

Thorsten Weimar, Sebastián Andrés López, Christoph Hahn

# **Entwicklung von Verbundtafeln aus innovativem Dünnglas und Polycarbonat**

F 3077

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2018

ISBN 978-3-7388-0198-9

Vervielfältigung, auch auszugsweise,  
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

[www.irb.fraunhofer.de/tauforschung](http://www.irb.fraunhofer.de/tauforschung)

Auskunft:

M.Sc. Sebastián Andrés López  
Hölderlinstraße 3  
57076 Siegen  
Telefon +49 271 740-4995  
Telefax +49 271 740-12891  
andres-lopez@architektur.uni-siegen.de  
www.architektur.uni-siegen.de/tragkonstruktion

## Zukunft Bau | SWD-10.08.18.7-14.32

### Entwicklung von Verbundtafeln aus innovativem Dünnglas und Polycarbonat

#### Endbericht

Forschungseinrichtung	Universität Siegen Fakultät II Lehrstuhl für Tragkonstruktion Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thorsten Weimar 57068 Siegen  T +49 271 740-5072 F +49 271 740-12891 E <a href="mailto:tragkonstruktion@architektur.uni-siegen.de">tragkonstruktion@architektur.uni-siegen.de</a>
Unternehmen	SiLATEC Sicherheits- und Laminatglastechnik GmbH Dipl.-Ing. (FH) Christoph Hahn Bürgermeister-Graf-Ring 18 82538 Gelting  T +49 8171 9281-0 F +49 8171 9281-20 E <a href="mailto:info@silatec.de">info@silatec.de</a>

Die Forschungsarbeit mit dem Aktenzeichen SWD-10.08.18.7-14.32 wurde aus Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt des Endberichts liegt bei den Autoren.

## Inhalt

1	Einleitung	3
1.1	Motivation	3
1.2	Ziel und Aufbau der Arbeit	5
2	Grundlagen zur Anwendung von Glas im Bauwesen	7
3	Materialauswahl	17
3.1	Glas	17
3.1.1	Vorgespanntes Glas	18
3.1.2	Dünnglas	20
3.2	Polycarbonat	22
3.3	Zwischenschicht	24
4	Untersuchung der Gebrauchstauglichkeit	26
4.1	Untersuchungen zum Haftverbund	26
4.2	Untersuchungen zur Beständigkeit	29
4.3	Untersuchungen zum Widerstand gegen manuellen Angriff	31
4.4	Untersuchungen zur Wärmedämmung	35
4.5	Untersuchungen zur Transmission	37
5	Untersuchung des Tragverhaltens	40
5.1	Numerische Untersuchungen	40
5.2	Querschnittsauswahl	43
5.3	Untersuchungen zum Trag- und Bruchverhalten	44
5.3.1	Versuchsaufbau und Versuchsprogramm	44
5.3.2	Tragverhalten mit Dünnglas Optiwhite	48
5.3.3	Tragverhalten mit Dünnglas Leoflex	51
5.3.4	Bruchverhalten mit Dünnglas Optiwhite	53
5.3.5	Bruchverhalten mit Dünnglas Leoflex	56
5.4	Untersuchungen zum Resttragverhalten	59
5.4.1	Versuchsaufbau und Versuchsprogramm	59
5.4.2	Resttragverhalten mit Dünnglas Optiwhite	59
5.4.3	Resttragverhalten mit Dünnglas Leoflex	62
6	Herstellprozess	64
6.1	Identifikation von Prozessparametern	64

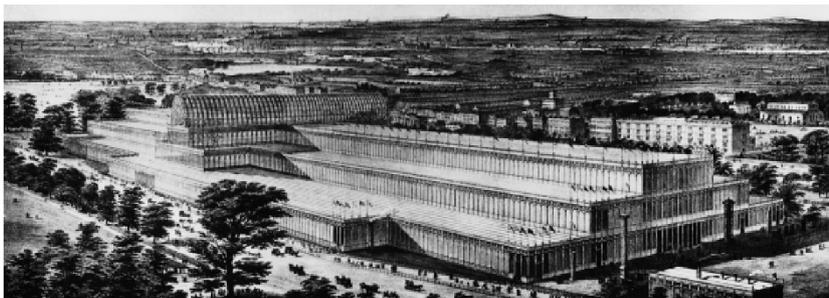
6.1.1	Material	64
6.1.2	Materialverarbeitung	65
6.2	Betrachtung der Prozesskette	68
6.3	Herstellung eines Prototypens	69
7	Zusammenfassung	71
8	Literatur	75
8.1	Fachbücher und Fachaufsätze	75
8.2	Normen, Richtlinien und Verordnungen	76
8.3	Produktdatenblätter	80

## 1 Einleitung

### 1.1 Motivation

Seitdem sich die Menschen vom Jäger und Sammler zu sesshaften Bauern entwickelten, wurden Unterkünfte zum Wohnen, Ausruhen und Versammeln, für religiöse Zwecke und Lagern von Material oder Nahrung gebaut. Einfache Hütten aus Holz und Steine entstanden, gefolgt von den ägyptischen Pyramiden und den griechischen Tempeln über die Erfindung des Opus Caementitium der Römer bis hin zu den Fachwerkhäusern aus Lehm und Holz. Durch die Jahrtausende hinweg blieben viele Nutzungen gleich, die Baustoffe und Konstruktionen veränderten sich. Die industrielle Revolution im 19. Jahrhundert brachte weitere Baustoffe wie Beton und Stahl hervor. Einer der ersten erfolgreich eingesetzten Verbundbaustoffe war der Stahlbeton. Der Stahl nimmt hohe Zugkräfte auf, der Beton überträgt die Druckkräfte. Zusammen entsteht ein Baustoff, das durch geschickte Anordnung der Bewehrung eine hohe Last bei geringem Querschnitt aufnimmt. Ein weiterer klassischer Verbund ist im Bereich des Stahlbaus zu finden. Dabei werden Stahlprofile über eine Verbundfuge durch Kopfbolzendübel mit Betonbauteilen verbunden. Ein ähnliches Vorgehen besteht bei neueren Entwicklungen im Holz-Beton-Verbundbau.

Mit dem Einsatz von großflächigen Verglasungen in der Architektur wurde seit dem Ende der 1980er ein neuer Bereich der Baustoffe wieder entdeckt. Obwohl Glas eine lange Tradition in der Verwendung und Herstellung besaß und vor allem die bunten Fensterverglasungen von Kathedralen und barocken Gebäuden mehrere Jahrhunderte überlebten, ist der konstruktive Glasbau eine der neueren Disziplinen im Bauwesen. Mit der industriellen Revolution gelang es, die Glasherstellung von einem manuellen auf ein maschinelles Verfahren weiter zu entwickeln, um dadurch nicht ausschließlich das wohlhabende Klientel zu erreichen. Mit der Errichtung des Kristallpalastes anlässlich der Weltausstellung 1851 in London wurde ein erstes Ausrufezeichen im Glasbau in Kombination mit der Gusseisenbauweise gesetzt.<sup>1</sup>



**Bild 1** Kristallpalast von Joseph Paxton bei der Weltausstellung 1851 in London aus Glas und Gusseisen.

<sup>1</sup> Vergleiche Schittich 2006, Ricken 2001

Anschließend entstanden immer weitere Herstellungsverfahren basierend auf dem Ziehverfahren, bei dem die Glasschmelze über Rollen in die gewünschte Dicke gezogen wird. Das 1959 von dem britischen Unternehmen Pilkington Ltd. eingeführte Floatglasverfahren ist das bedeutendste und weitverbreitetste Herstellungsverfahren von Flachglas. Es ermöglicht eine verzerrungsfreie und kontinuierliche Herstellung. Damit ist Glas zu einem Massenprodukt mit einem kostengünstigen Angebot am Markt geworden. Bei diesem Verfahren werden die Ausgangsstoffe Quarzsand, Kalk und Soda sowie Stabilisatoren in Form von Zwischenoxiden und weiteren Bestandteilen wie Metalloxide geschmolzen und bei einer Temperatur von etwa +1.100 °C auf ein flüssiges Zinnbad gegeben. Aufgrund der unterschiedlichen Dichten schwimmt die Schmelze auf dem Zinnbad. Die Anlagengeschwindigkeit bestimmt dabei die Dicke des Glases. Nachdem sich das Glas auf etwa +600 °C abkühlt, wird es vom Zinnbad gehoben und im Kühlkanal kontrolliert auf +100 °C gebracht. Abschließend erfolgen der Zugschnitt und die Lagerung.<sup>2</sup>

Ein Verbund wird bei Glas durch Kleben oder Laminieren transparenter Materialien erzeugt. Glas besitzt als spröder Werkstoff keine Resttragfähigkeit. Um eine Tragfähigkeit nach dem Bruch sicherzustellen, wird Glas über eine polymere Zwischenschicht zu einem Verbundglas oder einem Verbundsicherheitsglas laminiert. Verbundsicherheitsglas besteht aus mindestens zwei Glastafeln verbunden mit einer transparenten Zwischenschicht. Bei Glasbruch verhindert diese Zwischenschicht einen Splitterabgang. Durch Verzahnung einzelner Glasbruchstücke ist eine Resttragfähigkeit gegeben. Die Verglasung bietet weiterhin einen Schutz vor Verletzungen durch Splitter und eine Begrenzung von Öffnungen.

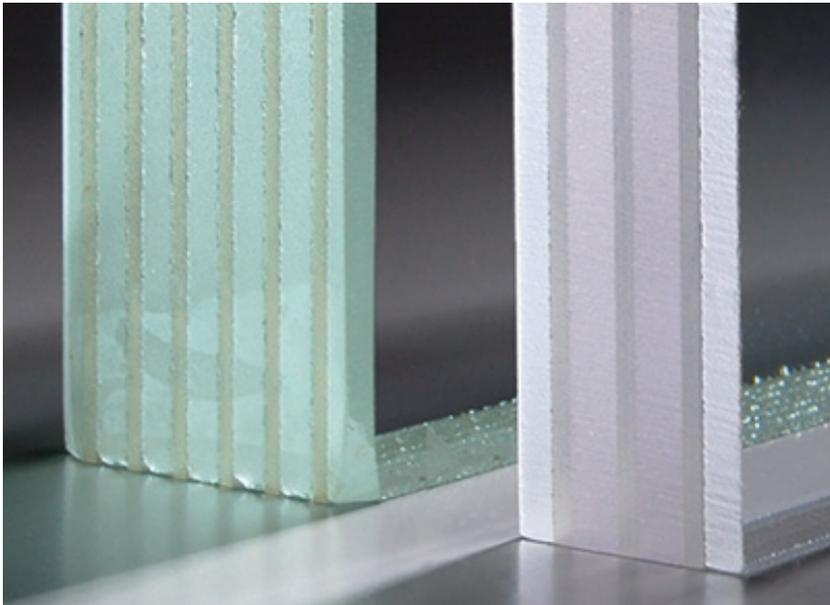
Sicherheitssonderverglasungen sind Verbundsicherheitsgläser mit erhöhten Anforderungen an den Schutz vor manuellem Angriff, Durchschuss oder Sprengwirkung. Verglasungen der höchsten Widerstandsklassen können allerdings einen großen Querschnitt und ein damit verbundenes hohes Eigengewicht aufweisen. Eine Alternative zu Glastafeln in Verbundsicherheitsgläsern stellen transparente Kunststofftafeln dar.<sup>3</sup>

Polycarbonat als technischer Thermoplast bietet sich aufgrund seiner hohen Schlagzähigkeit besonders bei Sicherheitssonderverglasungen an. Die Oberfläche ist empfindlich und muss durch außenliegende Glastafeln geschützt werden. Bild 2 zeigt einen Vergleich der Querschnitte von einer herkömmlichen Sicherheitssonderverglasung als

<sup>2</sup> Vergleiche Weller 2013

<sup>3</sup> Vergleiche DIN EN ISO 12543-2 und Weimar 2011

Verbundsicherheitsglas und einer Glas-Polycarbonat-Verbundtafel Die Glas-Polycarbonat-Verbundtafeln sind gegenüber dem herkömmlichen Verbundglas um bis zu 33 % schlanker und 50 % leichter.<sup>4</sup>



**Bild 2** Sicherheitssonderverglasung mit der höchsten Widerstandsklasse P8B gegen manuellen Angriff aus einem Verbundsicherheitsglas (links) und einer Glas-Polycarbonat-Verbundtafel (rechts).

Mit der Einführung von Mobiltelefonen und Tablets hat sich auch die Glasforschung weiterentwickelt. Der Berührungsbildschirm ist eines der am stärksten beanspruchten Elemente dieser Geräte und erfährt Einwirkungen aus Bedienung, Lagerung und Absturz. Dabei ist eine ausreichende Oberflächenfestigkeit bei hoher Transparenz zu gewährleisten. Die speziell entwickelten Dünngläser für die mobilen Endgeräte stellen ein passendes Material dar. Die Herstellungsverfahren für Dicken von kleiner als 3 mm werden seit der Einführung kontinuierlich verbessert. Dünngläser sind meistens chemisch vorgespannt und erreichen dadurch eine eingeprägte Oberflächenspannung im Bereich von 800 N/mm<sup>2</sup>. Aufgrund optimierter Herstellungsverfahren ist die Produktion von Gläsern mit bis zu 50 µm in verschiedenen Abmessungen möglich. Die größeren Abmessungen der Gläser sind auch für alternative Anwendungsgebiete interessant. Neben der Informations- und Medizintechnik bietet auch das Bauwesen eine attraktive Perspektive für den Einsatz von Dünnglas.

## 1.2 Ziel und Aufbau der Arbeit

Das Forschungsprojekt beinhaltet die Entwicklung von Verbundtafeln aus innovativem Dünnglas und Polycarbonat als eine leistungsfähigere Variante von Verbundsicherheitsglas im Vergleich zu üblichen Glas-Verbunden. Die Zwischenschichten, beispielsweise aus Po-

<sup>4</sup> Vergleiche Weimar 2011, Weimar 2015 und Weimar 2016

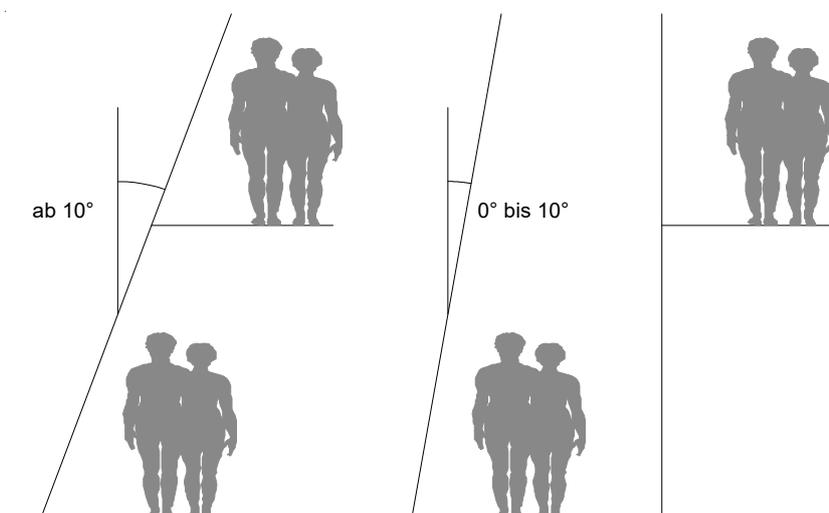
lyurethan, erreichen bei Glas-Polycarbonat-Verbundtafeln einen hohen Haft- und Schubverbund. Dadurch entstehen dünne und leichte Lamine, die eine hohe Robustheit und große Redundanz aufweisen.

In einem ersten Schritt werden die Anwendungsmöglichkeiten ermittelt und die sich ergebenden Anforderungen identifiziert. Aufgrund der hohen Beanspruchbarkeit eröffnen sich Anwendungsgebiete im Bereich der Sicherheitssonderversglasung. Anschließend werden die Eigenschaften der Ausgangsstoffe Dünnglas, Polycarbonat und Zwischenschicht analysiert und unter Berücksichtigung der Anforderungen und Anwendbarkeit ausgewählt. In einem zweiten Schritt sind die mechanischen, physikalischen und optischen Eigenschaften der Verbundtafel zu bestimmen. Hierbei wird eine besondere Beachtung auf den Haftverbund gelegt. Das Verhalten der Zwischenschicht im Verbund zeigt sich bei dem Kugelfallversuch. Die Beständigkeit ist unter klimatischen Beanspruchungen für Verbundsicherheitsglas geregelt. Eine Klassifizierung als durchbruchhemmende Sicherheitssonderversglasung erfolgt mit der Prüfung mit der Axt. Der Wärmedurchgangskoeffizient wird rechnerisch bestimmt und die Transmission im ultravioletten, sichtbaren und infraroten Spektralbereich gemessen. Mit ergänzenden numerischen Untersuchungen ergeben sich Aussagen zu einem weiteren Querschnittsaufbau und zur Untersuchung des Trag- und Resttragverhaltens unter kurzzeitiger Beanspruchung. Die Herstellung der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln wird näher betrachtet. Entscheidend ist der Umgang mit dem sensiblen Dünnglas vom Transport bis zum Einbau. Das biegeeweiche Material nimmt zunächst große Verformungen auf, zeigt dann allerdings durch das linear-elastische Materialverhalten einen spröden Bruch.

## 2 Grundlagen zur Anwendung von Glas im Bauwesen

Das Kapitel umfasst eine Zusammenstellung der Anwendungen und Anforderungen von Glas im Bauwesen. Darauf aufbauend lassen sich Anforderungen und Anwendungen für eine Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln ableiten. Neben einer kurzen Einführung in den konstruktiven Glasbau sind anschließend konkrete Anwendungen und Anforderungen an das Laminat aufgelistet.

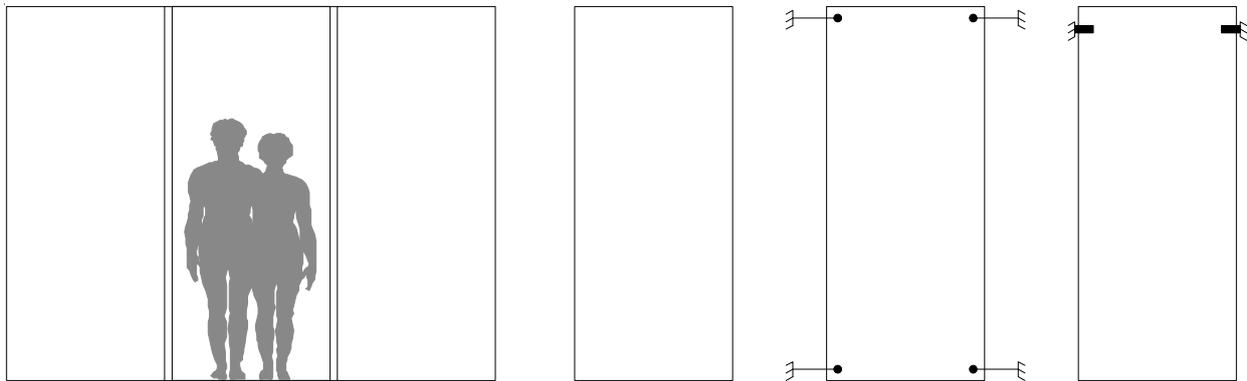
Zur Errichtung von Bauteilen aus Glas sind Normen als anerkannte Regeln der Technik sowie Richtlinien zu beachten. Für öffentliche Gebäude gelten weitere Sicherheitsregeln wie die Unfallverhütungsvorschriften, Informationen der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherungen, Arbeitsschutzgesetze, Arbeitsstättenverordnungen, Technische Regeln für Arbeitsstätten und die Versammlungsstättenverordnung. Private Gebäude müssen die Verkehrssicherungspflicht nach dem Bürgerlichen Gesetzbuch berücksichtigen. Weitere Anforderungen ergeben sich aus den Rechtsprechungen. DIN 18008 regelt national das Glas im Bauwesen mit Nenndicken von 3 mm bis 19 mm. In den allgemeinen Grundlagen von DIN 18008-1 sind die Aspekte zur Bemessung für die Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit nach dem semi-probabilistischen Sicherheitskonzept der DIN EN 1990 beschrieben. Prinzipiell können Verglasungen als Horizontal- oder Vertikalverglasung mit einer linien- oder punktförmigen Lagerung verwendet werden. Im Einbauzustand entspricht gemäß den Darstellungen in Bild 3 ein Neigungswinkel von mehr als  $10^\circ$  zur Vertikalen einer Horizontalverglasung und von weniger als  $10^\circ$  einer Vertikalverglasung.<sup>5</sup>



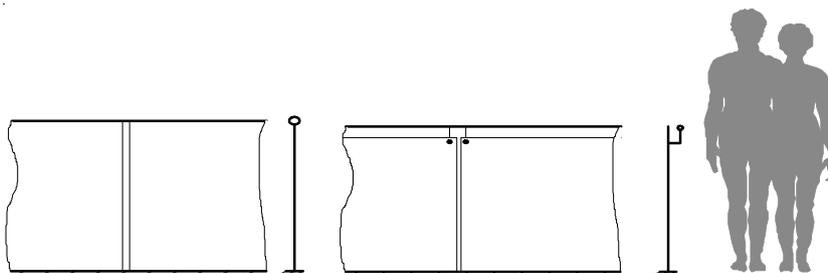
**Bild 3** Horizontalverglasung (links) und Vertikalverglasung (rechts) nach DIN 18008-2.

<sup>5</sup> Vergleiche DIN 18008-2

In DIN 18008-2 sind linienförmig und in DIN 18008-3 punktförmig gelagerte Verglasungen sowie eine kombinierte Lagerung geregelt. Vorwiegend bilden Verglasungen einen Raumabschluss in der Gebäudehülle. Dabei ergeben sich Zusatzanforderungen, beispielsweise für eine Absturzsicherung. DIN 18008-4 definiert drei Kategorien von absturzsichernden Verglasungen und legt deren Nachweise und Prüfungen fest. In Bild 4 bis Bild 6 sind die verschiedenen Kategorien einer absturzsichernden Verglasung dargestellt.<sup>6</sup>

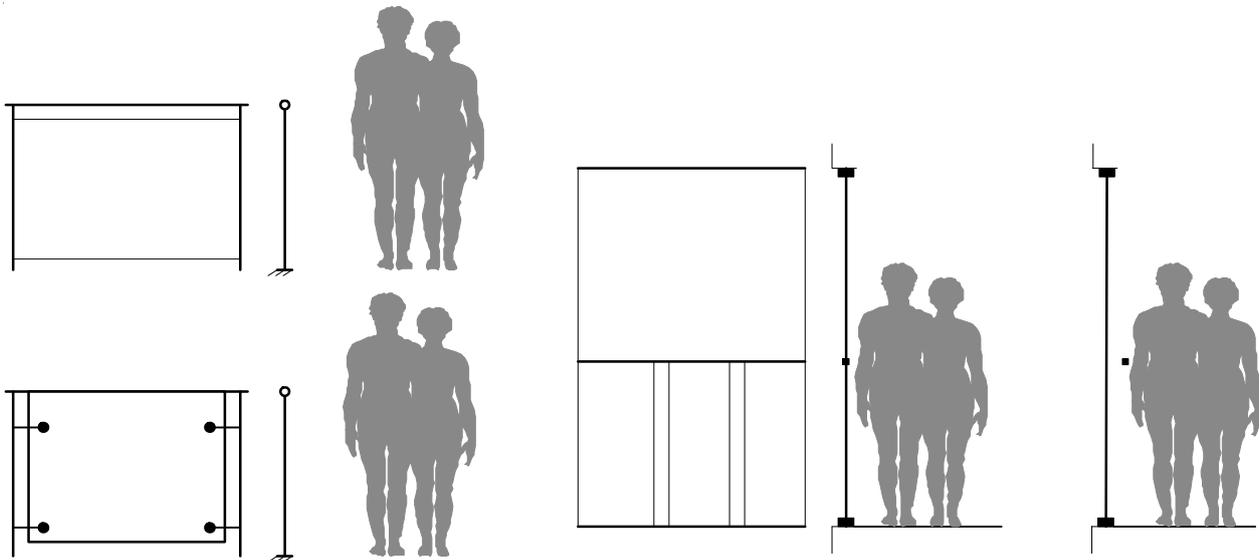


**Bild 4** Absturzsichernde Verglasung der Kategorie A nach DIN 18008-4. Horizontale Nutzlasten werden direkt über das Glas abgetragen. Ein tragender Brüstungsriegel ist nicht vorhanden.



**Bild 5** Absturzsichernde Verglasung der Kategorie B nach DIN 18008-4. Die Gläser sind an der Unterseite eingespannt. Horizontale Nutzlasten werden von einem durchgehenden Handlauf aufgenommen.

<sup>6</sup> Vergleiche DIN 18008-4



DIN 18008-5 enthält Regelungen für begehbare Verglasungen. Diese müssen mit einer Resttragfähigkeit ausgestattet sein. Die Simulation der Begehrbarkeit ist durch entsprechende Einwirkungen für den planmäßigen Personenverkehr möglich. Betretbare Verglasungen nach DIN 18008-6 sind ausschließlich für Reinigungs- und Wartungszwecke zu betreten und besitzen angepasste Sicherheitsanforderungen. Neben dem rechnerischen Nachweis für die Bemessung wird die Einhaltung von konstruktiven Randbedingungen vorgegeben. In DIN 18008-3 bis DIN 18008-6 sind für den Nachweis der jeweiligen Glasanwendungen auch alternativ Bauteilversuche definiert. Diese Versuche simulieren eine entsprechende Belastungssituation für die einzelne Verglasung. DIN 18008-7 gilt für Sonderanwendungen und wird momentan im Normungsausschuss vorbereitet.

**Bild 6** Absturzsichernde Verglasung der Kategorie C nach DIN 18008-4. Horizontale Nutzlasten werden von einem Handlauf aufgenommen.

Kategorie C1 - Ausfachungen von Geländern und Brüstungen (links)

Kategorie C2 - Verglasungen unterhalb lastabtragender Querriegel (mittig)

Kategorie C3 - Verglasungen mit einem lastabtragenden Holm (rechts)

Richtlinien zu Verglasungen schreiben einen Einsatz verschiedener Glasarten vor. Ganzglaselemente in Innenräume und als Türen unterliegen der Kennzeichnungspflicht. Üblicherweise werden bruch sichere Werkstoffe oder Werkstoffe mit verletzungsminimierenden Eigenschaften verwendet. Im Glasbau ist aus diesem Grund der Einsatz von Sicherheitsglas notwendig. Zusätzlich müssen die Verglasungen an Verkehrsflächen verkehrssicher ausgebildet sein. Dabei werden die Vermeidung von Unfällen, Schäden und eine Vorbeugung des Schutzes von Personen und Objekten bei deren Bewegung beschrieben. Weiterhin sollen Sicherheitsgläser die Nutzungssicherheit gewährleisten. Sicherheitsgläser sind nur als Einscheibensicherheitsglas (ESG), heißgelagertes Einscheibensicherheitsglas (ESG-H) und Verbundsicherheitsglas (VSG) auszuführen und reduzieren das Verletzungsrisiko aufgrund der günstigeren Splitterbildung beziehungsweise Splitterbindung im Vergleich zu anderen Glasarten.<sup>7</sup>

<sup>7</sup> Vergleiche ASR A1.6, ArbStättV und DGUV 208-014

Verbundglas beschreibt den Aufbau eines Laminats mit einer oder mehreren Tafeln aus Glas beziehungsweise Verglasungsmaterial aus Kunststoff, die durch eine oder mehrere Zwischenschichten miteinander verbunden sind ohne weitere Sicherheitsanforderungen zu klassifizieren. Verbundsicherheitsglas definiert sich über die Sicherheitsanforderungen an Verbundgläser. Diese beschreiben die Notwendigkeit einer Splitterbindung nach dem Bruch der Glastafeln um eine Resttragfähigkeit zu gewährleisten. Verbundsicherheitsgläser gelten dabei zusätzlich als verkehrssicher.<sup>8</sup> Tabelle 1 zeigt die Anforderungen an Verbundsicherheitsgläser.

Anforderungen an Verbundsicherheitsglas	
Norm	Anforderung an das Material und Prüfungen
DIN EN ISO 12543-1 DIN EN ISO 12543-2	Kombination aus Glas, Verglasungsmaterial aus Kunststoff und Zwischenschicht. Folien, Platten, Drähte oder Gitter können ebenfalls eingelegt werden.  Anforderungen an das Glas: - klar, eingefärbt, beschichtet, durchsichtig, durchscheinend, undurchsichtig, gekühlt, teilvorgespannt, thermisch vorgespannt, chemisch vorgespannt oder oberflächenbehandelt  Anforderungen an das Verglasungsmaterial aus Kunststoff: - klar, eingefärbt, beschichtet, durchsichtig oder durchscheinend  Anforderungen an die Zwischenschicht: - farblos, gefärbt, transparent, durchscheinend, undurchsichtig oder beschichtet  Anforderungen an das Laminat: - elastische polymere Zwischenschicht mit Splitterbindung und Begrenzung des Öffnungswinkels. Nach Bruch ist eine Resttragfähigkeit vorhanden und die Verletzungsgefahr vermindert.
DIN EN ISO 12543-4	Anforderungen an die Beständigkeit: - Prüfung bei hoher Temperatur - Prüfung in der Feuchte - Bestrahlungsprüfung
DIN EN 14449 DIN EN 12600	Pendelschlagversuch in CEN-Mitgliedstaaten Mindestklasse 3(B)3

**Tabelle 1** Normen, Anforderungen an das Material und Prüfungen für Verbundsicherheitsglas.

Verbundsicherheitsgläser werden entsprechend den Anforderungen an das Bauteil als Vertikalverglasung unter anderem als absturzsichernde Verglasung, in Fassaden, in Lärmschutzwänden oder in Sporthallen eingesetzt. Als Horizontalverglasung sind Anwendungen bei begehbaren und betretbaren Verglasungen wie Schachtabdeckung, Terrassen, Treppen, großflächige Dachverglasungen oder als Podeste möglich. Der Anforderungskatalog an Verglasungen als Verbundsicherheitsglas ergibt sich aus DIN 18008. Tabelle 2 und Tabelle

<sup>8</sup> Vergleiche DIN EN ISO 12543-1 und DIN EN ISO 12543-2

3 zeigen die Anforderungen an Vertikal- und Horizontalverglasungen mit entsprechenden Anwendungsbeispielen.

Anwendungen von Verbundsicherheitsglas														
Norm	Anforderung an das Bauteil	Anwendung (Beispiele)												
<b>Vertikalverglasung</b>														
DIN 18008-2	Linienförmig gelagerte Vertikalverglasungen sollen an mindestens zwei gegenüberliegenden Seiten beidseitig wirksam (Druck und Sog) gelagert sein. Bei einem MIG sind alle Scheiben im Querschnitt linienförmig gelagert. Ab einer Einbauhöhe der Oberkante von mehr als 4 m über einer Verkehrsfläche muss eine allseitige Lagerung vorliegen und ESG-H anstelle von ESG verwendet werden. Monolithische Einfachverglasungen sollen aus Verbundglas oder aus grob brechenden Glasarten bestehen.	<p>Ausfachende Fenster und Fassadenelemente</p> <p>Für Verglasungen mit der Einhaltung nachfolgender Bedingungen ist kein Nachweis notwendig.</p> <table border="1"> <tr> <td>Glaserzeugnis</td> <td>FG, TVG, ESG, ESG-H, VSG</td> </tr> <tr> <td>Fläche</td> <td>≤ 1,6 m<sup>2</sup></td> </tr> <tr> <td>Scheibendicke</td> <td>≥ 4,0 mm</td> </tr> <tr> <td>Differenz der Scheibendicken</td> <td>≤ 4,0 mm</td> </tr> <tr> <td>Scheibenzwischenraum</td> <td>≤ 16,0 mm</td> </tr> <tr> <td>Charakteristische Wert der Windlast</td> <td>≤ 0,8 kN/m<sup>2</sup></td> </tr> </table>	Glaserzeugnis	FG, TVG, ESG, ESG-H, VSG	Fläche	≤ 1,6 m <sup>2</sup>	Scheibendicke	≥ 4,0 mm	Differenz der Scheibendicken	≤ 4,0 mm	Scheibenzwischenraum	≤ 16,0 mm	Charakteristische Wert der Windlast	≤ 0,8 kN/m <sup>2</sup>
Glaserzeugnis	FG, TVG, ESG, ESG-H, VSG													
Fläche	≤ 1,6 m <sup>2</sup>													
Scheibendicke	≥ 4,0 mm													
Differenz der Scheibendicken	≤ 4,0 mm													
Scheibenzwischenraum	≤ 16,0 mm													
Charakteristische Wert der Windlast	≤ 0,8 kN/m <sup>2</sup>													
DIN 18008-3	Bohrung und Klemmung: VSG aus ESG, ESG-H oder TVG Klemmung: zusätzlich verwendbare Glasarten aus VSG FG oder ESG-H bei Einfachverglasung, MIG aus ESG-H, TVG, FG oder VSG	Ausfachende Fassadenelemente mit einer Teilerhalterung oder Klemmhalterung												
DIN 18008-4	Die Bauteile sind Vertikalverglasungen oder zur Angriffsseite geneigte Horizontalverglasungen, die Personen auf Verkehrsflächen gegen seitliches Abstürzen sichern.  Kategorie A: - VSG bei Einfachverglasung - Angriffsseite von MIG aus VSG, ESG oder VG ESG, mindestens 1x VSG in MIG  Kategorie B: - VSG  Kategorie C: - C1- und C2-Verglasungen aus VSG bei Einfachverglasung, Ausnahme: allseitig linienförmige Lagerung auch mit ESG möglich. Angriffsseite von MIG aus VSG, ESG oder VG ESG - C3-Verglasungen entsprechend Kategorie A auszuführen	Geländerausfachung, Ganzglasfassaden, Absturzsicherung von einem Balkon, Podest oder einer Treppe												
DIN 18032-1	Verglasungen sind ballwurfsicher bis zu einer Höhe von 2 m über dem Fußboden auszuführen.	Sporthallen, Mehrzweckhallen												

**Tabelle 2** Normen, Anforderungen an Vertikalverglasungen und Anwendungen für Verbundsicherheitsglas.

Anwendungen von Verbundsicherheitsglas		
Norm	Anforderung an das Bauteil	Anwendung (Beispiele)
<b>Horizontalverglasung</b>		
DIN 18008-2	Einfachverglasungen und untere Schichten von MIG aus VSG TVG, VSG FG oder Drahtglas	Wintergarten, großflächige Dachverglasungen
DIN 18008-3	Tellerhalter aus nur Einfachverglasung aus VSG TVG	Vordach, Abdeckungen von Lichtschächten
DIN 18008-5	Begehbare Verglasungen mit ausschließlich planmäßigem Personenverkehr bei einer üblichen und lotrechten Nutzung von 5 kN/m <sup>2</sup> . VSG mit mindestens drei Schichten. Diese müssen rutschsicher nach DIN 51131 Klasse R9 bis R13 sein.	Terrasse, Treppe, Podeste, Wintergarten, Stege, Abdeckungen von Lichtschächten, großflächige Dachverglasungen
DIN 18008-6 (Entwurf)	Diese Verglasungen werden zur Instandhaltungsmaßnahme betreten und müssen durchsturz sicher sein. Zusätzlich entsprechen sie den Regelungen der DIN 18008-2. Die oberste Tafel eines MIG besteht aus VSG oder ESG.	Wintergarten, großflächige Dachverglasungen

Mit Variation des Querschnitts, hochfesten Zwischenschichten und unterschiedlichen Glasdicken lassen sich Sicherheitssonderverglasungen herstellen. Dabei wird einerseits von einer passiven Sicherheit, dem Schutz vor Verletzungen nach Glasbruch, ausgegangen. Andererseits setzt die aktive Sicherheit der Verglasung einem gewaltsamen Einwirken einen bestimmten Widerstand entgegen mit dem Ziel der Verhinderung des unerlaubten Ein- oder Ausbruchs aus einem Raum oder einem Gebäude. Sicherheitssonderverglasungen sollen dadurch Gelegenheits Täter und professionelle Einbrecher davon abhalten, durch die Verglasung in oder aus einem Gebäude zu gelangen. Dabei werden weitere Untergruppen definiert. Die Angriffshemmung stellt den Schutz gegen manuellen Angriff nach DIN EN 356 dar. DIN EN 1063 regelt den Widerstand gegen Beschuss und DIN EN 13541 unterteilt den Widerstand gegen Sprengwirkung in verschiedene Klassen. Die Anforderungen an das Material ergeben sich aus Tabelle 4.

**Tabelle 3** Normen, Anforderungen an Horizontalverglasungen und Anwendungen für Verbundsicherheitsglas.

Norm	Widerstandsart	Prüfung
DIN EN 356	Widerstand gegen manuellen Angriff	Kugelfallprüfung Axtprüfung
DIN EN 1063	Widerstand gegen Beschuss	Beschussprüfung
DIN EN 13541	Widerstand gegen Sprengwirkung	Sprengstoffprüfung

**Tabelle 4** Normen, Anforderungen an das Material und Prüfungen für Sicherheitssonderverglasungen.

Ein Verbund aus Glas mit Polycarbonat ist in den letzten Jahren als weitere Alternative für Sicherheitssonderverglasungen in den Mittelpunkt gerückt. Die Herstellung erfolgt häufig analog der von Verbundglas im Autoklav. In einem klimatisierten Raum wird das Material entsprechend der erforderlichen Dicken aufeinander geschichtet. Das zweistufige Verfahren führt zuerst ein Walzenverbund bei einer

Temperatur von etwa +60 °C bis +70 °C durch. Dabei wird die eingeschlossene Luft zwischen der Folie und der Glas- beziehungsweise Polycarbonatplatte herausgedrückt. Alternativen zum Walzenverbund sind das Vakuum-Sack-Verfahren oder das Vakuum-Ring-Verfahren. Im Hauptverbundprozess wird das Laminat bei etwa +140 °C und ungefähr 12 bar bis 14 bar abschließend verbunden. Dadurch entsteht ein dauerhafter Verbund. Ein Kaltverbundverfahren mit Gießharzen ist ebenfalls möglich. Der Verbund stellt sich in diesem Fall über eine chemische Reaktion oder ein Aushärten der Zwischenschicht unter ultravioletter Strahlung ein.<sup>9</sup>

Glas-Polycarbonat-Verbundtafeln werden als Vertikalverglasung vor allem im Bereich des aktiven Schutzes gegen manuellen Angriff und Durchschuss verwendet. Aufgrund der Verbindung zwischen Glas und Polycarbonat ergänzen sich die positiven Eigenschaften wie Oberflächenfestigkeit des Glases und Schlagzähigkeit des Polycarbonates.<sup>10</sup> An die Gebäudehülle, Fassaden und Verglasungen steigen die Erwartungen vor allem hinsichtlich des Einbruchschutzes. Deshalb befinden sich Sicherheitssonderverglasungen vorwiegend in Schaufenstern von Einzelhandel und Juwelieren sowie in Museen oder Banken. Einen zusätzlichen Widerstand gegen Sprengwirkung ist an Verglasungen in Gebäuden der öffentlichen Sicherheit, an Botschaften oder in Flughäfen zu stellen. Anwendungsbeispiele für diese Verglasungsart gibt Tabelle 5 an. Die Anforderungen an die Verglasungen sind entsprechend der Anwendung mit dem Auftraggeber im Vorfeld individuell abzustimmen.

<sup>9</sup> Vergleiche Schneider 2016 und Kapitel 6

<sup>10</sup> Vergleiche Weimar 2011

Anwendungen von Sicherheitssonderverglasungen		
Norm	Anforderung an Bauteil	Anwendung (Beispiele)
<b>Vertikal- und Horizontalverglasung</b>		
DIN EN 356 DIN EN 1063	Verbundsicherheitsglas mit sicherheitstechnischen Eigenschaften	- Schaufenster von Juwelieren, Einzelhandel - Spezialvitrinen, beispielsweise in Museen oder Ausstellungsräumen - Banken (unter Berücksichtigung der BGV C9 )
DIN EN 356 DIN EN 1063 DIN EN 13541	Verbundsicherheitsglas mit sicherheitstechnischen Eigenschaften	- Gebäudeverglasung von Botschaften, öffentlichen Einrichtungen, Privathäuser, Museen, Gebäude zum Erhalt der öffentlichen Sicherheit wie Polizei, Feuerwehr, Krankenhaus und Zoll - Flughäfen (unter anderem im Sicherheitsbereich) und Fahrzeuge
Verglasungen im Maschinenbau als Schutzscheiben oder als Schutz in Bearbeitungszentren werden nicht ausdrücklich als Sicherheitssonderverglasung beschrieben. Es gelten dennoch erhöhte Anforderungen an den Widerstand, die Splitterbindung und den Schutz vor Verletzungen. Vergleiche hierzu Tabelle 7 und Tabelle 8.		- Personenschutz, wie in Bearbeitungszentren mit Werkzeugmaschinen
		- Maschinenschutzscheiben

Im Bereich der angriffhemmenden Verglasung spielen Ganzglastüren eine zentrale Rolle, die beispielsweise in Kaufhäusern, Sporthallen, Flughäfen, Bahnhöfen, Schwimmbädern, Hotels sowie Konferenzräumen oder in privaten Gebäuden verwendet werden. Eine Tür ist eine Einrichtung zum Schließen einer Öffnung in einer Wand. Ganzglastüren trennen Innen- oder Außenräume gegenüber anderen Bereichen unter Bewahrung der Durchgangsmöglichkeit verbunden mit einer Transparenz oder Transluzenz ab. Eine Norm für Ganzglastüren ist in Deutschland nicht vorhanden. Das Bauteil besteht aber aus Sicherheitsglas und muss verkehrssicher sein. Weitere Anforderungen sind den Richtlinien aus Tabelle 6 zu entnehmen. In Kombination mit einem Widerstand gegen manuellen Angriff ist eine Verwendung der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln im Bereich von Ganzglastüren vor allem aufgrund des niedrigen Flächengewichtes bei hoher Widerstandsklasse sinnvoll.

**Tabelle 5** Normen, Anforderungen an das Bauteil und Anwendungen für Sicherheitssonderverglasungen.

Richtlinie	Anforderung an das Bauteil	Anwendungen für Ganzglastüren (Beispiele)
Arbeitsstättenverordnung ArbStättV	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kennzeichnungspflicht der Tür. Verwendung eines bruchsicheren Werkstoffs beziehungsweise bei Zerstörung ohne Verletzungsgefahr für Personen</li> <li>- falls die Verglasung nicht bruchsicher ist, muss die Tür gegen Eindrücken gesichert sein</li> <li>- Schutz vor übermäßiger Sonneneinstrahlung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kaufhaus und Sporthallen beispielsweise als Eingangstür</li> <li>- Flughafen, Bahnhof, Zoll, Sicherheitsschleusen</li> <li>- Botschaften, öffentliche Einrichtungen und Gebäude</li> <li>- Privathäuser</li> <li>- Hotel, Konferenzraum</li> <li>- Schwimmbad</li> </ul>
Arbeitsstättenrichtlinie ASR A1.6	<ul style="list-style-type: none"> <li>- bruchsicher, wenn gilt: Erfüllung baurechtlicher Bestimmungen für Sicherheitsglas (5.6)</li> <li>- Kennzeichnungspflicht von Türen (5.7)</li> <li>- Ganzglaselemente regelmäßig auf Beschädigung prüfen um einen Glasbruch vorzubeugen</li> </ul>	
Technische Richtlinien des Glashandwerks Nr. 8 »Verkehrssicherheit mit Glas« TR 8	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Die Ganzglastür muss verkehrssicher sein</li> </ul>	
DGUV Information 208-014 »Glastüren, Glaswände« DGUV 208-014	<ul style="list-style-type: none"> <li>- hinreichend bruchsichere lichtdurchlässige Werkstoffe sind als ESG, ESG-H, VSG oder lichtdurchlässige Kunststoffe mit vergleichbaren Sicherheitseigenschaften auszuführen</li> <li>- Notfalls vollverklebte Splitterschutzfolie, die nicht ausgetauscht werden kann mit einem Prüfzeugnis nach DIN EN 12600</li> <li>- Markierungen in maßgebender Höhe</li> </ul>	

Maschinenschutzscheiben geben einen Einblick in die Maschine während des Bearbeitungsprozesses und schützen gleichzeitig den Bediener vor Verletzungen durch abplatzendes Material, Späne, Werkstücke oder Werkzeug. Aktuell werden Schutzscheiben aus Polycarbonat verwendet. In einigen Fällen ist es sinnvoll, die Polycarbonatplatte mit einer Beschichtung zum Schutz gegen Chemikalien, Verkratzungen oder Abrieb zu versehen, um einen Schutz vor ultravioletter Strahlung und Kühlmittelkontakt zu gewährleisten. Das Polycarbonat versprödet nach einem entsprechenden Kontakt und verliert an Duktilität. Eine Verwendung von Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln ist ebenfalls möglich. Maschinenschutzscheiben erfüllen damit die Eigenschaften an Diffusionsdichtigkeit, Kühlmittelresistenz, ausreichender chemischer Beständigkeit, splitterfreie Verglasung im Arbeitsraum, Schallminderung und eine hohe Transparenz. Tabelle 7 listet die Normen und Anforderungen an das Material auf und Tabelle 8 gibt mögliche Anwendungsbeispiele an.

**Tabelle 6** Normen, Anforderungen an das Bauteil und Anwendungen von Ganzglastüren.

Norm	Anforderung an das Material
DIN EN 12417	Aufprallprüfung durch Beschuss mit einem Projektil
DIN EN 13128	Aufprallprüfung durch Beschuss mit einem Projektil
DIN EN 14070	Aufprallprüfung durch Beschuss mit einem Projektil
DIN EN ISO 16089	Aufprallprüfung durch Beschuss mit einem Projektil
DIN EN ISO 23125	Aufprallprüfung durch Beschuss mit einem Projektil

**Tabelle 7** Normen, Anforderungen an das Material und Prüfungen für Maschinenschutzscheiben.

Anwendungen von Maschinenschutzscheiben		
Norm	Anforderung an das Bauteil	Anwendung (Beispiele)
DIN EN 12417	- Einteilung von Scheibenwerkstoffen in Widerstandsklassen abhängig unter anderem von der Projektilmasse und Aufprallgeschwindigkeit - Umleitung der auftreffenden kinetischen Energie auf die Rahmenkonstruktion oder Halterung	Bearbeitungszentren
DIN EN 13128	- Einteilung von Scheibenwerkstoffen in Widerstandsklassen abhängig unter anderem von der Projektilmasse und Aufprallgeschwindigkeit - Umleitung der auftreffenden kinetischen Energie auf die Rahmenkonstruktion oder Halterung	Fräs- und Bohr-Fräsmaschinen
DIN EN 14070	- Einteilung von Scheibenwerkstoffen in Widerstandsklassen abhängig unter anderem von der Projektilmasse und Aufprallgeschwindigkeit - Umleitung der auftreffenden kinetischen Energie auf die Rahmenkonstruktion oder Halterung	Transfer-, Einzweck- oder Sondermaschinen
DIN EN ISO 16089	- Einteilung von Scheibenwerkstoffen in Widerstandsklassen abhängig unter anderem von der Projektilmasse und Aufprallgeschwindigkeit - Umleitung der auftreffenden kinetischen Energie auf die Rahmenkonstruktion oder Halterung	Ortsfeste Schleifmaschinen
DIN EN ISO 23125	- Einteilung von Scheibenwerkstoffen in Widerstandsklassen abhängig unter anderem von der Projektilmasse und Aufprallgeschwindigkeit - Umleitung der auftreffenden kinetischen Energie auf die Rahmenkonstruktion oder Halterung	Drehmaschinen

**Tabelle 8** Normen, Anforderungen an das Bauteil und Anwendungen für Maschinenschutzscheiben.

### 3 Materialauswahl

Das Kapitel beschreibt die Eigenschaften von möglichen Materialien für die Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel und bildet die Grundlage zur Auswahl der einzelnen Komponenten.

#### 3.1 Glas

Nach DIN 1259-1 ist Glas ein anorganisches, nichtmetallisches Schmelzprodukt einer homogenen Flüssigkeit, das ohne Kristallisation erstarrt. Deshalb wird Glas als erstarrte Schmelze betrachtet. Die Ionen im Glas nehmen nicht den energetisch günstigeren kristallinen Zustand an, sondern bilden eine amorphe, isotrope Struktur.

Glas im Bauwesen besteht hauptsächlich aus Kalk-Natronsilicatglas mit den Hauptbestandteilen Siliziumoxid ( $\text{SiO}_2$ ), Kalziumoxid ( $\text{CaO}$ ) und Natriumcarbonat ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ).<sup>11</sup> Borosilicatglas besitzt einen höheren Anteil an Bortrioxid ( $\text{B}_2\text{O}_3$ ).<sup>12</sup> Dadurch verringert sich der Wärmeausdehnungskoeffizient verbunden mit einer höheren chemischen Beständigkeit sowie einer verbesserten Temperaturwechselbeständigkeit. Alumo-Silicatglas beinhaltet zusätzlich Aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Eine wesentliche Eigenschaft von Glas ist die Transparenz. Im sichtbaren Spektralbereich von 380 nm bis 780 nm gelangt die Strahlung durch das Glas hindurch und wird lediglich in geringem Maße absorbiert oder reflektiert. Als spröder Werkstoff verhält sich Glas bis zum Bruch linear-elastisch. Neben dem Werkstoffgesetz ist die Festigkeit eine weitere entscheidende Eigenschaft im konstruktiven Glasbau, die maßgeblich durch die Kerbempfindlichkeit der Glasoberfläche beeinflusst wird. Mikrorisse nach der Herstellung wirken ungünstig im Bereich einer zugbeanspruchten Oberfläche. Dies führt zu einem Verlust der hohen theoretischen Festigkeit und im Versagensfall zu einem Spröbruch. Tabelle 9 zeigt die charakteristischen Biegezugfestigkeiten von Gläsern im Bauwesen.

<sup>11</sup> Vergleiche DIN EN 572-1

<sup>12</sup> Vergleiche DIN EN 1748-1-1

Glasprodukt	Norm	charakteristische Biegefestigkeit $f_k$
Floatglas (FG) Kalk-Natronsilicatglas Borosilicatglas	DIN EN 572-1 DIN EN 1748-1-1	45 N/mm <sup>2</sup> 45 N/mm <sup>2</sup>
Teilvorgespanntes Glas (TVG)	DIN EN 1863-1	70 N/mm <sup>2</sup>
Einscheibensicherheitsglas (ESG)	DIN EN 12150-1	120 N/mm <sup>2</sup>
Chemisch vorgespanntes Glas (CVG)	DIN EN 12337-1	150 N/mm <sup>2</sup>

**Tabelle 9** Charakteristische Biegezugfestigkeiten unterschiedlicher Glasarten. Basisglas ist ein Floatglas als Kalk-Natronsilicatglas.

### 3.1.1 Vorgespanntes Glas

Vorgespanntes Glas ist ein Glaserzeugnis mit künstlich hergestellten Druckspannungen an den Glasoberflächen. Die Oberflächendefekte werden überdrückt und eine Rissbildung findet erst unter einer höheren Belastung statt. Im Kern bilden sich aus Gleichgewichtsgründen Zugspannungen aus. Die Spannungen werden entweder in einem thermischen oder chemischen Prozess erzeugt. Ein Vorspannen wirkt sich günstig auf die mechanische Festigkeit und Temperaturwechselbeständigkeit aus. Nach einer Vorspannung ist allerdings eine mechanische Bearbeitung nicht mehr oder nur bedingt möglich. Thermisch vorgespanntes Glas zerspringt aufgrund der freigesetzten Energie durch Zerstörung des Eigenspannungszustands, chemisch vorgespanntes Glas besitzt nach einer mechanischen Bearbeitung an der Schnittkante nur noch die Festigkeit von normal gekühltem Glas. Das Glas bricht nicht entlang der Sollbruchstelle. Im Vorfeld ist somit eine detaillierte Planung für die Abmessungen und eventuelle Bohrungen und Öffnungen notwendig.

Die thermische Vorspannung entsteht aufgrund einer Temperaturdifferenz zwischen Kern und Oberfläche im Glas durch die Erhitzung auf etwa 100 K über der Transformationstemperatur und anschließender schneller Abkühlung. Dabei wird im Querschnitt ein im Gleichgewicht befindlicher Eigenspannungszustand erzeugt. Mit der thermischen Vorspannung ist die Herstellung von teilvorgespanntem Glas und Einscheibensicherheitsglas möglich. Teilvorgespanntes Glas ist ein thermisch teilweise verfestigtes Glasprodukt und besitzt ein ähnliches Bruchbild wie normal gekühltes Glas. Einscheibensicherheitsglas wird als ein thermisch voll vorgespanntes Glas bezeichnet. Das typische Bruchbild zeigt kleine stumpfkantige Krümel. Bei der Glasherstellung sind Einschlüsse von Nickelsulfid nicht auszuschließen, die nach der thermischen Vorspannung die räumliche Struktur verändern. Das Volumen vergrößert sich. Überschreiten die Zugkräfte an der Oberfläche der Einschlüsse die Zugspannung im Glas, entsteht ein Risswachstum

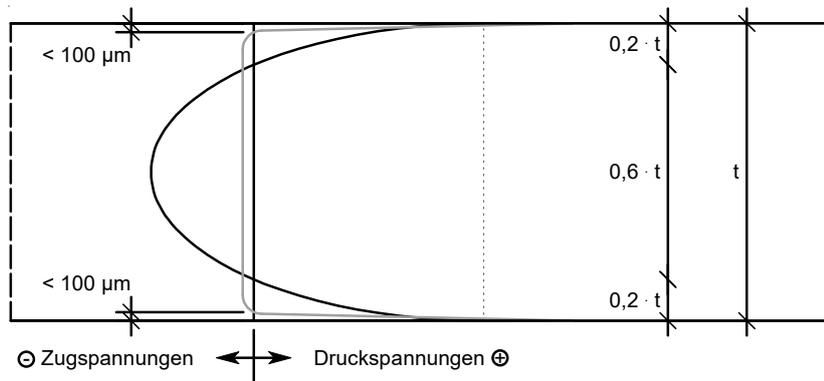
und letztendlich der Bruch. Eine Heißlagerungsprüfung nach der Vorspannung beschleunigt bei etwa +300 °C die Umwandlung von Nicksulfid und zwingt somit die Glastafeln mit möglichen Einschlüssen zum Bruch. Verglasungen aus Einscheibensicherheitsglas, die mindestens 4 m über einer Verkehrsfläche angebracht werden, sind deshalb als heißgelagertes Einscheibensicherheitsglas auszuführen. Die Grenze einer thermischen Vorspannung liegt in etwa bei einer Glasdicke von 2 mm.<sup>13</sup>

Die chemische Vorspannung erzeugt analog zur thermischen Vorspannung eine Druckspannung an der Oberfläche. Die Vorspannung erfolgt allerdings nur in geringen Tiefen bis zu 100 µm. Mit diesem Verfahren sind hohe Druckspannungen möglich. Üblicherweise wird das Glas über einen Ionenaustausch der Alkali-Ionen vorgespannt. Kalk-Natronsilicatglas lagert über 24 h in eine Lösung mit geschmolzenem Salz. Die kleineren Natrium-Ionen tauschen sich mit den größeren Kalium-Ionen aus und es entstehen Druckspannungen im oberflächennahen Bereich.<sup>14</sup> Die Druckspannungen sind proportional zum Glasvolumen in dem der Ionenaustausch stattfindet. Der Diffusionsprozess ist stark temperatur- und zeitabhängig. Mit zunehmender Prozessdauer steigt die Druckzonenhöhe und die Druckspannungen nehmen ab. Dabei bleibt die Temperatur unterhalb der Glasübergangstemperatur bei etwa +450 °C. Die Druckspannung wächst mit der Differenz der Radien der ausgetauschten Ionen. Besonders Alumo-Silicatgläser eignen sich dadurch zu einer chemischen Vorspannung. Dieses Verfahren wird zur Vorspannung von Spezial- und Dünngläsern verwendet. Zurzeit liegt der großformatige Einsatz dieser Gläser bei Cockpitverglasungen, Yachten oder gebogenen Verglasungen. Im Vergleich zur thermischen Vorspannung ist das chemische Verfahren kosten- und zeitintensiv, da eine Automatisierung kaum stattfindet. Das Bruchbild entspricht dem eines teilvorgespannten Glases, da im Inneren eine geringere gespeicherte Energie vorliegt. Den Eigenspannungszustand der thermischen und chemischen Vorspannung zeigt Bild 7.<sup>15</sup>

<sup>13</sup> Vergleiche Feldmann 2012 und Schneider 2016

<sup>14</sup> Natrium-Ionen (Na<sup>+</sup>) besitzen einen Atomradius von 153,7 pm. Kalium-Ionen (K<sup>+</sup>) sind mit einem Radius von 227,2 pm etwa 30 % größer.

<sup>15</sup> Vergleiche Schneider 2016 und Siebert 2012



**Bild 7** Eigenspannungszustand bei thermisch (schwarz) und chemisch (grau) vorgespanntem Glas im Glasquerschnitt mit der Dicke  $t$ .

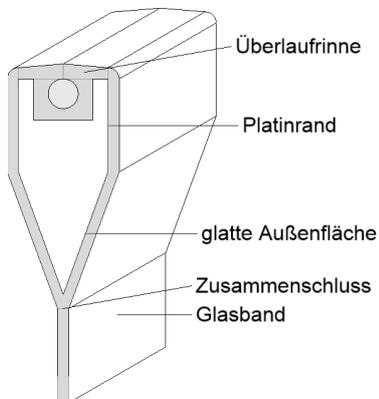
### 3.1.2 Dünnglas

DIN 18008-1 beschreibt Glas im Bauwesen als ein Bauprodukt mit einer Nenndicke von 3 mm bis 19 mm. Der Begriff »Dünnglas« ist somit nicht geregelt und wird gegenwärtig als ein Glas mit einer Nenndicke unter 3 mm beschrieben. Das Overflow-Fusion-Verfahren oder das Down-Draw-Verfahren nach Bild 8 bieten als Ziehverfahren eine Alternative zur Herstellung von Dünnglas neben dem Floatverfahren. Beim Down-Draw-Verfahren läuft das flüssige Glas nach unten aus dem Schmelzofen und wird auf die entsprechende Dicke gezogen. Das Overflow-Fusion-Verfahren bringt eine Wanne an den Längsseiten zum Überlaufen. Die Glasschmelze läuft entlang der Außenkanten bis zum Zusammenschluss an der Unterseite der Rinne.

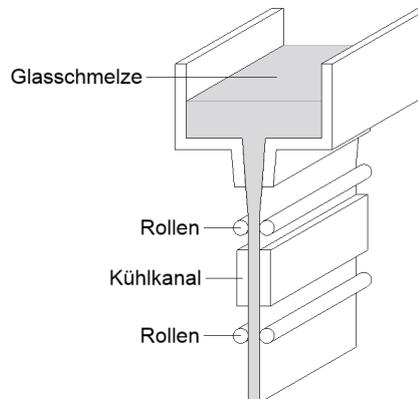
Eine Anwendung von Dünnglas im Bauwesen wird zurzeit erforscht. Denkbar ist der Einsatz in Dreifach- oder Vierfach-Isoliergläsern als innenliegende Schicht, in faltbaren Temporärbauten oder bei Laminaten mit Kunststoffen. Dünngläser sind häufig chemisch oder thermisch vorgespannt und erreichen dadurch eine hohe Festigkeit. Die Biegezugfestigkeit wird wegen der großen Verformungen bis zum Bruch in den üblichen Prüfverfahren nicht erreicht und ist deshalb häufig nicht eindeutig bestimmbar. Die Prüfkörper rutschen beispielsweise unter der großen Verformung beim Vierschneiden-Verfahren nach DIN EN 1288-3 von den Auflagern oder ermöglichen keine konstante Spannung innerhalb des Lastrings beim Doppelring-Biegeversuch nach DIN EN 1288-2. Aktuell werden verschiedene Ansätze zur Ermittlung der charakteristischen Biegezugfestigkeit diskutiert.<sup>16</sup>

<sup>16</sup> Vergleiche Schneider 2016, Neugebauer 2016, Blaumeiser 2016 und Albus 2015

Overflow-Fusion-Verfahren



Down-Draw-Verfahren



**Bild 8** Overflow-Fusion-Verfahren zur Herstellung von Dünnglas nach Albus 2015.

Chemisch vorgespannte Dünngläser werden beispielsweise von Asahi Glass Co., Ltd., Corning, Inc. und Schott AG hergestellt. Saint-Gobain Glass Deutschland GmbH und Pilkington Deutschland AG bieten Dünngläser aus nicht vorgespanntem Floatglas an. Tabelle 10 gibt verschiedene Dünngläser mit den relevanten Eigenschaften an.

Die Auswahl der Dünngläser erfolgt aus der Verfügbarkeit der maximalen Abmessungen. Mögliche Einsatzgebiete als Verbundsicherheitsglas oder Ganzglastüren erfordern größere Formate. Die Mindestabmessungen sind deshalb mit 2.000 mm auf 1.500 mm festgelegt. Zusätzlich wird die Möglichkeit einer nachträglichen Bearbeitung angestrebt. Dies ist bei thermisch vorgespanntem Glas grundsätzlich nicht gegeben. Eine nachträgliche Bearbeitung von chemisch vorgespanntem Glas geht mit einem Verlust der Vorspannung im Bereich der bearbeiteten Kante einher.<sup>17</sup> Es werden deshalb für die weiteren Untersuchungen das nicht vorgespannte Glas Optiwhite von Pilkington Deutschland AG sowie das chemisch vorgespannte Glas Leoflex von Asahi Glass Co., Ltd. ausgewählt.<sup>18</sup>

<sup>17</sup> Vergleiche Kapitel 6

<sup>18</sup> Vergleiche Kapitel 5

Eigenschaft	Borofloat® 33	Gorilla® Glass 4	Leoflex™	Planiclear®	Optiwhite™
Hersteller	Schott AG	Corning, Inc.	Asahi Glass Co., Ltd.	Saint-Gobain Glass Deutschland GmbH	Pilkington Deutschland AG
Glasart	Borosilicatglas	Alumo-Silicatglas	Alumo-Silicatglas	Kalk-Natronsilicatglas	Kalk-Natronsilicatglas
Vorspannung	keine	chemisch	chemisch	keine	keine
Biegezugfestigkeit	25 N/mm <sup>2</sup>	keine Angabe	260 N/mm <sup>2</sup>	45 N/mm <sup>2</sup>	45 N/mm <sup>2</sup>
Lieferform	2.300 mm x 1.700 mm	2.020 mm x 1.200 mm	2.070 mm x 1.650 mm	6.000 mm x 3.210 mm	6.000 mm x 3.210 mm
Dicke	0,70 mm – 25,40 mm	0,55 mm – 2,00 mm	0,55 mm – 2,00 mm	2,00 mm – 19,00 mm	2,00 mm – 19,00 mm
Elastizitätsmodul	64.000 N/mm <sup>2</sup>	68.000 N/mm <sup>2</sup>	74.000 N/mm <sup>2</sup>	70.000 N/mm <sup>2</sup>	70.000 N/mm <sup>2</sup>
Transmissionsgrad	> 90,0 %	> 91,0 %	91,7 %	91,0 %	92,0 %
Wärmeausdehnungskoeffizient	9,40 · 10 <sup>-6</sup> 1/K	7,75 · 10 <sup>-6</sup> 1/K	9,80 · 10 <sup>-6</sup> 1/K	9,00 · 10 <sup>-6</sup> 1/K	9,00 · 10 <sup>-6</sup> 1/K
Wärmeleitfähigkeit	1,20 W/(m · K)	keine Angabe	1,04 W/(m · K)	1,00 W/(m · K)	1,00 W/(m · K)

### 3.2 Polycarbonat

Polycarbonat wird als Produkt der Polykondensation aus Bisphenol A und Phosgen in der flüssigen Phase oder aus Bisphenol A und Diphénylcarbonat in der Schmelze gewonnen. Der Kunststoff besitzt als technischer Thermoplast die chemische Struktur eines Polyesters. Polycarbonatplatten werden im Bauwesen vor allem als Abdeckungen für Stadien und Bahnhöfe oder in Wintergärten und Gewächshäuser eingesetzt. Bei der Verwendung in der Außenhülle von Gebäuden sollte ein Schutz vor ultravioletter Strahlung sichergestellt sein, da Polycarbonat ansonsten versprödet. Mit seinen günstigen Eigenschaften hinsichtlich hoher Transparenz, sehr guter Schlagzähigkeit und niedrigem Flächengewicht im Vergleich zu Glas wird der Kunststoff weiterhin häufig als Ersatz von Verglasungen verwendet. In Tabelle 11 sind die Eigenschaften von Polycarbonat angegeben.<sup>19</sup>

**Tabelle 10** Ausgewählte Dünngläser mit relevanten Eigenschaften. Die Kennwerte sind den entsprechenden entnommen.

<sup>19</sup> Vergleiche Abts 2010

**Tabelle 11** Eigenschaften von Polycarbonat nach Abts 2010.

Günstige Eigenschaft	Ungünstige Eigenschaft
<ul style="list-style-type: none"> <li>- hohe Transparenz</li> <li>- hohe Wärmeformbeständigkeit</li> <li>- sehr gute Schlagzähigkeit</li> <li>- mittlere bis hohe Festigkeit und Steifigkeit im Vergleich zu alternativen Kunststoffen</li> <li>- hoher Kriechmodul</li> <li>- gute Maßhaltigkeit</li> <li>- beständig gegen verdünnte Säuren, viele Öle, Fette und Ethanol</li> <li>- Brandschutz im Innenraum ist gewährleistet (Klassifizierung B1 nach DIN 4102)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- kerb- und kratzempfindlich</li> <li>- geringe Abriebfestigkeit</li> <li>- nicht UV-beständig</li> <li>- unbeständig gegen Basen, aromatische und halogenierte Kohlenwasserstoffe, Ketone und Ester</li> <li>- Auftreten von Spannungsrissen bei längerer Einwirkung von heißem Wasser</li> </ul>

Die am Markt verfügbaren Produkte von Polycarbonat sind beispielsweise Makrolon von Covestro AG, Lexan 9030 von Sabic Deutschland GmbH, PALSUN von Palgram Germany GmbH oder Marlon FSX von Brett Martin Ltd.. Tabelle 12 zeigt die relevanten Eigenschaften der unterschiedlichen Polycarbonate.

Eigenschaft	Makrolon GP	Lexan 9030	PALSUN	Marlon FSX.
Hersteller	Covestro AG	Sabic Deutschland GmbH	Palram Germany GmbH	Brett Martin Ltd.
Dichte	1,20 g/cm <sup>3</sup>	1,20 g/cm <sup>3</sup>	1,20 g/cm <sup>3</sup>	1,20 g/cm <sup>3</sup>
Brechungsindex <sup>20</sup>	1,587	1,586	1,586	1,586
Elastizitätsmodul	2.300 MPa	2.300 MPa	2.350 MPa	2.400 MPa
Biegefestigkeit	90 MPa	90 MPa	93 MPa	97 MPa
Bruchdehnung	> 50 %	> 100 %	> 80 %	150 %
Wärmeleitfähigkeit	0,20 W/(m · K)	0,20 W/(m · K)	0,21 W/(m · K)	0,20 W/(m · K)
Wärmeausdehnungskoeffizient	65 · 10 <sup>-6</sup> 1/K	70 · 10 <sup>-6</sup> 1/K	65 · 10 <sup>-6</sup> 1/K	68 · 10 <sup>-6</sup> 1/K

**Tabelle 12** Eigenschaften unterschiedlicher Polycarbonate.

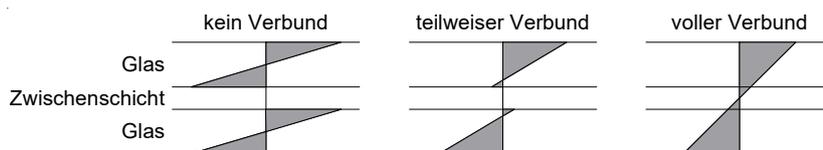
Die Polycarbonate besitzen annähernd identische Eigenschaften. Eine Unterscheidung anhand der Eigenschaften ist kaum möglich. Neben den mechanischen und thermischen Kenngrößen spielen wirtschaftliche Aspekte, wie die kurzfristige Verfügbarkeit oder die maximalen Abmessungen, eine entscheidende Rolle zur Auswahl des

<sup>20</sup> Der Brechungsindex als dimensionslose, physikalische Größe ist ein Maß für Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes im Medium im Vergleich zum Vakuum.

technischen Kunststoffes. Auf dieser Grundlage wird Lexan 9030 von Sabc Deutschland GmbH als Polycarbonat für weiteren Untersuchungen der Verbundtafeln verwendet.

### 3.3 Zwischenschicht

Die Zwischenschicht gewährleistet den Verbund zwischen den Glas- und der Polycarbonatplatten. Das Polymer beeinflusst dadurch maßgeblich das Tragverhalten in Plattenebene. Bei der Bemessung von Verbundglas sind in der Regel die Grenzfälle voller Verbund und kein Verbund zu unterscheiden. Die Schubübertragung der Zwischenschicht liegt in der Realität allerdings meistens bei einem teilweisen Verbund. Bild 9 beschreibt die qualitativen Spannungsverteilungen im Verbundglas. Die Schubübertragung einer Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel lässt sich analog daraus ableiten.



**Bild 9** Qualitative Spannungsverteilung im Verbundglas in Abhängigkeit des Schubverbunds.

Zwischenschichten im Verbundglas sind in der Regel transparent, können aber auch eingefärbt oder bedruckt sein. Grundsätzlich lassen sich die polymeren Zwischenschichten mit einer Folie oder einem Gießharz herstellen. Das prinzipielle Herstellungsverfahren von Verbundglas ist in Kapitel 2 beschrieben. Im Folgenden werden Gießharze aus thermoplastischen Polyurethanen untersucht. Vorteilhaft ist die hohe Flexibilität der Zwischenschicht, die die unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Glas und Polycarbonat ausgleicht, und ein guter Haftverbund zu den beiden Materialien. Der Polymerwerkstoff ist ein linienförmiges Makromolekül, das aus Hart- und Weichsegmente besteht. Die Weichsegmente verleihen dem Werkstoff sein lineares Verhalten, die Hartsegmente bilden kristalline Bereiche und beeinflussen damit die mechanischen Eigenschaften.<sup>21</sup>

SILATEC Sicherheits- und Laminatglastechnik GmbH als Hersteller von Verbundsicherheitsglas in Verbindung mit Polycarbonat setzt ein speziell für die Anwendung entwickeltes thermoplastisches Polyurethan als Gießharz ein. Kapitel 6 beschreibt die Herstellung der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln. Zum Schutz des Polycarbonats vor ultravioletter Strahlung werden Additive hinzugegeben.<sup>22</sup> Die weichmacherfreie Zwischenschicht weist eine hohe Elastizität zum Ausgleich der unterschiedlichen Temperaturendeckung von Glas

<sup>21</sup> Vergleiche Kothe 2013

<sup>22</sup> Vergleiche Kapitel 4

und Polycarbonat auf. Der maßgebliche Temperaturbereich im Bauwesen liegt zwischen  $-25\text{ °C}$  und  $+75\text{ °C}$ .<sup>23</sup> Tabelle 13 zeigt die mechanischen Eigenschaften des thermoplastischen Polyurethans.

Eigenschaft	Thermoplastisches Polyurethan
Hersteller	SILATEC Sicherheits- und Laminatglastechnik GmbH
Dichte	$1,035\text{ g/cm}^3$
Elastizitätsmodul	$0,76\text{ MPa}$
Querdehnzahl	$0,40$
Bruchspannung	$0,39\text{ MPa}$
Bruchdehnung	$110\text{ %}$
Wärmeausdehnungskoeffizient	$223,53 \cdot 10^{-6}\text{ 1/K}$
Wärmeleitfähigkeit	$0,25\text{ W/(m} \cdot \text{K)}^{\text{*)}}$
*) Die Wärmeleitfähigkeit des thermoplastischen Polyurethans wurde im Rahmen eines weiteren Forschungsprojekts am Lehrstuhl für Tragkonstruktion der Universität Siegen ermittelt.	

**Tabelle 13** Eigenschaften des thermoplastischen Polyurethans im ungealterten Zustand bei einer Temperatur von  $+25\text{ °C}$  nach Weimar 2011.

#### 4 Untersuchung der Gebrauchstauglichkeit

Die Untersuchung der Gebrauchstauglichkeit dient als Grundlage zur Querschnittsentwicklung von Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln. Dazu stehen Untersuchungen zum Haftverbund mit dem Kugelfallversuch, Untersuchungen zur Beständigkeit mit klimatischen Prüfungen sowie die Prüfung mit der Axt für eine durchbruchhemmende Sicherheitssonderversglasung zur Verfügung. Zur Durchführung werden zwei verschiedene Dünngläser verwendet. In Tabelle 14 sind die einzelnen Materialien für die Prüfkörper angegeben.

Schicht	Material	Hersteller	Nennstärke
Dünnglas	Optiwhite	Pilkington Deutschland AG	2,00 mm
Dünnglas	Leoflex	Asahi Glass Co., Ltd.	0,85 mm
Polycarbonat	Lexan 9030	Sabic Deutschland GmbH	Auswahl in Abhängigkeit der Prüfung
Zwischenschicht	Thermoplastisches Polyurethan	SILATEC Sicherheits- und Laminatglas-technik GmbH	2,00 mm

**Tabelle 14** Materialien zur Herstellung der Prüfkörper für die Entwicklung des Querschnittsaufbaus.

Das Ergebnis der Untersuchungen beschreibt jeweils einen erforderlichen Mindestquerschnittsaufbau, der in einer möglichen Anwendung in der Dicke der Einzelschicht variabel ist. Tabelle 15 zeigt die Untersuchungen zur Gebrauchstauglichkeit in Kapitel 4.

Prüfung	Kugelfallversuch	Prüfung Beständigkeit	Widerstand gegen manuellen Angriff	Wärmeleitfähigkeit	Transmissionsmessung
Kapitel	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5
Methode	experimentell	experimentell	experimentell	analytisch	experimentell
Norm	DIN EN 14449	DIN EN ISO 12543-4	DIN EN 356	DIN EN 673	Anlehnung an DIN EN 410
Prüfkörpergeometrie	500 mm x 500 mm	300 mm x 150 mm	1.100 mm x 900 mm	beliebig	300 mm x 150 mm
Anzahl der Prüfkörper	5	3 x 3	3	1	3

##### 4.1 Untersuchungen zum Haftverbund

Die Versuche zum Haftverbund der Zwischenschicht erfolgen in Anlehnung an DIN EN 14449 und DIN 52338 durch die Belastung mit einem harten Stoß. Die Stahlkugel mit einem Durchmesser von 63,5 mm und einer Masse von 1.030 g wird aus einer Höhe von 4 m mittig auf den Prüfkörper ohne Anfangsimpuls fallengelassen. Dabei

**Tabelle 15** Abmessungen und Anzahl der Prüfkörper für die Untersuchungen einer Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel zur Gebrauchstauglichkeit.

sollte die Abweichung der Auftreffstelle zur Probenmitte nicht mehr als die vorgeschriebenen 50 mm betragen. In dem Versuchsaufbau löst sich die Kugel von einem Elektromagneten. Die fünf Prüfkörper mit den Abmessungen von 500 mm auf 500 mm liegen auf einem Stahlgestell auf und sind vierseitig linienförmig eingespannt. Nach dem Versuch wird der Zerstörungsgrad der Prüfkörper ermittelt. Die Anzahl der durchschlagenden Prüfkörper, die Anzahl der angebrochenen jedoch nicht durchschlagenen Prüfkörper sowie die Masse und Größe der von der Zwischenschicht abgelösten Glassplitter werden dokumentiert. Die Prüfung gilt als bestanden, wenn die Stahlkugel den Prüfkörper nicht durchdringt. Die Untersuchungen zum Haftverbund nach DIN EN 14449 erfolgen an der Universität Siegen. In Tabelle 16 sind der Aufbau, die Abmessungen und die Anzahl der Prüfkörper angegeben.

Prüfung	Abmessung	Anzahl	Aufbau
Kugelfallversuch	500 mm x 500 mm	5	Glas   2 mm TPU   2 mm PC   2 mm TPU   Glas

**Tabelle 16** Aufbau, Abmessung und Anzahl der Prüfkörper zum Kugelfallversuch nach DIN EN 14449.

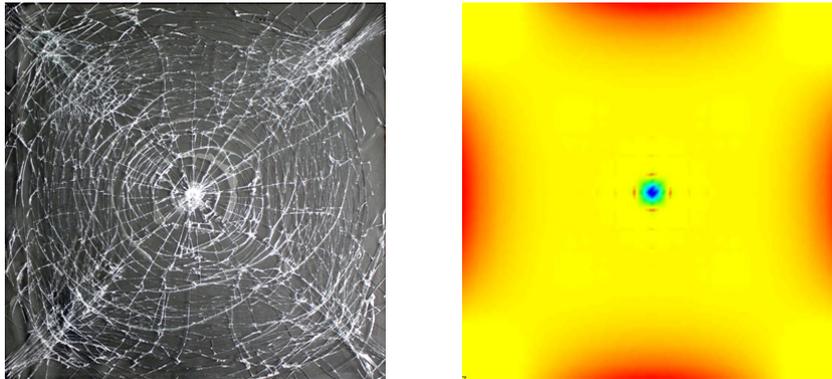
Die Ergebnisse aus dem Kugelfallversuch mit dem Dünnglas Optiwhite gibt Tabelle 17 an.

Prüfkörper	Nenn- dicke	Realdicke	Durch- schlag	Zerstörung	Splitter- masse
1	10,00 mm	9,77 mm	nein	oben / unten	1,5 g
2	10,00 mm	9,74 mm	nein	oben / unten	1,0 g
3	10,00 mm	9,69 mm	nein	oben / unten	1,0 g
4	10,00 mm	9,67 mm	nein	oben / unten	1,5 g
5	10,00 mm	9,64 mm	nein	oben / unten	2,0 g
Mittelwert					1,4 g
Standardabweichung					0,4 g

**Tabelle 17** Auswertung des Kugelfallversuchs nach DIN EN 14449.

Kein Prüfkörper wird von der Stahlkugel durchdrungen. Bei allen fünf Prüfkörpern bricht sowohl die obere als auch die untere Glastafel. Dabei lösen sich Glassplitter unterhalb der kritischen Größe von 40 mm an beiden Glastafeln. Die Kugel trifft bei allen Prüfkörpern innerhalb eines Kreises mit dem vorgeschriebenen Durchmesser von 50 mm in der Mitte des Prüfkörpers. Die geringe aufgefangene Splittermasse mit einem Mittelwert von 1,4 g weist auf einen guten Haftverbund zwischen dem Glas und der Zwischenschicht hin. Bild 10 zeigt einen qualitativen Vergleich zwischen dem Bruchbild nach dem Auftreffen der Stahlkugel und einer geometrischen nichtlinearen Berechnung aus

der numerischen Simulation mit dem Programm SJ Mepla 4.0.6 unter einer statischen Ersatzlast als Punktlast. Der Vergleich der Rissbilder verdeutlicht die diagonale Tragwirkung analog zu den Hauptspannungen der quadratischen Platte. Das runde Rissbild entstand an der oberen und das diagonale Rissbild an der unteren Glastafel.



**Bild 10** Vergleich zwischen dem Bruchbild nach dem Auftreffen der Stahlkugel (links) und der Spannungsverteilung der oberen Glastafel an der Unterseite nach der numerischen Berechnung unter einer Punktlast mit SJ Mepla (rechts). Das Rissbild stimmt qualitativ mit dem Verlauf der Hauptspannungen überein. Zugspannungen sind rot, Druckspannungen in blau markiert. Die Pfeile geben die Tragwirkung der Platte an.

Die Ergebnisse aus dem Kugelfallversuch der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel mit dem Dünnglas Leoflex zeigt Tabelle 18.

Prüfkörper	Nenn-dicke	Realdicke	Durchschlag	Zerstörung	Splinter-masse
1	7,70 mm	7,38 mm	nein	oben	0 g
2	7,70 mm	7,37 mm	nein	oben	0 g
3	7,70 mm	7,33 mm	nein	oben	0 g
4	7,70 mm	7,38 mm	nein	keine	0 g
5	7,70 mm	7,38 mm	nein	oben	0 g

**Tabelle 18** Auswertung des Kugelfallversuchs nach DIN EN 14449.

Kein Prüfkörper wird von der Stahlkugel durchdrungen. Bei vier Prüfkörpern bricht die obere Glastafel, bei einem Prüfkörper versagt keine der beiden Glastafeln. Die untere Glastafel bleibt bei allen fünf Prüfkörpern nach dem Auftreffen mit der Stahlkugel intakt. Die Kugel trifft bei allen Prüfkörpern innerhalb eines Kreises mit dem vorgeschriebenen Durchmesser von 50 mm in der Mitte des Prüfkörpers auf. Bild 11 zeigt das Bruchbild nach dem Auftreffen der Stahlkugel auf die Verglasung. Die Angriffsseite ist zerstört und es bildet sich ein um die Auftreffstelle konzentrisches Bruchbild.



**Bild 11** Darstellung des Bruchbildes an der Oberseite der Verbundtafel im Kugelfallversuch.

Die Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln bestehen sowohl mit dem Dünnglas Optiwhite als auch mit dem Dünnglas Leoflex die Anforderungen an einen ausreichenden Haftverbund der Zwischenschicht und die Splitterbindung unter mechanischer Beanspruchung mit hartem Stoß. Der mittlere Splitterabgang an der unteren Glastafel ist für das Dünnglas Optiwhite mit 1,4 g sehr gering und für das Dünnglas Leoflex mit 0,0 g nicht vorhanden.

#### 4.2 Untersuchungen zur Beständigkeit

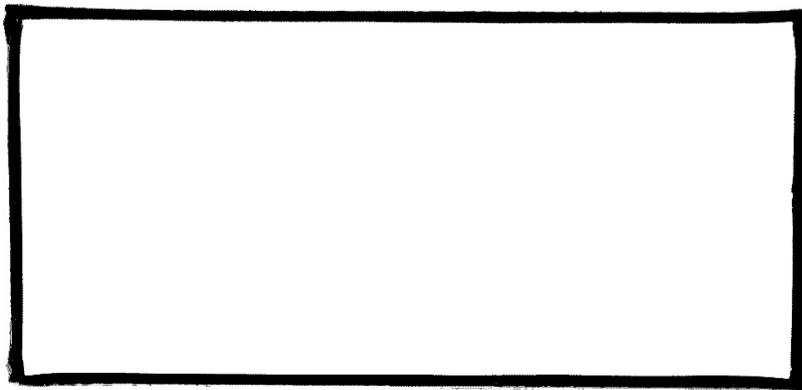
Die Beständigkeit der Zwischenschicht gegen klimatische Beanspruchungen nach DIN EN ISO 12543-4 wird durch Versuche unter hoher Temperatur, in der Feuchte und unter Bestrahlung experimentell nachgewiesen. Die Zwischenschicht darf sich nach den unterschiedlichen Versuchen nicht wesentlich durch das Auftreten von Blasen, Delaminationen oder Trübungen verändern. Die Anforderungen in den Versuchen gelten für Verbundgläser und Verbundsicherheitsgläser. Tabelle 19 zeigt den Aufbau und die Abmessungen der Prüfkörper für die Prüfung der Beständigkeit.

Prüfung	Aufbau	Abmessung	Anzahl
Prüfung bei hoher Temperatur	Glas   2 mm TPU   2 mm PC   2 mm TPU   Glas	300 mm x 150 mm	3
Prüfung in der Feuchte	Glas   2 mm TPU   2 mm PC   2 mm TPU   Glas	300 mm x 150 mm	3
Bestrahlungsprüfung	Glas   2 mm TPU   2 mm PC   2 mm TPU   Glas	300 mm x 150 mm	3

**Tabelle 19** Aufbau, Abmessung und Anzahl der Prüfkörper zur Beständigkeitsprüfung nach DIN EN ISO 12543-4.

Die Prüfung bei hoher Temperatur untersucht den Einfluss von hohen Temperaturen über einen längeren Zeitraum. Dabei soll eine Veränderung der Eigenschaften durch Fehlstellen vermieden werden. Insgesamt lagern drei Prüfkörper mit den Mindestabmessungen von 300 mm auf 100 mm entweder bei einer Temperatur von +100 °C in einen Ofen für 16 h oder in kochendem Wasser für 2 h. Die drei Prüf-

körper mit den Abmessungen 300 mm auf 150 mm lagern entsprechend der Randbedingungen bei +100 °C für 16 h im Ofen. Das Unternehmen SiLATEC Sicherheits- und Laminatglastechnik GmbH führt die Prüfungen zur Untersuchung der Verbundtafeln mit dem Dünnglas Optiwhite bei hoher Temperatur durch. Die Prüfungen der Lamine mit dem Dünnglas Leoflex erfolgen an der Universität Siegen. Die Auswertung zeigt bei keinem Prüfkörper eine Veränderung in der Zwischenschicht. Alle Prüfkörper bestehen die Prüfung bei hoher Temperatur. Bild 11 zeigt beispielhaft einen Prüfkörper der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit Optiwhite nach der Prüfung bei hoher Temperatur ohne Blasen, Trübungen oder Delaminationen.



**Bild 12** Auswertung nach DIN EN ISO 12543-4. Im Querschnitt sind nach der Prüfung unter hoher Temperatur weder Blasen noch Trübungen oder Delaminationen zu erkennen.

Die Prüfung in der Feuchte soll den Einfluss von Luftfeuchtigkeit auf die Zwischenschicht über einen längeren Zeitraum feststellen. Die Prüfkörper mit den Mindestabmessungen von 300 mm auf 100 mm stehen während des Versuchs ohne Kondensation senkrecht bei einer Temperatur von +50 °C und einer relativen Luftfeuchte von 80 % über einen Zeitraum von zwei Wochen in einer Klimakammer. Die Untersuchung erfolgt mit jeweils drei Prüfkörpern an der Universität Siegen und findet bei einer mittleren Luftfeuchtigkeit von 83,0 % rF und einer durchschnittlichen Temperatur von +50,2 °C statt. Nach Abschluss der Prüfung weisen alle Prüfkörper keine Fehlstellen in der Zwischenschicht auf. Die Prüfung in der Feuchte ist somit für die Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit beiden Dünngläsern bestanden.

Bei der Bestrahlungsprüfung wird die Verbundtafel über einen längeren Zeitraum mit einer Strahlung analog zum Sonnenspektrum 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<sup>2</sup> bei einer Temperatur von +45 °C. Nach den Prüfungen werden die Prüfkörper auf mögliche Fehlstellen untersucht sowie der Transmissionsgrad vor und nach der Bestrah-

lungsprüfung gemessen. Zusätzlich ist das Verhalten des Polycarbonates zu analysieren, da das Material unter ultravioletter Bestrahlung versprödet und vergilbt. Aus diesem Grund muss der Transmissionsgrad des Dünnglases und der Zwischenschicht zum Schutz des innenliegenden Polycarbonates und zum Eigenschutz der Zwischenschicht im ultravioletten Bereich möglichst gering sein.<sup>24</sup> Die Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit dem Dünnglas Optiwhite bestehen die Bestrahlungsprüfung. Der Lichttransmissionswert vor der Bestrahlungsprüfung mit 89,3 % weicht vom Messwert nach der Prüfung mit 89,1 % nur geringfügig ab. Der Lichttransmissionswert der Prüfkörper mit dem Dünnglas Leoflex beträgt nach der Bestrahlungsprüfung 89,4 % und weicht von dem Wert vor der Prüfung mit 89,8 % unwesentlich ab. Alle Prüfkörper bestehen die Untersuchungen zur Beständigkeit in der Bestrahlungsprüfung.

### **4.3 Untersuchungen zum Widerstand gegen manuellen Angriff**

DIN EN 356 beschreibt Sicherheitssonderverglasungen mit einem Widerstand gegen manuellen Angriff. In Abhängigkeit der Widerstandsfähigkeit unterscheiden sich die Klassen P1A bis P5A für eine durchwurfhemmende und P6B bis P8B für eine durchbruchhemmende Verglasung. Die Prüfung der Durchwurfhemmung wird in diesem Projekt nicht weiter betrachtet, da mit dem Erreichen der Durchbruchhemmung auch die Durchwurfhemmung sichergestellt ist. Die Untersuchungen zur durchbruchhemmenden Verglasung erfolgen mit einer 2 kg schweren, maschinengeführten Axt unter einer Schlaggeschwindigkeit von 11 m/s und einer Schlagkraft von 300 J auf einen Prüfkörper mit den Abmessungen von 900 mm auf 1.100 mm. Die Widerstandsklasse richtet sich nach der Anzahl der benötigten Lockerungs- und Axtschläge bis zur Entstehung einer 400 mm auf 400 mm großen Öffnung in der Glasmitte beziehungsweise bis die Verbundtafel vom Auflager rutscht. Die Zuordnung der einzelnen Widerstandsklassen für die durchwurf- und durchbruchhemmenden Verglasungen ist in Tabelle 20 angegeben. Die Untersuchungen zum Widerstand gegen manuellen Angriff sind nicht analytisch oder numerisch möglich und werden deshalb ausschließlich experimentell durchgeführt. Die Ergebnisse sind unabhängig vom Tragverhalten der Verbundtafeln unter späteren statischen oder dynamischen Einwirkungen.

<sup>24</sup> Vergleiche Kapitel 4.5

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

**Tabelle 20** Widerstandsklassen für durchwurf- und durchbruchhemmende Verglasungen nach DIN EN 356.

Das Beschussamt Mellrichstadt führt die Versuche zu den durchbruchhemmenden Eigenschaften nach DIN EN 356 mit den Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln durch. Eine Sicherheitssonderverglasung mit einem Widerstand gegen manuellen Angriff darf an Mindestquerschnittsaufbauten geprüft werden. Nachträglich können beispielsweise zusätzliche Glaserzeugnisse dem Mindestquerschnitt hinzugefügt werden. Tabelle 23 zeigt den Querschnittsaufbau und die Ergebnisse für das Dünnglas Optiwhite.

Aufbau	Widerstandsklasse angestrebt	Widerstandsklasse bestanden
2 mm FG   2 mm TPU   4 mm PC   2 mm TPU   2 mm FG  Nennstärke 12 mm	P6B	-
2 mm FG   2 mm TPU   8 mm PC   2 mm TPU   2 mm FG  Nennstärke 16 mm	P8B	P6B

**Tabelle 21** Prüfung mit der Axt nach DIN EN 356 für die Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel mit dem Dünnglas Optiwhite.

FG Floatglas (Optiwhite)  
 TPU Thermoplastisches Polyurethan  
 PC Polycarbonat

Die Verbundtafel mit einer Nennstärke von 12 mm verfehlt für die angestrebte Widerstandsklasse von P6B die erforderliche Mindestanzahl von 30 Lockerungs- und Axtschlägen. Der Nachweis des Querschnittsaufbaus ist für diese Widerstandsklasse nicht erfüllt. Eine Erhöhung der Nennstärke der Polycarbonatplatte von 4 mm auf 5 mm wird zum Erreichen der Widerstandsklasse P6B für eine Wiederholungsprüfung vorgesehen. Die Widerstandsklasse P8B ist nur für einen der drei Prüfkörper mit einer Nennstärke von 16 mm nachgewiesen. An zwei Prüfkörpern wird die niedrigere Widerstandsklasse P6B festgestellt. In Bild 13 ist das Ausbrechen der Polycarbonatplatte bei der Prüfung mit der Axt zu sehen.

Das Laminat wird entsprechend den Vorgaben an drei Seiten des Prüfkörpers durchtrennt. An der vierten Seite weicht die Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel bei weiteren Schlägen der Axt aus oder bricht und es entsteht eine größere Öffnung als zugelassen. Die Prüfung wird deshalb abgebrochen. Aufgrund des Bruchs der Polycarbonat-Verbundtafel bei zwei der drei Prüfkörper erreicht die Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel mit dem Dünnglas Optiwhite und einer 4 mm Polycarbonat-Verbundtafel nur die Widerstandsklasse P6B.



**Bild 13** Ausbrechen der Polycarbonat-Verbundtafel bei der Prüfung mit der Axt.

Zu den Prüfungen mit der Axt für den Nachweis der Widerstandsklassen P6B und P8B gegen manuellen Angriff erfolgt eine Wiederholung mit einem modifizierten Querschnittsaufbau. Die Polycarbonat-Verbundtafel mit einer Nenndicke von 4 mm wird durch eine Nenndicke von 5 mm ersetzt. Die Polycarbonat-Verbundtafel mit einer Nenndicke von 8 mm wird durch zwei Polycarbonat-Verbundtafeln mit einer Nenndicke von jeweils 5 mm ersetzt und mit einer zusätzlichen Zwischenschicht verbunden. Mit dem modifizierten Verglasungsaufbau werden die angestrebten Widerstandsklassen erreicht.

Aufbau	Widerstandsklasse angestrebt	Widerstandsklasse bestanden
2 mm FG   2 mm TPU   5 mm PC   2 mm TPU   2 mm FG  Nenndicke 13 mm	P6B	P6B
2 mm FG   2 mm TPU   5 mm PC   2 mm TPU   5 mm PC   2 mm TPU   2 mm FG  Nenndicke 20 mm	P8B	P8B

**Tabelle 22** Prüfung mit der Axt nach DIN EN 356 für die Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel mit dem Dünnglas Optiwhite.

FG Floatglas (Optiwhite)  
 TPU Thermoplastisches Polyurethan  
 PC Polycarbonat

Der Querschnittsaufbau der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit dem Dünnglas Leoflex wird basierend auf den Ergebnissen aus den Prüfungen mit der Axt zum Nachweis der Widerstandsklasse gegen manuellen Angriff mit dem Dünnglas Optiwhite festgelegt. Die Prüfkörper für die Widerstandsklasse P6B enthalten eine Polycarbonatplatte von 5 mm und die Prüfkörper für die Widerstandsklasse P8B zwei Polycarbonatplatten von jeweils 5 mm. Tabelle 23 zeigt die Querschnittsaufbauten mit den Ergebnissen zu den Prüfungen für die beiden Widerstandsklassen P6B und P8B.

Aufbau	Widerstandsklasse angestrebt	Widerstandsklasse bestanden
0,85 mm CVG   2,00 mm TPU   5,00 mm PC   2,00 mm TPU   0,85 mm CVG  Nennstärke 10,70 mm	P6B	P6B
0,85 mm CVG   2,00 mm TPU   5,00 mm PC   2,00 mm TPU   5,00 mm PC   2,00 mm TPU   0,85 mm CVG  Nennstärke 17,70 mm	P8B	P8B

**Tabelle 23** Prüfung mit der Axt nach DIN EN 356 für die Dünnglas-Polycarbonat-Verbundplatte mit dem chemisch vorgespannten Dünnglas Leoflex.

CVG chemisch vorgespanntes Glas (Leoflex)  
 TPU Thermoplastisches Polyurethan  
 PC Polycarbonat

Die Verbundtafeln mit einer Nennstärke von 10,7 mm erreichen die angestrebte Widerstandsklasse von P6B mit einer benötigten Mindestanzahl von 30 Lockerungs- und Axtschlägen. Der Nachweis des Querschnittsaufbaus ist für diese Widerstandsklasse erfüllt. Die Widerstandsklasse P8B wird ebenfalls bei allen drei Prüfkörper mit einer Nennstärke von 17,7 mm nachgewiesen. Der Nachweis des Querschnittsaufbaus für diese Widerstandsklasse ist erfüllt. Im Prüfverfahren sind mindestens zwölf Lockerungsschläge notwendig. Bei der ersten Auftreffstelle ist der Schlag so oft zu wiederholen, bis alle Glastafeln im Querschnitt gebrochen sind. Erst anschließend wird die zweite Auftreffstelle angeschlagen. Wegen der hohen Festigkeit und Oberflächenhärte vom Dünnglas Leoflex sind mehrere Lockerungsschläge mit dem Hammer an der ersten Stelle erforderlich, bis die vordere und hintere Glastafel brechen. Ein Lockerungsschlag an der ersten Auftreffstelle zur Zerstörung aller Glastafeln in der Verbundplatte ist in Bild 14 dargestellt.



**Bild 14** Lockerungsschlag an der ersten Auftreffstelle zur Zerstörung aller Glastafeln in der Verbundtafel. Erst nach mehrmaligen Auftreffen sind die vordere und hintere Glastafel zerstört.

#### 4.4 Untersuchungen zur Wärmedämmung

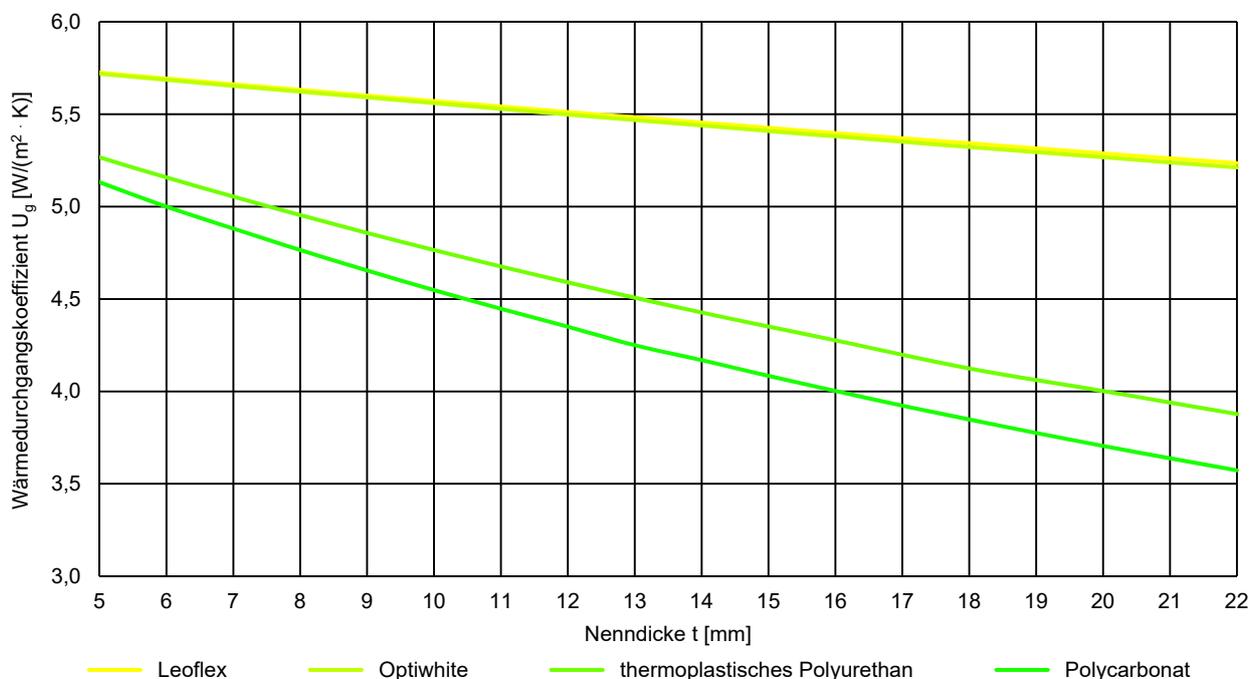
In der Gebäudehülle ist der Wärmeverlust auch bei Verglasungen in der Fassade zu berücksichtigen. Der Wärmedurchgangskoeffizient, auch als U-Wert bezeichnet, beschreibt die Wärmedämmeigenschaften und setzt sich aus dem Verglasungsanteil  $U_g$ , dem Rahmenanteil  $U_R$  und dem Randverbundanteil  $\psi$  zusammen. Eine Verbesserung des U-Wertes erfolgt hauptsächlich über eine Optimierung des  $U_g$ -Wertes, da der Einfluss des Rahmens im Vergleich zum flächigen Verglasung gering ausfällt. Bei Mehrscheiben-Isoliergläsern ist eine Verbesserung des U-Wertes zusätzlich durch Beschichtungen auf den Oberflächen im Querschnitt und den Einsatz von Edelgasen im Scheibenzwischenraum möglich.

Zur rechnerischen Ermittlung des U-Wertes nach DIN EN 673 werden die in Tabelle 24 angegebenen Nenndicken und Wärmeleitfähigkeiten für die einzelnen Schichten verwendet.

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

**Tabelle 24** Kennwerte zur Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten nach DIN EN 673 für die Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln.

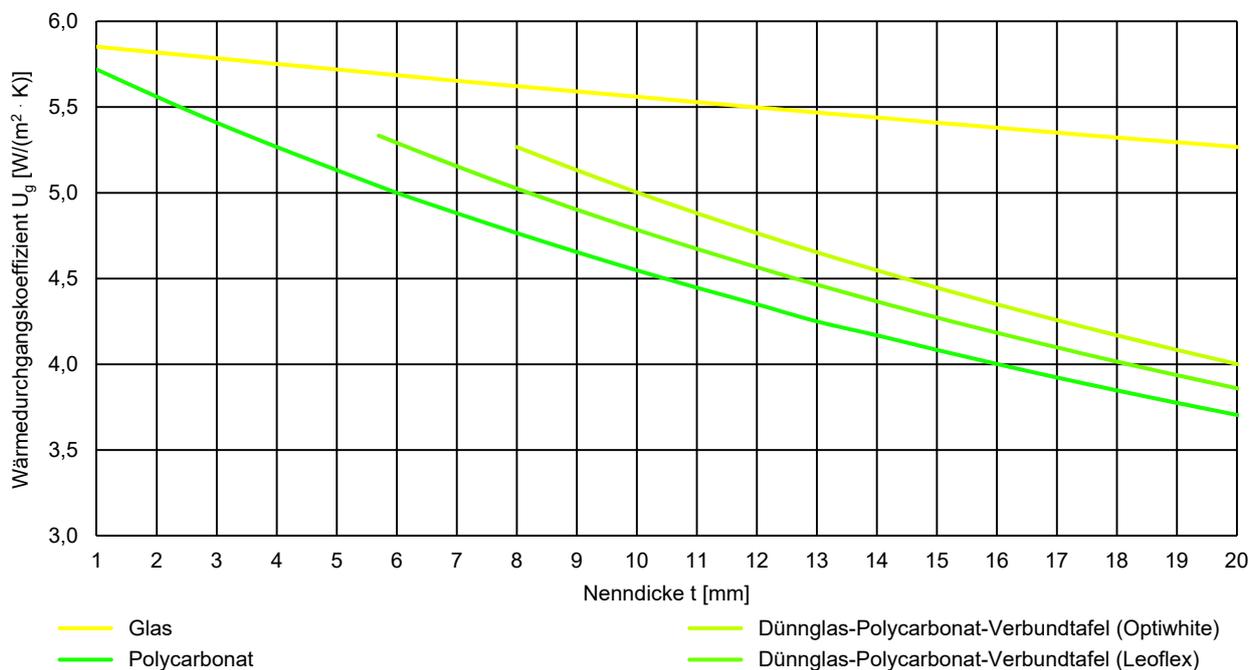
Eine niedrige Wärmeleitfähigkeit weist auf eine bessere Wärmedämmung des Materials hin. In der Untersuchung der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln wird zuerst das Ausgangsmaterial betrachtet. Bild 15 zeigt den Wärmedurchgangskoeffizienten in Abhängigkeit der Nennstärke. Der Einfluss der geringeren Wärmeleitfähigkeit der Kunststoffe auf den Wärmedurchgangskoeffizienten ist erkennbar. Ein Vergleich der Kunststoffe mit den beiden Dünngläsern zeigt niedrigere U-Werte um bis zu 1,5 W/(m<sup>2</sup> · K). Leoflex und Optiwhite besitzen annähernd gleiche U-Werte. Polycarbonat stellt den unteren Grenzwert und Dünnglas den oberen Grenzwert der Kurven für den U-Wert dar.



Eine Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel setzt sich aus zwei äußeren Dünngläser, einer inneren Polycarbonatplatte sowie zwei Zwischenschichten aus thermoplastischem Polyurethan zusammen. In Kapitel 4.3 werden die Vorteile wie eine Erhöhung der Schlagzähigkeit ver-

**Bild 15** U-Wert nach DIN EN 673 für die beiden Dünngläser Optiwhite und Leoflex sowie das Polycarbonat und das thermoplastische Polyurethan in Abhängigkeit der Nennstärke t.

bunden mit einer verbesserten Widerstandsklasse als durchbruchhemmende Sicherheitssonderverglasung für die Verbundtafeln aufgezeigt. Mit der Untersuchung zum Wärmedurchgangskoeffizient der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln ist ein weiterer Vorteil belegt. Bild 16 zeigt das Ergebnis einer Parameterstudie mit unterschiedlichen Nenndicken für die innenliegende Polycarbonat-Verbundtafel. Dabei ist erkennbar, dass das Mehrschichtsystem der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel einen wesentlich besseren  $U_g$ -Wert aufweist als der theoretische Wert für ein Monoglas mit gleicher Nenndicke.



**Bild 16**  $U$ -Wert nach DIN EN 673 für Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit dem Dünnglas Optiwhite sowie dem Dünnglas Leoflex im Vergleich zu Glas und Polycarbonat.

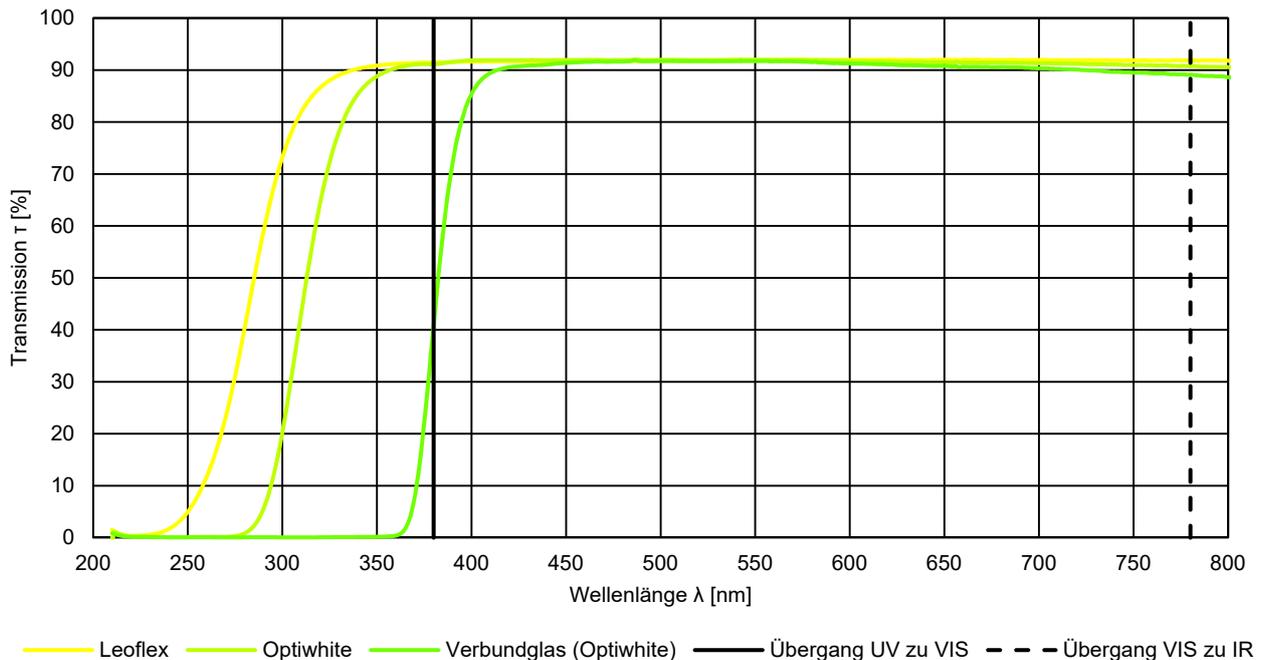
Die in Kapitel 5 untersuchten Querschnittsaufbauten der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln weisen einen verbesserten Wärmedurchgangskoeffizienten um bis zu  $1,3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  im Vergleich zu Glas der gleichen Nenndicke auf.

#### 4.5 Untersuchungen zur Transmission

Die auf eine Glastafel auftreffende Strahlung wird transmittiert, absorbiert und reflektiert. Die Transmission stellt den größeren Anteil dar. Dabei ist das Glas vor allem im ultravioletten, sichtbaren und infraroten Bereich zwischen den beiden Absorptionskanten strahlungsdurchlässig.<sup>25</sup>

<sup>25</sup> Im spektralen Bereich von etwa 250 nm bis 2.800 nm lässt Glas die Strahlung transmittieren. Mit einer Beschichtung ist eine gezielte Variation der Absorptionskanten möglich. In dem Forschungsprojekt wird unbeschichtetes Glas verwendet, da Beschichtungen sehr anfällig gegenüber mechanischen Einwirkungen und zur Zwischenschicht hin unwirksam sind. Beschichtungen werden vor allem bei Mehrscheiben-Isolierglas im Scheibenzwischenraum eingesetzt.

Polycarbonat versprödet unter dem Einfluss von ultraviolettem Licht, das thermoplastische Polyurethan ändert ebenfalls die Eigenschaften. Deshalb müssen das Glas und die Zwischenschichten diesen Strahlungsanteil absorbieren.



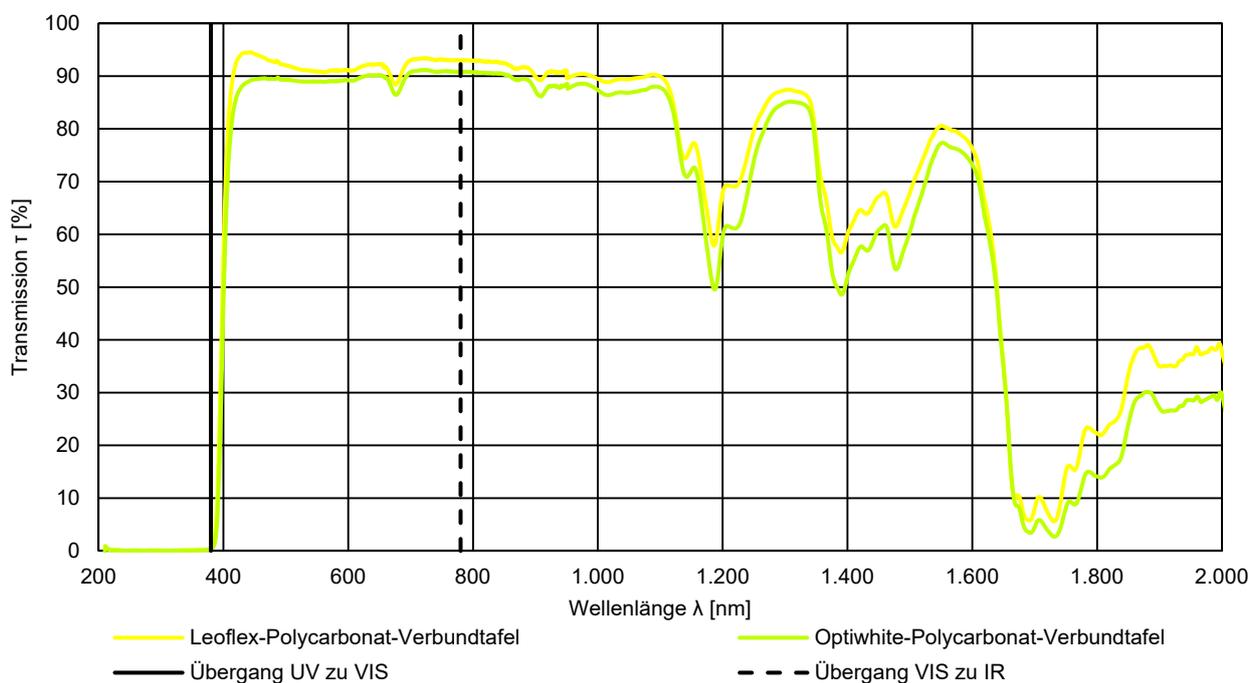
Die Untersuchungen der Transmission zeigen in Bild 17 sowohl für das Dünnglas Optiwhite als auch das Dünnglas Leoflex einen Strahlungsdurchgang von über 90 % im sichtbaren und im infraroten Spektralbereich auf. Ultraviolette Strahlung gelangt durch beide Gläser und beeinflussen die photooxidative Alterung der Polymerwerkstoffe. Zum Schutz des Polycarbonats vor ultravioletter Strahlung und zum Eigenschutz der Zwischenschicht enthält das thermoplastische Polyurethan geeignete Additive, die ultraviolette Strahlung blocken. Dadurch verschiebt sich die Absorptionskante des Verbundglases annähernd bis in den sichtbaren Bereich ohne dessen Transmission zu beeinflussen. Die Zugabe von Strahlungsblockern im thermoplastischen Polyurethan der Zwischenschicht erfordert eine genaue Dosierung bei der Herstellung, damit die Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln eine möglichst niedrige Transmission im ultravioletten und gleichzeitig eine hohe Transmission im sichtbaren Bereich aufweisen. Zum Schutz der Polycarbonattafel ist diese zusätzlich ultraviolettbeständig ausgeführt.

**Bild 17** Transmission der Dünngläser Leoflex und Optiwhite sowie von einem Verbundglas aus zwei Dünngläser Optiwhite und einer Zwischenschicht von 2 mm aus thermoplastischen Polyurethan.

UV = ultravioletter Bereich  
 VIS = sichtbarer Bereich  
 IR = infraroter Bereich

Bild 18 zeigt die gemessenen Transmissionskurven von Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln. Dabei sind zwei Absorptionskanten, eine an der Grenze zwischen ultravioletter Strahlung und dem sichtbaren Bereich und eine weitere bei etwa 1.600 nm, erkennbar. Insgesamt gelangen keine ultravioletten Strahlungsanteile durch die Verglasung.

Die innenliegende Polycarbonattafel ist durch Absorption und Reflektion der Strahlung im Bereich bis 380 nm bis zur Zwischenschicht ausreichend vor Schäden infolge ultravioletter Strahlung geschützt. Im sichtbaren Bereich liegt ein Strahlungsdurchgang von etwa 90 % vor. Weiterhin gelangen kurzwellige Infrarotstrahlungen, die für die Erwärmung verantwortlich sind, durch die Verbundtafel. Mit der Weiterverarbeitung zu einem Mehrscheiben-Isolierglas und der Verwendung von Beschichtungen im Scheibenzwischenraum ist eine erhebliche Reduzierung der Transmission von infraroten Strahlungsanteilen möglich.



**Bild 18** Transmission der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln.

UV = ultravioletter Bereich  
VIS = sichtbarer Bereich  
IR = infraroter Bereich

## 5 Untersuchung des Tragverhaltens

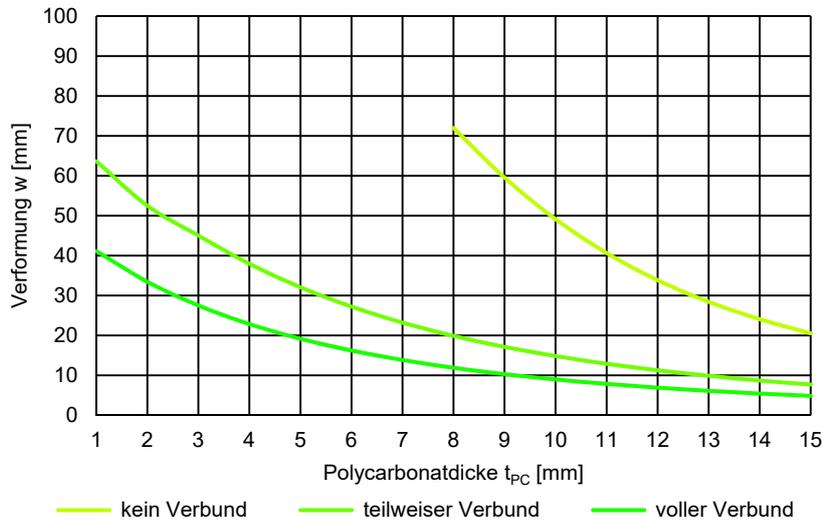
Das Kapitel beschreibt die Untersuchungen zum Tragverhalten, Bruchverhalten und Resttragverhalten der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln. Das Prüfverfahren wird in Anlehnung an das Vierschneiden-Verfahren zur Bestimmung der Festigkeit von Flachglas ausgewählt. Numerische Untersuchungen geben den Querschnitt der Verbundtafeln für die experimentellen Untersuchungen vor.

### 5.1 Numerische Untersuchungen

Die geometrisch nichtlinearen Berechnungen zur Untersuchung des Tragverhaltens der Verbundtafeln betrachten in Abhängigkeit der Verbundwirkung auftretende Spannungen und Verformungen. Die Parameterstudie mit dem Programm SJ Mepla 4.0.6 berücksichtigt variable Nenndicken für das Polycarbonat von 1 mm bis 15 mm, die Nenndicken des Dünnglases und der Zwischenschichten sind vorgegeben.<sup>26</sup> Neben den beiden Grenzfällen »kein Verbund« und »voller Verbund« wird auch ein »teilweiser Verbund« angenommen. Das Tragsystem ist eine Einfeldplatte mit einer Spannweite von 1.000 mm und einer Breite von 360 mm. Die Belastung aus einer Nutzlast von 300 N erfolgt durch zwei Linienlasten über die kürzere Seite mit einem Abstand von jeweils 100 mm zur Plattenmitte. Die Eigenlast wird nicht berücksichtigt. Die Ergebnisse der numerischen Simulation stellen die Grundlage zu den Querschnittsaufbauten für die experimentellen Untersuchungen des Tragverhaltens dar.

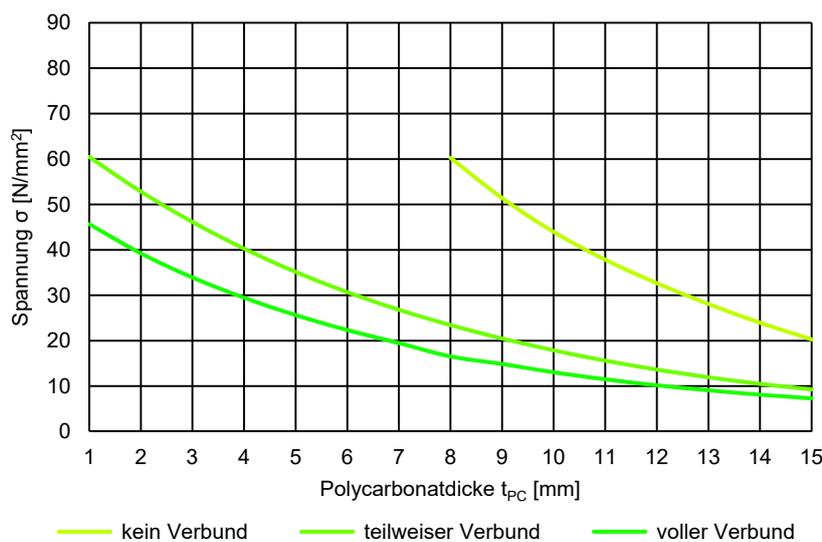
Bild 19 zeigt in Abhängigkeit von keinem, teilweisem und vollem Schubverbund der Zwischenschicht die Verformung. Mit steigender Nenndicke des Polycarbonats nähern sich die Verformungen der Prüfkörper mit teilweisem und vollem Verbund an. Der Einfluss vom Dünnglas auf das Tragverhalten der Verbundtafeln nimmt ab. Die Verformungen für eine Verbundtafel mit einer Polycarbonatplatte von 1 mm betragen 41 mm bei vollem Verbund und 63 mm bei teilweisem Verbund. Die Differenz der Verformungen verringert sich bei einer Polycarbonatplatte von 15 mm im teilweisen Verbund und vollen Verbund auf nur noch 1 mm. Das normative Kriterium für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit mit der Durchbiegungsbegrenzung von  $L/100$  wird erst mit einer Polycarbonatplatte ab einer Nenndicke von 15 mm unter einer Nutzlast von 300 N im teilweisen Verbund erreicht.

<sup>26</sup> Die Auswertung erfolgt nur für die Ergebnisse, bei denen sich eine Konvergenz für die geometrisch nichtlineare Berechnung einstellt.



**Bild 19** Verformungen der Verbundtafel bei keinem, teilweisem und vollem Verbund der Zwischenschicht für Prüfkörper mit dem Dünnglas Optiwhite. Nicht eingetragene Werte ergeben keine Konvergenz bei einer geometrisch nichtlinearen Berechnung.

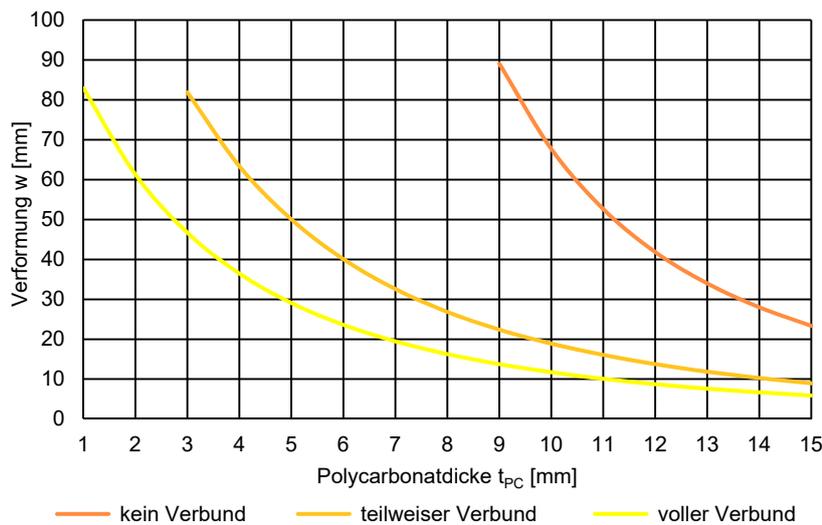
Bild 20 zeigt die aus der geometrisch nichtlinearen Berechnung ermittelten Hauptzugspannungen an der Unterseite der Dünngläser. Die charakteristische Festigkeit von einem Verbundglas aus Floatglas wird mit  $49,5 \text{ N/mm}^2$  angenommen.<sup>27</sup> Der Vergleich der Festigkeiten mit den Hauptzugspannungen ermöglicht eine Verwendung der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit dem Dünnglas Optiwhite ab einer Nenndicke von 4 mm für die Polycarbonat tafel. Die Berücksichtigung einer kurzen Lasteinwirkungsdauer für den Bemessungswert von  $27,7 \text{ N/mm}^2$  für den Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit ergibt sich für eine Polycarbonat tafel mit 8 mm, eine mittlere Lasteinwirkungsdauer erfordert eine Polycarbonat tafel mit 12 mm.



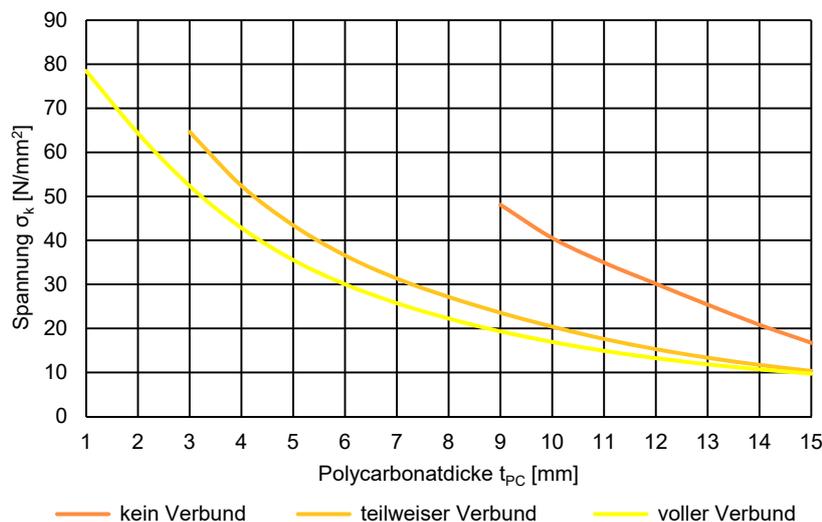
**Bild 20** Hauptzugspannungen im Dünnglas der Verbundtafel bei keinem, teilweisem und vollem Verbund der Zwischenschicht für die Prüfkörper mit dem Dünnglas Optiwhite. Nicht eingetragene Werte ergeben keine Konvergenz bei einer geometrisch nichtlinearen Berechnung.

<sup>27</sup> Vergleiche DIN 18008-1

Die numerische Berechnung der Verbundtafeln mit dem Dünnglas Leoflex erfolgt analog dazu. Bild 21 und Bild 22 stellen dabei die Ergebnisse für die Verformungen der Verbundtafeln und die Hauptzugspannungen an der Unterseite der Dünngläser in Abhängigkeit der Nenndicke der Polycarbonatplatte dar. Die charakteristische Festigkeit des chemisch vorgespannten Dünnglases Leoflex beträgt  $260 \text{ N/mm}^2$  und wird bei keinem Querschnittsaufbau überschritten. Die Verformungen der Verbundtafeln nehmen unter der Belastung aus einer Nutzlast von  $300 \text{ N}$  bei Berücksichtigung eines teilweisen Verbundes der Zwischenschicht für Verbundtafeln mit  $5 \text{ mm}$  Polycarbonat einen Wert von über  $50 \text{ mm}$  an. Die Querschnittsentwicklung des Dünnglases Leoflex erfordert deshalb eine Beschränkung der Verformung. Die Durchbiegungsbegrenzung von  $L/17,5$  erfüllt eine Polycarbonatplatte von etwa  $4 \text{ mm}$ ,  $L/35$  von  $8 \text{ mm}$  und  $L/70$  von  $12 \text{ mm}$ .

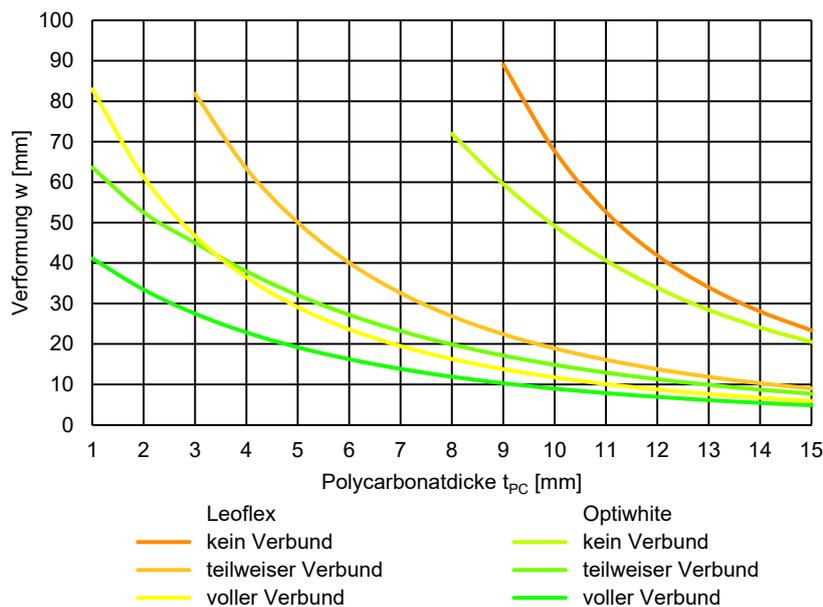


**Bild 21** Verformungen der Verbundtafel bei keinem, teilweisem und vollem Verbund der Zwischenschicht für Prüfkörper mit dem Dünnglas Leoflex. Nicht eingetragene Werte ergeben keine Konvergenz bei einer geometrisch nichtlinearen Berechnung.



**Bild 22** Hauptzugspannungen im Dünnglas der Verbundtafel bei keinem, teilweisem und vollem Verbund der Zwischenschicht für die Prüfkörper mit dem Dünnglas Leoflex. Nicht eingetragene Werte ergeben keine Konvergenz bei einer geometrisch nichtlinearen Berechnung.

Ein Vergleich der Verformungen beider Dünngläser bei einer Nutzlast von 300 N zeigt, dass sich bei zunehmender Nenndicke der Polycarbonat-Verbundtafel die Verformungen der Verbundtafeln annähern. Dadurch verringert sich der Einfluss der Dünngläser auf die Gesamtbiegesteifigkeit der Verbundtafeln. Die Polycarbonat-Verbundtafel trägt hauptsächlich zur Lastabtragung bei. Die Verformungen der beiden Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln sind in Bild 23 dargestellt.



**Bild 23** Verformungen der Verbundtafeln mit den Dünngläsern Leoflex und Optiwhite bei keinem, teilweisem und vollem Verbund der Zwischenschicht. Nicht eingetragene Werte ergeben keine Konvergenz bei einer geometrisch nichtlinearen Berechnung.

## 5.2 Querschnittsauswahl

Die Untersuchungen in Kapitel 4 und Kapitel 5.1 zu den Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit den Dünngläsern Optiwhite und Leoflex zielen mit dem Kugelfallversuch und den Prüfungen der Beständigkeit auf den Nachweis eines ausreichenden Haftverbunds der Zwischenschicht gegen mechanische und klimatische Beanspruchungen ab. Die Prüfung mit Axt ergänzt die Prüfungen mit der Untersuchung auf einen ausreichenden Widerstand gegen manuellen Angriff. Die innenliegende Polycarbonat-Verbundtafel verbessert zusätzlich den Wärmedurchgangskoeffizienten. Die numerischen Berechnungen liefern erste Aussagen zum Tragverhalten der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln unter statischen Einwirkungen. Die Nenndicke der Polycarbonat-Verbundtafel wird für die weiteren Untersuchungen auf 4 mm, 8 mm und 12 mm festgelegt. Die bisherigen Ergebnisse zeigen die grundsätzliche Realisierbarkeit von Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln. Tabelle 25 und Tabelle 26 geben den Querschnittsaufbau für die Untersuchungen zum Tragverhalten der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel vor.

Material	Nennstärke	Hersteller
Floatglas Optiwhite	2,00 mm	Pilkington Deutschland AG
Thermoplastisches Polyurethan	2,00 mm	SiLATEC Sicherheits- und Laminatglas-technik GmbH
Polycarbonat Lexan 9030	Variante 1: 4,00 mm Variante 2: 8,00 mm Variante 3: 12,00 mm	Sabic Deutschland GmbH
Thermoplastisches Polyurethan	2,00 mm	SiLATEC Sicherheits- und Laminatglas-technik GmbH
Floatglas Optiwhite	2,00 mm	Pilkington Deutschland AG

**Tabelle 25** Aufbau der Prüfkörper für die Untersuchungen zum Tragverhalten der Verbundtafeln mit dem Dünnglas Optiwhite.

Material	Nennstärke	Hersteller
CVG Leoflex	0,85 mm	Asahi Glass Co., Ltd.
Thermoplastisches Polyurethan	2,00 mm	SiLATEC Sicherheits- und Laminatglas-technik GmbH
Polycarbonat Lexan 9030	Variante 1: 4,00 mm Variante 2: 8,00 mm Variante 3: 12,00 mm	Sabic Deutschland GmbH
Thermoplastisches Polyurethan	2,00 mm	SiLATEC Sicherheits- und Laminatglas-technik GmbH
CVG Leoflex	0,85 mm	Asahi Glass Co., Ltd.

**Tabelle 26** Aufbau der Prüfkörper für die Untersuchungen zum Tragverhalten der Verbundtafeln mit dem Dünnglas Leoflex.

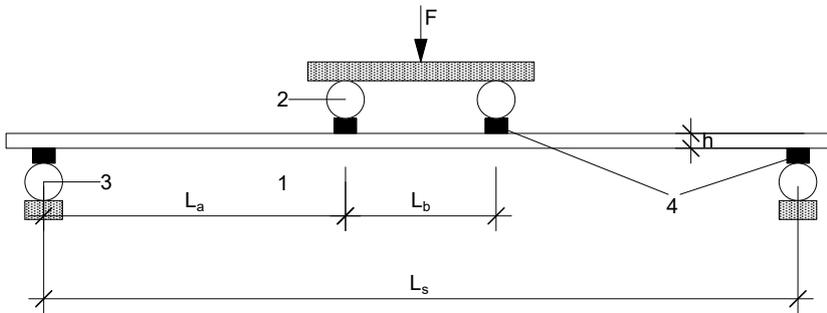
### 5.3 Untersuchungen zum Trag- und Bruchverhalten

#### 5.3.1 Versuchsaufbau und Versuchsprogramm

Zur Untersuchung der mechanischen Beanspruchbarkeit der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln wird der Vierpunkt-Biegeversuch in Anlehnung an das Vierschneiden-Verfahren durchgeführt.<sup>28</sup> Bild 24 stellt das Vierschneiden-Verfahren dar. Die 1.100 mm langen und 360 mm breiten Prüfkörper liegen auf zwei Auflagerrollen auf und sind durch zwei Biegerollen mit Linienlasten beansprucht. Im Bereich zwischen den beiden Lasteinleitungen findet eine reine Biegebeanspruchung statt. Mit den biaxialen Dehnungsmessstreifen an jeder Grenzfläche sowohl in der Plattenmitte als auch am Plattenrand wird das Tragverhalten im ebenen Spannungszustand aufgezeigt. Positive Messwerte entsprechen Dehnungen unter einer Zugbeanspruchung, negative Werte definieren den Druckbereich. Auftretenden Querspannungen der schmalen Platte wirken sich bei den geringen Nennstärken

<sup>28</sup> Vergleiche DIN EN 1288-3

der Verbundtafeln günstig auf das Tragverhalten aus und erzeugen ein nichtlineares Tragverhalten.<sup>29</sup>

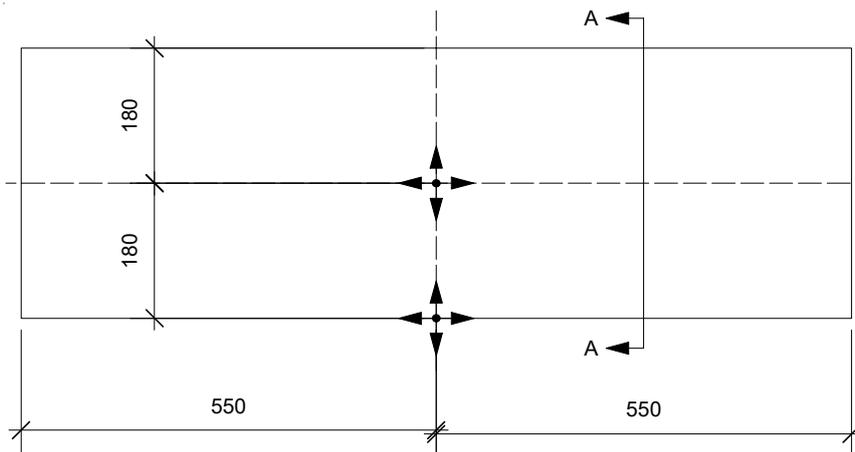


**Bild 24** Längsschnitt des Vier-schneiden-Verfahrens nach DIN EN 1288-3.

- 1 Prüfkörper
  - 2 Biegerolle
  - 3 Auflagerrolle
  - 4 Zwischenlage aus Gummi
- L x B = 1.100 mm x 360 mm

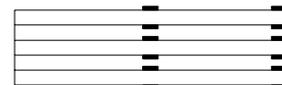
$L_s = 1.000 \text{ mm}$   
 $L_a = 400 \text{ mm}$   
 $L_b = 200 \text{ mm}$

Insgesamt erfolgen die Untersuchungen im Kurzzeitversuch an jeweils 3 Prüfkörpern für jeden Querschnittsaufbau der beiden Dünngläser. Dabei werden neben der aufgebrachtten Kraft auch die Zeit und die Verformung in Plattenmitte senkrecht zur Querschnittsachse gemessen. Die biaxialen Dehnungsmessstreifen<sup>30</sup> in Plattenmitte und am Plattenrand ermitteln die Dehnungen an den Grenzflächen. Tabelle 27 gibt den Querschnittsaufbau und die Abmessungen der Prüfkörper für die Untersuchungen zum Trag- und Bruchverhalten der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln an. Die Lage der Dehnungsmessstreifen ist in Bild 25 zu sehen. Der Elastizitätsmodul der Zwischenschicht wird nach den experimentellen Prüfungen mit dem Programm SJ Mepla 4.0.6 bei Berücksichtigung des geometrisch nichtlinearen Verfahrens numerisch bestimmt.



Schnitt A :

Aufbau von oben nach unten  
 Glas | TPU | PC | TPU | Glas



- Dehnungsmessstreifen
- > Richtung der Dehnungsmessung

alle Maße in mm

**Bild 25** Anordnung der Dehnungsmessstreifen im Querschnitt der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln.

<sup>29</sup> Vergleiche Blank 1994

<sup>30</sup> Dehnungsmessstreifen sind von Preusser-Messtechnik GmbH und mit 4-Leitertechnik an den Messverstärker angeschlossen. Es werden für die Applikation auf Glas beziehungsweise Polycarbonat unterschiedliche Typen von Dehnungsmessstreifen, angepasst an die Wärmeausdehnung des Materials, ausgewählt.

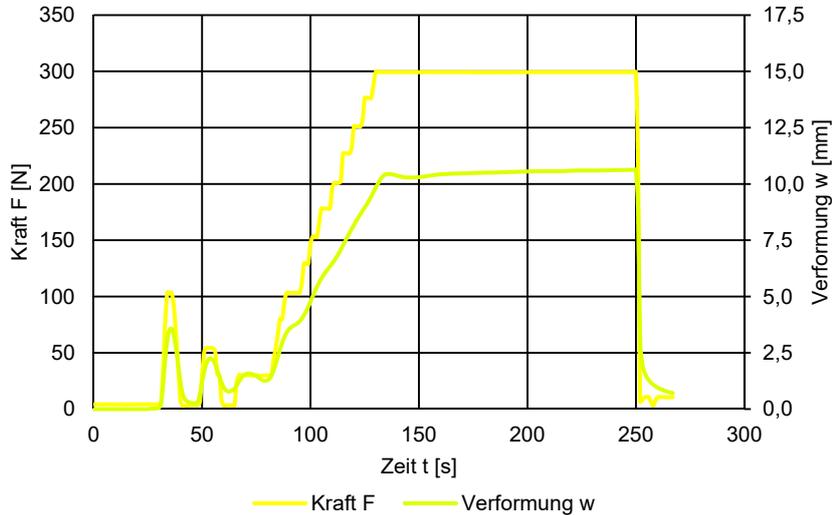
Prüfkörper	Aufbau Nennquerschnitt	Aufbau Realquerschnitt [Mittelwert]	Abmessung  Länge x Breite	Anzahl
	Gesamtdicke	Gesamtdicke		
Optiwhite PK 04	2,00 mm FG   2,00 mm TPU   4,00 mm PC   2,00 mm TPU   2,00 mm FG  12,00 mm	1,90 mm FG   2,05 mm TPU   3,80 mm PC   2,05 mm TPU   1,90 mm FG  11,70 mm	1.100 mm x 360 mm	3
Optiwhite PK 08	2,00 mm FG   2,00 mm TPU   8,00 mm PC   2,00 mm TPU   2,00 mm FG  16,00 mm	1,90 mm FG   1,95 mm TPU   7,80 mm PC   1,95 mm TPU   1,90 mm FG  15,50 mm	1.100 mm x 360 mm	3
Optiwhite PK 12	2,00 mm FG   2,00 mm TPU   12,00 mm PC   2,00 mm TPU   2,00 mm FG  20,00 mm	1,90 mm FG   1,89 mm TPU   11,80 mm PC   1,89 mm TPU   1,90 mm FG  19,38 mm	1.100 mm x 360 mm	3
Leoflex PK 04	0,85 mm CVG   2,00 mm TPU   4,00 mm PC   2,00 mm TPU   0,85 mm CVG  9,70 mm	0,86 mm CVG   2,00 mm TPU   3,80 mm PC   2,00 mm TPU   0,86 mm CVG  9,52 mm	1.100 mm x 360 mm	3
Leoflex PK 08	0,85 mm CVG   2,00 mm TPU   8,00 mm PC   2,00 mm TPU   0,85 mm CVG  13,70 mm	0,86 mm CVG   1,94 mm TPU   7,80 mm PC   1,94 mm TPU   0,86 mm CVG  13,40 mm	1.100 mm x 360 mm	3
Leoflex PK 12	0,85 mm CVG   2,00 mm TPU   12,00 mm PC   2,00 mm TPU   0,85 mm CVG  17,70 mm	0,86 mm CVG   1,87 mm TPU   11,80 mm PC   1,87 mm TPU   0,86 mm CVG  17,26 mm	1.100 mm x 360 mm	3

Die Untersuchungen zum Tragverhalten der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit dem Vierschneiden-Verfahren teilen sich in zwei Prüfungen. Prüfung 1 erfolgt im intakten Zustand der Dünngläser. Die Verbundtafel wird für 120 s mit einer Kraft von 300 N kraftgesteuert mit 5 N/s beansprucht, anschließend entlastet. Die Auswertung erfolgt über einen Zeitraum von 60 s. 7 Tage nach Prüfung 1 startet Prüfung 2 zunächst analog zu Prüfung 1. Abschließend wird der Prüfkörper bis zum Bruch belastet. Die Durchführung der Versuche erfolgt mit der hydraulischen Prüfmaschine Delta 6-100 von Form + Test Seidner + Co. GmbH.

**Tabelle 27** Prüfkörper mit Querschnittsaufbau, Abmessungen und Anzahl für die Untersuchungen zum Tragverhalten.

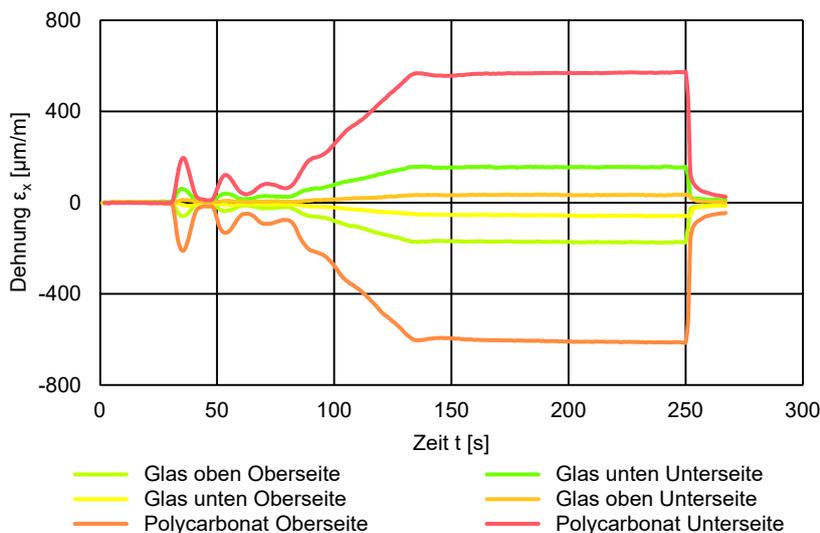
Die zweiseitig linienförmig gelagerten Platten zeigen bei geringer Belastung im Vierpunkt-Biegeversuch eine große Verformung. DIN 18008 legt im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit eine maximale Durchbiegung von  $L/100$  fest. In den nachfolgenden Untersuchungen wird die Verbundtafel kraftgesteuert auf eine maximal zulässige Verformung von  $L/10$  analysiert. Dies entspricht eine Erhöhung der normativ zulässigen Verformung um den Faktor 10.

Bild 26 zeigt exemplarisch die Darstellung der Kraft und der Verformung für einen Prüfkörper. Die weiteren Prüfkörper werden analog dazu ausgewertet.



**Bild 26** Exemplarische Darstellung der Kraft und der Verformung in Abhängigkeit der Zeit für Prüfung 1 im Vierpunkt-Biegeversuch.

Die Auswertung erfolgt über eine Betrachtung der korrigierten Dehnungen der biaxialen Dehnungsmessstreifen. Im biaxialen Spannungsfeld beachtet die korrigierte Dehnung die Querdehnungsempfindlichkeit<sup>31</sup> der Dehnungsmessstreifen und ist zur Fehlerkorrektur notwendig.<sup>32</sup> Die Messwerte der korrigierten Dehnungen sind exemplarisch in Abhängigkeit der Zeit in Bild 27 dargestellt. Die Dehnungen in Längsrichtung zeigen betragsmäßig einen ähnlichen Wert an der Oberseite und Unterseite auf.



**Bild 27** Exemplarische Darstellung der korrigierten Längsdehnungen über die Zeit in Plattenmitte.

<sup>31</sup> Die Querdehnungsempfindlichkeit berücksichtigt das Verhalten des Dehnungsmessstreifens, wenn Dehnungen quer zur Gitterlängsachse wirken.

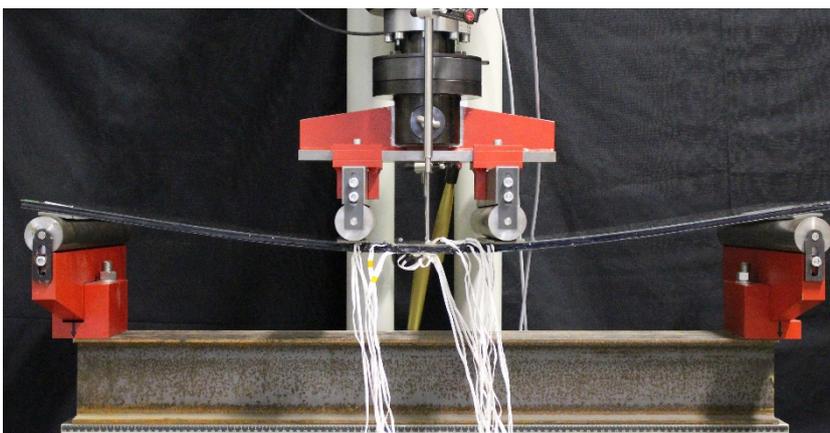
<sup>32</sup> Vergleiche Keil 2017

Die Ermittlung der Spannungen ist mit dem Ansatz der linearen Plattentheorie nach Kirchhoff nur bis zu einem Verhältnis zwischen Verformung und Dicke von 1 möglich. Ansonsten wird üblicherweise die Plattentheorie unter einem geometrisch nichtlinearen Ansatz verwendet. Von einer physikalischen Nichtlinearität der Werkstoffe ist bei einer kurzzeitigen Lasteinwirkungsdauer nicht auszugehen. Die Auswertung der korrigierten Dehnungen zielt auf die Beschreibung des Tragverhaltens der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln ab. Zusätzlich beschreibt das Verhältnis der einwirkenden Kraft zur auftretenden Verformung die Steifigkeit der Verbundtafel. Bei steigendem Verhältniswert liegt ein Laminat mit einer höheren Gesamtbiegesteifigkeit vor.

Die Bestimmung der Bruchlast für die Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln erfolgt im Anschluss an die Untersuchungen zum Tragverhalten kraftgesteuert. Der Verbund der Zwischenschicht und die Oberflächenbeschaffenheit der Dünngläser beeinflussen die Bruchlast. Ein Versagen ist im Bereich der größten Beanspruchung zwischen den Lastrollen für die zugbeanspruchte Oberfläche der Dünngläser zu erwarten.

### 5.3.2 Tragverhalten mit Dünnglas Optiwhite

Bild 28 zeigt den Versuchsaufbau im Vierpunkt-Biegeversuch zur Untersuchung des Tragverhaltens der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit dem Dünnglas Optiwhite. Während der Versuche liegt eine Temperatur von +21,9 °C und eine relative Luftfeuchtigkeit von 35,5 % rF vor.



**Bild 28** Prüfung zum Tragverhalten der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit dem Dünnglas Optiwhite unter einer Nutzlast von 300 N.

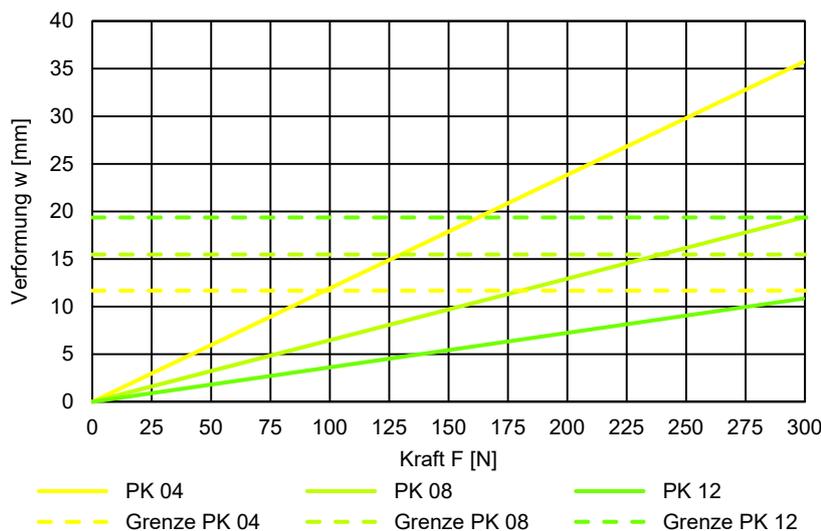
Tabelle 28 gibt die gemittelten Messergebnisse für die Verformung aus der Nutzlast für die Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln an. Die Nutzlast beträgt 300 N für die verschiedenen Querschnittsaufbauten. Bei wachsender Polycarbonatdicke verringert sich die Verformung, das Last-Verformungs-Verhältnis steigt infolge einer höheren Biegesteifigkeit der Verbundtafel. Unter einer kurzen Lasteinwirkungsdauer von 60 s stellt sich ein mittlerer Elastizitätsmodul unabhängig der

Nenndicke der Verbundtafel von  $0,42 \text{ N/mm}^2$  für die Zwischenschicht aus dem thermoplastischen Polyurethan ein.

Messwert	PK 04	PK 08	PK 12
Nenndicke	12,0 mm	16,0 mm	20,0 mm
Realdicke	11,7 mm (0,1 mm)	15,5 mm (0,1 mm)	19,4 mm (0,1 mm)
Messzeit	60 s	60 s	60 s
Kraft	299,2 N (0,2 N)	299,0 N (0,4 N)	299,2 N (0,1 N)
Verformung	35,7 mm (3,3 mm)	19,3 mm (1,4 mm)	10,8 mm (0,3 mm)
Kraft/Verformung	8,5 N/mm (0,7 N/mm)	15,5 N/mm (1,1 N/mm)	27,6 N/mm (0,6 N/mm)
Elastizitätsmodul Zwischenschicht	$0,46 \text{ N/mm}^2$ ( $0,06 \text{ N/mm}^2$ )	$0,42 \text{ N/mm}^2$ ( $0,04 \text{ N/mm}^2$ )	$0,41 \text{ N/mm}^2$ ( $0,02 \text{ N/mm}^2$ )

Bild 29 zeigt die Last-Verformungs-Kurven für die Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit dem Dünnglas Optiwhite. Die Verformung ist für die Prüfkörper mit der größten Nenndicke am geringsten. Zusätzlich wird für jeden Querschnitt die Grenzlinie zwischen der linearen und der geometrisch nichtlinearen Plattentheorie angegeben. Für PK 04 ist der lineare Ansatz der Plattentheorie bis zu einer Belastung von 100 N anwendbar. Die Grenzlinie liegt für PK 08 bei etwa 225 N und für PK 12 bei etwa 550 N.

**Tabelle 28** Ergebnisse zum Tragverhalten der Prüfkörper im Vierpunkt-Biegeversuch mit dem Dünnglas Optiwhite. Die Standardabweichung ist in Klammern angegeben.



**Bild 29** Last-Verformungs-Kurven im Vierpunkt-Biegeversuch bis zu einer Belastung von 300 N. Darstellung der Kraft in Abhängigkeit der Verformung sowie die Grenzlinie zwischen linearer und geometrisch nichtlinearer Berechnung.

Sowohl die Glastafeln als auch die Polycarbonatplatte zeigen in Tabelle 29 in Längsrichtung einen Druckbereich an der Oberseite und einen Zugbereich an der Unterseite. Die äußeren Glastafeln der Prüfkörper PK 04 brechen teilweise bereits während der Haltezeit bei Prüfung 1. Die Prüfkörper zeigen für die Dehnung in Plattenmitte an der Unterseite der unteren Glastafel einen Wert von  $429 \mu\text{m/m}$ . Im Vergleich

dazu reduziert sich die Dehnung an der Unterseite um den Faktor 3 bei den Prüfkörpern PK 12. Dieses Verhalten ist ebenfalls für die obere Glastafel in der Druckzone zu beobachten. Die Beteiligung der beiden äußeren Glastafeln an der Lastabtragung nimmt mit steigender Nennstärke der Polycarbonatplatte ab.

Messwert	PK 04	PK 08	PK 12
Dehnung Glas oben (Plattenmitte)	-423 $\mu\text{m/m}$ (8 $\mu\text{m/m}$ ) +264 $\mu\text{m/m}$ (32 $\mu\text{m/m}$ )	-279 $\mu\text{m/m}$ (12 $\mu\text{m/m}$ ) +96 $\mu\text{m/m}$ (14 $\mu\text{m/m}$ )	-175 $\mu\text{m/m}$ (4 $\mu\text{m/m}$ ) +37 $\mu\text{m/m}$ (4 $\mu\text{m/m}$ )
Dehnung Polycarbonat (Plattenmitte)	-553 $\mu\text{m/m}$ (55 $\mu\text{m/m}$ ) +768 $\mu\text{m/m}$ (150 $\mu\text{m/m}$ )	-670 $\mu\text{m/m}$ (22 $\mu\text{m/m}$ ) +753 $\mu\text{m/m}$ (99 $\mu\text{m/m}$ )	-599 $\mu\text{m/m}$ (10 $\mu\text{m/m}$ ) +600 $\mu\text{m/m}$ (24 $\mu\text{m/m}$ )
Dehnung Glas unten (Plattenmitte)	-258 $\mu\text{m/m}$ (34 $\mu\text{m/m}$ ) +429 $\mu\text{m/m}$ (21 $\mu\text{m/m}$ )	-118 $\mu\text{m/m}$ (13 $\mu\text{m/m}$ ) +253 $\mu\text{m/m}$ (17 $\mu\text{m/m}$ )	-64 $\mu\text{m/m}$ (8 $\mu\text{m/m}$ ) +147 $\mu\text{m/m}$ (6 $\mu\text{m/m}$ )
Dehnung Glas oben (Plattenrand)	-383 $\mu\text{m/m}$ (58 $\mu\text{m/m}$ ) +260 $\mu\text{m/m}$ (28 $\mu\text{m/m}$ )	-243 $\mu\text{m/m}$ (8 $\mu\text{m/m}$ ) +139 $\mu\text{m/m}$ (21 $\mu\text{m/m}$ )	-143 $\mu\text{m/m}$ (5 $\mu\text{m/m}$ ) +77 $\mu\text{m/m}$ (5 $\mu\text{m/m}$ )
Dehnung Polycarbonat (Plattenrand)	-583 $\mu\text{m/m}$ (49 $\mu\text{m/m}$ ) +709 $\mu\text{m/m}$ (154 $\mu\text{m/m}$ )	-670 $\mu\text{m/m}$ (22 $\mu\text{m/m}$ ) +775 $\mu\text{m/m}$ (91 $\mu\text{m/m}$ )	-559 $\mu\text{m/m}$ (17 $\mu\text{m/m}$ ) +654 $\mu\text{m/m}$ (22 $\mu\text{m/m}$ )
Dehnung Glas unten (Plattenrand)	-268 $\mu\text{m/m}$ (29 $\mu\text{m/m}$ ) +395 $\mu\text{m/m}$ (39 $\mu\text{m/m}$ )	-119 $\mu\text{m/m}$ (17 $\mu\text{m/m}$ ) +255 $\mu\text{m/m}$ (13 $\mu\text{m/m}$ )	-46 $\mu\text{m/m}$ (4 $\mu\text{m/m}$ ) +170 $\mu\text{m/m}$ (6 $\mu\text{m/m}$ )

Tabelle 30 zeigt die Ergebnisse für die Querdehnungen zum Tragverhalten der Prüfkörper im Vierpunkt-Biegeversuch mit dem Dünnglas Optiwhite. Die Unterseite der Polycarbonatplatte und der Dünnglastafeln wird positiv gedehnt. PK 04 weist dabei die höchsten Messwerte auf. Im Gegensatz zur Plattenmitte wird der Plattenrand an der Oberseite positiv und an der Unterseite negativ gedehnt. Es stellt sich ein geometrisch nichtlineares Tragverhalten, bei dem die Dehnungen in Querrichtung mit den Dehnungen in Längsrichtung überlagert werden und einen zweiaxialen Zugspannungszustand in Plattenmitte bilden, ein.

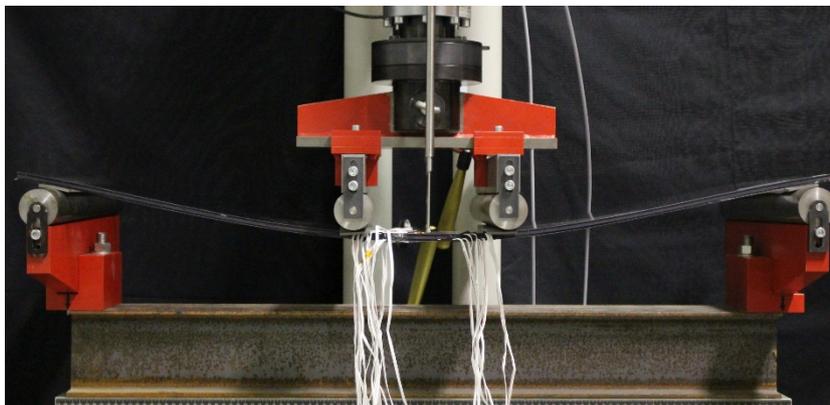
**Tabelle 29** Ergebnisse für die Längsdehnungen zum Tragverhalten der Prüfkörper im Vierpunkt-Biegeversuch mit dem Dünnglas Optiwhite. Der obere Wert beschreibt den Messwert an der Oberseite, der untere Wert stellt den Messwert an der Unterseite der entsprechenden Schicht dar. Die Standardabweichung ist in Klammern angegeben.

Messwert	PK 04	PK 08	PK 12
Dehnung Glas oben (Plattenmitte)	+4 µm/m (3 µm/m) +32 µm/m (4 µm/m)	-1 µm/m (4 µm/m) +22 µm/m (7 µm/m)	+7 µm/m (2 µm/m) +13 µm/m (2 µm/m)
Dehnung Polycarbonat (Plattenmitte)	-56 µm/m (26 µm/m) -7 µm/m (43 µm/m)	-66 µm/m (19 µm/m) +25 µm/m (21 µm/m)	-24 µm/m (13 µm/m) +8 µm/m (11 µm/m)
Dehnung Glas unten (Plattenmitte)	-31 µm/m (10 µm/m) -2 µm/m (3 µm/m)	-34 µm/m (4 µm/m) -2 µm/m (7 µm/m)	-17 µm/m (3 µm/m) -5 µm/m (3 µm/m)
Dehnung Glas oben (Plattenrand)	+80 µm/m (6 µm/m) -48 µm/m (1 µm/m)	+58 µm/m (7 µm/m) -49 µm/m (3 µm/m)	+39 µm/m (2 µm/m) -32 µm/m (2 µm/m)
Dehnung Polycarbonat (Plattenrand)	+112 µm/m (28 µm/m) -158 µm/m (52 µm/m)	+189 µm/m (8 µm/m) -249 µm/m (27 µm/m)	+195 µm/m (7 µm/m) -230 µm/m (9 µm/m)
Dehnung Glas unten (Plattenrand)	+46 µm/m (4 µm/m) -77 µm/m (4 µm/m)	+39 µm/m (8 µm/m) -64 µm/m (5 µm/m)	+24 µm/m (5 µm/m) -45 µm/m (4 µm/m)

### 5.3.3 Tragverhalten mit Dünnglas Leoflex

Bild 30 zeigt den Versuchsaufbau im Vierpunkt-Biegeversuch zur Untersuchung des Tragverhaltens der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit dem Dünnglas Leoflex. Während der Versuche liegt eine Temperatur von +21,7 °C und eine relative Luftfeuchtigkeit von 36,5 % rF vor.

**Tabelle 30** Ergebnisse für die Querdehnungen zum Tragverhalten der Prüfkörper im Vierpunkt-Biegeversuch mit dem Dünnglas Optiwhite. Der obere Wert beschreibt den Messwert an der Oberseite, der untere Wert stellt den Messwert an der Unterseite der entsprechenden Schicht dar. Die Standardabweichung ist in Klammern angegeben.



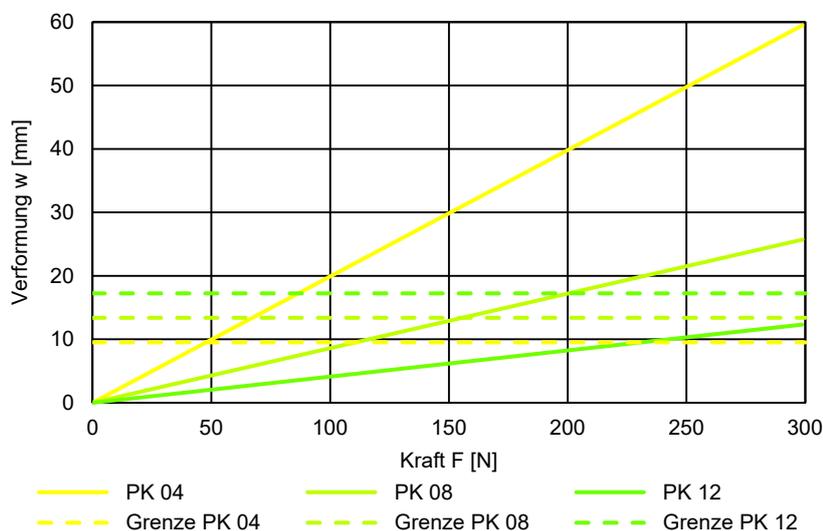
**Bild 30** Prüfung zum Tragverhalten der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit dem Dünnglas Leoflex unter einer Nutzlast von 300 N.

Die Messergebnisse der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln sind in Tabelle 31 angegeben. Bei einer Belastung von 300 N stellt sich für die Prüfkörper PK 04 eine Verformung ohne Bruch von 59,5 mm ein. Mit steigender Polycarbonatdicke reduzieren sich die Verformung infolge der Nutzlast, das Last-Verformungs-Verhältnis und die damit verbunden die Gesamtbiegesteifigkeit der Verbundtafeln steigt. Der mittlere Elastizitätsmodul der Zwischenschicht aus dem thermoplastischen Polyurethan beträgt 0,54 N/mm<sup>2</sup>.

Messwert	PK 04	PK 08	PK 12
Nennstärke	9,7 mm	13,7 mm	17,7 mm
Realdicke	9,5 mm (0,0 mm)	13,4 mm (0,0 mm)	17,3 mm (0,1 mm)
Messzeit	60 s	60 s	60 s
Kraft	298,7 N (0,3 N)	298,8 N (0,2 N)	298,6 N (0,3 N)
Verformung	59,5 mm (8,3 mm)	25,7 mm (3,5 mm)	12,3 mm (0,6 mm)
Kraft/Verformung	5,1 N/mm (0,7 N/mm)	11,8 N/mm (1,5 N/mm)	24,3 N/mm (1,1 N/mm)
Elastizitätsmodul der Zwischenschicht	0,50 N/mm <sup>2</sup> (0,09 N/mm <sup>2</sup> )	0,51 N/mm <sup>2</sup> (0,09 N/mm <sup>2</sup> )	0,57 N/mm <sup>2</sup> (0,04 N/mm <sup>2</sup> )

Bild 31 zeigt die Last-Verformungs-Kurve für die Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit dem Dünnglas Leoflex. Die Verformung ist für die Prüfkörper mit der größten Nennstärke am geringsten. Zusätzlich wird für jeden Querschnitt die Grenzlinie zwischen der linearen und der geometrisch nichtlinearen Plattentheorie angegeben. Für PK 04 ist der lineare Ansatz der Plattentheorie bis zu einer Belastung von 50 N anwendbar. Die Grenzlinie liegt für die Prüfkörper PK 08 bei 150 N und für die Prüfkörper PK 12 bei 350 N.

**Tabelle 31** Ergebnisse zum Tragverhalten der Prüfkörper im Vierpunkt-Biegeversuch mit dem Dünnglas Leoflex. Die Standardabweichung ist in Klammern angegeben.



**Bild 31** Last-Verformungs-Kurven im Vierpunkt-Biegeversuch bis zu einer Belastung von 300 N. Darstellung der Kraft in Abhängigkeit der Verformung sowie die Grenzlinie zwischen linearer und geometrisch nichtlinearer Berechnung.

Bei Betrachtung der Längsdehnung der Verbundtafeln in Tabelle 32 bilden sich im oberen Bereich des Laminats eine Druckzone und im unteren Bereich eine Zugzone aus. Die Abweichungen der Messwerte der Glastafeln sind gering. Die Ergebnisse der Polycarbonatplatten weisen größere Abweichungen auf. Bei steigender Polycarbonatdicke reduziert sich der Anteil des Dünnglases an der Lastabtragung.

Messwert	PK 04	PK 08	PK 12
Dehnung Glas oben (Plattenmitte)	-505 µm/m (55 µm/m) -147 µm/m (46 µm/m)	-309 µm/m (11 µm/m) -87 µm/m (26 µm/m)	-209 µm/m (7 µm/m) -102 µm/m (7 µm/m)
Dehnung Polycarbonat (Plattenmitte)	-728 µm/m (139 µm/m) +673 µm/m (435 µm/m)	-908 µm/m (190 µm/m) +877 µm/m (72 µm/m)	-664 µm/m (32 µm/m) +636 µm/m (46 µm/m)
Dehnung Glas unten (Plattenmitte)	+141 µm/m (74 µm/m) +492 µm/m (23 µm/m)	+84 µm/m (14 µm/m) +305 µm/m (29 µm/m)	+53 µm/m (5 µm/m) +163 µm/m (15 µm/m)
Dehnung Glas oben (Plattenrand)	-388 µm/m (55 µm/m) -89 µm/m (47 µm/m)	-238 µm/m (9 µm/m) -15 µm/m (37 µm/m)	-160 µm/m (6 µm/m) -45 µm/m (9 µm/m)
Dehnung Polycarbonat (Plattenrand)	-601 µm/m (94 µm/m) +565 µm/m (409 µm/m)	-893 µm/m (202 µm/m) +96 µm/m (96 µm/m)	-650 µm/m (29 µm/m) +721 µm/m (44 µm/m)
Dehnung Glas unten (Plattenrand)	+100 µm/m (74 µm/m) +379 µm/m (30 µm/m)	+63 µm/m (18 µm/m) +277 µm/m (18 µm/m)	+66 µm/m (13 µm/m) +194 µm/m (10 µm/m)

Die Messwerte in Querrichtung sind in Tabelle 33 angegeben. In Querrichtung stellt sich im unteren Bereich eine Druckzone und im oberen Bereich eine Zugzone ein. Zugspannungen in Querrichtung an der Oberseite der Verbundtafel entwickeln dabei eine stabilisierende Wirkung und ein geometrisch nichtlineares Tragverhalten ist zu erkennen. Die Querspannungen sind bei großen Verformungen nicht mehr vernachlässigbar und führen zu einer günstigeren Ausbildung der Spannungen und Verformungen.

**Tabelle 32** Ergebnisse für Längsdehnungen zum Tragverhalten der Prüfkörper im Vierpunkt-Biegeversuch mit dem Dünnglas Leoflex. Der obere Wert beschreibt den Messwert an der Oberseite, der untere Wert stellt den Messwert an der Unterseite der entsprechenden Schicht dar. Die Standardabweichung ist in Klammern angegeben.

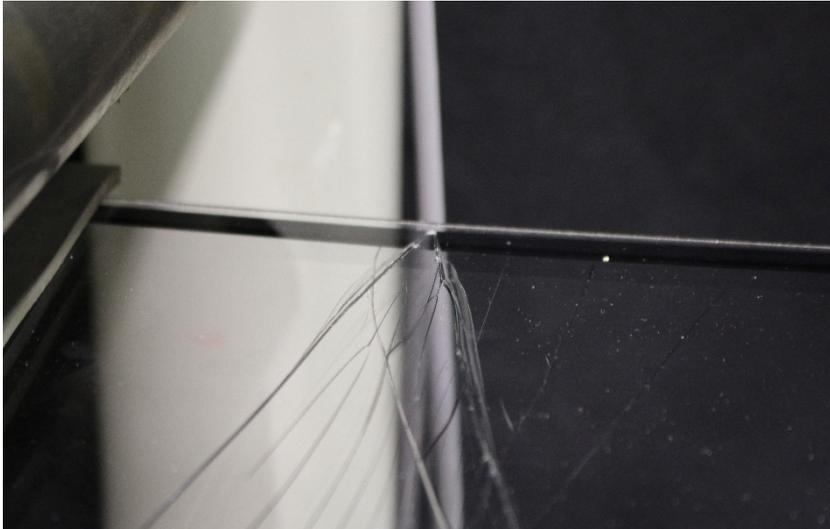
Messwert	PK 04	PK 08	PK 12
Dehnung Glas oben (Plattenmitte)	+69 µm/m (6 µm/m) +50 µm/m (5 µm/m)	+28 µm/m (9 µm/m) +44 µm/m (2 µm/m)	+23 µm/m (8 µm/m) +27 µm/m (5 µm/m)
Dehnung Polycarbonat (Plattenmitte)	+25 µm/m (93 µm/m) -28 µm/m (87 µm/m)	-72 µm/m (15 µm/m) +81 µm/m (70 µm/m)	-36 µm/m (12 µm/m) +30 µm/m (13 µm/m)
Dehnung Glas unten (Plattenmitte)	-69 µm/m (12 µm/m) -70 µm/m (11 µm/m)	-53 µm/m (3 µm/m) -25 µm/m (10 µm/m)	-35 µm/m (5 µm/m) -19 µm/m (4 µm/m)
Dehnung Glas oben (Plattenrand)	+90 µm/m (11 µm/m) +8 µm/m (5 µm/m)	+62 µm/m (3 µm/m) -13 µm/m (10 µm/m)	+38 µm/m (6 µm/m) -4 µm/m 59 µm/m)
Dehnung Polycarbonat (Plattenrand)	+190 µm/m (53 µm/m) -193 µm/m (120 µm/m)	+313 µm/m (67 µm/m) -326 µm/m (27 µm/m)	+227 µm/m (15 µm/m) -273 µm/m (16 µm/m)
Dehnung Glas unten (Plattenrand)	-9 µm/m (15 µm/m) -92 µm/m (6 µm/m)	+9 µm/m (7 µm/m) -69 µm/m (4 µm/m)	-2 µm/m (5 µm/m) -49 µm/m (3 µm/m)

### 5.3.4 Bruchverhalten mit Dünnglas Optiwhite

Die Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln werden kraftgesteuert bis zum Versagen der Dünngläser beansprucht. Es liegt während der Versuche eine Temperatur von +21,4 °C und eine relative Luftfeuchtigkeit von 33,2 % rF vor. Alle Prüfkörper brechen ausgehend von der Glas-

**Tabelle 33** Ergebnisse für die Querdehnung zum Tragverhalten der Prüfkörper im Vierpunkt-Biegeversuch mit dem Dünnglas Leoflex. Der obere Wert beschreibt den Messwert an der Oberseite, der untere Wert stellt den Messwert an der Unterseite der entsprechenden Schicht dar. Die Standardabweichung ist in Klammern angegeben.

kante unter dem Lasteinleitungspunkt im Bereich der größten Beanspruchung. Bild 32 zeigt einen zerstörten Prüfkörper mit dem Bruchsprung an der Glaskante.



**Bild 32** Bruch der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel mit dem Dünnglas Optiwhite ausgehend von der Kante im Lasteinleitungsbereich.

Tabelle 34 stellt die Ergebnisse der Prüfung beim Versagen der Verbundtafel dar. Die Dünngläser der Prüfkörper PK 04 brechen teilweise bereits während der Haltezeit für die Untersuchungen zum Tragverhalten. Grundsätzlich versagt bei der Prüfung zur Bruchlast für alle Prüfkörper zuerst die untere Glastafel. Die Glasfestigkeit wird von der Anzahl der kritischen Mikro- und Makrorisse sowohl in der Oberfläche als auch in der Kante bestimmt. Innerhalb der Verbundtafel erfährt die untere Glastafel die größten Zugspannungen und versagt zuerst. Dabei bricht die Glastafel ausgehend von der Glaskante im Lasteinleitungsbereich. Innerhalb einer Prüferie weichen deshalb die Ergebnisse für die Bruchlast sowie der korrespondierenden Verformung und Dehnungen relativ stark voneinander ab. Die Bestimmung der Festigkeit von Flachglas wird meistens mit der Verteilungsfunktion nach Weibull unter Berücksichtigung eines großen Stichprobenumfangs ermittelt.<sup>33</sup> Die Messwerte von den drei untersuchten Verbundtafeln sind aus diesem Grund für die Bestimmung der charakteristischen Bruchfestigkeit der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel nicht ausreichend. Die Ergebnisse verdeutlichen eine qualitative Tendenz zum Bruchverhalten der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit einem geometrisch nichtlinearen Tragverhalten. Der Elastizitätsmodul des thermoplastischen Polyurethans im Versagensfall der Zwischenschicht liegt bei  $0,43 \text{ N/mm}^2$  und entspricht dem Wert der Untersuchungen zum Tragverhalten im intakten Zustand in Kapitel 5.3.

<sup>33</sup> Vergleiche Schneider 2016

Messwert	PK 04	PK 08	PK 12
Nennstärke	12,0 mm	16,0 mm	20,0 mm
Realdicke	11,7 mm (0,1 mm)	15,5 mm (0,1 mm)	19,4 mm (0,1 mm)
Messzeit	1 s	1 s	1 s
Bruchlast	331,5 N (45,6 N)	896,7 N (1,5 N)	1.449,4 N (132,8 N)
Verformung	40,0 mm (5,4 mm)	56,2 mm (5,4 mm)	50,6 mm (3,6 mm)
Kraft/Verformung	8,3 N/mm (0,7 N/mm)	16,1 N/mm (1,2 N/mm)	28,6 N/mm (0,6 N/mm)
Elastizitätsmodul der Zwischenschicht	0,45 N/mm <sup>2</sup> (0,05 N/mm <sup>2</sup> )	0,43 N/mm <sup>2</sup> (0,05 N/mm <sup>2</sup> )	0,42 N/mm <sup>2</sup> (0,01 N/mm <sup>2</sup> )

Die Dehnungen in Längsrichtung sowohl in Plattenmitte als auch am Plattenrand zeigt Tabelle 35. Bei den Glastafeln und der Polycarbonatplatte entstehen eine Druckzone an der Oberseite und eine Zugzone an der Unterseite. Die Messwerte der Polycarbonatplatte zeigen größere Abweichungen als die der Dünnglastafeln.

**Tabelle 34** Ergebnisse zum Versagen der Prüfkörper im Vierpunkt-Biegeversuch mit dem Dünnglas Optiwhite. Die Standardabweichung ist in Klammern angegeben.

Messwert	PK 04	PK 08	PK 12
Dehnung Glas oben (Plattenmitte)	-486 µm/m (60 µm/m) +297 µm/m (48 µm/m)	-783 µm/m (35 µm/m) +305 µm/m (38 µm/m)	-789 µm/m (61 µm/m) +216 µm/m (21 µm/m)
Dehnung Polycarbonat (Plattenmitte)	-554 µm/m (59 µm/m) +852 µm/m (121 µm/m)	-1.887 µm/m (65 µm/m) +2.205 µm/m (285 µm/m)	-2.720 µm/m (277 µm/m) +2.887 µm/m (180 µm/m)
Dehnung Glas unten (Plattenmitte)	-289 µm/m (50 µm/m) +429 µm/m (52 µm/m)	-317 µm/m (38 µm/m) +746 µm/m (44 µm/m)	-258 µm/m (8 µm/m) +707 µm/m (77 µm/m)
Dehnung Glas oben (Plattenrand)	-434 µm/m (94 µm/m) +276 µm/m (25 µm/m)	-705 µm/m (25 µm/m) +378 µm/m (53 µm/m)	-653 µm/m (37 µm/m) +350 µm/m (58 µm/m)
Dehnung Polycarbonat (Plattenrand)	-663 µm/m (141 µm/m) +784 µm/m (117 µm/m)	-1.869 µm/m (71 µm/m) +2.178 µm/m (249 µm/m)	-2.653 µm/m (327 µm/m) +3.005 µm/m (193 µm/m)
Dehnung Glas unten (Plattenrand)	-271 µm/m (28 µm/m) +396 µm/m (38 µm/m)	-355 µm/m (49 µm/m) +706 µm/m (26 µm/m)	-235 µm/m (26 µm/m) +739 µm/m (52 µm/m)

Die Messwerte in Querrichtung sind in Tabelle 36 dargestellt. In Plattenmitte ist die obere Glastafel über die gesamte Dicke positiv gedehnt, die Polycarbonatplatte und untere Glastafel zeigen eine Druck- und eine Zugzone. Am freien Rand des Laminats treten in jeder der einzelnen Schichten an der Oberseite positive und an der Unterseite negative Dehnungen auf.

**Tabelle 35** Ergebnisse der Längsdehnungen beim Versagen der Prüfkörper im Vierpunkt-Biegeversuch mit dem Dünnglas Optiwhite. Der obere Wert beschreibt den Messwert an der Oberseite, der untere Wert stellt den Messwert an der Unterseite der entsprechenden Schicht dar. Die Standardabweichung ist in Klammern angegeben.

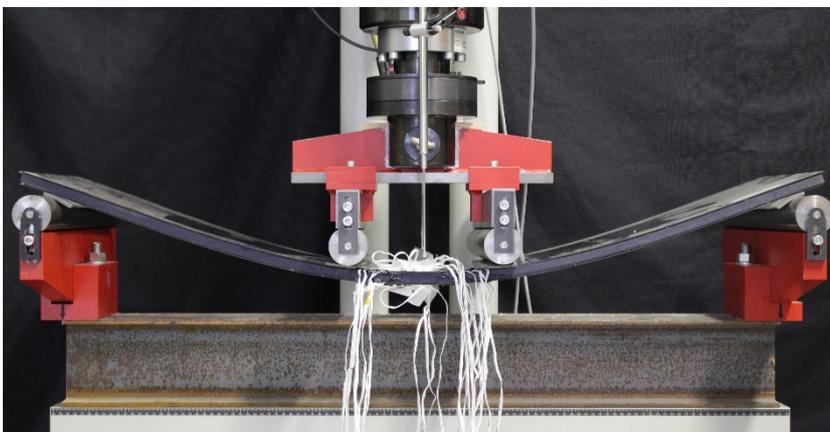
Messwert	PK 04	PK 08	PK 12
Dehnung Glas oben (Plattenmitte)	+6 $\mu\text{m/m}$ (3 $\mu\text{m/m}$ ) +34 $\mu\text{m/m}$ (6 $\mu\text{m/m}$ )	+17 $\mu\text{m/m}$ (5 $\mu\text{m/m}$ ) +55 $\mu\text{m/m}$ (8 $\mu\text{m/m}$ )	+23 $\mu\text{m/m}$ (8 $\mu\text{m/m}$ ) +86 $\mu\text{m/m}$ (7 $\mu\text{m/m}$ )
Dehnung Polycarbonat (Plattenmitte)	-57 $\mu\text{m/m}$ (27 $\mu\text{m/m}$ ) -8 $\mu\text{m/m}$ (43 $\mu\text{m/m}$ )	-132 $\mu\text{m/m}$ (46 $\mu\text{m/m}$ ) +24 $\mu\text{m/m}$ (36 $\mu\text{m/m}$ )	-217 $\mu\text{m/m}$ (47 $\mu\text{m/m}$ ) +151 $\mu\text{m/m}$ (40 $\mu\text{m/m}$ )
Dehnung Glas unten (Plattenmitte)	-33 $\mu\text{m/m}$ (10 $\mu\text{m/m}$ ) -14 $\mu\text{m/m}$ (0 $\mu\text{m/m}$ )	-76 $\mu\text{m/m}$ (7 $\mu\text{m/m}$ ) -24 $\mu\text{m/m}$ (5 $\mu\text{m/m}$ )	-85 $\mu\text{m/m}$ (9 $\mu\text{m/m}$ ) -19 $\mu\text{m/m}$ (12 $\mu\text{m/m}$ )
Dehnung Glas oben (Plattenrand)	+89 $\mu\text{m/m}$ (10 $\mu\text{m/m}$ ) -48 $\mu\text{m/m}$ (1 $\mu\text{m/m}$ )	+162 $\mu\text{m/m}$ (15 $\mu\text{m/m}$ ) -111 $\mu\text{m/m}$ (4 $\mu\text{m/m}$ )	+179 $\mu\text{m/m}$ (11 $\mu\text{m/m}$ ) -121 $\mu\text{m/m}$ (12 $\mu\text{m/m}$ )
Dehnung Polycarbonat (Plattenrand)	+128 $\mu\text{m/m}$ (45 $\mu\text{m/m}$ ) -170 $\mu\text{m/m}$ (44 $\mu\text{m/m}$ )	+516 $\mu\text{m/m}$ (16 $\mu\text{m/m}$ ) -651 $\mu\text{m/m}$ (73 $\mu\text{m/m}$ )	+873 $\mu\text{m/m}$ (113 $\mu\text{m/m}$ ) -1.021 $\mu\text{m/m}$ (76 $\mu\text{m/m}$ )
Dehnung Glas unten (Plattenrand)	+45 $\mu\text{m/m}$ (5 $\mu\text{m/m}$ ) -78 $\mu\text{m/m}$ (3 $\mu\text{m/m}$ )	+89 $\mu\text{m/m}$ (18 $\mu\text{m/m}$ ) -163 $\mu\text{m/m}$ (10 $\mu\text{m/m}$ )	+82 $\mu\text{m/m}$ (1 $\mu\text{m/m}$ ) -198 $\mu\text{m/m}$ (14 $\mu\text{m/m}$ )

Die Messergebnisse zu den Dehnungen in Längs- und Querrichtung liegen über den Werten aus den Untersuchungen zum Tragverhalten. Eine Laststeigerung führt zu größeren Verformungen einhergehend mit höheren Dehnungen. Die Last-Verformungs-Verhältnisse verändern sich allerdings nicht.

**Tabelle 36** Ergebnisse für die Querdehnung beim Versagen der Prüfkörper im Vierpunkt-Biegeversuch mit dem Dünnglas Optiwhite. Der obere Wert beschreibt den Messwert an der Oberseite, der untere Wert stellt den Messwert an der Unterseite der entsprechenden Schicht dar. Die Standardabweichung ist in Klammern angegeben.

### 5.3.5 Bruchverhalten mit Dünnglas Leoflex

Die Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln sollen bis zum Bruch im Vierpunkt-Biegeversuch beansprucht werden. Zum Versuchszeitpunkt liegt eine Temperatur von +21,7 °C bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 31,0 % rF vor. Bei keinem Prüfkörper ist eine Belastung bis zum Bruch möglich. Deshalb werden die Untersuchungen bei einer Verformung von  $L_s/10$  durchgeführt.



**Bild 33** Verformung von 100 mm der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel mit dem Dünnglas Leoflex.

Tabelle 37 zeigt die Ergebnisse bei einer Verformung von 100 mm. Die Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit dem Dünnglas Leoflex können hohe Lasten ohne Bruch aufnehmen. Dadurch ist im Vergleich zum Dünnglas Optiwhite eine Steigerung der Lasten um mehr als

30 % möglich. Der gemittelte Elastizitätsmodul der Zwischenschicht aus thermoplastischen Polyurethan beträgt  $0,42 \text{ N/mm}^2$  und ist geringer als in Kapitel 5.3 bei größerer Standardabweichung. Mit steigender Nenndicke des Polycarbonats reduziert sich der Anteil der Dünngläser an der Gesamtbiegesteifigkeit der Verbundtafel.

Messwert	PK 04 <sup>1)</sup>	PK 08 <sup>1)</sup>	PK 12 <sup>1)</sup>
Nenndicke	9,7 mm	13,7 mm	17,7 mm
Realdicke	9,5 mm (0,0 mm)	13,4 mm (0,0 mm)	17,3 mm (0,1 mm)
Messzeit	1 s	1 s	1 s
Kraft bei Verformung 100 mm	534,5 N (32,6 N)	1.163,1 N (142,2 N)	2.377,7 N (77,0 N)
Verformung	99,5 mm (1,6 mm)	100,6 mm (0,3 mm)	100,6 mm (0,6 mm)
Kraft/Verformung	5,4 N/mm (0,4 N/mm)	11,6 N/mm (1,4 N/mm)	23,6 N/mm (0,7 N/mm)
Elastizitätsmodul der Zwischenschicht	0,50 N/mm <sup>2</sup> (0,05 N/mm <sup>2</sup> )	0,43 N/mm <sup>2</sup> (0,07 N/mm <sup>2</sup> )	0,42 N/mm <sup>2</sup> (0,02 N/mm <sup>2</sup> )
<sup>1)</sup> Die Messwerte sind in dem Bereich abgelesen, bei dem die Verbundtafel eine Verformung von 100 mm erreicht.			

Die Auswertung der Messwerte in Längsrichtung zeigt Tabelle 38. Die Abweichungen der einzelnen Werte sind hoch, da die Verformung bei 100 mm mit unterschiedlicher Belastung der einzelnen Prüfkörper erreicht wird. Im oberen Bereich der Verbundtafeln entsteht eine Druck- und im unteren Bereich eine Zugzone analog zu den Ergebnissen aus dem Tragverhalten. Das Polycarbonat trägt hauptsächlich zur Lastabtragung bei und die Dehnungen steigen nichtlinear an.

**Tabelle 37** Ergebnisse zum Bruchverhalten der Prüfkörper im Vierpunkt-Biegeversuch mit dem Dünnglas Leoflex. Der obere Wert beschreibt den Messwert an der Oberseite, der untere Wert stellt den Messwert an der Unterseite der entsprechenden Schicht dar. Die Standardabweichung ist in Klammern angegeben.

Messwert	PK 04	PK 08	PK 12
Dehnung Glas oben (Plattenmitte)	-822 $\mu\text{m/m}$ (44 $\mu\text{m/m}$ ) -279 $\mu\text{m/m}$ (85 $\mu\text{m/m}$ )	-1.158 $\mu\text{m/m}$ (35 $\mu\text{m/m}$ ) -315 $\mu\text{m/m}$ (38 $\mu\text{m/m}$ )	-1.509 $\mu\text{m/m}$ (37 $\mu\text{m/m}$ ) -629 $\mu\text{m/m}$ (49 $\mu\text{m/m}$ )
Dehnung Polycarbonat (Plattenmitte)	-1.117 $\mu\text{m/m}$ (252 $\mu\text{m/m}$ ) +975 $\mu\text{m/m}$ (625 $\mu\text{m/m}$ )	-3.317 $\mu\text{m/m}$ (267 $\mu\text{m/m}$ ) +3.423 $\mu\text{m/m}$ (244 $\mu\text{m/m}$ )	-5.126 $\mu\text{m/m}$ (32 $\mu\text{m/m}$ ) +5.442 $\mu\text{m/m}$ (167 $\mu\text{m/m}$ )
Dehnung Glas unten (Plattenmitte)	+274 $\mu\text{m/m}$ (126 $\mu\text{m/m}$ ) +804 $\mu\text{m/m}$ (19 $\mu\text{m/m}$ )	+360 $\mu\text{m/m}$ (69 $\mu\text{m/m}$ ) +1.184 $\mu\text{m/m}$ (51 $\mu\text{m/m}$ )	+543 $\mu\text{m/m}$ (32 $\mu\text{m/m}$ ) +1.375 $\mu\text{m/m}$ (49 $\mu\text{m/m}$ )
Dehnung Glas oben (Plattenrand)	-673 $\mu\text{m/m}$ (62 $\mu\text{m/m}$ ) -183 $\mu\text{m/m}$ (79 $\mu\text{m/m}$ )	-964 $\mu\text{m/m}$ (110 $\mu\text{m/m}$ ) -136 $\mu\text{m/m}$ (138 $\mu\text{m/m}$ )	-1.279 $\mu\text{m/m}$ (52 $\mu\text{m/m}$ ) -391 $\mu\text{m/m}$ (50 $\mu\text{m/m}$ )
Dehnung Polycarbonat (Plattenrand)	-997 $\mu\text{m/m}$ (258 $\mu\text{m/m}$ ) +860 $\mu\text{m/m}$ (519 $\mu\text{m/m}$ )	-3.284 $\mu\text{m/m}$ (350 $\mu\text{m/m}$ ) +3.292 $\mu\text{m/m}$ (198 $\mu\text{m/m}$ )	-4.911 $\mu\text{m/m}$ (106 $\mu\text{m/m}$ ) +5.598 $\mu\text{m/m}$ (147 $\mu\text{m/m}$ )
Dehnung Glas unten (Plattenrand)	+227 $\mu\text{m/m}$ (162 $\mu\text{m/m}$ ) +682 $\mu\text{m/m}$ (100 $\mu\text{m/m}$ )	+189 $\mu\text{m/m}$ (80 $\mu\text{m/m}$ ) +986 $\mu\text{m/m}$ (61 $\mu\text{m/m}$ )	+434 $\mu\text{m/m}$ (89 $\mu\text{m/m}$ ) +1.400 $\mu\text{m/m}$ (51 $\mu\text{m/m}$ )

Die Querdehnungen in Tabelle 39 zeigen im oberen Bereich der Verbundtafeln eine Zug- und im unteren Bereich eine Druckzone analog zum Tragverhalten.

**Tabelle 38** Ergebnisse der Längsdehnungen zum Bruchverhalten der Prüfkörper im Vierpunkt-Biegeversuch mit dem Dünnglas Leoflex. Der obere Wert beschreibt den Messwert an der Oberseite, der untere Wert stellt den Messwert an der Unterseite der entsprechenden Schicht dar. Die Standardabweichung ist in Klammern angegeben.

Messwert	PK 04	PK 08	PK 12
Dehnung Glas oben (Plattenmitte)	+116 $\mu\text{m/m}$ (10 $\mu\text{m/m}$ ) +90 $\mu\text{m/m}$ (3 $\mu\text{m/m}$ )	+143 $\mu\text{m/m}$ (33 $\mu\text{m/m}$ ) +151 $\mu\text{m/m}$ (31 $\mu\text{m/m}$ )	+195 $\mu\text{m/m}$ (12 $\mu\text{m/m}$ ) +236 $\mu\text{m/m}$ (8 $\mu\text{m/m}$ )
Dehnung Polycarbonat (Plattenmitte)	+52 $\mu\text{m/m}$ (147 $\mu\text{m/m}$ ) -29 $\mu\text{m/m}$ (136 $\mu\text{m/m}$ )	-52 $\mu\text{m/m}$ (76 $\mu\text{m/m}$ ) +79 $\mu\text{m/m}$ (118 $\mu\text{m/m}$ )	-333 $\mu\text{m/m}$ (42 $\mu\text{m/m}$ ) +335 $\mu\text{m/m}$ (53 $\mu\text{m/m}$ )
Dehnung Glas unten (Plattenmitte)	-115 $\mu\text{m/m}$ (25 $\mu\text{m/m}$ ) -125 $\mu\text{m/m}$ (21 $\mu\text{m/m}$ )	-170 $\mu\text{m/m}$ (21 $\mu\text{m/m}$ ) -142 $\mu\text{m/m}$ (26 $\mu\text{m/m}$ )	-238 $\mu\text{m/m}$ (12 $\mu\text{m/m}$ ) -179 $\mu\text{m/m}$ (8 $\mu\text{m/m}$ )
Dehnung Glas oben (Plattenrand)	+136 $\mu\text{m/m}$ (9 $\mu\text{m/m}$ ) +31 $\mu\text{m/m}$ (9 $\mu\text{m/m}$ )	+236 $\mu\text{m/m}$ (37 $\mu\text{m/m}$ ) +4 $\mu\text{m/m}$ (27 $\mu\text{m/m}$ )	+321 $\mu\text{m/m}$ (10 $\mu\text{m/m}$ ) +36 $\mu\text{m/m}$ (10 $\mu\text{m/m}$ )
Dehnung Polycarbonat (Plattenrand)	+284 $\mu\text{m/m}$ (97 $\mu\text{m/m}$ ) -260 $\mu\text{m/m}$ (165 $\mu\text{m/m}$ )	+1.027 $\mu\text{m/m}$ (110 $\mu\text{m/m}$ ) -1.116 $\mu\text{m/m}$ (107 $\mu\text{m/m}$ )	+1.650 $\mu\text{m/m}$ (20 $\mu\text{m/m}$ ) -1.839 $\mu\text{m/m}$ (96 $\mu\text{m/m}$ )
Dehnung Glas unten (Plattenrand)	-29 $\mu\text{m/m}$ (34 $\mu\text{m/m}$ ) -150 $\mu\text{m/m}$ (15 $\mu\text{m/m}$ )	-3 $\mu\text{m/m}$ (22 $\mu\text{m/m}$ ) -232 $\mu\text{m/m}$ (18 $\mu\text{m/m}$ )	-59 $\mu\text{m/m}$ (14 $\mu\text{m/m}$ ) -374 $\mu\text{m/m}$ (5 $\mu\text{m/m}$ )

**Tabelle 39** Ergebnisse der Querdehnungen zum Bruchverhalten der Prüfkörper im Vierpunkt-Biegeversuch mit dem Dünnglas Leoflex. Der obere Wert beschreibt den Messwert an der Oberseite, der untere Wert stellt den Messwert an der Unterseite der entsprechenden Schicht dar. Die Standardabweichung ist in Klammern angegeben.

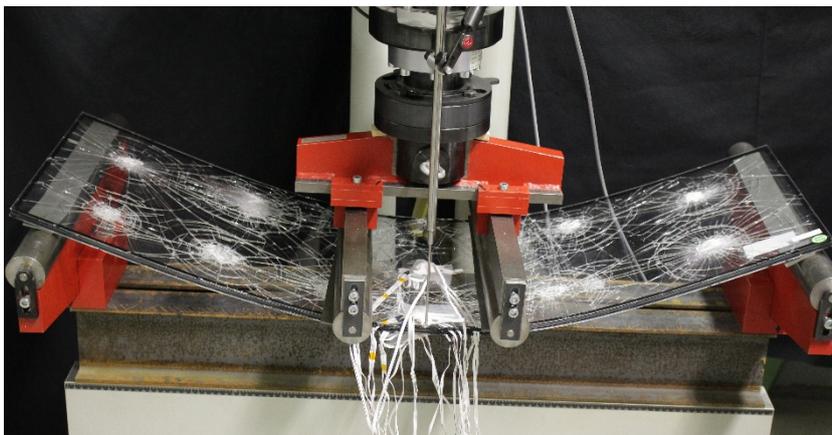
## 5.4 Untersuchungen zum Resttragverhalten

Die Resttragfähigkeit wird als Widerstand gegen ein vollständiges Versagen einer teilzerstörten Verglasung verstanden. Die Untersuchungen zum Resttragverhalten zielen auf die Lastabtragung im planmäßig zerstörten Zustand der Dünngläser ab.

### 5.4.1 Versuchsaufbau und Versuchsprogramm

Glas als sprödes Material versagt schlagartig ohne Vorankündigung. Verbundsicherheitsglas bietet durch die Verwendung von weiteren Materialien, wie beispielsweise polymere Folien als Zwischenschichten, eine passive Sicherheit gegen Verletzungen von Personen sowie eine Resttragfähigkeit.<sup>34</sup> Eine ausreichende Resttragfähigkeit wird entweder experimentell oder für Verglasungen im teilzerstörten Zustand rechnerisch nachgewiesen. Dabei dürfen gebrochene Glastafeln nicht angesetzt werden. Weiterhin bestimmen konstruktive Vorgaben eine bereits nachgewiesene Resttragfähigkeit von Verbundsicherheitsglas.

Die Untersuchungen zum Resttragverhalten der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln erfolgen experimentell an den Prüfkörpern aus Kapitel 5.3 mit gebrochenen Glastafeln. Die Dünngläser sind an 12 definierten Stellen an der Ober- und Unterseite für den anschließenden Vierpunkt-Biegeversuch zerstört. Die Verbundtafeln mit den gebrochenen Dünngläsern werden kraftgesteuert mit 5 N/s bis zu einer Last von 200 N für eine Dauer von 120 s beansprucht. Die Auswertung erfolgt anschließend für eine Zeit von 60 s. Bild 34 zeigt den Vierpunkt-Biegeversuch mit einer planmäßig zerstörten Verbundtafel.



**Bild 34** Untersuchung zum Resttragverhalten mit einer planmäßig zerstörten Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel.

### 5.4.2 Resttragverhalten mit Dünnglas Optiwhite

Bild 35 zeigt eine planmäßig zerstörte Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel zur Prüfung des Resttragverhaltens. Zum Versuchszeitpunkt

<sup>34</sup> Vergleiche Kapitel 2

liegt eine Temperatur von  $+23,6\text{ °C}$  bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von  $30,7\text{ \%rF}$  vor.



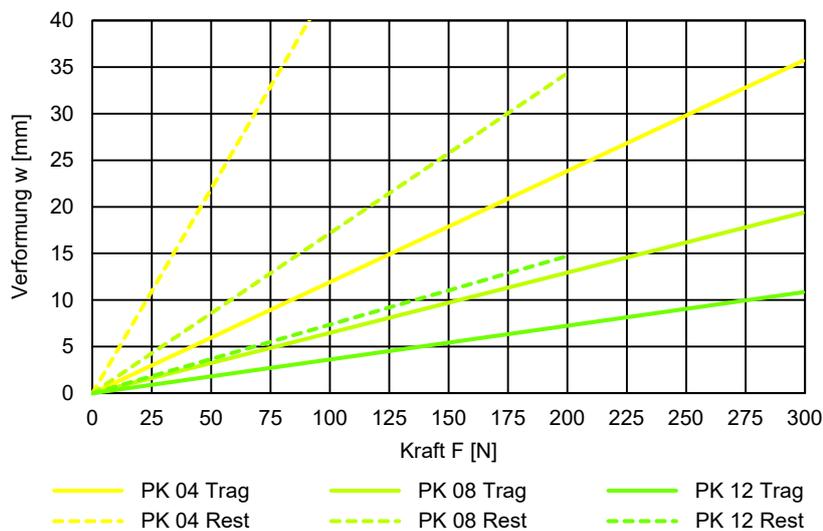
**Bild 35** Planmäßig zerstörte Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel mit dem Dünnglas Optiwhite zur Untersuchung des Resttragverhaltens.

Tabelle 40 beschreibt die Ergebnisse zum Resttragverhalten. Die Prüfkörper PK 04 mit einer Polycarbonat tafel von 4 mm weisen eine Verformung von über 100 mm auf. Der Grenzwert der Verformung für die Betrachtung des Resttragverhaltens wird analog zum Grenzwert der Verformung beim Tragverhalten mit der maximal zulässigen Verformung von  $L_s/10$  festgelegt. Mit zunehmender Nenndicke der Polycarbonat tafel ist eine Erhöhung des Last-Verformungs-Verhältnisses nach einem nichtlinearen Verlauf zu beobachten. Neben den Messwerten zu den Längsdehnungen werden auch die Querdehnungen der Polycarbonat tafel aufgenommen. Die druckbeanspruchte Oberseite zeigt geringere Werte als die zugbeanspruchte Unterseite vom Polycarbonat und verdeutlicht damit das günstige Resttragverhalten der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln. Die untere gebrochene Glas tafel beteiligt sich nicht mehr an der Lastabtragung während die Bruchstücke der oberen Glas tafel die Druckzone vergrößern. Die Polycarbonat tafel übernimmt die Lastabtragung in der Druckzone gemeinsam mit den Glasbruchstücken.

Messwert	PK 04	PK 08	PK 12
Nennstärke	12,0 mm	16,0 mm	20,0 mm
Realdicke	11,7 mm (0,1 mm)	15,5 mm (0,1 mm)	19,4 mm (0,1 mm)
Messzeit	1 s	60 s	60 s
Kraft	202,5 N (0,3 N)	200,3 N (0,3 N)	200,6 N (0,1 N)
Verformung	88,9 mm (10,7 mm)	34,4 mm (1,0 mm)	14,8 mm (0,7 mm)
Kraft/Verformung	2,3 N/mm (0,3 N/mm)	5,7 N/mm (0,2 N/mm)	13,3 N/mm (0,5 N/mm)
Dehnung Polycarbonat (Plattenmitte Längsrichtung)	+1.107 µm/m (10 µm/m) +2.672 µm/m (305 µm/m)	-628 µm/m (75 µm/m) +1.752 µm/m (82 µm/m)	-616 µm/m (31 µm/m) +979 µm/m (26 µm/m)
Dehnung Polycarbonat (Plattenrand Längsrichtung)	+398 µm/m (87 µm/m) +1.831 µm/m (1.033 µm/m)	-579 µm/m (69 µm/m) +1.804 µm/m (76 µm/m)	-561 µm/m (40 µm/m) +1.093 µm/m (75 µm/m)
Dehnung Polycarbonat (Plattenmitte Querrichtung)	-739 µm/m (12 µm/m) -457 µm/m (166 µm/m)	-393 µm/m (30 µm/m) -28 µm/m (40 µm/m)	-24 µm/m (20 µm/m) -145 µm/m (10 µm/m)
Dehnung Polycarbonat (Plattenrand Querrichtung)	-310 µm/m (169 µm/m) -769 µm/m (14 µm/m)	+110 µm/m (19 µm/m) -600 µm/m (12 µm/m)	+191 µm/m (22 µm/m) -420 µm/m (36 µm/m)

Die Last-Verformungs-Kurven aus den Untersuchungen zum Resttragverhalten im Vergleich zum Tragverhalten zeigt Bild 36. Die Verformungen der Prüfkörper PK 04 sind unter der gegebenen Belastung am größten und zeigen eine geringere Gesamtbiegesteifigkeit. Mit zunehmender Polycarbonatdicke flacht die Kraft-Verformungs-Kurve ab. Das Verhältnis zwischen der aufgebrachten Last und der Verformung ist nicht mehr linear. Die planmäßig zerstörten Verbundtafeln weisen größere Verformungen bei geringerer Last auf. Die Gesamtbiegesteifigkeit nimmt im Vergleich zu den intakten Verbundtafeln ab. Mit wachsender Polycarbonatdicke nähern sich die Kurven für das Trag- und Resttragverhalten an. Der Einfluss des Dünnglases an der Gesamtbiegesteifigkeit reduziert sich. Das Polycarbonat trägt maßgebend zur Lastabtragung bei.

**Tabelle 40** Ergebnisse zum Resttragverhalten der Prüfkörper im Vierpunkt-Biegeversuch mit dem Dünnglas Optiwhite. Der obere Wert der Dehnung beschreibt den Messwert an der Oberseite, der untere Wert stellt den Messwert an der Unterseite der entsprechenden Schicht dar. Die Standardabweichung ist in Klammern angegeben.



**Bild 36** Last-Verformungs-Kurven im Vierpunkt-Biegeversuch. Darstellung der Kraft in Abhängigkeit der Verformung für die Untersuchungen zum Trag- und Resttragverhalten der Dünnglas Polycarbonat-Verbundtafeln mit dem Dünnglas Optiwhite.

### 5.4.3 Resttragverhalten mit Dünnglas Leoflex

Bild 37 zeigt eine planmäßig zerstörte Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel zur Prüfung des Resttragverhaltens. Zum Versuchszeitpunkt liegt eine Temperatur von +23,6 °C bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 31,8 %rF vor.



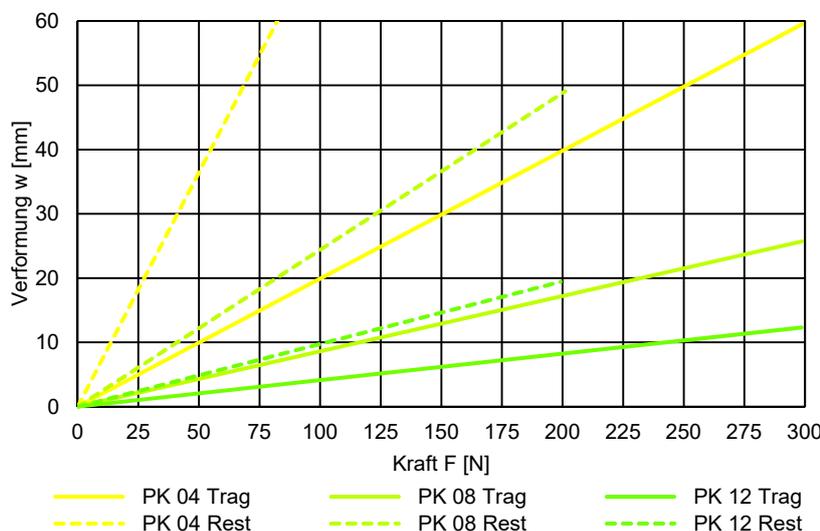
**Bild 37** Planmäßig zerstörte Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel mit dem Dünnglas Leoflex zur Untersuchung des Resttragverhaltens.

Tabelle 41 zeigt die Ergebnisse zum Resttragverhalten der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln. Neben den Messwerten zur Dehnung in Längsrichtung werden die Dehnungen in Querrichtung der Polycarbonatplatte aufgenommen. Die Verformung der Prüfkörper PK 04 wird auf 100 mm begrenzt. Die untere Glaskomponente im gebrochenen Zustand beteiligt sich nicht an der Lastabtragung. Der Grenzwert wird mit einer Last von 137,7 N erreicht. Die ungleichmäßige Verteilung der Längsdehnungen für die Polycarbonatplatte weist auf eine Mitwirkung der oberen Glaskomponente an der Lastabtragung hin. Die Glasbruchstücke verzahnen sich und vergrößern dabei die Druckzone. Bei PK 04 ist die Polycarbonatplatte in Plattenmitte über die gesamte Querschnittsdicke positiv gedehnt.

Messwert	PK 04 <sup>1)</sup>	PK 08	PK 12
Nennstärke	9,7 mm	13,7 mm	17,7 mm
Realdicke	9,5 mm (0,0 mm)	13,4 mm (0,0 mm)	17,3 mm (0,1 mm)
Messzeit	1 s	60 s	60 s
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)
Kraft/Verformung	1,4 N/mm (0,0 N/mm)	4,2 N/mm (0,7 N/mm)	10,3 N/mm (0,7 N/mm)
Dehnung Polycarbonat (Plattenmitte Längsrichtung)	+502 µm/m (84 µm/m) +3.406 µm/m (634 µm/m)	-1.187 µm/m (296 µm/m) +2.265 µm/m (261 µm/m)	-804 µm/m (25 µm/m) +1.126 µm/m (7 µm/m)
Dehnung Polycarbonat (Plattenrand Längsrichtung)	-164 µm/m (312 µm/m) +2.219 µm/m (161 µm/m)	-1.132 µm/m (347 µm/m) +2.213 µm/m (308 µm/m)	-711 µm/m (24 µm/m) +1.284 µm/m (55 µm/m)
Dehnung Polycarbonat (Plattenmitte Querrichtung)	-753 µm/m (130 µm/m) -492 µm/m (69 µm/m)	-528 µm/m (64 µm/m) +187 µm/m (36 µm/m)	+25 µm/m (35 µm/m) -151 µm/m (7 µm/m)
Dehnung Polycarbonat (Plattenrand Querrichtung)	+116 µm/m (83 µm/m) -820 µm/m (10 µm/m)	+429 µm/m (141 µm/m) -862 µm/m (121 µm/m)	+270 µm/m (11 µm/m) -502 µm/m (15 µm/m)
<sup>1)</sup> Die Messwerte sind in dem Bereich abgelesen, bei dem die Verbundtafel eine Verformung von 100 mm erreicht.			

Die Last-Verformungs-Kurven aus den Untersuchungen zum Resttragverhalten im Vergleich zum Tragverhalten zeigt Bild 38. Die größten Verformungen treten bei den Prüfkörpern PK 04 mit 4 mm Polycarbonat auf. Eine Last von 50 N erzeugt eine Verformung von 10 mm im intakten Zustand der Glastafeln in Prüfung 1 und eine Verformung von 35 mm im planmäßig zerstörten Zustand in Prüfung 5. Mit steigender Polycarbonatdicke wird die Differenz weniger, da sich die Beteiligung der äußeren Glastafeln an der Lastabtragung verringert.

**Tabelle 41** Ergebnisse zum Resttragverhalten der Prüfkörper im Vierpunkt-Biegeversuch mit dem Dünnglas Leoflex. Der obere Wert der Dehnung beschreibt den Messwert an der Oberseite, der untere Wert stellt den Messwert an der Unterseite der entsprechenden Schicht dar. Die Standardabweichung ist in Klammern angegeben.



**Bild 38** Last-Verformungs-Kurve im Vierpunkt-Biegeversuch. Darstellung der Kraft in Abhängigkeit der Verformung für die Untersuchungen zum Trag- und Resttragverhalten der Dünnglas Polycarbonat-Verbundtafeln mit dem Dünnglas Leoflex.

## 6 Herstellprozess

In diesem Abschnitt werden die maßgebenden Prozessparameter der Herstellung identifiziert und ermittelt. Daraus ergeben sich Besonderheiten bei der Einführung in den vorhandenen Prozessablauf. Die bestehende Prozesskette wird um die maßgebenden Prozessparameter ergänzt und beschrieben.

### 6.1 Identifikation von Prozessparametern

#### 6.1.1 Material

Die Herstellung der Zwischenschicht von Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln im Gießharzverfahren ist in der Regel kostenintensiver als bei konventionellem Verbundsicherheitsglas, da der Personalaufwand höher als beim Autoklavverfahren liegt. Die in Kapitel 3 ausgewählten Materialien müssen aufeinander abgestimmt sein, um reproduzierbare Ergebnisse zu ermöglichen. Eine hohe Qualität der Ausgangsmaterialien beeinflusst maßgeblich die Eigenschaften des Endprodukts. Sowohl das Polycarbonat Lexan 9030 als auch das thermoplastische Polyurethan aus werkseigener Herstellung finden bereits in den vorhandenen Produkten des Unternehmens SiLATEC Sicherheits- und Laminatglastechnik GmbH eine Anwendung. Beide Materialien werden weiterhin verwendet. Der Einsatz von zwei innovativen Dünngläser ist neu im Herstellungsprozess.

Das thermisch entspannte Kalk-Natronsilikatglas Optiwhite von Pilkington Deutschland AG ist kurzfristig und auf den gewünschten Zugschnitt verfügbar. Die Maximalabmessungen liegen bei 1.605 mm auf 1.250 mm. Eine größere Menge der maximalen Abmessungen von 3.210 mm auf 6.000 mm sind auf Anfrage durch Pilkington Deutschland AG lieferbar.

Das chemisch vorgespannte Alumo-Silicatglas Leoflex von Asahi Glass Co., Ltd. wird ausschließlich in Japan hergestellt. Das Unternehmen bietet eine Lieferung bis zum Verladeort an.<sup>35</sup> Der logistische Aufwand zur Beschaffung des Dünnglases ist deshalb zeit- und kostenintensiv. Neben den Herstellungskosten müssen die Transport- und die Einfuhrkosten bei der Preiskalkulation berücksichtigt werden. Die Vorspannkörbe für die chemische Vorspannung begrenzen die maximalen Abmessungen der Dünngläser. Momentan betragen diese 1.650 mm auf 2.070 mm. Größere Abmessungen sind auf Anfrage mit erhöhten Kosten individuell herstellbar.

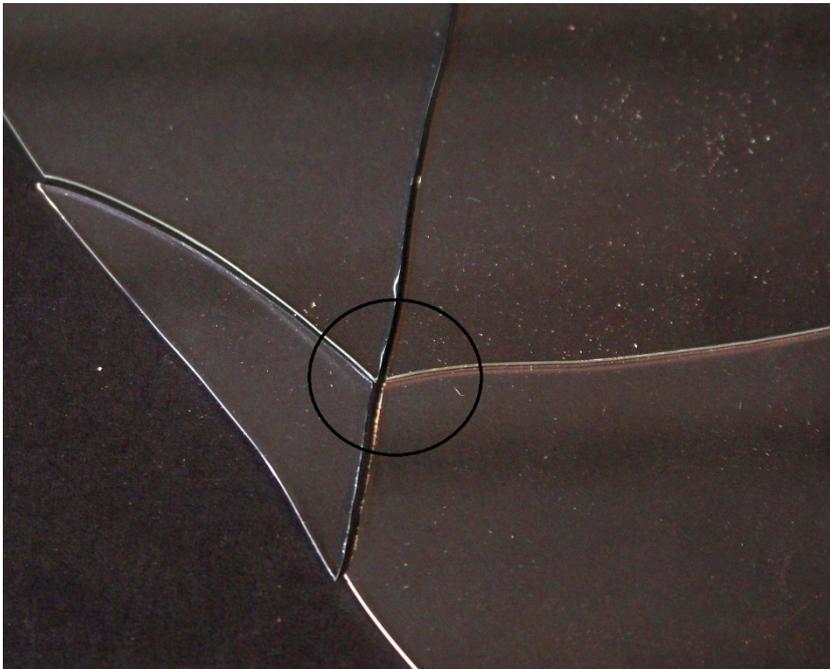
<sup>35</sup> Die internationale Handelsklausel »Free On Board« (FOB) beschreibt die Lieferung bis zum vereinbarten Verladeort. Dies ist zu einem Seehafen oder einem Flughafen möglich.

### 6.1.2 Materialverarbeitung

Das Dünnglas für die Verbundtafeln wird mit den erforderlichen Abmessungen direkt vom Hersteller bezogen. Die Rohstoffe zur Verarbeitung des thermoplastischen Polyurethans stehen in Form von Granulat vom Hersteller zur Verfügung und bilden die Grundlage zur Herstellung der Zwischenschicht für die Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln. Das Polycarbonat Lexan 9030 wird vor der Herstellung der Verbundtafeln mit den erforderlichen Abmessungen und Nenndicken von einem Händler des Herstellers erworben. Eine nachträgliche Anpassung auf geänderte Abmessungen ist auch vor Ort möglich.

Das Dünnglas Optiwhite bietet als thermisch entspanntes Floatglas die Möglichkeit der nachträglichen Bearbeitung durch Schneiden. Dazu können herkömmliche Glasschneider, das Wasserstrahlverfahren oder das Laserschneidverfahren verwendet werden. Ein Glasschneider ritzt die Glasoberfläche an und der Bruch entsteht an der Sollbruchstelle. Das Wasserstrahlverfahren schneidet Glas mit einer Dicke von bis zu 20 mm. Der Wasserstrahl weist einen Druck von bis zu 6.200 bar auf. Das Laserschneidverfahren durchtrennt mit einer gepulsterten Strahlung das Glas. Um Kosten zu reduzieren, ist die Bestellung auf Zuschnitt mit der gewünschten Kantenbeschaffenheit vorzuziehen.

Ein nachträgliches Schneiden von dem Dünnglas Leoflex ist nur unter hohem Energieeinsatz möglich. Mit Glasschneider ebenso wie mit dem Wasserstrahlverfahren ist ein Zuschnitt des chemisch vorgespannten Glases aufgrund des eingepprägten Eigenspannungszustandes nicht möglich. Bedingt durch den Ionenaustausch während des Vorspannprozesses bildet sich eine Druckspannung in der Oberfläche aus. Eine Überschreitung der Oberflächenspannung führt bei dem Dünnglas ausgehend von der maximalen Aufbringkraft ohne Vorankündigung zum Bruch. Dies erschwert das nachträgliche Schneiden der Verglasung. Das Bruchbild von chemisch vorgespanntem Glas ähnelt dem von teilvorgespanntem Glas, da die gespeicherte Energie im Vergleich zum thermisch vollvorgespannten Einscheibensicherheitsglas geringer ist.

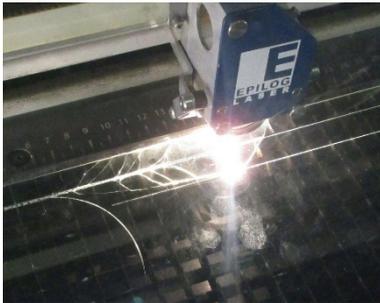


**Bild 39** Mechanisches Schneiden des Dünnglases Leoflex mit einem Glasschneider. Das Bruchbild ähnelt dem von teilvorgespanntem Glas. Der Bruchursprung ist in der Mitte eindeutig zu erkennen.

Im Rahmen des Forschungsprojektes wird das Laserschneiden mit CO<sub>2</sub>-Laser in Kurzimpulstechnik auf die prinzipielle Anwendbarkeit mit einem Epilog Fusion M2 40 Laser für das chemisch vorgespannte Dünnglas Leoflex untersucht. Die Faserlaserleistung lässt sich stufenweise auf bis zu 50 W einstellen. Insgesamt werden zwei Stufen mit 25 % und 100 % Leistung untersucht. Die niedrigere Stufe erfordert eine mehrmalige Bearbeitung des Glases. Das Dünnglas bricht allerdings nicht entlang der vorgegeben Querschnittsschwächung. Unter Maximalleistung bricht das Glas während der Bearbeitung ohne Vorankündigung. Das Bruchbild ist feiner als bei einem mechanischen Verfahren. Mit diesem Laser lässt sich das Dünnglas Leoflex nicht nachträglich schneiden.

Das Günter-Köhler-Institut für Fügetechnik und Werkstoffprüfung in Jena besitzt die Möglichkeit, einen CO<sub>2</sub>-Laser exakter zu steuern und damit prinzipiell chemisch vorgespanntes Glas zu schneiden. Mit einem abtragenden Verfahren erfolgt unter Berücksichtigung der Glas-temperatur eine rissfreie Bearbeitung. Die Herstellung von kreisförmigen Ausschnitten mit einem Durchmesser von 10 mm beziehungsweise 20 mm ist ohne Schwierigkeiten möglich. Allerdings stellt sich ein Neigungswinkel der Kanten, dargestellt in Bild 27, von etwa 10 ° ein. Die Untersuchung der Kanten erfolgt mit einem Rasterelektronenmikroskop. Bei dem Laserschnitt zeigt sich eine stark profilierte Kantenoberfläche. Im unteren Bereich bricht das Glas teilweise. Im Vergleich dazu zeigt die Bruchkante mit einem Glasschneider eine glattere Oberfläche. Auch hier lassen sich Oberflächenschäden und Risse erkennen, aus der eine Festigkeitsminderung resultieren könnte. Die

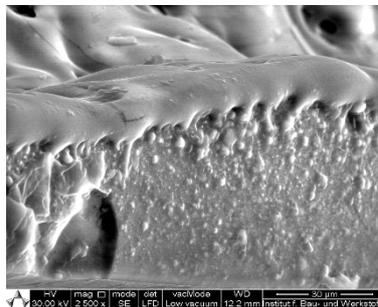
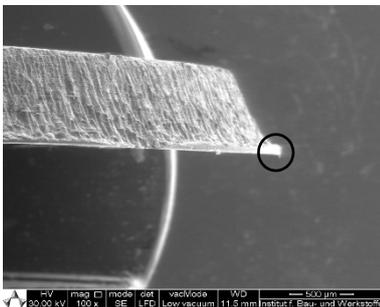
Originalkante wird vor dem Vorspannprozess geschliffen und zeigt geringere Oberflächendefekte auf. Die erkennbare Oberflächenstruktur entsteht nach dem Ionenaustausch im chemischen Vorspannprozess. In Bild 28 sind die Oberflächen der drei unterschiedlich bearbeiteten Kanten durch Vergrößerung mit einem Rasterelektronenmikroskop dargestellt.



**Bild 40** Laserschneider. Mit einer exakten Steuerung des Lasers ist ein nachträgliches Schneiden von chemisch vorgespanntem Glas prinzipiell möglich.

Links Laserschneiden an der Universität Siegen. Das Glas zerspringt nicht entlang der Sollbruchstelle.

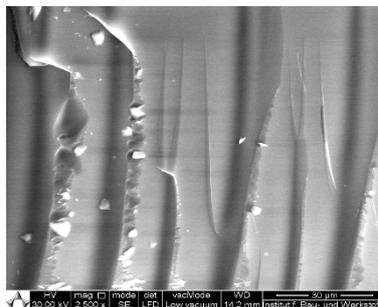
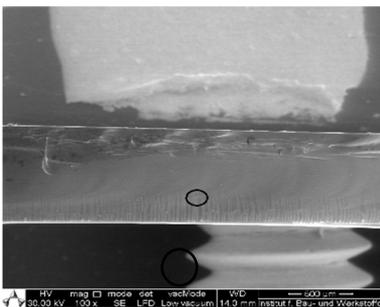
Rechts Ergebnis des Laserschneidverfahrens am Günter-Köhler-Institut für Fügetechnik und Werkstoffprüfung. Die Kanten weisen einen Neigungswinkel von etwa 10° auf.



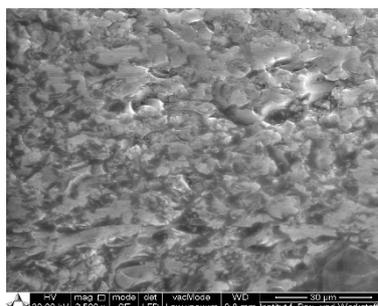
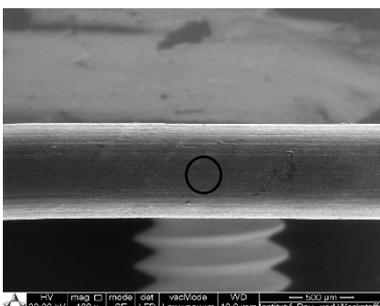
**Bild 41** Vergrößerungen der drei unterschiedlichen Kanten mit einem Rasterelektronenmikroskop. Der Kreis zeigt die Stelle des vergrößerten Bildausschnittes.

Oben Laserkante  
 Links 100-fach vergrößert  
 Rechts 2.500-fach vergrößert

Mitte Bruchkante  
 Links 100-fach vergrößert  
 Rechts 2.500-fach vergrößert



Unten Originalkante  
 Links 100-fach vergrößert  
 Rechts 2.500-fach vergrößert



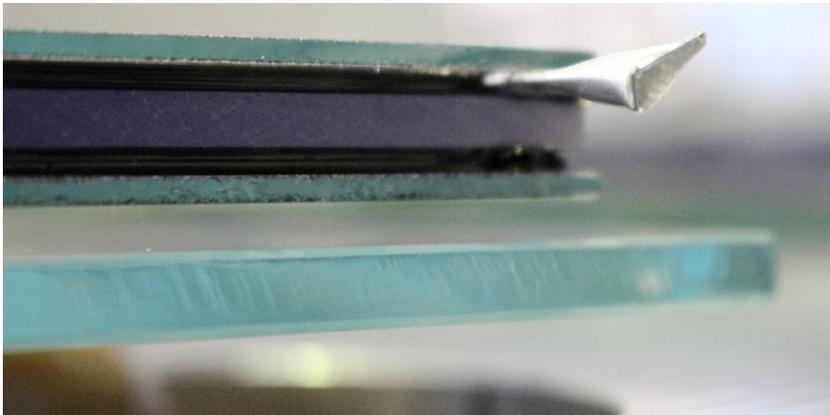
Die Ergebnisse zeigen, dass für chemisch vorgespanntes Dünnglas prinzipiell eine nachträgliche Bearbeitung durch Schneiden mit dem Laserschneidverfahren möglich ist. Die nachträglich bearbeiteten Kanten weisen allerdings eine andere Beschaffenheit als bei der Originalkante auf. Untersuchungen einer Original-, Bruch- und Laserschnittkante mit einem Rasterelektronenmikroskop bestätigen die Oberflächendefekte nach dem Schneiden. Eine weitergehende Untersuchung zur möglichen Reduktion der Kantenfestigkeit durch das nachträgliche Schneiden von chemisch vorgespannten Dünnglas soll in einem zukünftigen Forschungsprojekt intensiver betrachtet werden. Eine Aussage ist beispielsweise mit einem bildgebenden Polarimetersystem zur automatischen Erfassung der Eigenspannungen in transparenten Systemen möglich. Chemisch vorgespanntes Glas sollte entsprechend den bisherigen Erkenntnissen nicht nach dem Vorspannprozess bearbeitet werden.

## 6.2 Betrachtung der Prozesskette

Eine Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel besteht aus mindestens zwei äußeren Dünngläsern und einer innenliegenden Polycarbonattafel, verbunden über eine Zwischenschicht aus thermoplastischem Polyurethan. Die Herstellung der Prüfkörper erfolgt durch das Unternehmen SiLATEC Sicherheits- und Laminatglastechnik GmbH. Das Unternehmen besitzt bereits langjährige Erfahrungen in der Herstellung von Glas-Polycarbonat-Verbundtafeln. Bei der Herstellung der Verbundtafeln aus innovativem Dünnglas und Polycarbonat ist während des Herstellprozesses auf verschiedene Besonderheiten zu achten.

Die Herstellung der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln im Gießharzverfahren stellt mit einem mehrkomponentigen thermoplastischen Polyurethan den Verbund zwischen den einzelnen Schichten sicher. Zur Verbesserung der Haftung zur Zwischenschicht werden die Oberflächen der Dünngläser mit Isopropanol gereinigt. Dabei ist eine Anpassung des Drucks der Reinigungsanlage auf die Glasdicke erforderlich. Die Untersuchungen dazu ergeben eine Empfehlung für eine manuelle Reinigung von Dünngläsern mit einer Nenndicke unter 2 mm. Im Anschluss wird am Rand der untersten Dünnglastafel ein Butylband eingelegt, das die gewünschte Dicke der Zwischenschicht einstellt. Die aufgelegte Polycarbonattafel schließt das Volumen für das anschließend einzufüllende Polyurethan ein. Eine Einlaufhülse in der Mitte der längeren Kante und mehrere Auslaufhülsen sind für das Befüllen mit dem Material der Zwischenschicht sowie für das Entlüften notwendig. Das flüssige Polyurethan wird unter Druck in erforderlicher Menge in das Volumen eingefüllt. Nach der vollständigen Befüllung werden die Auslaufhülsen verschlossen. Das Polyurethan härtet mit einsetzender chemischen Reaktion bei Raumtemperatur ohne zusätzlichem Einfluss von Feuchtigkeit oder Bestrahlung innerhalb einer

Dauer von 24 h aus. Alle Hülsen werden entfernt und die entstehenden Öffnungen mit einem Silikon beziehungsweise Butyl verschlossen. Bedingt durch die geringe Steifigkeit der Dünngläser sind geeignete Decktafeln zum Schutz der Verbundtafel sowie vor ungewünschtem Glasbruch während der Produktion erforderlich. In einem zweiten Arbeitsschritt wiederholt sich das Verfahren für die zweite Hälfte der Verbundtafel. Das Butylband wird auf das Polycarbonat gelegt und die Glastafel schließt das Volumen für die Zwischenschicht ein. Anschließend erfolgt die Befüllung mit Polyurethan analog zur Herstellung des unteren Teils der Verbundtafel.



**Bild 42** Schutz der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln durch geeignete Decktafeln während der Produktion.

Das aufwendigere Gießharzverfahren ist zur Herstellung der Verbundtafeln wegen der geringen Steifigkeit der Dünngläser im Unterschied zum weitgehend automatisierten Autoklavverfahren zu empfehlen. Individuelle Abmessungen und Anforderungen an Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln sind im Gesamtprozess dadurch einfach zu berücksichtigen und auch für komplexe Geometrien herstellbar. Der Aushärtprozess der Zwischenschicht aus Polyurethan findet bei Raumtemperatur statt. Dadurch treten keine Zwangsbeanspruchungen im Querschnitt durch die unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten der einzelnen Schichten auf, die während der Herstellung mit dem Autoklavverfahren durch die für die Laminierung erforderlichen Temperaturen entstehen.

### 6.3 Herstellung eines Prototypens

Ein Prototyp soll als Exponat auf der Sonderschau »glass technology live« im Rahmen der Glasstec 2018 in Düsseldorf ausgestellt werden. Darüber hinaus erfolgen Veröffentlichungen und Vorträge auf den Fachtagungen Challenging Glass 6 in Delft unter »Research on Thin Glass-Polycarbonate Composite Panels«, Glasbau 2018 in Dresden unter »Entwicklung und Untersuchung von Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln« sowie Engineered Transparency in Düsseldorf unter »Development of Thin Glass-Polycarbonate Composite Panels«.

Abhängig von den gewählten Randbedingungen wird für die Untersuchungen der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit dem Kugelfallversuch, der Prüfung bei hoher Temperatur, in der Feuchte und unter Bestrahlung sowie die Prüfung mit der Axt ein Mindestquerschnitt bestimmt. Mit einem Mindestquerschnitt besteht die Möglichkeit den Querschnitt für zusätzliche Anforderungen nachträglich um weitere Glas- oder Polycarbonatplatten zu erweitern. Die Parameterstudien im Rahmen der numerischen Untersuchungen, des Trag- und Resttragverhaltens sowie der Untersuchungen zur Wärmedämmung erfolgen nur durch eine Variation der Nenndicke für die Polycarbonatplatten. Der Prototyp wird auf Grundlage dieser Querschnittsaufbauten entwickelt und bemessen.

Der Querschnitt einer Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel mit der Zusatzanforderung der Angriffshemmung basiert auf den Vorgaben aus den Prüfungen mit der Axt zum Nachweis des Widerstands gegen manuellen Angriff. In Abhängigkeit des Glasprodukts und der Widerstandsklasse ergibt sich aus Tabelle 42 ein Mindestquerschnitt. Numerische Untersuchungen zum Tragverhalten in Abhängigkeit der Beanspruchung durch die verschiedenen statischen Einwirkungen sowie die angesetzte Verbundwirkung im Querschnitt ergänzen gegebenenfalls den definierten Mindestquerschnitt und führen unter Berücksichtigung des Bauteilwiderstandes im Grenzzustand der Tragfähigkeit sowie im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit zum erforderlichen Querschnitt einer Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel.

Prüfung	Dünnglas	Querschnitt	Nenndicke	Aufbau
Prüfung mit der Axt	Optiwhite	Mindestquerschnitt P6B	13,00 mm	2,00 mm FG   2,00 mm TPU   5,00 mm PC   2,00 mm TPU   2,00 mm FG
		Mindestquerschnitt P8B	20,00 mm	2,00 mm FG   2,00 mm TPU   5,00 mm PC   2,00 mm TPU   5,00 mm PC   2,00 mm TPU   2,00 mm FG
Prüfung mit der Axt	Leoflex	Mindestquerschnitt P6B	10,70 mm	0,85 mm CVG   2,00 mm TPU   5,00 mm PC   2,00 mm TPU   0,85 mm CVG
		Mindestquerschnitt P8B	17,70 mm	0,85 mm CVG   2,00 mm TPU   5,00 mm PC   2,00 mm TPU   5,00 mm PC   2,00 mm TPU   0,85 mm CVG

Die Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln werden mit dem Dünnglas Optiwhite und dem Dünnglas Leoflex hergestellt. Der Verglasungsaufbau erfüllt die Anforderungen einer Sicherheitssonderversglasung mit den Widerstandsklassen P6B und P8B gegen manuellen Angriff. Dazu wird der definierte Mindestquerschnittsaufbau nach Tabelle 42 ausgewählt. Die Abmessungen der Sicherheitssonderversglasung betragen 1.000 mm in der Breite und 2.000 mm in der Höhe.

**Tabelle 42** Mindestquerschnitt für eine Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel in Abhängigkeit des Glasproduktes und der Widerstandsklasse.

- FG Floatglas Optiwhite
- CVG Chemisch vorgespanntes Dünnglas Leoflex
- TPU Thermoplastisches Polyurethan
- PC Polycarbonat

## 7 Zusammenfassung

Die Entwicklung von Verbundtafeln aus innovativem Dünnglas und Polycarbonat erfordert verschiedene Untersuchungen des hybriden Materials. Das Laminat bietet breite Anwendungsmöglichkeiten als Verbundsicherheitsglas sowie als Sicherheitssonderverglasung mit Widerstand gegen manuellen Angriff. Sicherheitssonderverglasungen können unter Verwendung von Dünnglas und Polycarbonat leichter und schlanker im Vergleich zu konventionellen Verglasungen ausgeführt werden. Gleichzeitig werden verbesserte Wärmedurchgangskoeffizienten und hohe Lichttransmissionsgrade erreicht.

Insgesamt konzentrieren sich die Untersuchungen auf zwei unterschiedliche Dünngläser. Das Dünnglas Optiwhite von Pilkington Deutschland AG als nicht vorgespanntes Kalk-Natronsilikatglas wird im Floatverfahren hergestellt. Mit einer Nennstärke von 2 mm, einem hohen Transmissionsgrad und der schnellen Verfügbarkeit bietet sich das Dünnglas zur Verwendung für die Verbundtafeln an. Die Möglichkeit einer nachträglichen Bearbeitung mit mechanischen Schneidverfahren ist möglich. Das Dünnglas Leoflex von Asahi Glass Co., Ltd. ist ein chemisch vorgespanntes Dünnglas und weist mit einer Nennstärke von 0,85 mm eine hohe Oberflächenhärte und Festigkeit auf. Eine nachträgliche Bearbeitung der Glastafeln ist nur unter einem hohen Energieeinsatz im Laserschneidverfahren bei Verlust der Kantenfestigkeit möglich.

Als Monoglas wird Dünnglas aufgrund der geringen geometrischen Steifigkeit im Bauwesen bisher nicht eingesetzt. Polycarbonat ist ein transparenter Thermoplast und bietet eine hohe Schlagzähigkeit, ein niedrigeres Flächengewicht sowie hohe Transparenz. Allerdings ist Polycarbonat kratzempfindlich und gegen ultraviolette Strahlung nicht beständig.

Der Verbund zwischen Dünnglas und Polycarbonat wird über eine Zwischenschicht aus thermoplastischen Polyurethan sichergestellt. Die Zwischenschicht gleicht auftretende Zwangsspannungen infolge der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungen von Dünnglas und Polycarbonat aus und stellt einen flächigen Verbund zwischen den einzelnen Schichten her. Zusätzlich werden Strahlungsblocker zum Schutz gegen ultraviolette Strahlung, auch für das Polycarbonat, zugegeben. Eine Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel besteht demnach aus mindestens zwei äußeren Dünnglastafeln und einer inneren Polycarbonattafel, die über polymere Zwischenschichten aus thermoplastischen Polyurethan verbunden sind. Die Herstellung der Prüfkörper erfolgt im Gießharzverfahren. Der manuelle Prozess bietet neben einer Aushärtung bei Raumtemperatur ebenfalls die Möglichkeit von individuellen Anpassungen.

Der Haftverbund der Zwischenschicht und der Splitterabgang der Verbundtafel werden im Kugelfallversuch untersucht, bei dem eine Stahlkugel mittig auf das Laminat fällt. Die Anzahl der zerstörten Scheiben sowie die Splittermasse auf der entgegengesetzten Oberfläche zur Angriffsseite werden dokumentiert. Der Verbund mit dem Dünnglas Optiwhite weist einen relativ geringen Splitterabgang an den beiden gebrochenen Glastafeln auf. Das Dünnglas Leoflex bricht im Kugelfallversuch nur an der oberen Glastafel an der Angriffsseite.

Die Untersuchungen zur klimatischen Beständigkeit mit der Prüfung bei hoher Temperatur, der Prüfung in der Feuchte und der Bestrahlungsprüfung werden erfolgreich für die Prüfkörper mit dem Dünnglas Optiwhite sowie mit dem Dünnglas Leoflex bestanden. Nach Abschluss der Prüfung bilden sich keine Blasen, Delamination oder Trübung im Verbund.

Die Klassifizierung als durchbruchhemmende Verglasung mit einer Widerstandsklasse P6B erreicht eine Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafel mit dem Dünnglas Optiwhite bei einer Gesamtdicke von 13,0 mm. Das Dünnglas Leoflex im Verbund reduziert die Gesamtdicke einer Verglasung mit der Widerstandsklasse P6B auf 10,7 mm. Die Anforderungen an die Widerstandsklasse P8B sind bei einer Gesamtdicke von 20,0 mm mit dem Dünnglas Optiwhite und von 17,7 mm mit dem Dünnglas Leoflex eingehalten.

Das Tragverhalten der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln ist entscheidend vom Schubverbund der Zwischenschicht abhängig. Die beiden Grenzfälle kein Verbund und voller Verbund werden durch numerische Berechnungen nach dem geometrisch nichtlinearen Ansatz mit dem Programm SJ Mepla 4.0.6 ermittelt. Die experimentellen Untersuchungen im Vierpunkt-Biegeversuch weisen einen teilweisen Schubverbund der Zwischenschicht für die Verbundtafeln auf. Das Tragverhalten zeigt bei steigender Nenndicke für das Polycarbonat eine verminderte Beteiligung der Dünnglastafeln an der Lastabtragung. Die Biegesteifigkeit der Polycarbonattafel in Verbindung mit den Glasbruchstücken in der Druckzone gewährleistet ein ausreichendes Resttragverhalten. Die Verbundtafeln zeigen im zerstörten Zustand der Dünngläser eine Verformungen von über 100 mm bei der Spannweite von 1.000 mm. Eine Begrenzung der Durchbiegung auf  $L/10$  wird deshalb für die Versuche zur Untersuchung des Trag- und Resttragverhaltens festgelegt.

Untersuchungen zum Wärmedurchgangskoeffizienten ergeben bereits bei einer geringen Gesamtdicke der Verbundtafeln einen verbesserten Wärmeschutz im Vergleich zu Monoglas oder Verbundglas. Die

Transmissionsmessung zeigt im sichtbaren Bereich hohe Transmissionswerte. Dabei unterscheiden sich die Werte der Verbundtafeln mit den unterschiedlichen Dünngläsern kaum. Im ultravioletten Spektralbereich besteht keine Transmission einer schädlichen Strahlung.

Die Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln eignen sich wegen dem leichten und schlanken Verglasungsaufbau in Verbindung mit dem hohen Widerstand gegen mechanische Einwirkungen besonders als Vertikalverglasungen mit Zusatzanforderungen an eine Absturzsicherung oder Angriffshemmung. In Tabelle 43 sind deshalb die wesentlichen Eigenschaften der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit dem Dünnglas Optiwhite sowie dem Dünnglas Leoflex im Vergleich zu einer konventionellen Sicherheitssonderverglasung mit der höchsten Widerstandsklasse P8B gegen manuellen Angriff zusammengefasst.

Eigenschaft	Sicherheitssonderverglasung Glas-Verbund	Dünnglas-Polycarbonat-Verbund Optiwhite	Dünnglas-Polycarbonat-Verbund Leoflex
Gesamtneendicke	36,0 mm	20,0 mm	17,7 mm
Eigengewicht	80,0 kg/m <sup>2</sup>	28,2 kg/m <sup>2</sup>	21,8 kg/m <sup>2</sup>
Wärmedurchgangskoeffizient	5,1 W/(m <sup>2</sup> · K)	4,0 W/(m <sup>2</sup> · K)	4,1 W/(m <sup>2</sup> · K)

Die Ausführung der Querschnitte ist für die höchste Widerstandsklasse P8B gegen manuellen Angriff bis zu 51 % dünner und bis zu 73 % leichter als konventionelle Sicherheitssonderverglasung. Dies ermöglicht schlankere Rahmen- und Unterkonstruktionen für Verglasungen im Neubau sowie eine nachträgliche Ertüchtigung von Verglasungen im Bestandsbau. Der Wärmedurchgangskoeffizient ist im Vergleich zur konventionellen Sicherheitssonderverglasung um bis zu 22 % günstiger. Deshalb bietet sich für die Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln eine Weiterverarbeitung zu einem Mehrscheiben-Isolierglas hervorragend an. Allerdings sind die vorläufig kalkulierten Kosten der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln durch die höheren Preise der verwendeten Materialien Polycarbonat und Dünnglas, insbesondere dem chemisch vorgespanntem Dünnglas Leoflex, um bis zu 120 % teurer.

**Tabelle 43** Eigenschaften der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln mit Optiwhite sowie Leoflex im Vergleich zu einer konventionellen Sicherheitssonderverglasung mit der höchsten Widerstandsklasse P8B gegen manuellen Angriff.

Die Ergebnisse zur Entwicklung von Verbundtafeln aus Dünnglas und Polycarbonat ermöglichen die Herstellung eines hybriden Materials als flächige, ausfachende Verglasung. Das Trag- und Resttragverhalten wird in dieser Forschungsarbeit für ein Einfachglas untersucht. Die baupraktische Umsetzung erfordert zusätzliche Prüfungen hinsichtlich einer linien- und punktförmigen Lagerung der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln. In der Gebäudehülle werden zur Reduzierung des Wärmeverlustes grundsätzlich Mehrscheiben-Isoliergläser verwendet.

Angriffshemmende Mehrscheiben-Isoliergläser aus konventionellem Verbundsicherheitsglas besitzen eine große Nennstärke bei gleichzeitig hohem Flächengewicht. Die Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln bieten sich aus bauphysikalischer sowie sicherheitsrelevanter Sicht als leistungsstärkere Verglasung an. Das Laminat weist damit das Potential auf, konventionelle Verglasungen zukünftig in dem Bereich von Vertikalverglasungen mit Zusatzanforderungen an eine Absturzicherung oder Angriffshemmung zu ersetzen. Bis zur Markteinführung sind allerdings noch weitere Untersuchungen der Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln hinsichtlich der mechanischen und optischen Eigenschaften bei einer Verwendung als Mehrscheiben-Isolierglas mit linien- oder punktförmiger Lagerung erforderlich.

Die Forschungsarbeit mit dem Aktenzeichen SWD-10.08.18.7-14.32 wurde von der Forschungsinitiative Zukunft Bau im Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit finanziell unterstützt und betreut. Besonderen Dank geht an das beteiligte Unternehmen SiLATEC Sicherheits- und Laminatglastechnik GmbH für die Bereitstellung der zahlreichen Prüfkörper und den engen inhaltlichen Austausch hinsichtlich der Querschnittsentwicklung und Untersuchung der Prozesskette sowie der Prozessparameter.

## 8 Literatur

### 8.1 Fachbücher und Fachaufsätze

- Abts 2010                    Abts, Georg: Kunststoff-Wissen für Einsteiger. München: Hanser, 2010.
- Albus 2015                    Albus, Jutta; Robanus, Stefan: Glas in der Architektur – neue Entwicklungen. In: DETAIL Zeitschrift für Architekten + Bauteil. (2015), Heft 1/2.
- Blank 1994                    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. 1994.
- Blaumeiser 2016            Blaumeiser, Louisa; Schneider, Jens: Strength testing of thin glasses. In: Engineered Transparency. Berlin: Ernst & Sohn, 2016.
- Feldmann 2012            Feldmann, Markus; Kasper, Ruth; Langosch, Katharina: Glas für tragende Bauteile. Köln: Werner, 2012.
- Keil 2017                    Keil, Stefan: Dehnungsmessstreifen. Berlin: Springer, 2017.
- Kothe 2013                    Kothe, Michael: Alterungsverhalten polymerer Zwischenschichtmaterialien. Dissertation. Technische Universität Dresden. Dresden, 2013.
- Neugebauer 2016            Neugebauer, Jürgen: Investigation of different test set scenarios for determination of ultimate bending stress of thin glass. In: Engineered Transparency. Berlin: Ernst & Sohn, 2016.
- Ricken 2001                    Ricken, Herbert: Joseph Paxton (1801-1865) und der Kristallpalast in London (1851). In: Bau-technik 78 (2001), Heft 10.
- 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, 2016.
- Siebert 2012 Siebert, Geralt; Maniatis, Iris: Tragende Bauteile aus Glas. Berlin: Ernst & Sohn, 2012.
- Weimar 2011 Weimar, Thorsten: Untersuchungen zu Glas-Polycarbonat-Verbundtafeln. Dissertation. Technische Universität Dresden. Dresden, 2011.
- Weimar 2015 Weimar, Thorsten: Experimentelle Untersuchungen zu Glas-Polycarbonat-Verbundtafeln. Bautechnik. In: Bautechnik 92 (2015). Heft 4.
- Weimar 2016 Weimar, Thorsten; Böckermann, Caroline: Entwicklung neuartiger Glas-Polycarbonat-Verbundtafeln. In: Glasbau 2016. Berlin: Ernst & Sohn 2016.
- Weller 2013 Weller, Bernhard; Engelmann, Michael; Nicklisch, Felix; Weimar, Thorsten: Glasbau-Praxis. Berlin: Beuth, 2013.

## 8.2 Normen, Richtlinien und Verordnungen

- ArbStättV Verordnung über Arbeitsstätten. Bundesministerium der Justiz und Verbraucherschutz. 2004.
- ASR A1.6 Technische Regeln für Arbeitsstätten – Fenster, Oberlichter, lichtdurchlässige Wände. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. 2012.
- BGV C9 Kassen. Unfallverhütungsvorschrift. Verwaltungs-Berufsgenossenschaft. 1997.
- DGUV 208-014 Information 208-014: Glastüren, Glaswände. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung. 2010.
- DGUV 208-014 Information 208-014: Glastüren, Glaswände. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung. 2010.

- DIN 1259-1            DIN 1259-1: Glas. Teil 1: Begriffe für Glasarten und Glasgruppen. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2001.
- DIN 18008-1        DIN 18008-1: Glas im Bauwesen – Bemessungs- und Konstruktionsregeln – Teil 1: Begriffe und allgemeine Grundlagen. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2010.
- DIN 18008-2        DIN 18008-2: Glas im Bauwesen – Bemessungs- und Konstruktionsregeln – Teil 2: Linienförmig gelagerte Verglasungen. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2010.
- 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 durchsturzsichernde Verglasungen. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2018.
- DIN 18032-1        DIN 18032-1: Sporthallen – Hallen und Räume für Sport und Mehrzwecknutzung – Teil 1: Grundsätze für die Planung. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2014.
- DIN 52338            DIN 52338: Prüfverfahren für Flachglas im Bauwesen - Kugelfallversuch für Verbundglas. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2016.

DIN EN 356	DIN EN 356: Glas im Bauwesen – Sicherheits-sonderverglasung – Prüfverfahren und Klasseneinteilung des Widerstandes gegen manuellen Angriff. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2002.
DIN EN 410	DIN EN 410: Glas im Bauwesen – Bestimmung der lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kenngrößen von Verglasungen. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2011.
DIN EN 572-1	DIN EN 572-1: 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: Glas im Bauwesen – Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) - Berechnungsverfahren. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2011.
DIN EN 1063	DIN EN 1063: Glas im Bauwesen – Sicherheits-sonderverglasung - Prüfverfahren und Klasseneinteilung für den Widerstand gegen Beschuss. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2001.
DIN EN 1288-2	DIN EN 1288-2: 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: 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 1748-1-1	DIN EN 1748-1-1: 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: Glas im Bauwesen – Teilvorgespanntes Kalknatronglas – Teil 1: Definition und Beschreibung. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2012.
DIN EN 1990	DIN EN 1990: Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2012.
DIN EN 12150-1	DIN EN 12150-1: 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: Glas im Bauwesen – Chemisch vorgespanntes Kalknatronglas – Teil 1: Definition und Beschreibung. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2000.
DIN EN 12417	DIN EN 12417: Werkzeugmaschinen – Sicherheit – Bearbeitungszentren. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2009.
DIN EN 12600	DIN EN 12600: Glas im Bauwesen – Pendelschlagversuch – Verfahren für die Stoßprüfung und Klassifizierung von Flachglas. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2003.
DIN EN 13128	DIN EN 13128: Sicherheit von Werkzeugmaschinen – Fräsmaschinen (einschließlich Bohrfräsmaschinen). Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2009.
DIN EN 13541	DIN EN 13541: Glas im Bauwesen – Sicherheitssonderverglasung – Prüfverfahren und Klasseneinteilung des Widerstandes gegen Sprengwirkung. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2012.
DIN EN 14070	DIN EN 14070: Sicherheit von Werkzeugmaschinen – Transfer- und Einzweck- oder Sondermaschinen. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2009.

- DIN EN 14449      DIN EN 14449: Glas im Bauwesen – Verbundglas und Verbund-Sicherheitsglas – Konfirmitätsbewertung/Produktnorm. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2005.
- DIN EN ISO 12543-1      DIN EN ISO 12543-1: 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: Glas im Bauwesen – Verbundglas und Verbund-Sicherheitsglas. Teil 2: Verbund-Sicherheitsglas. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2011.
- DIN EN ISO 12543-4      DIN EN ISO 12543-4: Glas im Bauwesen – Verbundglas und Verbund-Sicherheitsglas. Teil 4: Verfahren zur Prüfung der Beständigkeit. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2011.
- DIN EN ISO 16089      DIN EN ISO 16089: Werkzeugmaschinen – Sicherheit – Ortsfeste Schleifmaschinen. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2016.
- DIN EN ISO 23125      DIN EN ISO 23125: Werkzeugmaschinen – Sicherheit – Drehmaschinen. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2015.
- TR 8      Technische Richtlinien des Glashandwerks Nr.8 Verkehrssicherheit mit Glas. Bundesinnungsverband des Glaserhandwerks. 2013.

### 8.3 Produktdatenblätter

- Borofloat 33      Borofloat® 33: Produktdatenblatt. Schott AG, 2017.
- Gorilla Glass® 4      Gorilla Glass® 4: Produktdatenblatt. Corning, Inc., 2015.
- Leoflex™      Leoflex™: Produktdatenblatt. Asahi Glass Co., Ltd., 2016.
- Lexan™ 9030      Lexan™ 9030: Produktdatenblatt. Sabic Deutschland GmbH, 2014.

Makrolon® GP	Makrolon® GP: Produktdatenblatt. Covestro AG, 2013.
Marlon FSX	Marlon FSX: Produktdatenblatt. Brett Martin Ltd., 2016.
Optiwhite™	Optiwhite™: Produktdatenblatt. Pilkington Deutschland AG, 2011.
Planiclear®	Planiclear®: Produktdatenblatt. Saint Gobain Glass Deutschland GmbH, 2014.
PALSUN®	PALSUN®: Produktdatenblatt. Palram Germany GmbH, 1997.