

# **Spannungsermittlung bei Mehrscheiben-Isolierglas und Vakuumisolierglas-Hybriden aufgrund von Temperatureinwirkungen**

**Franz Paschke, Gregor Schwind, Matthias Seel, Miriam Schuster**

*Institut für Statik und Konstruktion, Glass Competence Center, Technische Universität Darmstadt*

**Zusammenfassung:** Neben den europaweit standardisierten Einwirkungen (z. B. Wind, Schnee) können auch Temperaturgradienten infolge von Temperatureinwirkungen innerhalb einer Verglasungskonstruktion zum Versagen führen. Dieser Beitrag präsentiert eine Berechnungsmethode zur Ermittlung der Beanspruchungen von Mehrscheiben-Isolierglas (MIG) und Vakuumisolierglas-Hybriden (VIG-H) infolge eines Temperaturgradienten. Die Grundlage bildet die Ermittlung der resultierenden Temperaturverteilung in Abhängigkeit der meteorologischen Randbedingungen.

## **1 Einleitung**

Die Bemessung von Verglasungen im Bauwesen erfolgt in Deutschland gemäß der Normenreihe DIN 18008 [1], unter Berücksichtigung der auftretenden Einwirkungen. Diese Vorgehensweise gewährleistet die Integrität der Verglasung während ihres gesamten Einsatzzeitraums. Durch die Anwendung genormter Konstruktionen und die Berücksichtigung spezifischer Einwirkungen wird das Risiko eines Glasbruchs minimiert. Dies trägt dazu bei das Haftungsrisiko für die planenden und ausführenden Gewerke zu reduzieren.

In den vergangenen Jahren wird aus der Praxis vermehrt von Glaskantenbrüchen bei Isolierverglasungen berichtet. Dieser Versagensmechanismus, bei dem ein Riss rechtwinklig zur Scheibenkante verläuft (siehe Abb.1), kann auf eine ungleichmäßige Ausdehnung der Glasscheibe innerhalb der Scheibenebene infolge eines Temperaturgradientens von der Glaskante zur Glasmitte zurückgeführt werden [9]. Infolge des steifen Randverbundes können bei neuartigen Verglasungen wie Vakuumisolierglas (VIG) - neben den in der Ebene wirkenden Temperaturunterschieden - Temperaturgradienten zwischen den beiden Einzelscheiben der



**Abbildung 1:** Thermisch induzierter Glasbruch bei Mehrscheibenisoliertglas.

VIG-Einheit zusätzlich zu Biegespannungen führen. Brüche von VIG infolge einer Temperaturbeanspruchung sind in der Praxis zwar noch nicht umfangreich dokumentiert, die Problematik ist jedoch schon seit 1996 [11] bekannt.

Die Einwirkung der Temperatur innerhalb einer Verglasungskonstruktion ist bisher nicht für den konstruktiven Glasbau in Deutschland normiert. Bislang wurde sich oft an der vorhandenen französischen Norm NF DTU 39 P3 [8] orientiert. Jedoch weist diese Norm teilweise veraltete und nicht nachvollziehbare Annahmen für die Eingangsgrößen der Berechnung auf. Deswegen wurden unter anderem in dem Verbundprojekt "Normenentwurf zur Ermittlung der thermischen Beanspruchung von Glas und Glas-PV-Modulen (BIPV) im Bauwesen (Thermobruch)" [5] Berechnungsmethoden auf der Grundlage aktueller meteorologischer Daten (solare Einstrahlung und Außenlufttemperatur) entwickelt und in Form eines Normenentwurfs dokumentiert.

Im Rahmen der hier vorliegenden Untersuchungen wird ein Verfahren zur Berechnung thermisch induzierter Spannungen bei Isoliergläsern vorgestellt, das anhand eines Dreifach-Isolierglases (3IG) und eines Vakuumisoliertglas-Hybriden (VIG-H) vorgestellt wird. Ein VIG-H beschreibt eine Kombination aus einem VIG und einem MIG, siehe Abb. 2 und Tab. 1. Im Rahmen dieses Ansatzes werden die Wärmeübergangskoeffizienten (WÜK) der Scheibenzwischenräume (SZR) der Verglasungskonstruktion iterativ unter Verwendung eines eindimensionalen Modells algebraisch berechnet. Diese ermittelten Koeffizienten werden anschließend für die numerische Berechnung der resultierenden Temperatur- und Spannungsverteilung angesetzt.

Für die gewählten Konstruktionen entsteht aufgrund der vorhandenen Temperaturverteilung infolge der gewählten meteorologischen Randbedingungen die maximale Beanspruchung auf der mittleren Scheibe (siehe schematische Darstellung in Abb. 2).

## 2 Randbedingungen

Zur Berechnung der resultierenden Spannungen infolge eines Temperaturgradienten in einer Verglasung müssen zunächst die konstruktionsbedingten sowie die meteorologischen Randbedingungen definiert sein und die daraus resultierende Temperaturverteilung im Glas bestimmt werden.

## 2.1 Konstruktionsbedingte Randbedingungen

Unter den konstruktionsbedingten Randbedingungen werden die Geometrie und Materialien des Fensters bzw. Fassadenelements verstanden. Die Parameter des 3IG sowie des VIG-H sind in Tab. 1 dargestellt.

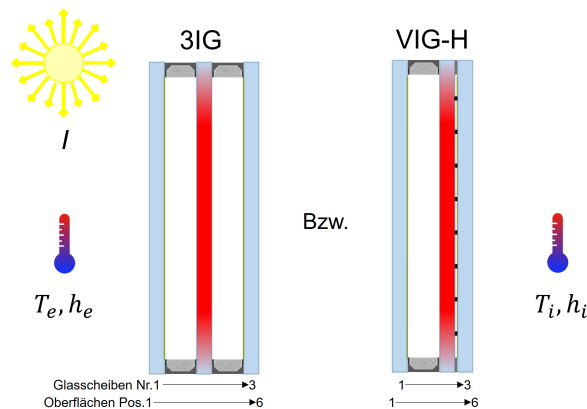
**Tabelle 1:** Konstruktionsaufbau und  $U_g$ -Wert der Verglasungen gemäß [3] und [6];  
Abk.: Floatglas (FL), Scheibenzwischenraum (SZR), Vakuummierter Scheibenzwischenraum (VSZR).

Verglasung	Glasaufbau [mm]	$U_g$ -Wert [ $\frac{W}{m^2K}$ ]
3IG	6Fl-12SZR <sub>1</sub> -4Fl-12SZR <sub>2</sub> -6Fl	0,6
VIG-H	6Fl-12SZR <sub>1</sub> -4Fl-0,2VSZR <sub>2</sub> -4Fl	0,6

In der Praxis kommen die verschiedensten Fenster- und Fassadenrahmenprofile zum Einsatz. Die Variation hinsichtlich ihrer Materialität und Geometrie ist sehr umfangreich, weswegen die folgende Vereinfachung getroffen wird. Im Rahmen der hier vorgestellten Untersuchungen wird auf die Modellierung eines Rahmens verzichtet und der Effekt des Rahmens mit Hilfe von veränderten WÜK abgebildet.

## 2.2 Meteorologische Randbedingungen

Die meteorologischen Randbedingungen, die zur Berechnung der Temperaturverteilung in der Konstruktion bekannt sein müssen, sind die inneren und äußeren Temperaturen  $T_i$  und  $T_e$ , die WÜK  $h_i$  und  $h_e$  und die solare Einstrahlungsintensität  $I$ .



**Abbildung 2:** Darstellung der thermischen Randbedingungen von Isolierverglasungen (3IG links und VIG-H rechts).

Die Größen der meteorologischen Randbedingungen (solare Einstrahlungsintensität und zugehörige Außenlufttemperatur) sind abhängig vom Standort der zu untersuchenden Fassade.

Im Zuge des Forschungsprojektes „Thermobruch“ [5] wurden frei verfügbare und aktuelle meteorologische Daten (solare Einstrahlungsintensität für Vertikalfassaden verschiedener Orientierung, zugehörige Außenlufttemperatur, Wasserdampf und Aerosolgehalt der Luft) der letzten 11 Jahre in Deutschland analysiert. Diese meteorologischen Daten wurden anschließend in einem Raster, welches Deutschland vollständig abdeckt, tabellarisiert.

Die für die Temperaturberechnung erforderlichen standortabhängigen meteorologischen Randbedingungen sind die solare Einstrahlungsintensität  $I$  und die zugehörige äußere Lufttemperatur  $T_e$ . Der kombinierte (Superposition von Temperaturstrahlung und Konvektion - basierend auf der Linearisierung der Temperaturstrahlung) äußere und innere WÜK  $h_e$  und  $h_i$  wurde für den Fall „freie Konvektion“ zu  $10,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  und  $7,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  gewählt. Die Innenraumtemperatur kann vereinfacht je nach Jahreszeit nach Anhang C der DIN 18008-1 [1] je nach Klimatisierung zwischen  $19 \text{ °C}$  und  $28 \text{ °C}$  liegen. Für das hier vorgestellte Beispiel wurde eine raumseitige Temperatur  $T_i$  von  $20 \text{ °C}$  bzw.  $25 \text{ °C}$  angenommen. Welche Kombination der meteorologischen Randbedingungen zur maximalen Beanspruchung der Verglasung führt, ist maßgeblich von dem Aufbau und vorhandenen Beschichtungen (z. B. low-e) des Isolierglases abhängig und kann deshalb nicht allgemeingültig angegeben werden. Zusätzlich kann je nach Kombination und Aufbau der Verglasungskonstruktion eine der drei Glasscheiben des 3IG bzw. des VIG-H maßgebend beansprucht werden.

In der Berechnung beider Konstruktionen wurden zwei Szenarien betrachtet: ein kalter Wintertag und ein warmer Sommertag. Dabei wurde für beide Szenarien eine hohe solare Einstrahlungsintensität  $I$  angesetzt, da diese einen maßgeblichen Einfluss auf die resultierenden Temperaturgradienten hat [5]. Die gewählten meteorologischen Randbedingungen sind in Tabelle 2 aufgeführt und bilden die Grundlage für die numerische Berechnung der Temperaturverteilung in den betrachteten Verglasungskonstruktionen.

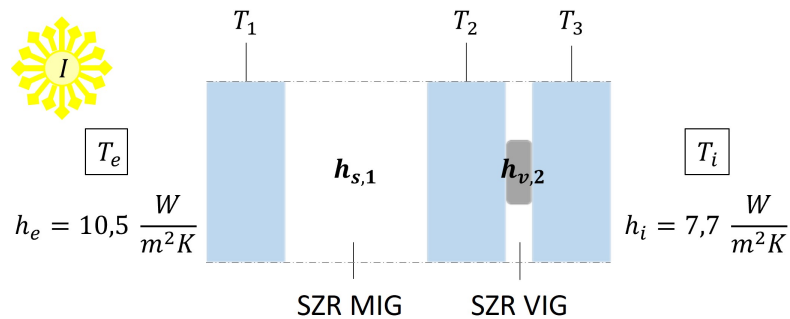
**Tabelle 2:** Meteorologische Randbedingungen.

Szenario	$T_e$ [°C]	$T_i$ [°C]	$h_e$ [ $\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$ ]	$h_i$ [ $\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$ ]	$I$ [ $\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ ]
Kalter Wintertag	-15	20	10,5	7,7	950
Warmer Sommertag	35	25	10,5	7,7	950

### 2.3 Berechnung der WÜK und Glastemperaturen

Der Wärmetransport über die SZR der Isolierverglasungen erfolgt durch Konvektion und Wärmestrahlung. Im VIG-SZR erfolgt der Wärmetransport nur durch Wärmestrahlung und über die Wärmeleitung der Abstandhalter (engl. *pillar*). Diese drei Wärmetransportmechanismen werden jeweils in den WÜK  $h_{s,1}$ ,  $h_{s,2}$  für das 3IG und  $h_{s,1}$  und  $h_{v,1}$  für VIG-H zusammengefasst.

Zur Berechnung der Scheibentemperaturen sowie der temperaturabhängigen WÜK wird ein eindimensionales Modell des Aufbaus der Verglasungskonstruktionen in Scheibenmitte verwendet, siehe Abb. 3.



**Abbildung 3:** Eindimensionales thermisches Modell des VIG-Hybrid in Scheibenmitte.

Das Modell für das 3IG ist dem aus Abb. 3 identisch bis auf den zweiten SZR der für das 3IG dem des ersten SZR entspricht.

Dem Modell unterliegt die Annahme, dass der Temperaturgradient über die Dicke der einzelnen Scheiben vernachlässigbar klein ist. Die Temperaturen der einzelnen Scheiben  $T_1$ ,  $T_2$  und  $T_3$  können mit Hilfe der stationären Wärmebilanzgleichung algebraisch ermittelt werden. Die solare Einstrahlungsintensität  $I$  wird mit Hilfe des effektiven Absorptionsgrads  $\alpha_i$  je Scheibe - Ermittlung nach EN 410 [2] oder auch EN ISO 52033-3 [4] - berücksichtigt. Hierbei können unterschiedliche Beschichtungen auf den einzelnen Oberflächen der Gläser berücksichtigt werden.

Das algebraische Gleichungssystem resultierend aus der Energiebilanzierung für das VIG-H ergibt sich zu:

$$0 = h_e(T_e - T_1) + h_{s,1}(T_2 - T_1) + \alpha_{e,1}I \quad (1)$$

$$0 = h_{s,1}(T_1 - T_2) + h_{v,2}(T_3 - T_2) + \alpha_{e,2}I \quad (2)$$

$$0 = h_{v,2}(T_2 - T_3) + h_i(T_i - T_3) + \alpha_{e,3}I \quad (3)$$

Die Lösung des Gleichungssystems liefert den algebraischen Zusammenhang zur Ermittlung der Glastemperaturen.

Zur Ermittlung der tatsächlichen Glastemperaturen müssen die WÜK der SZR jeweils iterativ berechnet werden, da diese temperaturabhängig sind, siehe Gl. 4 und Gl. 5. Die Berechnung der WÜK der Verglasungskonstruktionen erfolgt für das 3IG gemäß EN 673 [3] und für den Vakuum-SZR des VIG-H gemäß ISO 19916-1 [6].

Der Wärmeübergangskoeffizient der gasgefüllten SZR lässt sich durch Anwendung der Superposition von Wärmestrahlung und Konvektion mit Gleichung 4 gemäß [3] ermitteln.

$$h_{s,k} = 4\sigma \left( \frac{1}{\varepsilon_{1,k}} + \frac{1}{\varepsilon_{2,k}} - 1 \right)^{-1} T_{m,k}^3 + A \cdot \left( \frac{9,81 s_k^3 \Delta T \cdot \rho^2}{T_m \mu^2} \cdot Pr \right)^n \frac{\lambda_k}{s_k} \quad (4)$$

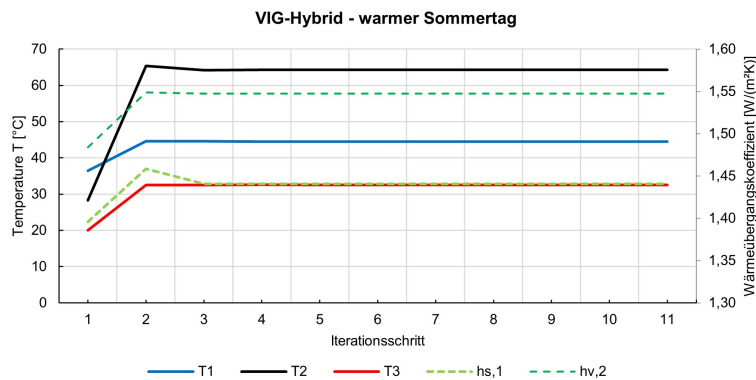
Der Wärmeübergangskoeffizient für den vakuumierten SZR kann mit Hilfe von Gleichung 5 gemäß [6] berechnet werden.

$$h_{v,k} = h_p + 4\sigma \left( \frac{1}{\varepsilon_{1,k}} + \frac{1}{\varepsilon_{2,k}} - 1 \right)^{-1} T_{m,k}^3 + h_a \quad (5)$$

Der Wärmeübergangskoeffizient durch die Abstandhalter des VIG  $h_p$  ist temperaturunabhängig, da er lediglich die Wärmeleitung enthält und diese für die relevanten Temperaturbereiche als konstant angenommen werden kann. Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient resultierend aus den im VIG enthaltenen Restgasen kann vernachlässigt werden, da dieser relativ zu den anderen Wärmeübertragungsmechanismen (Wärmestrahlung und Wärmeleitung) verhältnismäßig klein ist [12].

Unter der Annahme initialer Glastemperaturen  $T_1$ ,  $T_2$  und  $T_3$  können mit Hilfe von Gleichung 1 bis 5 die Glastemperaturen für die betrachtete meteorologische Situation (Wintertag, Sommertag) iterativ berechnet werden. Weiterführende Erläuterungen zum Ablauf dieser iterativen Berechnung sind in [9] aufgeführt.

Diese iterative eindimensionale Berechnung kann anschließende numerische Berechnungen von zweidimensionalen und dreidimensionalen Modellen erleichtern, da die temperaturabhängige Wärmebilanzierung bereits abgeschlossen ist. Es genügen in der Regel drei Iterationsschritte in der eindimensionalen Berechnung bis die Glastemperaturen und WÜK konvergieren, wie dies in Abb. 4 zu sehen ist.



**Abbildung 4:** Iteration der Scheibentemperaturen und der WÜK der SZR.

Für die hier vorgestellten Konstruktionen wurden die WÜK  $h_{s,1}$ ,  $h_{s,2}$  (bzw.  $h_{v,2}$ ) für die zwei Kombinationen von meteorologischen Randbedingungen gemäß Tab. 2 berechnet und sind

für beide Verglasungstypen in Tab. 4 dargestellt. Anhand der Ergebnisse zeigt sich, dass die initial geschätzten Glastemperaturen nur eine erste Näherung darstellen und die temperaturabhängige Berechnung der Wärmeübertragung im SZR erforderlich ist, um die korrekten Glastemperaturen zu erhalten.

**Tabelle 3:** Iterativ berechnete WÜK der SZR.

Verglasung	Szenario	$h_{s,1} \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$	$h_{s,2}$ bzw. $h_{v,2} \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$
3IG	kalter Wintertag	1,81	1,24
3IG	warmer Sommertag	1,43	1,67
VIG-H	kalter Wintertag	1,80	1,51
VIG-H	warmer Sommertag	1,44	1,55

### 3 Berechnung der Temperaturverteilung

Zur Berechnung der resultierende Spannungen kann die Ermittlung der Temperaturverteilung in den Verglasungen mit Hilfe eines numerischen Modells erfolgen. Die standortabhängigen meteorologischen Randbedingungen gemäß Abschn. 2 und die iterativ berechneten WÜK  $h_{s,1}$  und  $h_{s,2}$  (bzw.  $h_{v,2}$ ) gemäß Tab. 4 werden dafür auf das numerische Modell aufgebracht. Die Lufttemperaturen auf der Außen- bzw. Innenseite werden mit Hilfe von Konvektionsrandbedingungen auf Pos.1 bzw. Pos.6 (Nummerierung von außen nach innen, siehe Abb. 2) des numerischen Modells aufgebracht. Die über die eindimensionale iterative Berechnung ermittelten WÜK werden jeweils auf den Pos. 2 bis Pos. 5 als Konvektionsrandbedingungen aufgebracht. Mittels der effektiven Absortionskoeffizienten (Berechnung nach [2] oder [4]) der Glasscheiben  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  und  $\alpha_3$  und der solaren Einstrahlungsintensität  $I$  wird über eine aufgebrachte Wärmestromdichte der Energieeintrag infolge Sonneneinstrahlung im numerischen Modell berücksichtigt. Im Bereich des Randverbundes wird keine solare Einstrahlung angesetzt, da hier sowohl der Rahmen infolge des Glaseinstandes und der Randverbund selbst die Glaskante vor direkter Einstrahlung schützt.

Die Temperaturberechnung kann stationär oder transient erfolgen. Dabei stellt die die stationäre Berechnung mit konstanten meteorologischen Randbedingungen gemäß Tab. 2 einen konservativen Ansatz dar. Ist der Strahlungs- und Temperaturverlauf über einen Tag bekannt, so kann die Berechnung auch transient erfolgen. Jedoch muss bei Anwendung des in Abschn. 2.3 beschriebenen Vorgehens beachtet werden, dass für jeden Zeitpunkt eines Tages mit den entsprechenden Temperatur- und Einstrahlungswerten die WÜK iteriert werden müssen, um die tatsächliche Temperaturverteilung für jeden Zeitpunkt zu erhalten.

In dem hier vorgestellten Beispiel wurde eine stationäre Temperaturberechnung durchgeführt. Wie zu Beginn dieses Artikels erwähnt, ist für die mittlere Glasscheibe des 3IG der Temperaturgradient in der Scheibenebene ( $\Delta T = T_{2,Mitte} - T_{2,Rand}$ ) maßgebend und für die mittlere Glasscheibe des VIG im VIG-H die Temperaturdifferenz zwischen den beiden Glasscheiben des VIG ( $\Delta T_{VIG} \sim T_2 - T_3$ ).

**Tabelle 4:** Resultierende gemittelte Temperaturdifferenzen  $\Delta T$  und  $\Delta T_{VIG}$ 

Verglasung	Szenario	$\Delta T$ [°C]	$\Delta T_{VIG}$ [°C]
3IG	kalter Wintertag	19,5	-
3IG	warmer Sommertag	20,5	-
VIG-H	kalter Wintertag	12,5	7
VIG-H	warmer Sommertag	18	32

## 4 Berechnung der resultierenden Spannungen

Im Anschluss an die thermische Berechnung, wird die Temperaturverteilung auf ein mechanisches Modell übertragen. Dieses wurde, wie es im konstruktiven Glasbau üblich ist, linien-gelagert ausgeführt. Somit ergeben sich für die Pos.1, Pos.3, und Pos.6 der Verglasungskonstruktionen die in Tab. 5 dargestellten Hauptzugspannungen in Abhängigkeit der gewählten Szenarien.

**Tabelle 5:** Berechnete Hauptzugspannungen auf den Glasoberflächen Pos.1, Pos.3 und Pos.6

Verglasung	Szenario	$\sigma_{1max,Pos.1}$ [MPa]	$\sigma_{1max,Pos.3}$ [MPa]	$\sigma_{1max,Pos.6}$ [MPa]
3IG	kalter Wintertag	-	11,8	3,4
3IG	warmer Sommertag	1,4	12,1	-
VIG-H	kalter Wintertag	-	11,0	-
VIG-H	warmer Sommertag	7,4	18,5	-

Die berechneten maximalen Hauptzugspannungen  $\sigma_1$  entstehen an der Kante der jeweiligen Glasscheibe. Es ist bekannt, dass die Kante einer Glasscheibe gegenüber der Fläche eine verminderte Festigkeit aufweisen kann. Bei der richtigen Prozessführung des Schneid- und ggf. Schleifprozesses können charakteristische Kantenfestigkeiten über 45 N/mm<sup>2</sup> erreicht werden [10] [7]. Wie groß die maximalen Spannungen in einer Glasscheibe sind und wo diese auftreten ist bei VIG insbesondere von den Lagerungsbedingungen in Kombination mit der Ausführung des Randverbundes abhängig und muss deshalb den tatsächlichen konstruktiven Randbedingungen der Verglasung angepasst werden.

## 5 Diskussion

Für die Berechnung von Verglasungssystemen ist es unabdingbar, ortbezogene meteorologische Daten zu verwenden, da allgemeingültige meteorologische Randbedingungen nicht hinreichend spezifisch für eine effiziente Bemessung von Verglasungen sind. Dies liegt insbesondere daran, dass die Größe der resultierenden Spannungen maßgeblich von der jeweiligen Konstruktion abhängt. Neben dem hier vorgestellten Berechnungsverfahren wurden auch ein-, zwei- und dreidimensionale Methoden für die Analyse der Temperatur- und Spannungsverteilung in Verglasungskonstruktionen entwickelt. Das eindimensionale Berechnungsverfahren kann sowohl analytisch als auch numerisch durchgeführt werden. Die entwickelten zwei-



und dreidimensionalen Berechnungsmethoden sind dagegen rein numerischer Natur. Zudem besteht die Möglichkeit, in allen Verfahren sowohl die zeitabhängige (transiente) als auch die zeitunabhängige (stationäre) Temperatur- und Spannungsverteilung zu berechnen. Die Auswahl eines geeigneten Verfahrens obliegt der Entscheidung des planenden Ingenieurs.

## Literatur

- [1] Norm DIN 18008-1 Mai 2020. *Glas im Bauwesen – Bemessungs- und Konstruktionsregeln – Teil 1: Begriffe und allgemeine Grundlagen*
- [2] Norm DIN EN 410 2011. *Glas im Bauwesen – Bestimmung der lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kenngrößen von Verglasungen*
- [3] Norm DIN EN 673 Apr. 2011. *Glas im Bauwesen - Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) - Berechnungsverfahren*
- [4] Norm DIN EN ISO 52022-3 2018. *Energieeffizienz von Gebäuden – Wärmetechnische, solare und tageslichtbezogene Eigenschaften von Bauteilen und Bauelementen – Teil 3: Detailliertes Berechnungsverfahren zur Ermittlung der solaren und tageslichtbezogenen Eigenschaften von Sonnenschutz in Kombination mit Verglasungen*
- [5] ENSSLEN, F. ; BEINERT, A. J. ; MAHFOUDI, A. ; HERZBERG, W. ; LORENZ, E. ; HECK, M. ; SCHWIND, G. ; SCHUSTER, M. ; SEEL, M. ; SCHNEIDER, J. ; ELSTNER, M. ; SCHÄFER, S. ; WONDRAKOVA, M. ; ERBAN, C. ; GÖTZ, D. : *Verbundprojekt: Normentwurf zur Ermittlung der thermischen Beanspruchung von Glas und Glas-PV-Modulen (BIPV) im Bauwesen (Thermobruch) : Schlussbericht zum WIPANO-Projekt : Laufzeit: 01.10.2020 bis 30.09.2022*
- [6] Norm ISO 19916-1 Okt. 2018. *Glass in building - Vacuum insulating glass - Part 1: Basic specification of products and evaluation methods for thermal and sound insulating performance*
- [7] MÜLLER-BRAUN, S. ; SEEL, M. ; KÖNIG, M. ; HOF, P. ; SCHNEIDER, J. ; OECHSNER, M. : Cut edge of annealed float glass: crack system and possibilities to increase the edge strength by adjusting the cutting process. In: *Glass Structures & Engineering* 5 (2020). <http://dx.doi.org/10.1007/s40940-019-00108-3>. – DOI 10.1007/s40940-019-00108-3. – ISSN 2363-5142
- [8] Norm NF DTU 39 P3 Okt. 2006. *Travaux de bâtiment - Travaux de vitrerie-miroiterie - Partie 3: Mémento calculs des contraintes thermiques.*
- [9] SCHWIND, G. ; PASCHKE, F. ; SCHNEIDER, J. : Case studies on the thermally induced stresses in insulating glass units via numerical calculation. In: *Challenging Glass Conference Proceedings* Bd. 8, 2022
- [10] SEEL, M. ; MÜLLER-BRAUN, S. ; HOF, P. ; SCHNEIDER, F. ; SCHNEIDER, J. ; OECHSNER, M. : Edge strength of annealed float glass: Identification and optimisation of cutting process parameters, 2023

- [11] SIMKO, T. M.: *Heat Transfer Processes and Stresses in Vacuum Glazing*, The University of Sydney, Diss., 1996
- [12] SIMKO, T. ; EL-MAHDY, A. ; COLLINS, R. E.: DETERMINATION OF THE OVER-ALL HEAT TRANSMISSION COEFFICIENT (U-VALUE) OF VACUUM GLAZING