

Gutachten

Nr. G-70-19-0002

Datum: 20.07.2023

Geschäftszeichen: 5509.010#2019-2/2

über die Einhaltung bauaufsichtlicher Anforderungen
an bauliche Anlagen bei Einbau des Bauprodukts

Verbund-Sicherheitsglas mit SAFLEX DG Structural mit Schubverbund PO 54081584

SOLUTIA EUROPE BV
Ottergemsesteenweg Zuid 707
9000 GENT
BELGIEN

Das Gutachten umfasst 13 Seiten, davon acht Anlagen.

1 Anforderungen an bauliche Anlagen

Dieses Gutachten dient zur Beurteilung der Einhaltung der Anforderungen an bauliche Anlagen bezüglich der mechanischen Festigkeit und Standsicherheit gemäß MVV TB, A 1.2.7.1 (Normenreihe DIN 18008¹) bei Verwendung von Verbund-Sicherheitsglas (VSG) mit der Verbundfolie SAFLEX DG der Fa. Solutia Europe bvba mit Schubverbund.

2 Gegenstand des Gutachtens

Gegenstand des Gutachtens ist ein VSG, das aus mindestens zwei ebenen Glasscheiben und der Verbundfolie SAFLEX DG hergestellt wird.

Der Aufbau und die Herstellung des VSG entspricht **Anlage 1, A.1.1**.

3 Bewertung

Zur Bewertung wurden folgende Nachweise herangezogen:

- Prof. Dr.-Ing. Ö.Bucak: Gutachterliche Stellungnahme zur Beurteilung von Verbund-Sicherheitsglas mit der Zwischenschicht Saflex DG, Nr. 84/13/02 Rev.1 vom 11.03.2014 (einschließlich aller in Abschnitt 2 der Stellungnahme angegebenen Unterlagen)
- Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jens Schneider: Gutachterliche Stellungnahme zur Verwendung einer Folie der Produktfamilie Saflex DG in Verbund-Sicherheitsglas unter Ansatz einer Schubmodule bei der Glasbemessung, vom 14.04.2016 (einschließlich aller in Abschnitt 2 der Stellungnahme angegebenen Unterlagen)
- Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jens Schneider: Kurzbericht zur Bewertung der neuen Verbundsicherheitsglas-zwischenschicht "Saflex DG41 XC" im Vergleich zu "Saflex DG 41" vom 24.07.2017
- SGS: Bewertung der Schubmoduleigenschaften von Saflex[®] DG als Verbundmaterial in Verbund-sicherheitsglas unter Ansatz eines günstig wirkenden Schubverbunds bei der Glasbemessung, Sachverständige Stellungnahme 1484/2022.33.01 vom 05.05.2023

Auf Basis der vorgelegten Nachweise werden die Leistungswerte gemäß **Anlage 1, A 1.2** bestätigt.

Das VSG mit der Verbundfolie SAFLEX DG weist eine ausreichende Resttragfähigkeit im Sinne der DIN 18008-1², Abschnitt 9 auf und hat damit seine Eignung für die Verwendung als VSG in Verglasungen, die entsprechend der Normenreihe DIN 18008¹ geplant, bemessen und ausgeführt werden, nachgewiesen.

Die Leistungen gelten nur, wenn sichergestellt ist, dass die Glas- bzw. Zwischenschichtränder nur in Kontakt mit angrenzenden Stoffen stehen, die dauerhaft mit der Verbundfolie SAFLEX DG verträglich sind.

Die Bewertung gilt solange keine Änderungen des Produkts oder des Produktionsverfahrens vorgenommen werden.

4 Empfehlungen und Hinweise

Der Hersteller weist die Leistungsbeständigkeit gemäß den Maßnahmen nach **Anlage 2** nach.

Es wird empfohlen, das Gutachten nach 5 Jahren auf seine Aktualität hin überprüfen zu lassen.

Dr.-Ing. Lars Eckfeldt
Referatsleiter

Beglaubigt
Schult

¹ DIN 18008

Glas im Bauwesen - Bemessungs- und Konstruktionsregeln

² DIN 18008-1:2020-05

Glas im Bauwesen - Bemessungs- und Konstruktionsregeln - Teil 1: Begriffe und allgemeine Grundlagen

A 1.1 Aufbau und Herstellung des VSG mit Schubansatz

- Die Glasscheiben bestehen aus den folgenden Glaserzeugnissen:
 - Floatglas (Kalk-Natronsilicatglas) nach DIN EN 572-2¹,
 - ESG nach DIN EN 12150-1² mit einem Bruchbild gemäß A1.3,
 - Heißgelagertes thermisch vorgespanntes Kalknatron-Einscheibensicherheitsglas nach DIN EN 14179-1³ bzw. nach DIN 18008-2⁴, Abschnitt 4.3, 3. Spiegelstrich mit einem Bruchbild gemäß A1.3,
 - TVG nach DIN EN 1863-1⁵ mit einem Bruchbild gemäß A1.3,
 - beschichtetes Glas nach DIN EN 1096-1⁶.
 - Ornamentglas nach DIN EN 572-5⁷.
- Die Mindestdicke der Verbundfolie SAFLEX DG beträgt 0,76 mm, die maximale Dicke 2,28 mm. Die Zusammensetzung ist beim Deutschen Institut für Bautechnik hinterlegt.
- Die Verbundfolie SAFLEX DG hat folgende nach DIN EN ISO 527-3⁸ (Prüfgeschwindigkeit: 50 mm/min, Prüftemperatur: 23 °C) ermittelten Eigenschaften:
 - Reißfestigkeit: $\geq 33 \text{ N/mm}^2$
 - Bruchdehnung: $\geq 196 \%$
- Folienfeuchte im Laminat: Grenzwert $\leq 0,6\%$, geprüft nach **Anlage 4**
- Bei Herstellung des VSG aus beschichteten Glaserzeugnissen (außer emaillierte Glaserzeugnisse) erfolgt die Laminierung der Glasscheiben mit der Verbundfolie SAFLEX DG nur auf der unbeschichteten Glasoberfläche. Es dürfen nur solche Beschichtungen verwendet werden, die sich hinsichtlich Absorption und daraus resultierender Zwischenschichttemperatur nicht ungünstiger verhalten als Glas mit schwarzer Emaillierung.
- Die Herstellung des VSG erfolgt im Verbundverfahren unter Berücksichtigung der beim Deutschen Institut für Bautechnik hinterlegten Bestimmungen.

A 1.2 Leistungswerte

- Haftverhalten am Laminat (Pummel-Test) geprüft nach **Anlage 3**: Pummel Standard ≥ 3
- Mindestwert der Haftzugfestigkeit (Pull-Test): $\sigma \geq 13 \text{ N/mm}^2$, geprüft nach **Anlage 5**
- Schubmodulwerte geprüft nach **Anlagen 6.1 bis 6.3**: siehe **Anlage 7 und 8**

A 1.3 Bruchbild

Glasprodukte nach EN 12150-2⁹ und EN 14179-2¹⁰ müssen das in DIN EN 12150-1² für Testscheiben definierte Bruchbild für jede hergestellte Bauteilgröße aufweisen.

Glasprodukte nach EN 1863-2¹¹ müssen ab einer Bauteilgröße von 1000 mm x 1500 mm ein Bruchbild aufweisen, bei dem der Flächenanteil an Bruchstücken unkritischer Größe größer als vier Fünftel der Gesamtfläche ist. Die Prüfung des Bruchbilds ist dabei in Anlehnung an DIN EN 1863-1¹¹, Abschnitt 8 durchzuführen. Als Bruchstücke unkritischer Größe dürfen alle Bruchstücke betrachtet werden, denen ein Kreis von 120 mm Durchmesser einbeschrieben werden kann.

<p>1 DIN EN 572-2:2012-11</p> <p>2 DIN EN 12150-1: 2012-02</p> <p>3 DIN EN 14179-1: 2016-12</p> <p>4 DIN 18008-2:2020-05</p> <p>5 DIN EN 1863-1: 2012-02</p> <p>6 DIN EN 1096-1:2012-04</p> <p>7 DIN EN 572-5:2012-11</p> <p>8 DIN EN ISO 527-3:2019-02</p> <p>9 In Deutschland umgesetzt durch DIN EN 12150-2:2005-01.</p> <p>10 In Deutschland umgesetzt durch DIN EN 14179-2:2005-08.</p> <p>11 In Deutschland umgesetzt durch DIN EN 1863-2:2005-01.</p>	<p>Glas im Bauwesen - Basiserzeugnisse aus Kalk-Natronsilicatglas - Teil 2: Floatglas</p> <p>Glas im Bauwesen - Thermisch vorgespanntes Kalknatron-Einscheibensicherheitsglas - Teil 1: Definition und Beschreibung</p> <p>Glas im Bauwesen - Heißgelagertes thermisch vorgespanntes Kalknatron-Einscheibensicherheitsglas - Teil 1: Definition und Beschreibung</p> <p>Glas im Bauwesen - Bemessungs- und Konstruktionsregeln - Teil 2: Linienförmig gelagerte Verglasungen</p> <p>Glas im Bauwesen - Teilvorgespanntes Kalknatronglas - Teil 1: Definition und Beschreibung</p> <p>DIN EN 1096-1:2012-04 Glas im Bauwesen - Beschichtetes Glas - Teil 1: Definitionen und Klasseneinteilung</p> <p>Glas im Bauwesen - Beschichtetes Glas - Teil 1: Definitionen und Klasseneinteilung</p> <p>Glas im Bauwesen - Basiserzeugnisse aus Kalk-Natronsilicatglas - Teil 5: Ornamentglas</p> <p>Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 3: Prüfbedingungen für Folien und Tafeln</p>
--	---

Verbund-Sicherheitsglas mit Verbundfolie SAFLEX DG mit Schubverbund
Anwendungsbereich, Glasscheiben und Leistungswerte

Anlage 1

A 2__Werkseigene Produktionskontrolle

Die werkseigene Produktionskontrolle umfasst mindestens die folgenden Maßnahmen:

Nr.	Merkmal	Anforderungen	Häufigkeit
1	2	3	4
1	Materialkontrolle	Gemäß DIN EN 14449 ¹	
		Folienschrunpf max. 4% gemäß der beim Deutschen Institut für Bautechnik hinterlegten Arbeitsanweisung	
2	Produktionskontrolle	Gemäß DIN EN 14449 ¹	
3	Produktkontrolle	Gemäß DIN EN 14449 ¹	
		Haftverhalten am Laminat: Pummel-Test nach Anlage 3.1 und 3.2 und gemäß den beim DIBt hinterlegten Angaben Pummel Standard: ≥ 3	Jede Produktionscharge
		Messung der Folienfeuchte am Laminat: Messung der Folienfeuchte nach Anlage 4 und gemäß dem beim DIBt hinterlegten Angaben	einmal je Produktionstag bzw. pro Produktionscharge
		Prüfung der Haftzugfestigkeit: Zugversuch (Pull-Test) an mind. 5 Kleinproben nach Anlage 5 . Mindestwert $\sigma \geq 13 \text{ N/mm}^2$	Mindestens monatlich
¹ DIN EN 14449:2005-07 Glas im Bauwesen - Verbundglas und Verbund-Sicherheitsglas - Konformitätsbewertung/Produktnorm			

Verbund-Sicherheitsglas mit Verbundfolie SAFLEX DG mit Schubverbund
Werkseigene Produktionskontrolle

Anlage 2

A 3__Prüfanleitung Haftverhalten am Laminat (Pummel-Test)

A 3.1 Allgemeines

- Die Probekörper werden unter Beachtung der Laminationsrichtlinien der Fa. Solutia Europe bvba hergestellt.
- Es sind mindestens fünf Probekörper 200 mm x 100 mm aus unbeschichtetem Floatglas herzustellen Die Pummeltests sind an mindestens drei dieser Probekörper durchzuführen.
- Sollten mehrere Produktionschargen am Tag hergestellt werden, sind für jede Produktionscharge Pummeltests durchzuführen
- Als Mindestwert ist "Pummel Standard 3" zu erreichen.
- Für die Herstellung von VSG aus emaillierten Verglasungen, bei denen die Emaillierung zur zwischenschichtzugewandten Seite erfolgt, gelten die o.g. Bestimmungen analog. In diesem Fall ist der Pummeltest an Probekörpern aus vorgespannten Glasprodukten mit dem jeweils zur Anwendung kommenden Emailletyp durchzuführen.

A 3.2 Prüfdurchführung

- Vor der Prüfdurchführung wird der Probekörper auf -18°C gekühlt (mindestens 2 Stunden).
- Nach dem Kühlen, min. 7 Minuten vor Test bei Raumtemperatur lagern.
- Probekörper werden in einem Winkel von ca. 5 - 10 Grad zur Ebene der Pummelplatte gehalten, damit nur die Kante des unzerbrochenen Glases Berührung mit der Platte hat. (Abb. A 3.1).
- Der Probekörper wird mit einem Hammer (Kugelhammer) wiederholt in einem überlappenden Muster mit gleichmäßigen Schlägen geschlagen "Pummeln", in Abständen von ca. 12 mm(1/2Inch) entlang der untersten Fläche. Wenn die untere Fläche fertig gepummelt ist, wird der Vorgang in gleicher Weise wiederholt bis das gesamte Glas, bis auf die letzten 7 - 10 cm (3-4 Zoll), gepummelt ist. Dabei muss sichergestellt werden, dass das gesamte glatte Glas pulverisiert wird.
- Danach wird das Laminat umgedreht (kurzes Ende über kurzes Ende) und der Vorgang wiederholt. Beide Enden (die Innenseite des einen Endes und die Außenseite des anderen Endes) werden geschlagen und gelesen. Nach der Fertigstellung sollte der mittlere Abschnitt, in dem sich die Proben-ID befindet, das einzige Glas sein, das nicht zerkleinert wurde.
- Bei der Verwendung einer halbautomatischen Pummel-Ausrüstung wird das Laminat nach der ersten Pummelreihe auf der Vorderseite gedreht, und dann die Rückseite in derselben Reihe gepummelt.

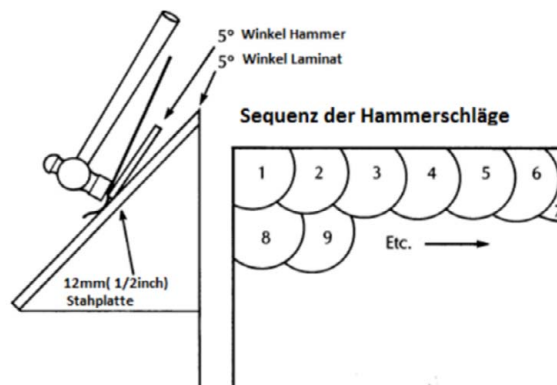


Abb. A 3.1 – Pummel Box und Pummel Sequenz

Verbund-Sicherheitsglas mit der Verbundfolie Saflex DG
Prüfanleitung Haftverhalten am Laminat (Pummel-Test)

Anlage 3.1

A 3.3 Auswertung

- Vor der Bewertung lässt man die gepummelten Proben auf Raumtemperatur erwärmen und die kondensierte Feuchtigkeit verdampfen.
- Die Proben werden mit den Referenzproben verglichen und der Haftungsgrad (0 bis 9) durch Vergleich der Proben mit den Referenzproben bestimmt (vgl. Abb. A 3.2).
- Ein Pummel Standard von 0 (in Abb. A 3.2 nicht dargestellt) entspricht keiner Haftung, ein Pummel Standard von 9 entspricht einer sehr hohen Haftung.
- Für die Auswertung ist der Mittelwert über alle Pummelwerte zu bilden.

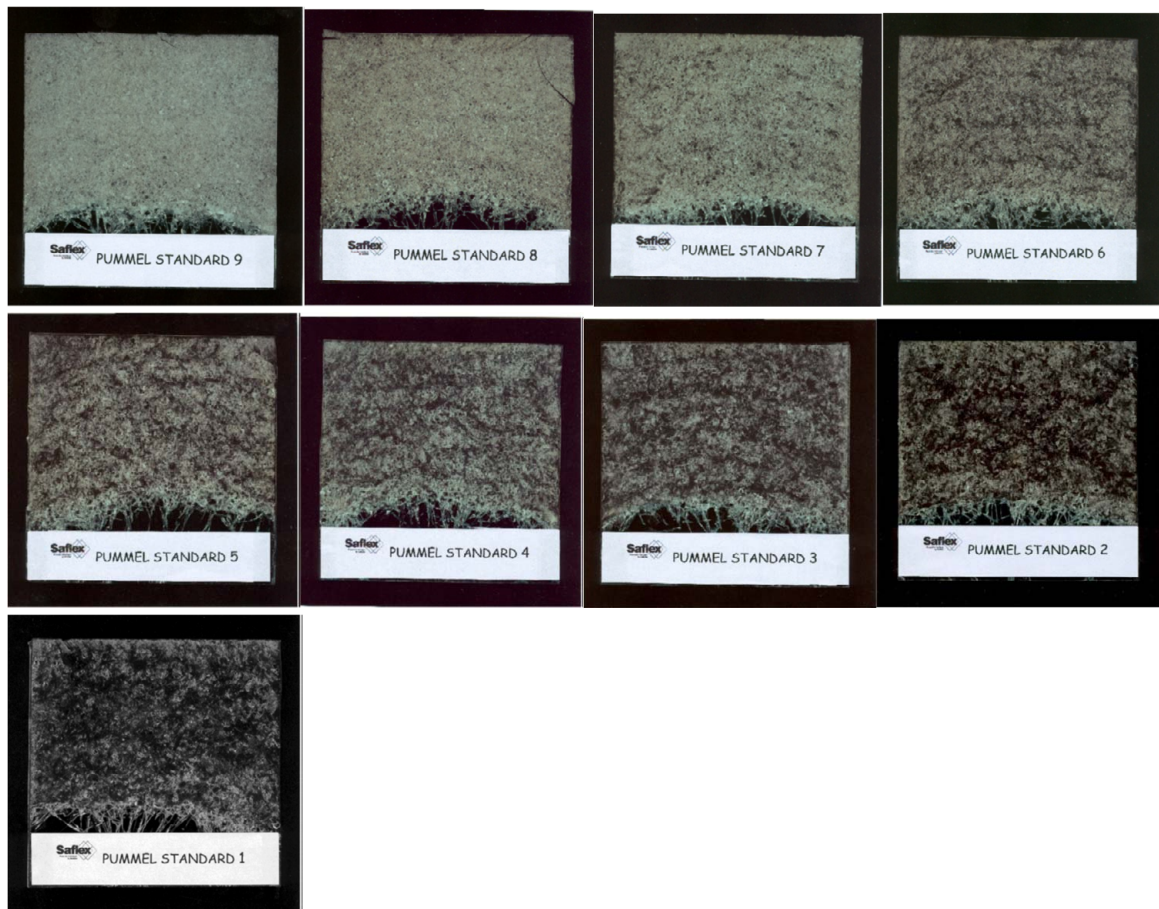


Abb. A 3.2: Referenzproben der Pummel Standards

**Verbund-Sicherheitsglas mit Verbundfolie SAFLEX DG mit Schubverbund
Prüfanleitung Haftverhalten am Laminat (Pummel-Test)**

Anlage 3.2

A 4__Allgemeine Prüfanleitung zur Messung der Folienfeuchte im Laminat

A 4.1 Allgemeines und Prüfdurchführung

- Benötigte Materialien und Geräte
 - Spektrofotometer, dass im Bereich von 1.600 - 2.000 nm scannen kann
 - Feuchtevergleichsmuster für Saflex Zwischenschichten mit entsprechender Glaskonfiguration.
- Kalibrierung des Spektrofotometer:
 - Modus: Durchlässigkeit
 - Spaltbreite: 2 nm
 - Scan-Geschwindigkeit: 240 nm/min (bei verzerrter Spitzenauflösung ist eine niedrigere Scan Geschwindigkeit anzuwenden)
 - Hintergrundkorrektur auf 100 % Durchlässigkeit im Bereich 1600 - 2000 nm einstellen (ohne Probe und Referenzstrahl).
- Saflex Vergleichsmuster für mittleren Feuchtegehalt senkrecht zum Lichtstrahl vor der Probenöffnung anordnen. Der Abstand zwischen Verbundglas und Probenöffnung muss reproduzierbar sein.
- Im Bereich zwischen 1600 und 2000 nm scannen.
- Maximalwerte der Durchlässigkeit bei ca. 1650 und 1875 nm und die Minimalwerte der Durchlässigkeit bei ca. 1700 und 1925 nm ablesen mit einer Genauigkeit von 0,1 %. Diese Wellenlängenwerte sind Näherungswerte und können sich bei unterschiedlichen Messgeräten und Scan-Geschwindigkeiten leicht verschieben.
- Die Schritte 3 - 5 mit Saflex Vergleichsmustern für niedrigen und hohen Feuchtegehalt wiederholen.

A 4.2 Ermittlung der Werte

A 4.2.1 Berechnungen

- Die Durchlässigkeitswerte (in Prozent) in das Absorptionsmaß (Extinktion) umrechnen. Absorptionsmaß (Extinktion) = $\text{Log}_{10}(100 / \%T)$
- Das Absorptionsverhältnis (AR) berechnen. $AR = (A_{1925} - A_{1875}) / (A_{1700} - A_{1650})$
- Den Feuchtegehalt berechnen. $\text{Feuchte in \%} = \text{Koeffizient} * AR + \text{Konstante}$
- Für die Kalibrierung sind die Feuchtwerte der Saflex Vergleichsmuster und das entsprechende Absorptionsverhältnis anzuwenden, um eine lineare Regression für die Bestimmung des entsprechenden Koeffizienten und der Konstanten in vorstehender Gleichung vorzunehmen. Dieses Kalibrierungsverfahren muss einmal pro Jahr bzw. nach jedem Austausch der Lichtquelle des Spektrofotometers wiederholt werden.

A 4.2.2 Stückprüfproben

- Spektrofotometer wie bei der Kalibrierung einstellen und die Schritte 1 - 5 durchführen. Wenn die Feuchtebestimmung des Saflex Vergleichsmusters für mittlere Feuchte innerhalb des normalen Bereichs liegt, ist mit der Prüfung fortzufahren. Ist der Wert nicht normal, ist das Messgerät eventuell nicht korrekt eingestellt oder defekt und alle Tests an Stückprüfproben sind möglicherweise ungenau.
- Die Stückprüfprobe senkrecht vor der Prüfkörperöffnung positionieren und scannen. Sind mehrere Proben zu messen, sollte dies fortlaufend durchgeführt werden. Es ist dann nicht erforderlich, das Vergleichsmuster erneut zu überprüfen.
- Die prozentualen Durchlässigkeitswerte ablesen und den Feuchtegehalt bis zu zwei Stellen hinter dem Komma berechnen (Genauigkeit 0,01 %).

A 4.3 Auswertung

- Der Feuchtegehalt des Vergleichsmusters und jeder Probe ist auf 0,01 % genau zu protokollieren.
- Genauigkeit: Die Reproduzierbarkeit der Prüfung beträgt $\pm 0,015 \%$ bei 95 % Konfidenz.
- Kontrolle des Feuchtegehalts bei einer Abweichung von $\pm 0,05 \%$ vom Anfangswert.

Verbund-Sicherheitsglas mit Verbundfolie SAFLEX DG mit Schubverbund

Prüfanleitung Messung der Folienfeuchte im Laminat

Anlage 4

A 5__Prüfanleitung Pull-Test

A 5.1 Allgemeines

- Die Probekörper werden unter Beachtung der Laminationsrichtlinien der Fa. Solutia Europe bvba hergestellt.
- Aufbau der Probekörper: 4 mm Float / 0,76 mm SAFLEX DG / 4 mm Float
- Aus dem VSG–Laminat werden Probekörper im Format 40 mm x 10 mm mit geeigneten Säge- oder Schneidverfahren herausgeschnitten.
- Die Glasoberflächen der Probekörper werden gereinigt und entfettet.
- Um während der Zeit bis zur Prüfung das Eindringen von Feuchtigkeit in die Folie zu verhindern, werden die offenen Folienkanten mit einer selbstklebenden Aluminiumfolie (Breite der Aluminiumfolie mindestens 5 mm) versehen.
- Die vorbereiteten Probekörper werden zwischen zwei geeigneten Probekörperhalterungen aus Metall eingeklebt. Als Klebstoff kann z.B. Klebstoff-Kit Loctite F246 oder gleichwertiger Klebstoff verwendet werden.
- Anzahl der Probekörper: mind. 5 Stück

A 5.2 Prüfdurchführung

- Die Probekörper werden in der Probekörperaufnahme einer geeigneten Zugprüfmaschine (z. B. Universalprüfmaschine UTS 100 MS-462) platziert, siehe Abb. A 5.1.
- Wegregelung mit einer Traversengeschwindigkeit von 0,50 mm/min.

A 5.3 Auswertung

- Probekörper mit Versagen der Klebeverbindung zum Probekörperhalter oder mit kohäsivem Versagen des Glases werden nicht zur Auswertung verwendet.
- Die Messergebnisse sind zusammen mit den berechneten Spannungswerten der Haftzugfestigkeit, den Mittelwerten, den Standardabweichungen und der Angabe der Versagensart tabellarisch anzugeben.



Abb. A 5.1 Beispielhafter Versuchsaufbau

Verbund-Sicherheitsglas mit Verbundfolie SAFLEX DG mit Schubverbund
Prüfanleitung Pull-Test

Anlage 5

A 6__Prüfanleitung Ermittlung Schubmodule G(t,T)

A 6.1 Allgemeines

Zur experimentellen Charakterisierung des temperatur- und belastungsdauerabhängigen Materialverhaltens polymerer Zwischenschichten werden Dynamisch-Mechanisch-Thermische-Analysen (DMTA) durchgeführt. In einer DMTA wird der visko-elastische Körper bei kontrollierter Temperatur mittels harmonisch oszillierender Verzerrung oder Spannung angeregt und die phasenverschobene Spannungs- bzw. Verzerrungsantwort gemessen. Durch Variation der Anregungsfrequenz und Temperatur können die zeit- und temperaturabhängigen Steifigkeitscharakteristika G(t;T) ermittelt werden. Die Messungen erfolgen im Rheometer.

Zur Validierung der DMTA werden Biegekriechversuche am Glas-Folien-Laminat durchgeführt. Das Prozedere ist allgemein in DIN EN 16613¹ bzw. der Normenreihe ISO 6721² beschrieben.

A 6.2 Prüfbeschreibung DMTA

A 6.2.1 Prüfdurchführung

Tabelle T 6.1 zeigt die Versuchsbeschreibung im Rheometer. In Abb. A 6.1 ist das Rheometer dargestellt. Tab. T 6.1: Versuchsbeschreibung

Prüfmaschine	Rheometer	
Probenvorbereitung	Mittels Locheisen ausgestanzt	
Probenlagerung	min. 48h: Trocken (z.B. Steiner Chemie Trocknungspellets) Raumtemperatur	
Messsystem	Platte-Platte-Torsion, obere Platte: texturiert	
Probengeometrie	Kreis: Ø 8 mm, d=0,76 mm	
Kontaktnormalkraft	0,1 [N] (Druck)	
Anzahl an Probenreihen	1	
	Amplituden-Messung	Temperatur-Frequenz-Messung
Temperatur	-40 °C; +100 °C	[-40 °C bis +100 °C], Abkühlung 5°C-Schritte, Nitrogen
Frequenzen	0,1Hz; 1Hz; 10Hz	[0,1Hz bis 10Hz]
Verzerrungsamplitude	[0,01 % bis 0,05 %]	0,1 % bei T [100 °C bis 40 °C] 0,05 % bei T [40 °C bis -40 °C]

A 6.2.2 Prüfergebnisse Rheometer

A 6.2.2.1 Amplituden-Messung

- Speichermodul G' in Abhängigkeit der aufgetragenen Verzerrungs-/Spannungsamplitude,
- Verlustmodul G'' in Abhängigkeit der aufgetragenen Verzerrungs-/Spannungsamplitude,
- Komplexer Modul G* in Abhängigkeit der aufgetragenen Verzerrungs-/Spannungsamplitude.

¹ DIN EN 16613:2020-01 Glas im Bauwesen - Verbundglas und Verbundsicherheitsglas - Bestimmung der viskoelastischen Eigenschaften von Zwischenschichten
² Normenreihe ISO 6721 Kunststoffe - Bestimmung dynamisch-mechanischer Eigenschaften

Verbund-Sicherheitsglas mit Verbundfolie SAFLEX DG mit Schubverbund
Prüfanleitung Ermittlung Schubmodule G(t,T)

Anlage 6.1

A 6.2.2.2 Temperatur-Frequenz-Messung

- Speichermodul G' als Funktion von Frequenz und Temperatur,
- Verlustmodul G'' als Funktion von Frequenz und Temperatur,
- Betrag des Komplexer Modul |G*| als Funktion von Frequenz und Temperatur,
- Verlustfaktor tan δ= G'/G'' als Funktion von Frequenz und Temperatur.

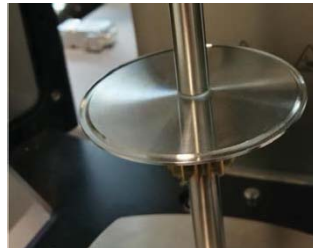


Abb. A 6.1: Versuchsaufbau, Rheometer

A 6.2.3 Analyse und Auswertung

So lange Speichermodul, Verlustmodul und komplexe Modul aus der Amplituden-Messung unabhängig von der aufgebrauchten Verzerrungsamplitude oder Spannungsamplitude, befindet man sich im linear viskoelastischen Bereich.

Durch schrittweises Verschieben horizontal entlang der Frequenzachse der gemessenen isothermen |G*|-Modul-Frequenz-Kurven wird die Masterkurve bei einer Referenztemperatur von T_{ref} = 20 °C erzeugt. Die horizontalen Verschiebungsfaktoren können mathematisch durch das Zeit/Temperatur-Verschiebungsprinzip von William-Landel-Ferry bzw. Arrhenius approximiert werden. Sofern diese die Verschiebungsfaktoren über den gesamten untersuchten Temperaturbereich nicht ausreichend abbilden, werden die inkrementell ermittelten Verschiebungsfaktoren herangezogen.

Unter Berücksichtigung der Masterkurven des Speichermodul G' und des Verlustmodul G'' wird die Prony-Reihe

$$G(t) = G_0 \cdot \left(1 - \sum_{i=1}^n g_i \left(1 - e^{-\frac{t}{\alpha_T(T, T_{ref}) \tau_i}} \right) \right)$$

bestimmt, mit der man die Schubmodulwerte G(t,T) erhält, s. **Anlage 7**, Abb. A 7.1.

A 6.3 Prüfanleitung Biegekriechversuche

A 6.3.1 Allgemeines

- Das VSG wird unter Beachtung der Laminationsrichtlinien der Fa. Solutia Europe bvba hergestellt.
- Aufbau: 6 mm Floatglas / 0,76 mm SAFLEX DG / 6 mm Floatglas
- Abmessung: 1100±5 mm x 360±5 mm (L x B)
- Anzahl: mind. 3 Probekörper je Temperatur.
- Der Messaufbau besteht aus einem Messkanal für die Durchbiegung in der Mitte der Spannweite bzw. für den Bohrwinkel und das Torsionsmoment und die Temperatur jedes Glaslaminats. Die Temperatur wird an der Außenseite des Glaslaminats gemessen.
- Der Prüfaufbau und die Messpunkte sind in Abb. A 6.2 dargestellt.

Verbund-Sicherheitsglas mit Verbundfolie SAFLEX DG mit Schubverbund

Prüfanleitung Ermittlung Schubmodule G(t,T)

Anlage 6.2

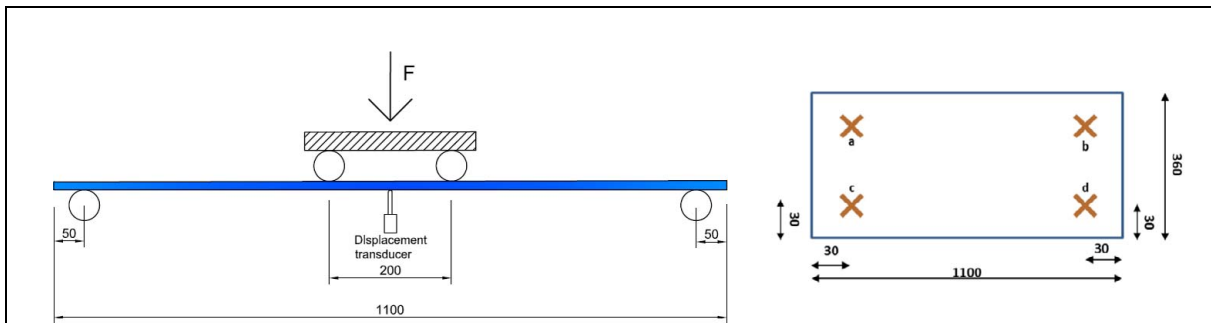


Abb. A 6.2: Biegekriechversuch und Messpunkte

A 6.3.2 Prüfdurchführung

- Durchführung in Anlehnung an DIN EN 16613¹, Anhang 3 bzw. DIN EN 1288-3².
- Belastung des Probekörpers so, dass die Glasscheiben mit mindestens 10 MPa belastet werden
- Vor dem Aufbringen der Last wurden alle Probekörper 24 Stunden lang ohne Belastung konditioniert, so dass Einfluss des Eigengewichts vernachlässigbar.
- Aufbringen der Belastung von 250 N quasi-statisch.
- Messung bei 0 °C, 10 °C, 20 °C, 30 °C und 40 °C.
- Belastungsdauer mind. 24 h
- Aufzeichnung der Durchbiegung in der Mitte der Spannweite sowie der Temperatur jedes Glaslaminats.

A 6.3.3 Auswertung

- Die Ermittlung der Schubmodule erfolgt für unterschiedliche Zeitpunkte und Temperaturen, s. **Anlage 7**, Abb. A 7.2.
- Die Schubmodule werden als Mittelwerte aus den Versuchen bestimmt.

¹ DIN EN 16613:2020-01 Glas im Bauwesen - Verbundglas und Verbundsicherheitsglas - Bestimmung der viskoelastischen Eigenschaften von Zwischenschichten
² DIN EN 1288-3:2000-09 Glas im Bauwesen - Bestimmung der Biegefestigkeit von Glas, Teil 3: Prüfung von Proben bei zweiseitiger Auflagerung

Verbund-Sicherheitsglas mit Verbundfolie SAFLEX DG mit Schubverbund
Prüfanleitung Ermittlung Schubmodule G(t,T)

Anlage 6.3

A 7__ Werte für Schubmodul $G(T,t)$, versuchstechnisch ermittelt

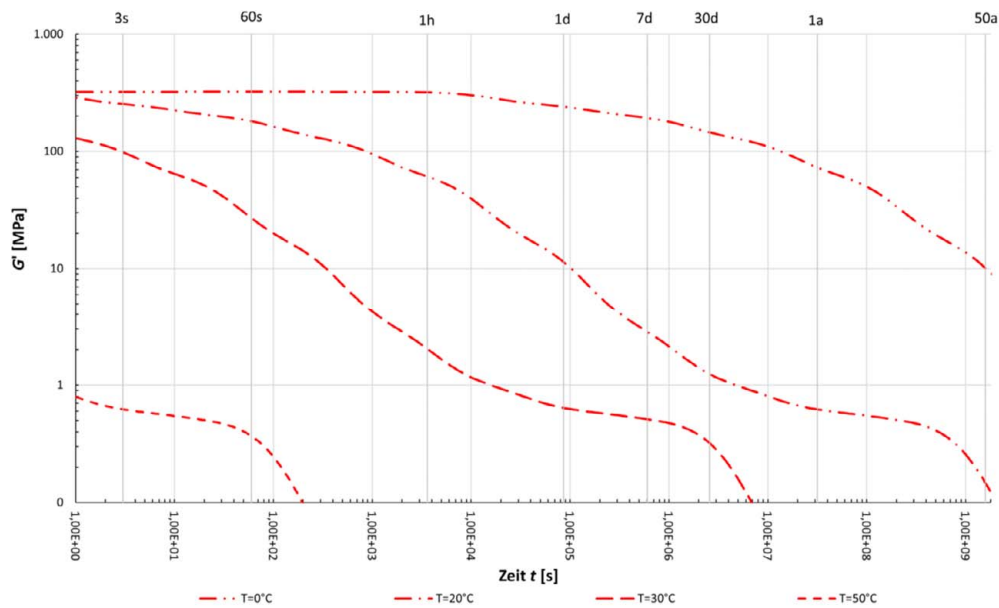


Abb. A 7.1 Schubmodul $G(T,t)$ aus DMTA in Abhängigkeit der Temperatur T und der Lasteinwirkungsdauer t

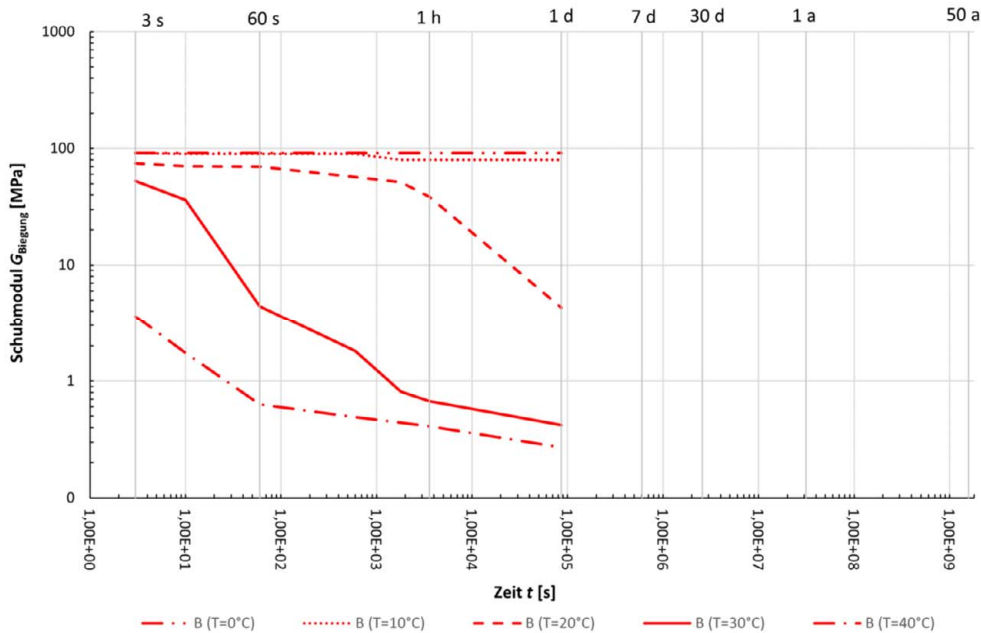


Abb. A 7.2 Schubmodul $G(T,t)$ aus Biegekreivversuche in Abhängigkeit der Temperatur T und der Lasteinwirkungsdauer t

Verbund-Sicherheitsglas mit Verbundfolie SAFLEX DG mit Schubverbund

Schubmodul $G(T,t)$

Anlage 7

Verschiebungsfunktion und Prony-Reihe

Für Einwirkungen, die von Tabelle 1 abweichen und für Berechnungsverfahren, die die viskoelastischen Eigenschaften der Zwischenschicht berücksichtigen können, dürfen die Verschiebungsfunktion nach Gleichung (1) und die Werte der Prony-Parameter nach Tabelle 2 mit Gleichung (2) verwendet werden. Mit der jeweiligen Temperatur und Gleichung (1) wird zunächst der Verschiebungsfaktor a_T berechnet und anschließend mit der Relaxationszeit τ_i in Gleichung (2) multipliziert.

$$\log_{10} a_T(T, T_{ref}) = -4,91956 \cdot 10^{-9} \cdot (T - T_{ref})^5 + 2,85098 \cdot 10^{-7} \cdot (T - T_{ref})^4 + 3,77869 \cdot 10^{-5} \cdot (T - T_{ref})^3 - 9,96994 \cdot 10^{-4} \cdot (T - T_{ref})^2 - 2,41794 \cdot 10^{-1} \cdot (T - T_{ref}) \tag{1}$$

mit:

- $\log_{10} a_T(T, T_{ref})$ = Verschiebungsfunktion für die Berechnung der Masterkurve bei einer Referenztemperatur (T_{ref}) von 20 °C
- T = jeweils zu untersuchende Folientemperatur in °C

$$G(t) = G_0 \left(1 - \sum_{i=1}^n g_i \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}} \right) \right) \tag{2}$$

mit:

- G (t) = Schubmodul in Abhängigkeit der Zeit t in Nmm⁻²
- G₀ = 322,68 Nmm² initialer Schubmodul
- g_i = dimensionsloser Schubmodul [-] siehe Tabelle 8.1
- τ_i = Relaxationszeit [s] siehe Tabelle 8.1
- t = jeweils zu untersuchende Belastungszeit

Tabelle 8.1: Prony-Parameter für eine Referenztemperatur von 20 °C

Relaxationszeit τ_i [s]	Dimensionsloser Schubmodul g_i [-]
1,0E+09	1,5659E-03
1,0E+08	2,5577E-04
1,0E+07	1,1927E-03
1,0E+06	6,3279E-03
1,0E+05	4,1877E-02
1,0E+04	1,3957E-01
1,0E+03	2,0500E-01
1,0E+02	2,1960E-01
1,0E+01	1,6199E-01
1,0E+00	2,2261E-01

Verbund-Sicherheitsglas mit Verbundfolie SAFLEX DG mit Schubverbund
Verschiebungsfunktion und Prony-Reihe

Anlage 8

Elektronische Kopie des Gutachtens des DIBt: G-70-19-0002