mu\text{m/m}$
T_01_K PK 2	-239 $\mu\text{m/m}$ -198 $\mu\text{m/m}$	-130 $\mu\text{m/m}$ -357 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	-329 $\mu\text{m/m}$ -313 $\mu\text{m/m}$	-186 $\mu\text{m/m}$ -468 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	91 $\mu\text{m/m}$ 115 $\mu\text{m/m}$	56 $\mu\text{m/m}$ 111 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.84

Dehnungen ε_x in Plattenmitte und am Plattenrand unter einer Belastung von 200 N für Prüfkörper O_08_R_III.

Prüfkörper	Kraft Verformung	Dehnung Mitte Polycarbonat	Dehnung Rand Polycarbonat
T_R_III PK 1	200,3 N 27,7 mm	-551 $\mu\text{m/m}$ +1.656 $\mu\text{m/m}$	-443 $\mu\text{m/m}$ +1.540 $\mu\text{m/m}$
T_R_III PK 2	200,1 N 26,2 mm	-496 $\mu\text{m/m}$ +1.577 $\mu\text{m/m}$	-528 $\mu\text{m/m}$ +1.644 $\mu\text{m/m}$
T_R_III PK 3	200,4 N 27,4 mm	-642 $\mu\text{m/m}$ +1.714 $\mu\text{m/m}$	-707 $\mu\text{m/m}$ +1.812 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	200,3 N 27,1 mm	-563 $\mu\text{m/m}$ +1.649 $\mu\text{m/m}$	-559 $\mu\text{m/m}$ +1.665 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	0,1 N 0,6 mm	60 $\mu\text{m/m}$ 56 $\mu\text{m/m}$	110 $\mu\text{m/m}$ 112 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.85

Dehnungen ε_y in Plattenmitte und am Plattenrand unter einer Belastung von 200 N für Prüfkörper O_08_R_III.

Prüfkörper	Dehnung Mitte Polycarbonat	Dehnung Rand Polycarbonat
T_R_III PK 1	-299 $\mu\text{m/m}$ -104 $\mu\text{m/m}$	+70 $\mu\text{m/m}$ -513 $\mu\text{m/m}$
T_R_III PK 2	-275 $\mu\text{m/m}$ -147 $\mu\text{m/m}$	+74 $\mu\text{m/m}$ -515 $\mu\text{m/m}$
T_R_III PK 3	-304 $\mu\text{m/m}$ -96 $\mu\text{m/m}$	+91 $\mu\text{m/m}$ -545 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	-293 $\mu\text{m/m}$ -116 $\mu\text{m/m}$	+78 $\mu\text{m/m}$ -524 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	12 $\mu\text{m/m}$ 23 $\mu\text{m/m}$	9 $\mu\text{m/m}$ 15 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.86

Dehnungen ε_x in Plattenmitte und am und Plattenrand unter einer Belastung von 200 N für Prüfkörper O_12_R_III.

Prüfkörper	Dehnung Mitte Polycarbonat	Dehnung Rand Polycarbonat
T_R_III PK 1	-563 $\mu\text{m/m}$ +939 $\mu\text{m/m}$	-564 $\mu\text{m/m}$ +1.076 $\mu\text{m/m}$
T_R_III PK 2	-469 $\mu\text{m/m}$ +828 $\mu\text{m/m}$	-453 $\mu\text{m/m}$ +857 $\mu\text{m/m}$
T_R_III PK 3	-540 $\mu\text{m/m}$ +956 $\mu\text{m/m}$	-581 $\mu\text{m/m}$ +1.191 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	-524 $\mu\text{m/m}$ +908 $\mu\text{m/m}$	-533 $\mu\text{m/m}$ +1.042 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	40 $\mu\text{m/m}$ 57 $\mu\text{m/m}$	56 $\mu\text{m/m}$ 139 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.87

Dehnungen ε_y in Plattenmitte und am Plattenrand unter einer Belastung von 200 N für Prüfkörper O_12_R_III.

Prüfkörper	Dehnung Mitte Polycarbonat	Dehnung Rand Polycarbonat
T_R_III PK 1	-49 $\mu\text{m/m}$ -109 $\mu\text{m/m}$	+163 $\mu\text{m/m}$ -381 $\mu\text{m/m}$
T_R_III PK 2	-84 $\mu\text{m/m}$ -78 $\mu\text{m/m}$	+138 $\mu\text{m/m}$ -311 $\mu\text{m/m}$
T_R_III PK 3	-69 $\mu\text{m/m}$ -111 $\mu\text{m/m}$	+155 $\mu\text{m/m}$ -420 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	-67 $\mu\text{m/m}$ -99 $\mu\text{m/m}$	152 $\mu\text{m/m}$ -370 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	14 $\mu\text{m/m}$ 15 $\mu\text{m/m}$	11 $\mu\text{m/m}$ 45 $\mu\text{m/m}$

A.5.2 Dehnungen im Kurzzeitversuch – Zustand IIIp

Tabelle A.88

Kraft (oben) und Verformung (unten) der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel mit dem Dünnglas Leflex im Zustand III.

Prüfkörper	L_04_R_IIIp	L_08_R_IIIp	L_12_R_IIIp
T_R_IIIp PK 1	132,6 N 101,5 mm	199,9 N 38,9 mm	198,5 N 17,6 mm
T_R_IIIp PK 2	155,4 N 109,7 mm	202,0 N 50,9 mm	199,3 N 20,8 mm
T_R_IIIp PK 3	131,3 N 94,6 mm	201,4 N 57,5 mm	199,7 N 19,9 mm
Mittelwert	139,8 N 101,9 mm	201,1 N 49,1 mm	199,2 N 19,4 mm
Standardabweichung	11,1 N 6,2 mm	0,9 N 7,7 mm	0,5 N 1,3 mm

Tabelle A.89

Kraft (oben) und Verformung (unten) der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel mit dem Dünnglas Optiwhite im Zustand IIIp.

Prüfkörper	O_04_R_IIIp	O_08_R_IIIp	O_12_R_IIIp
T_R_III PK 1	keine Messwerte	200,6 N 33,4 mm	200,7 N 14,0 mm
T_R_III PK 2	202,8 N 99,6 m	199,8 N 33,9 mm	200,6 N 14,6 mm
T_R_III PK 3	202,2 N 77,7 mm	200,3 N 35,8 mm	200,5 N 15,7 mm
Mittelwert	202,5 N 88,6 mm	200,3 N 34,4 mm	200,6 N 14,8 mm
Standardabweichung	0,3 N 2,7 m	0,3 N 1,0 mm	0,1 N 0,7 mm

Tabelle A.90Dehnungen ε_x in Plattenmitte und am Plattenrand für Prüfkörper L_04_R_IIIp.

Prüfkörper	Dehnung Mitte Polycarbonat	Dehnung Rand Polycarbonat
T_R_IIIp PK 1	+714 $\mu\text{m/m}$ +3.539 $\mu\text{m/m}$	-741 $\mu\text{m/m}$ +2.213 $\mu\text{m/m}$
T_R_IIIp PK 2	+586 $\mu\text{m/m}$ +4.040 $\mu\text{m/m}$	-476 $\mu\text{m/m}$ +2.380 $\mu\text{m/m}$
T_R_IIIp PK 3	+417 $\mu\text{m/m}$ +2.772 $\mu\text{m/m}$	+148 $\mu\text{m/m}$ +2.057 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	+502 $\mu\text{m/m}$ +3.406 $\mu\text{m/m}$	-164 $\mu\text{m/m}$ +2.219 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	84 $\mu\text{m/m}$ 634 $\mu\text{m/m}$	312 $\mu\text{m/m}$ 161 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.91Dehnungen ε_y in Plattenmitte und am Plattenrand für Prüfkörper L_04_R_IIIp.

Prüfkörper	Dehnung Mitte Polycarbonat	Dehnung Rand Polycarbonat
T_R_IIIp PK 1	-1.226 $\mu\text{m/m}$ -133 $\mu\text{m/m}$	+225 $\mu\text{m/m}$ -751 $\mu\text{m/m}$
T_R_IIIp PK 2	-883 $\mu\text{m/m}$ -560 $\mu\text{m/m}$	+200 $\mu\text{m/m}$ -830 $\mu\text{m/m}$
T_R_IIIp PK 3	-623 $\mu\text{m/m}$ -423 $\mu\text{m/m}$	+33 $\mu\text{m/m}$ -809 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	-753 $\mu\text{m/m}$ -492 $\mu\text{m/m}$	+116 $\mu\text{m/m}$ -820 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	130 $\mu\text{m/m}$ 69 $\mu\text{m/m}$	83 $\mu\text{m/m}$ 10 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.92Dehnungen ε_x in Plattenmitte und am Plattenrand für Prüfkörper L_08_R_IIIp.

Prüfkörper	Dehnung Mitte Polycarbonat	Dehnung Rand Polycarbonat
T_R_IIIp PK 1	-815 $\mu\text{m/m}$ +1.913 $\mu\text{m/m}$	-704 $\mu\text{m/m}$ +1.792 $\mu\text{m/m}$
T_R_IIIp PK 2	-1.207 $\mu\text{m/m}$ +2.345 $\mu\text{m/m}$	-1.138 $\mu\text{m/m}$ +2.327 $\mu\text{m/m}$
T_R_IIIp PK 3	-1.539 $\mu\text{m/m}$ +2.537 $\mu\text{m/m}$	-1.554 $\mu\text{m/m}$ +2.519 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	-1.187 $\mu\text{m/m}$ +2.265 $\mu\text{m/m}$	-1.132 $\mu\text{m/m}$ +2.213 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	296 $\mu\text{m/m}$ 261 $\mu\text{m/m}$	347 $\mu\text{m/m}$ 308 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.93Dehnungen ε_y in Plattenmitte und am Plattenrand für Prüfkörper L_08_R_IIIp.

Prüfkörper	Dehnung Mitte Polycarbonat	Dehnung Rand Polycarbonat
T_R_IIIp PK 1	-550 $\mu\text{m/m}$ +160 $\mu\text{m/m}$	+255 $\mu\text{m/m}$ -695 $\mu\text{m/m}$
T_R_IIIp PK 2	-442 $\mu\text{m/m}$ +163 $\mu\text{m/m}$	+431 $\mu\text{m/m}$ -916 $\mu\text{m/m}$
T_R_IIIp PK 3	-593 $\mu\text{m/m}$ +238 $\mu\text{m/m}$	+602 $\mu\text{m/m}$ -976 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	-528 $\mu\text{m/m}$ +187 $\mu\text{m/m}$	+429 $\mu\text{m/m}$ -862 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	64 $\mu\text{m/m}$ 36 $\mu\text{m/m}$	141 $\mu\text{m/m}$ 121 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.94Dehnungen ε_x in Plattenmitte und am Plattenrand für Prüfkörper L_12_R_IIIp.

Prüfkörper	Dehnung Mitte Polycarbonat	Dehnung Rand Polycarbonat
T_R_IIIp PK 1	-769 $\mu\text{m/m}$ +1.120 $\mu\text{m/m}$	-707 $\mu\text{m/m}$ +1.235 $\mu\text{m/m}$
T_R_IIIp PK 2	-826 $\mu\text{m/m}$ +1.136 $\mu\text{m/m}$	-684 $\mu\text{m/m}$ +1.360 $\mu\text{m/m}$
T_R_IIIp PK 3	-818 $\mu\text{m/m}$ +1.123 $\mu\text{m/m}$	-742 $\mu\text{m/m}$ +1.257 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	-804 $\mu\text{m/m}$ +1.126 $\mu\text{m/m}$	-711 $\mu\text{m/m}$ +1.284 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	25 $\mu\text{m/m}$ 7 $\mu\text{m/m}$	24 $\mu\text{m/m}$ 55 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.95Dehnungen ε_y in Plattenmitte und am Plattenrand für Prüfkörper L_12_R_IIIp.

Prüfkörper	Dehnung Mitte Polycarbonat	Dehnung Rand Polycarbonat
T_R_IIIp PK 1	-18 $\mu\text{m/m}$ -145 $\mu\text{m/m}$	+275 $\mu\text{m/m}$ -489 $\mu\text{m/m}$
T_R_IIIp PK 2	+67 $\mu\text{m/m}$ -147 $\mu\text{m/m}$	+254 $\mu\text{m/m}$ -523 $\mu\text{m/m}$
T_R_IIIp PK 3	+25 $\mu\text{m/m}$ -161 $\mu\text{m/m}$	+280 $\mu\text{m/m}$ -494 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	25 $\mu\text{m/m}$ -151 $\mu\text{m/m}$	270 $\mu\text{m/m}$ -502 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	35 $\mu\text{m/m}$ 7 $\mu\text{m/m}$	11 $\mu\text{m/m}$ 15 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.96Dehnungen ε_x in Plattenmitte und am Plattenrand für Prüfkörper O_04_R_IIIp.

Prüfkörper	Dehnung Mitte Polycarbonat	Dehnung Rand Polycarbonat
T_R_IIIp PK 1	Keine Messwerte vorhanden	
T_R_IIIp PK 2	+1.117 $\mu\text{m/m}$ +2.978 $\mu\text{m/m}$	+311 $\mu\text{m/m}$ +2.865 $\mu\text{m/m}$
T_R_IIIp PK 3	+1.097 $\mu\text{m/m}$ +2.367 $\mu\text{m/m}$	+484 $\mu\text{m/m}$ +798 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	+1.107 $\mu\text{m/m}$ +2.672 $\mu\text{m/m}$	+398 $\mu\text{m/m}$ +1.831 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	10 $\mu\text{m/m}$ 305 $\mu\text{m/m}$	87 $\mu\text{m/m}$ 1.033 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.97Dehnungen ε_y in Plattenmitte und am Plattenrand für Prüfkörper O_04_R_IIIp.

Prüfkörper	Dehnung Mitte Polycarbonat	Dehnung Rand Polycarbonat
T_R_IIIp PK 1	Keine Messwerte vorhanden	
T_R_IIIp PK 2	-727 $\mu\text{m/m}$ -623 $\mu\text{m/m}$	-480 $\mu\text{m/m}$ -755 $\mu\text{m/m}$
T_R_IIIp PK 3	-751 $\mu\text{m/m}$ -291 $\mu\text{m/m}$	-141 $\mu\text{m/m}$ -782 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	-739 $\mu\text{m/m}$ -457 $\mu\text{m/m}$	-310 $\mu\text{m/m}$ -769 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	12 $\mu\text{m/m}$ 166 $\mu\text{m/m}$	169 $\mu\text{m/m}$ 14 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.98Dehnungen ε_x in Plattenmitte und am Plattenrand für Prüfkörper O_08_R_IIIp.

Prüfkörper	Dehnung Mitte Polycarbonat	Dehnung Rand Polycarbonat
T_R_IIIp PK 1	-545 $\mu\text{m/m}$ +1.660 $\mu\text{m/m}$	-536 $\mu\text{m/m}$ +1.758 $\mu\text{m/m}$
T_R_IIIp PK 2	-612 $\mu\text{m/m}$ +1.738 $\mu\text{m/m}$	-525 $\mu\text{m/m}$ +1.743 $\mu\text{m/m}$
T_R_IIIp PK 3	-727 $\mu\text{m/m}$ +1.858 $\mu\text{m/m}$	-676 $\mu\text{m/m}$ +1.911 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	-628 $\mu\text{m/m}$ +1.752 $\mu\text{m/m}$	-579 $\mu\text{m/m}$ +1.804 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	75 $\mu\text{m/m}$ 82 $\mu\text{m/m}$	69 $\mu\text{m/m}$ 76 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.99Dehnungen ε_y in Plattenmitte und am Plattenrand für Prüfkörper O_08_R_IIIp.

Prüfkörper	Dehnung Mitte Polycarbonat	Dehnung Rand Polycarbonat
T_R_IIIp PK 1	-375 $\mu\text{m/m}$ -37 $\mu\text{m/m}$	+89 $\mu\text{m/m}$ -585 $\mu\text{m/m}$
T_R_IIIp PK 2	-368 $\mu\text{m/m}$ -72 $\mu\text{m/m}$	+135 $\mu\text{m/m}$ -615 $\mu\text{m/m}$
T_R_IIIp PK 3	-435 $\mu\text{m/m}$ +26 $\mu\text{m/m}$	+105 $\mu\text{m/m}$ -600 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	-393 $\mu\text{m/m}$ -28 $\mu\text{m/m}$	+110 $\mu\text{m/m}$ -600 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	30 $\mu\text{m/m}$ 40 $\mu\text{m/m}$	19 $\mu\text{m/m}$ 12 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.100Dehnungen ε_x in Plattenmitte und am Plattenrand für Prüfkörper O_12_R_IIIp.

Prüfkörper	Dehnung Mitte Polycarbonat	Dehnung Rand Polycarbonat
T_R_IIIp PK 1	-602 $\mu\text{m/m}$ 943 $\mu\text{m/m}$	-541 $\mu\text{m/m}$ 1.056 $\mu\text{m/m}$
T_R_IIIp PK 2	-587 $\mu\text{m/m}$ +988 $\mu\text{m/m}$	-526 $\mu\text{m/m}$ +1.025 $\mu\text{m/m}$
T_R_IIIp PK 3	-658 $\mu\text{m/m}$ +1.006 $\mu\text{m/m}$	-616 $\mu\text{m/m}$ +1.196 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	-616 $\mu\text{m/m}$ +979 $\mu\text{m/m}$	-561 $\mu\text{m/m}$ +1.093 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	31 $\mu\text{m/m}$ 26 $\mu\text{m/m}$	40 $\mu\text{m/m}$ 75 $\mu\text{m/m}$

Tabelle A.101Dehnungen ε_y in Plattenmitte und am Plattenrand für Prüfkörper O_012_R_IIIp.

Prüfkörper	Dehnung Mitte Polycarbonat	Dehnung Rand Polycarbonat
T_R_IIIp PK 1	-29 $\mu\text{m/m}$ -131 $\mu\text{m/m}$	+174 $\mu\text{m/m}$ -398 $\mu\text{m/m}$
T_R_IIIp PK 2	-46 $\mu\text{m/m}$ -148 $\mu\text{m/m}$	+178 $\mu\text{m/m}$ -390 $\mu\text{m/m}$
T_R_IIIp PK 3	+2 $\mu\text{m/m}$ -155 $\mu\text{m/m}$	+221 $\mu\text{m/m}$ -471 $\mu\text{m/m}$
Mittelwert	-24 $\mu\text{m/m}$ -145 $\mu\text{m/m}$	191 $\mu\text{m/m}$ -420 $\mu\text{m/m}$
Standardabweichung	20 $\mu\text{m/m}$ 10 $\mu\text{m/m}$	22 $\mu\text{m/m}$ 36 $\mu\text{m/m}$

A.5.3 Verformungen im Langzeitversuch – Zustand IIIp

Tabelle A.102

Zeitabhängige Verformung der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel für den Prüfkörper L_04_LR.

Prüfkörper	1 min	1 h	12 h	24 h
L_04_LR_01	22,1 mm	22,6 mm	22,8 mm	22,9 mm
L_04_LR_02	20,2 mm	21,2 mm	21,4 mm	21,3 mm
L_04_LR_03	19,0 mm	20,0 mm	20,4 mm	20,6 mm
Mittelwert	20,4 mm	21,2 mm	21,5 mm	21,6 mm
Standardabweichung	1,3 mm	1,1 mm	1,0 mm	1,0 mm

Tabelle A.103

Zeitabhängige Verformung der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel für den Prüfkörper L_08_LR.

Prüfkörper	1 min	1 h	12 h	24 h mm
L_08_LR_01	12,4 mm	12,8 mm	13,0 mm	13,2 mm
L_08_LR_02	13,9 mm	14,5 mm	14,8 mm	14,9 mm
L_08_LR_03	15,1 mm	16,0 mm	16,3 mm	16,6 mm
Mittelwert	13,8 mm	14,4 mm	14,7 mm	14,9 mm
Standardabweichung	1,1 mm	1,3 mm	1,4 mm	1,4 mm

Tabelle A.104

Zeitabhängige Verformung der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel für den Prüfkörper L_12_LR.

Prüfkörper	1 min	1 h	12 h	24 h
L_12_LR_01	5,2 mm	5,5 mm	5,7 mm	5,8 mm
L_12_LR_02	5,6 mm	5,8 mm	5,8 mm	6,0 mm
L_12_LR_03	5,1 mm	5,3 mm	5,4 mm	5,5 mm
Mittelwert	5,3 mm	5,5 mm	5,6 mm	5,8 mm
Standardabweichung	0,2 mm	0,2 mm	0,2 mm	0,2 mm

Tabelle A.105

Zeitabhängige Verformung der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel für den Prüfkörper O_04_LR.

Prüfkörper	1 min	1 h	12 h	24 h
O_04_LR_01	23,4 mm	24,7 mm	24,9 mm	25,0 mm
O_04_LR_02	22,5 mm	23,9 mm	24,0 mm	23,9 mm
O_04_LR_03	26,6 mm	28,6 mm	28,7 mm	28,7 mm
Mittelwert	24,2 mm	25,7 mm	25,9 mm	25,9 mm
Standardabweichung	1,8 mm	2,0 mm	2,0 mm	2,0 mm

Tabelle A.106

Zeitabhängige Verformung der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel für den Prüfkörper O_08_LR.

Prüfkörper	1 min	1 h	12 h	24 h
O_08_LR_01	9,4 mm	9,8 mm	10,0 mm	10,0 mm
O_08_LR_02	8,8 mm	9,2 mm	9,4 mm	9,4 mm
O_08_LR_03	9,0 mm	9,5 mm	9,7 mm	9,8 mm
Mittelwert	9,1 mm	9,5 mm	9,7 mm	9,7 mm
Standardabweichung	0,3 mm	0,2 mm	0,2 mm	0,2 mm

Tabelle A.107

Zeitabhängige Verformung der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel für den Prüfkörper O_12_LR.

Prüfkörper	1 min	1 h	12 h	24 h
O_12_LR_01	2,6 mm	2,8 mm	2,9 mm	2,9 mm
O_12_LR_02	2,7 mm	2,9 mm	2,9 mm	2,9 mm
O_12_LR_03	2,6 mm	2,9 mm	3,0 mm	3,0 mm
Mittelwert	2,6 mm	2,9 mm	2,9 mm	2,9 mm
Standardabweichung	<0,1 mm	0,1 mm	<0,1 mm	<0,1 mm

A.6 Berechnungsmethoden

A.6.1 SJ Mepla: Eingabeparameter

Tabelle A.108

Einstellungen in SJ Mepla zur Berechnung der Spannungen und Verformung der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel.

Parameter	Einstellung
Version	SJ Mepla 5.0.11
Geometrie	360 mm x 1.000 mm
Elementgröße	20 mm (Ergebnis der Netzstudie) 9-Knoten-Mehrschichtelement
Querschnitt	FG TPU PC TPU FG CVG 02 TPU PC TPU CVG 02
FG	Optiwhite (Pilkington) $E = 70.000 \text{ N/mm}^2$ $\mu = 0,23$ t nach Tabelle 20
CVG 02	Leoflex (AGC) $E = 74.000 \text{ N/mm}^2$ $\mu = 0,23$ t nach Tabelle 20
TPU	Thermoplastisches Polyurethan (SiLATEC) E aus Tabelle 25 $\mu = 0,40$ t = nach Tabelle 20
PC	Lexan 9030 (Sabic) $E = 2.300 \text{ N/mm}^2$ $\mu = 0,36$ t nach Tabelle 20
Lagerung	linienförmige Randlagerung, $w = 0$ Federlager an einer Ecke mit $c_x = 1 \text{ N/mm}$ Federlager an einer Ecke mit $c_x = c_y = 1 \text{ N/mm}$
Belastung	Vierpunkt-Biegeversuch nach Tabelle 23
Berechnung	Geometrisch nichtlineare Berechnung
Auswertung	lokale Ergebnisausgaben an relevanten Stellen analog zu Dehnungsmessstreifen, vergleiche Bild 49

A.6.2 SJ Mepla: Netzstudie

Ziel einer Netzstudie in der numerischen Berechnung nach der Finite-Elemente-Methode (FEM) ist eine ausreichend genaue Vernetzung bei geringer Berechnungsdauer zu bestimmen. Eine Konvergenzstudie mit veränderlicher Elementgröße zeigt Bild A.7. Die Netzstudie zur Festlegung des Elementnetzes ist exemplarisch für eine Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel mit einem Aufbau aus zwei Dünnglastafeln Leoflex mit einer Nenndicke von 0,85 m, einer Polycarbonattafel mit einer Nenndicke von 4,00 mm, laminiert über zwei Zwischenschicht mit einer Nenndicke von 2,00 mm und einem teilweisen Schubverbund von 0,38 N/mm² durchgeführt.

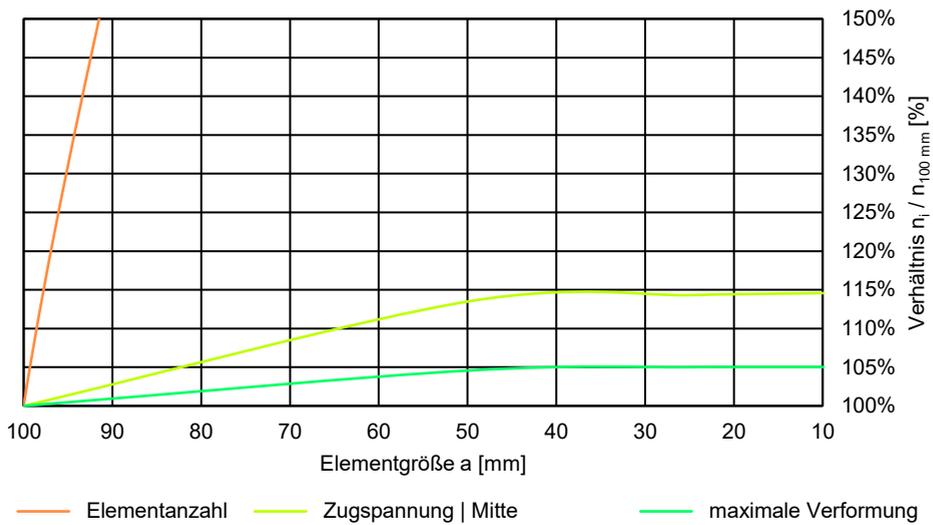


Bild A.7

Konvergenzstudie der Elementgröße in Abhängigkeit der Elementanzahl, Hauptzugspannung im Glas und maximalen Durchbiegung im Verhältnis zu den Ergebnissen der Referenzelementgröße von 100 mm mit SJ Mepla 5.0.11.

Die maximale Verformung und die Hauptzugspannung in Plattenmitte an der Glasunterseite konvergieren bei einer Elementgröße von 60 mm beziehungsweise 20 mm ausreichend genau. Allerdings wächst zeitgleich die Elementanzahl exponentiell an. Durch erhöht sich auch die Rechenzeit und Rechenkapazität.

A.6.3 SJ Mepla: Ergebnisse am Plattenrand

Tabelle A.109

Ergebnisse der Längsspannung am Plattenrand aus der numerischen Berechnung für die Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel mit dem Programm SJ Mepla bei geometrisch nichtlinearer Berechnung.

Prüfkörper	Verformung	Spannung Glastafel oben	Spannung Polycarbonat	Spannung Glastafel unten
L_04_K	59,5 mm	-38,9 N/mm ² -2,0 N/mm ²	-2,7 N/mm ² +2,7 N/mm ²	+1,9 N/mm ² +38,9 N/mm ²
L_08_K	25,5 mm	-18,7 N/mm ² -2,0 N/mm ²	-2,4 N/mm ² +2,5 N/mm ²	+6,4 N/mm ² +23,1 N/mm ²
L_12_K	12,0 mm	-11,3 N/mm ² -3,3 N/mm ²	-1,7 N/mm ² +1,8 N/mm ²	+5,8 N/mm ² +13,9 N/mm ²
O_04_K	35,6 mm	-31,1 N/mm ² +18,9 N/mm ²	-1,7 N/mm ² +1,8 N/mm ²	-17,0 N/mm ² +32,7 N/mm ²
O_08_K	19,2 mm	-16,9 N/mm ² +9,7 N/mm ²	-1,8 N/mm ² +1,9 N/mm ²	-7,1 N/mm ² +19,6 N/mm ²
O_12_K	10,6 mm	-10,1 N/mm ² +4,7 N/mm ²	-1,6 N/mm ² +1,6 N/mm ²	-3,0 N/mm ² +11,8 N/mm ²

A.6.4 SJ Mepla: Abweichung am Plattenrand

Tabelle A.110 zeigt die relativen Abweichung zwischen der numerischen Berechnung und den Messergebnissen der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel für den Plattenrand.

Tabelle A.110

Relativen Abweichung der numerischen Auswertung mit SJ Mepla 5.0.11 und den Messergebnissen am Plattenrand. Abweichung an der Schichtoberseite (oben) und Abweichung an der Schichtunterseite (unten).

Prüfkörper	Verformung	Glastafel oben	Polycarbonat	Glastafel unten
L_04_K	<+0,1 %	+35,8 % -70,9 %	+91,1 % +105,4 %	-75,0 % +38,9 %
L_08_K	-0,8 %	+6,6 % +42,2 %	+15,0 % +22,9 %	+25,9 % +13,0 %
L_12_K	-2,3 %	-3,9 % -8,1 %	+15,9 % +10,6 %	+14,0 % -3,0 %
O_04_K	-0,1 %	+15,4 % -10,3 %	+19,2 % +2,3 %	-10,7 % +17,4 %
O_08_k	-0,9 %	-0,4 % +3,1 %	+15,7 % +6,3 %	-12,9 % +10,3 %
O_12_K	-2,1 %	+2,4 % -7,7 %	+12,4 % +6,6 %	-1,4 % +1,8 %

A.6.5 RFEM RF-Glas: Eingabeparameter

Tabelle A.111

Einstellungen in RFEM RF-Glas zur Berechnung der Spannungen und Verformung der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel.

Parameter	Einstellung
Version	5.26
Geometrie	360 mm x 1.000 mm
Elementgröße	20 mm (Ergebnis der Netzstudie) 8-Knoten-Kubuselement
Querschnitt	FG TPU PC TPU FG CVG 02 TPU PC TPU CVG 02
FG	Optiwhite (Pilkington) E = 70.000 N/mm ² μ = 0,23 t nach Tabelle 20
CVG 02	Leoflex (AGC) E = 74.000 N/mm ² μ = 0,23 t nach Tabelle 20
TPU	Thermoplastisches Polyurethan (SiLATEC) E aus Tabelle 25 μ = 0,40 t = nach Tabelle 20
PC	Lexan 9030 (Sabic) E = 2.300 N/mm ² μ = 0,36 t nach Tabelle 20
Lagerung	linienförmige Randlagerung, uz, unten = 0 Federlager an einer Ecke mit $c_x = 1$ N/mm Federlager an einer Ecke mit $c_x = c_y = 1$ N/mm
Belastung	Vierpunkt-Biegeversuch nach Tabelle 23
Berechnung	Theorie III. Ordnung (nicht-linear), Newton-Raphson 3D, Berücksichtigung des Schubverbundes zwischen den Schichten
Auswertung	lokale Ergebnisausgaben an relevanten Stellen analog zu Dehnungsmessstreifen, vergleiche Bild 49

A.6.6 RFEM-RF Glas: Netzstudie

Ziel einer Netzstudie in der numerischen Berechnung nach der Finite-Elemente-Methode (FEM) ist eine ausreichend genaue Vernetzung bei geringer Berechnungsdauer zu bestimmen. Eine Konvergenzstudie mit veränderlicher Elementgröße zeigt Bild A.8. Die Netzstudie zur Festlegung des Elementnetzes ist exemplarisch für eine Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel mit einem Aufbau aus zwei Dünnglastafeln Leoflex mit einer Nenndicke von 0,85 m, einer Polycarbonattafel mit einer Nenndicke von 4,00 mm, laminiert über zwei Zwischenschicht mit einer Nenndicke von 2,00 mm und einem teilweisen Schubverbund von 0,38 N/mm² durchgeführt.

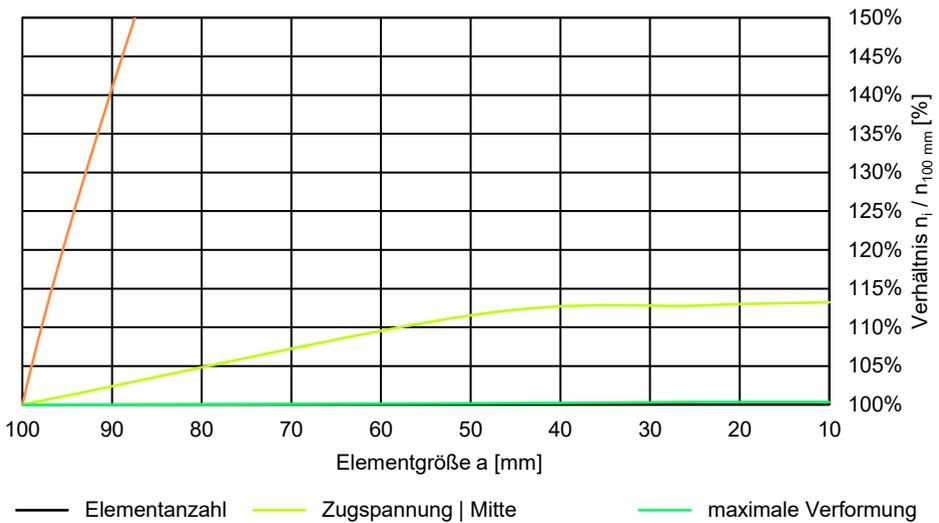


Bild A.8

Konvergenzstudie der Elementgröße in Abhängigkeit der Elementanzahl, Hauptzugspannung im Glas und maximalen Durchbiegung im Verhältnis zu den Ergebnissen der Referenzelementgröße von 100 mm mit RFEM RF-Glas.

Die maximale Verformung und die Hauptzugspannung in Plattenmitte an der Glasunterseite konvergieren bei einer Elementgröße von 100 mm beziehungsweise 20 mm ausreichend genau. Mit RFEM RF-Glas lässt sich die maximale Verformung bereits mit einem groben Netz bestimmen. Der grafische Verlauf der Verformung zeigt aufgrund des groben Netzes jedoch Sprünge zwischen zwei Elementen. Allerdings wächst zeitgleich die Elementanzahl exponentiell an. Durch erhöht sich auch die Rechenzeit und Rechenkapazität.

A.6.7 RFEM RF-Glas: Ergebnisse am Plattenrand

Tabelle A.112

Ergebnisse der Längsspannung am Plattenrand aus der numerischen Berechnung für die Dünnglas-Polycarbonat-Verbund-tafel mit dem Programm RFEM RF-Glas mit geometrisch nichtlinearer Berechnung.

Prüfkörper	Verformung	Spannung Glastafel oben	Spannung Polycarbonat	Spannung Glastafel unten
L_04_K	59,8 mm	-40,3 N/mm ² -0,8 N/mm ²	-3,3 N/mm ² +3,3 N/mm ²	+0,3 N/mm ² +39,7 N/mm ²
L_08_K	25,4 mm	-18,3 N/mm ² -1,3 N/mm ²	-2,7 N/mm ² +2,9 N/mm ²	+6,7 N/mm ² +23,6 N/mm ²
L_12_K	12,3 mm	-11,1 N/mm ² -2,9 N/mm ²	-2,0 N/mm ² +2,1 N/mm ²	+5,9 N/mm ² +14,1 N/mm ²
O_04_K	35,7 mm	-32,1 N/mm ² +19,9 N/mm ²	-2,0 N/mm ² +2,1 N/mm ²	-18,3 N/mm ² +33,6 N/mm ²
O_08_k	19,3 mm	-17,1 N/mm ² +10,4 N/mm ²	-2,1 N/mm ² +2,2 N/mm ²	-7,3 N/mm ² +20,2 N/mm ²
O_12_K	10,7 mm	-10,2 N/mm ² +5,1 N/mm ²	-1,7 N/mm ² +1,8 N/mm ²	-3,1 N/mm ² +12,2 N/mm ²

A.6.8 RFEM RF-Glas: Abweichung am Plattenrand

Tabelle A.113 zeigt die relativen Abweichung zwischen der numerischen Berechnung und den Messergebnissen der Dünnglas-Polycarbonat-Verbund-tafel für den Plattenrand.

Tabelle A.113

Relativen Abweichung der numerischen Auswertung mit RFEM RF Glas und den Messergebnissen am Plattenrand. Abweichung an der Schichtoberseite (oben) und Abweichung an der Schichtunterseite (unten).

Prüfkörper	Verformung	Glastafel oben	Polycarbonat	Glastafel unten
L_04_K	+0,6 %	+40,4 % -87,5 %	+133,8 % +153,1 %	-96,7 % +41,8 %
L_08_K	-1,2 %	+4,6 % -8,3 %	+30,7 % +39,7 %	+30,8 % +15,8 %
L_12_K	-0,1 %	-6,0 % -20,2 %	+31,1 % +25,0 %	+14,8 % -1,4 %
O_04_K	>-0,1 %	+19,4 % -5,6 %	+41,5 % +19,9 %	-3,6 % +20,4 %
O_08_k	-0,5 %	+0,6 % +10,7 %	+32,3 % +21,4 %	-9,8 % +13,8 %
O_12_K	-0,5 %	+2,9 % +0,8 %	+26,8 % +20,4 %	+2,8 % +4,7 %

A.6.9 Ansys: Eingabeparameter

Tabelle A.114

Einstellungen Ansys zur Berechnung der Spannungen und Verformung der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel.

Parameter	Einstellung
Version	Ansys Workbench 2020 R2
Geometrie	180 mm x 500 mm (Viertelmodell, Ausnutzung der Symmetrie)
Vernetzung	Elementgröße 5 mm, Elementgröße zwischen den Biegerollen 2,5 mm 2 Elemente pro Schicht SOLID186 Element (Hexaeder mit 20 Knoten)
Kontakt	gemeinsame Topologie
Querschnitt	FG TPU PC TPU FG CVG 02 TPU PC TPU CVG 02
FG	Optiwhite (Pilkington) $E = 70.000 \text{ N/mm}^2$ $\mu = 0,23$ t nach Tabelle 20
CVG 02	Leoflex (AGC) $E = 74.000 \text{ N/mm}^2$ $\mu = 0,23$ t nach Tabelle 20
TPU	Thermoplastisches Polyurethan (SiLATEC) E aus Tabelle 25 $\mu = 0,40$ t = nach Tabelle 20
PC	Lexan 9030 (Sabic) $E = 2.300 \text{ N/mm}^2$ $\mu = 0,36$ t nach Tabelle 20
Lagerung	linienförmige Randlagerung, $w = 0$ Symmetrielagerung
Belastung	Vierpunkt-Biegeversuch nach Tabelle 23
Analyseeinstellung	direkter Solver, große Verformungen, schwache Federn aus
Auswertung	lokale Ergebnisausgaben an relevanten Stellen analog zu Dehnungsmessstreifen, vergleiche Bild 49

A.6.10 Ansys: Ergebnisse am Plattenrand

Tabelle A.115

Ergebnisse am Plattenrand aus der Längsspannung aus der numerischen Berechnung für die Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel mit dem Programm Ansys Workbench 2020 R2 bei geometrisch nichtlinearer Berechnung.

Prüfkörper	Verformung	Spannung Glastafel oben	Spannung Polycarbonat	Spannung Glastafel unten
L_04_K	60,1 mm	-39,2 N/mm ² -1,4 N/mm ²	-2,7 N/mm ² +2,7 N/mm ²	+1,4 N/mm ² +39,1 N/mm ²
L_08_K	26,6 mm	-19,2 N/mm ² -1,9 N/mm ²	-2,4 N/mm ² +2,7 N/mm ²	+5,9 N/mm ² +23,2 N/mm ²
L_12_K	13,2 mm	-11,7 N/mm ² -3,1 N/mm ²	-1,8 N/mm ² +2,0 N/mm ²	+5,2 N/mm ² +13,8 N/mm ²
O_04_K	35,9 mm	-31,2 N/mm ² +19,2 N/mm ²	-1,7 N/mm ² +1,8 N/mm ²	-17,5 N/mm ² +32,9 N/mm ²
O_08_K	19,5 mm	-17,1 N/mm ² +9,9 N/mm ²	-1,8 N/mm ² +1,9 N/mm ²	-7,2 N/mm ² +19,7 N/mm ²
O_12_K	10,9 mm	-10,3 N/mm ² +4,8 N/mm ²	-1,6 N/mm ² +1,6 N/mm ²	-3,1 N/mm ² +11,9 N/mm ²

A.6.11 Ansys: Abweichungen am Plattenrand

Tabelle A.116 zeigt die relative Abweichung zwischen der numerischen Berechnung und den Messergebnissen der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel für den Plattenrand.

Tabelle A.116

Relativen Abweichung der numerischen Auswertung mit Ansys und den Messergebnissen am Plattenrand. Abweichung an der Schichtoberseite (oben) und Abweichung an der Schichtunterseite (unten).

Prüfkörper	Verformung	Glastafel oben	Polycarbonat	Glastafel unten
L_04_K	+1,0 %	+36,9 % -79,6 %	+95,1 % +108,1 %	-81,8 % +39,7 %
L_08_K	+3,5 %	+9,7 % +32,9 %	+16,6 % +29,7 %	+16,2 % +13,7 %
L_12_K	+9,8 %	-1,1 % -14,3 %	+19,6 % +21,4 %	+1,3 % -3,7 %
O_04_K	+0,7 %	+16,6 % -9,2 %	+20,5 % +3,0 %	-8,2 % +17,9 %
O_08_k	+0,8 %	+0,7 % +5,1 %	+15,9 % +6,2 %	-11,5 % +11,1 %
O_12_K	+3,2 %	+4,0 % -4,8 %	+12,4 % +6,6 %	+1,1 % +2,8 %

A.7 Zusatzanforderungen

A.7.1 Spektrale Kenngrößen

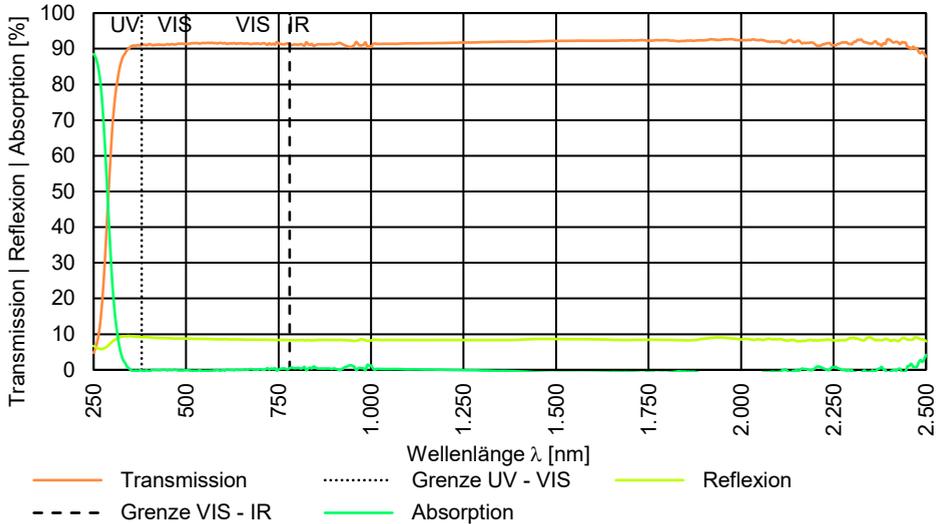


Bild A.9

Transmission, Reflexion und Absorption von chemisch vorgespanntem Alumo-Silikatglas mit einer Nennstärke von 0,85 mm im Wellenlängenbereich von 250 nm bis 2.500 nm.

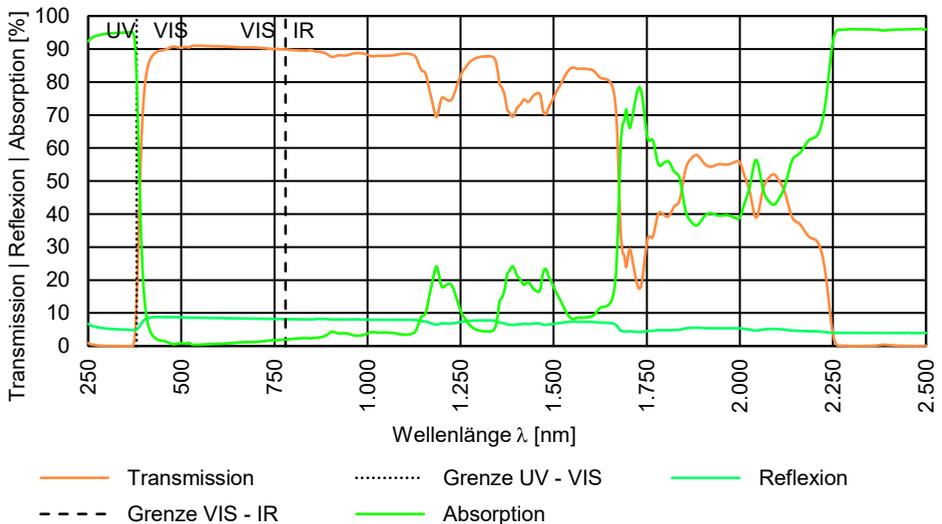


Bild A.10

Transmission, Reflexion und Absorption von Verbundglas mit dem Aufbau 2 mm FG | 2 mm TPU | 2 mm FG im Wellenlängenbereich von 250 nm bis 2.500 nm.

Tabelle A.117

Spektrale Kenngrößen nach DIN EN 410 der untersuchten Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel.

Kenngröße	Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel		
Aufbau	Glas 2 mm TPU 2 mm PC 2 mm TPU Glas		
Glas	Falcon t = 0,50 mm	Leoflex t = 0,85 mm	Optiwhite t = 2,00 mm
Direkter Strahlungsreflexionsgrad	7,5 %	7,4 %	7,9 %
Direkter Strahlungstransmissionsgrad	78,0 %	77,5 %	76,5 %
Allgemeiner Farbwiedergabeindex	99,5 %	99,4 %	99,5 %
Spezifische Farbwiedergabeindizes			
Dunkelrosa	99,5 %	99,5 %	99,6 %
Senfgelb	99,9 %	99,9 %	99,9 %
Gelbgrün	99,7 %	99,9 %	99,7 %
Hellgrün	99,3 %	99,2 %	99,2 %
Türkisblau	99,6 %	99,6 %	99,5 %
Himmelblau	99,5 %	99,4 %	99,4 %
Asterviolett	99,4 %	99,2 %	99,4 %
Fliederviolett	99,0 %	98,9 %	99,1 %

Tabelle A.118

Spektrale Kenngrößen nach DIN EN 410 Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit der Widerstandsklasse P6B oder P8B gegen manuellen Angriff und dem Dünnglas Optiwhite.

Kenngröße	P6B_O	P8B_O
Nennstärke	13,0 mm	20,00 mm
Realdicke	12,7 mm	19,7 mm
Direkter Strahlungsreflexionsgrad	7,4 %	7,4 %
Direkter Strahlungstransmissionsgrad	75,4 %	71,7 %
Allgemeiner Farbwiedergabeindex	99,5 %	99,0 %
Spezifische Farbwiedergabeindizes		
Dunkelrosa	99,5 %	99,0 %
Senfgelb	99,5 %	98,9 %
Gelbgrün	99,0 %	98,4 %
Hellgrün	99,3 %	99,1 %
Türkisblau	99,7 %	99,3 %
Himmelblau	99,8 %	99,3 %
Asterviolett	99,6 %	99,3 %
Fliederviolett	99,2 %	98,9 %

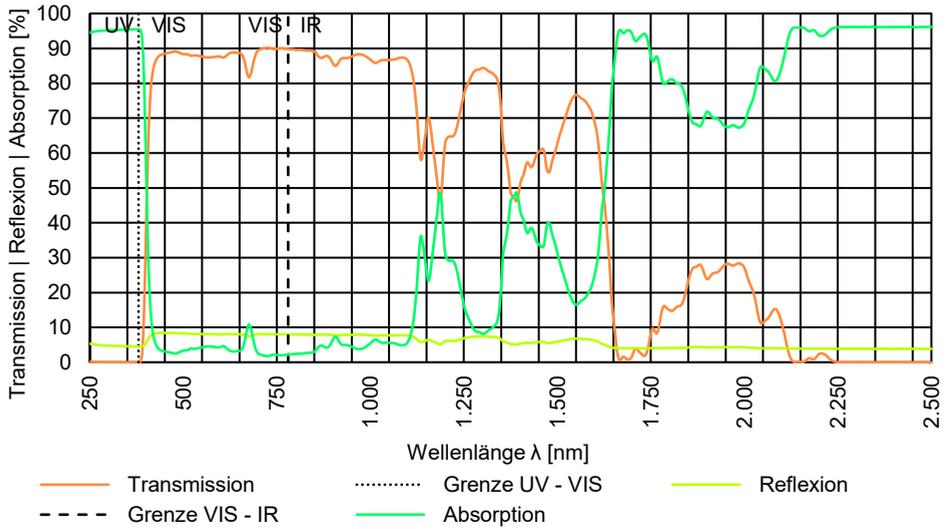


Bild A.11

Transmission, Reflexion und Absorption der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel P6B_O.

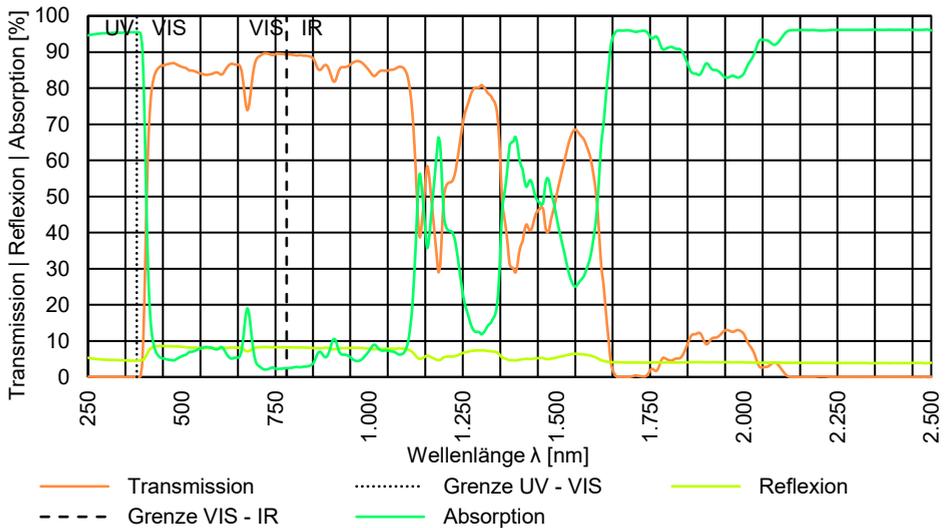


Bild A.12

Transmission, Reflexion und Absorption der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel P8B_O.

A.7.2 Brandschutz

Tabelle A.119

Auswertung der Untersuchung der Baustoffklasse B2 nach DIN 4102 für B2_O_P6B im 90° gedrehten Einbauzustand.

Prüfkörper	Prüfkörper	Entzündung	Selbstverlöschen der Flamme	Größte Flammhöhe bis 20 s
B2_O_P6B	1	1 s	17 s	3 cm
	2	1 s	> 20 s	3 cm
	3	1 s	> 20 s	4 cm
	4	1 s	15 s	3 cm
	5	1 s	17 s	3 cm
Zusatzinformation	geringe Rauchentwicklung kein brennendes Abfallen			

Tabelle A.120

Auswertung der Untersuchung der Baustoffklasse B2 nach DIN 4102 für B2_O_P8B im 90° gedrehten Einbauzustand.

Prüfkörper	Prüfkörper	Entzündung	Selbstverlöschen der Flamme	Größte Flammhöhe bis 20 s
B2_O_P8B	1	1 s	> 20 s	5 cm
	2	1 s	> 20 s	5 cm
	3	1 s	> 20 s	4 cm
	4	1 s	> 20 s	4 cm
	5	1 s	> 20 s	4 cm
Zusatzinformation	geringe Rauchentwicklung kein brennendes Abfallen			

Tabelle A.121

Auswertung der Untersuchung der Baustoffklasse B2 nach DIN 4102 für B1_O_P6B und B1_O_P8B.

Prüfkörper	Material tropft brennend ab	Material tropft nichtbrennend ab	Weiterbrennen auf dem Siebboden (Zeitdauer)	Maximale Rauchgas-temperatur erreicht
B1_O_P6B	138 s	80 s	80 s	373 s
B1_O_P8B	118 s	99 s	130 s	343 s

A.7.3 Schallschutz

Tabelle A.122

Auswertung der Messung der Luftschalldämmung von Bauteilen im Prüfstand nach DIN EN ISO 10140-2 für den Prüfkörper S_O_P6B.

Prüfkörper	Frequenz	R _{Terz}	R _{Oktave}
S_O_P6B	100 Hz 125 Hz 160 Hz	26,8 dB 26,4 dB 28,5 dB	27,1 dB
	200 Hz 250 Hz 315 Hz	28,5 dB 30,2 dB 29,9 dB	29,5 dB
	400 Hz 500 Hz 630 Hz	31,8 dB 33,4 dB 34,3 dB	33,0 dB
	800 Hz 1.000 Hz 1.250 Hz	35,7 dB 37,6 dB 39,6 dB	37,3 dB
	1.600 Hz 2.000 Hz 2.500 Hz	41,5 dB 43,4 dB 44,9 dB	43,0 dB
	3.150 Hz 4.000 Hz 5.000 Hz	45,8 dB 46,8 dB 47,5 dB	46,6 dB

Tabelle A.123

Auswertung der Messung der Luftschalldämmung von Bauteilen im Prüfstand nach DIN EN ISO 10140-2 für den Prüfkörper S_O_P8B.

Prüfkörper	Frequenz	R _{Terz}	R _{Oktave}
S_O_P8B	100 Hz 125 Hz 160 Hz	30,2 dB 28,1 dB 31,3 dB	29,7 dB
	200 Hz 250 Hz 315 Hz	31,7 dB 33,4 dB 32,9 dB	32,6 dB
	400 Hz 500 Hz 630 Hz	34,5 dB 35,7 dB 37,3 dB	35,7 dB
	800 Hz 1.000 Hz 1.250 Hz	38,8 dB 40,6 dB 42,5 dB	40,4 dB
	1.600 Hz 2.000 Hz 2.500 Hz	44,6 dB 46,3 dB 47,8 dB	46,0 dB
	3.150 Hz 4.000 Hz 5.000 Hz	48,9 dB 49,9 dB 50,6 dB	49,7 dB

