TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Institut für Statik und Konstruktion

Institute of Structural Mechanics and Design (ISM+D)

Zwischenbericht

Thermische Beanspruchung von Glas im Bauwesen – Ermittlung der thermisch induzierten Beanspruchung ausgewählter Fassaden-verglasungen
Stufe 1: Problemstellung verdeutlichen

Auftraggeber: Bundesverband Flachglas e.V.
Mülheimer Straße 1
53840 Troisdorf

Dieser Bericht umfasst 16 Seiten.

Die Veröffentlichung des vorliegenden Dokuments, auch auszugsweise, sowie die Verwendung für Werbungszwecke bedarf der Genehmigung des Fachgebietes

Institut für Statik und Konstruktion

Franziska-Braun-Str. 3 64287 Darmstadt Telefon: 06151.16 23013 Telefax: 06151.16 23010

Bearbeiter: Technische Universität Darmstadt	
Vorhabenbezeichnung: Thermische Beanspruchung von Glas im Bauwesen – Ermittlung der thermisch induzierten Beanspruchung ausgewählter Fassadenverglasungen Stufe 1: Problemstellung verdeutlichen	
Projektpartner: Institut für Statik und Konstruktion der Technischen Universität Darmstadt (Prof. Dr.-Ing. Jens Schneider) Bundesverband Flachglas e.V.	
Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2016 – 31.06.2016 (Projektlaufzeit – 6 Monate)	

Inhalt

1. Einleitung 4
1.1. Forschungsvorhaben 4
1.2. Ziel und Motivation 4
2. Stufe 1 – Verdeutlichung der Problemstellung 6
2.1. Beschreibung des Vorgehens 6
2.1.1. Außentemperatur und Strahlung 6
2.1.2. 2-Box-Modell (Warme Kante) 8
2.2. FE-Modell 9
2.3. Ergebnisse 10
3. Fazit 14
4. Literaturverzeichnis 16

1. Einleitung

1.1. Forschungsvorhaben

Das zweistufige Forschungsvorhaben „Thermische Beanspruchung von Glas im Bauwesen“ wurde durch den Bundesverband Flachglas e.V. in Auftrag gegeben. Projektleiter des Forschungsvorhabens ist Prof. Dr.-Ing. Jens Schneider vom *Institut für Statik und Konstruktion* (ISMD) der Technischen Universität Darmstadt. Das Projekt begann im Januar 2016. Die Laufzeit der ersten Stufe des Projekts betrug 6 Monate.

1.2. Ziel und Motivation

Bisher gibt es in Deutschland kein normativ geregeltes Verfahren, um den Nachweis gegen thermische Beanspruchung für Glas im Bauwesen zu führen. Demgegenüber stehen jedoch eine Vielzahl an Schadensfällen, die auf thermisch induzierte Belastungen zurückzuführen sind (Abbildung 1.1). Als Vorbereitung für ein entsprechendes Nachweisformat wird im Rahmen dieses Projekts grundsätzlich die Problemstellung verdeutlicht, um anschließend einen öffentlich geförderten Forschungsantrag zu erarbeiten und einzureichen. Das Projekt ist in zwei Stufen gegliedert:

Stufe 1: Verdeutlichung der Problemstellung

Stufe 2: Erarbeitung und Einreichung eines Vollantrags für ein öffentlich gefördertes Forschungsprojekt.

Abbildung 1.1 Beispiele für Schadensfälle, die auf thermisch induzierte Beanspruchung zurückzuführen sind

Um einen öffentlich geförderten Forschungsantrag zu stellen, muss die Problemstellung nachvollziehbar dargestellt werden. Dazu wird in der ersten Stufe des vorliegenden Projekts die Notwendigkeit eines Nachweises gegen thermische Beanspruchung für Glas im Bauwesen verdeutlicht, indem das grundsätzliche Vorgehen für die Ermittlung der durch thermische Beanspruchung hervorgerufenen Spannungszustände definiert und an ausgewählten Konstruktionen angewendet wird.

Darauf aufbauend wird in der zweiten Stufe eine Antragsskizze vorbereitet und bei einer öffentlichen Förderstelle (z.B. BMWi-WIPANO) eingereicht.

2. Stufe 1 – Verdeutlichung der Problemstellung

2.1. Beschreibung des Vorgehens

Für die Ermittlung der durch thermische Beanspruchung hervorgerufenen Spannungszustände wird auf Basis von kritischen Einwirkungskombinationen aus Temperatur und Strahlung in Abhängigkeit der Fassadenorientierung und der Jahreszeit das Temperaturfeld in der Glasebene und die daraus resultierenden Spannungszustände in der Verglasung ermittelt. Dabei wird im ersten Schritt zur Ermittlung der thermisch induzierten Spannungen mit Hilfe des Programpakets ANSYS [1] das Temperaturfeld für jede Verglasungsebene in Abhängigkeit der in den folgenden Abschnitten beschriebenen Randbedingungen transient berechnet. Ziel ist ein zweidimensionales Temperaturfeld über Glasfläche für jeden Zeitschritt zu erzeugen. Der Temperaturgradient über die Glasdicke wird dabei zunächst nicht berücksichtigt.

Das ermittelte Temperaturfeld wird im zweiten Schritt auf ein strukturmechanisches Modell unter Berücksichtigung der Materialeigenschaften der unterschiedlichen Elemente der Verglasung (Glas, Abstandhalter, Dichtstoff) in ANSYS als Belastung in einem gekoppelten thermisch-strukturmechanischen Modell (Methode der finiten Elemente) auf die Einzelscheibe eingelesen und die resultierenden Spannungen für die als kritisch identifizierten Zeitschritte ermittelt. Auf dieser Basis kann anschließend ein Nachweis z.B. gegenüber der Kantenfestigkeit von Verglasungen geführt werden.

In den folgenden Abschnitten werden die getroffenen Annahmen und die angesetzten Randbedingungen, die als Input-daten für eine Finite Elemente Modellierung des dargestellten Problems bedeutsam sind, beschrieben.

2.1.1. Außentemperatur und Strahlung

Die Eingangswerte für die thermische Simulation werden auf Basis der DIN EN 10077, Teil 2 zusammengestellt [3].

Für jeweils Winter und Sommer werden für einen repräsentativen Standort (Deutschland, Potsdam nach EnEV) und für die Fassadenorientierungen Südost die Strahlungsganglinien und die dazugehörige Außentemperatur erarbeitet. Dabei wird ein Testreferenzjahr (TRY) des Deutschen Wetterdienstes (DWD) zugrunde gelegt (vgl. Abbildung 2.1). Bei der Entscheidung der kritischen Fassadenorientierung Südost wurde die Kombination der Morgensonne (hohe Strahlung) mit der kalten Nacht berücksichtigt.

Die Strahlungswerte sind aus der Summe der direkten und der diffusen Strahlung des Testreferenzjahres TRY2011 ermittelt.

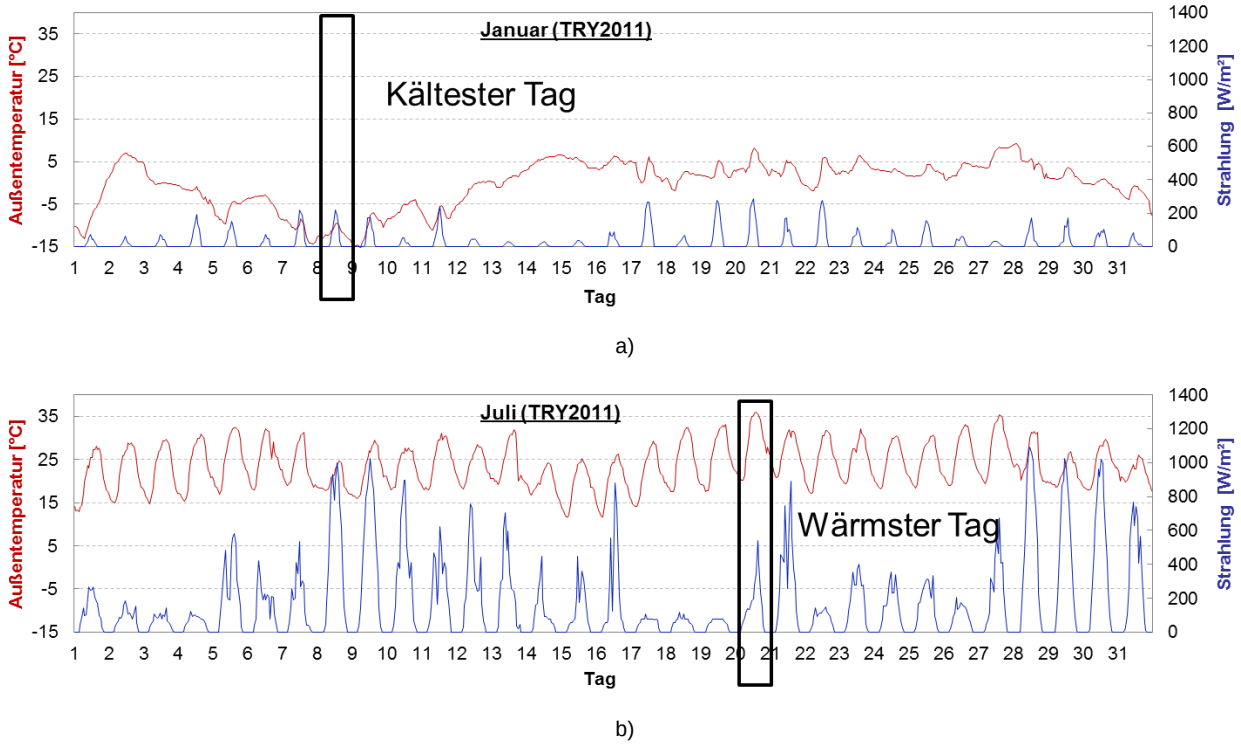


Abbildung 2.1 Strahlungsganglinie [W/m²] (blau) und Außentemperatur [°C] (rot) für das Testreferenzjahr TRY2011 des Deutschen Wetterdienstes (DWD): a) Kältester Tag im Winter, b) Wärmster Tag im Sommer

In Abbildung 2.2 sind die Werte der Strahlung und der Außentemperatur, die bei den FE-Berechnungen berücksichtigt wurden, jeweils über den Tag im Winter und im Sommer dargestellt.

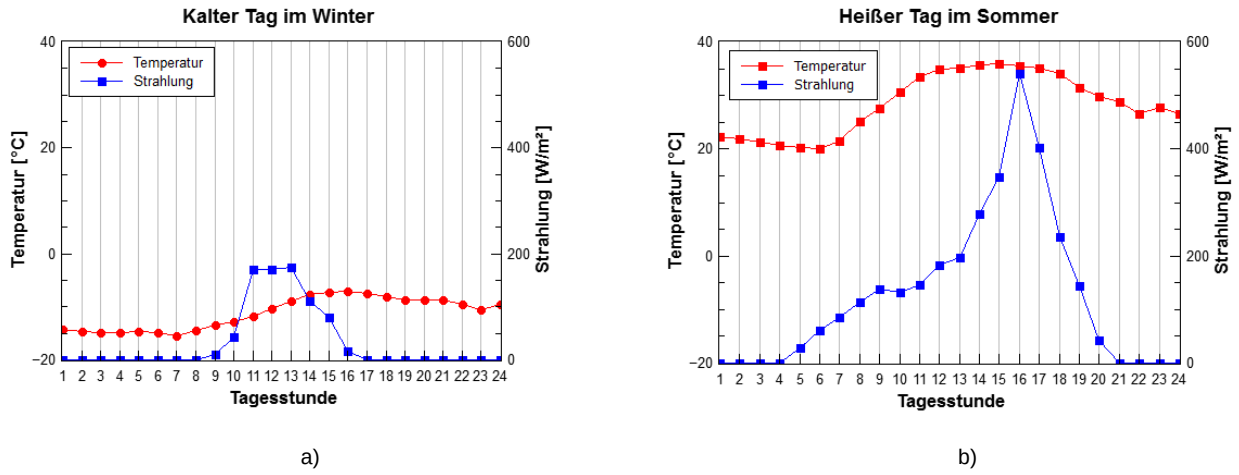


Abbildung 2.2 Werte für die Strahlung [W/m²] (blaue Quadrate) und die Außentemperatur [°C] (rote Kreise) aufgetragen über Tagesstunden, jeweils für a) Winter und b) Sommer (TRY2011)

Bei der Entscheidung des Referenztages aus dem Testreferenzjahr zur Ermittlung der kritischen Einwirkungskombination für die FE-Berechnungen wurde jeweils der Tag mit geringer Außentem-

peratur und gleichzeitig hoher Strahlung (z.B. Einwirkung: kalte Nacht + Morgensonne) berücksichtigt.

2.1.2. 2-Box-Modell (Warme Kante)

Zur Ermittlung des Temperaturfeldes wurde eine „warme Kante“ als Randverbund berücksichtigt. Dabei wurden für den Abstandhalter *Thermix® TX.N® Plus* die äquivalenten Wärmeleitfähigkeitswerte den Datenblättern der Firma Ensinger GmbH [2] entnommen. In Abbildung 2.3 ist die Skizze eines 2-Box-Modells mit dem Randverbund als „warme Kante“ für ein 2-fach Isolierglas und den dazugehörigen Werten für die Leitfähigkeit des angesetzten Dichtstoffes (Polysulfid) mit der Höhe h1 und des Abstandhalters mit der Höhe h2 dargestellt.

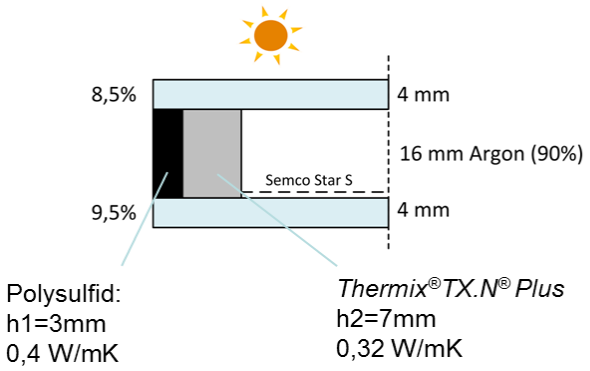


Abbildung 2.3 Skizze eines 2-Box-Modells mit dem Randverbund als „warme Kante“ und den zugehörigen Werten der Wärmeleitfähigkeit für den Dichtstoff (Polysulfid, h1=3 mm) und den Abstandhalter (*Thermix® TX.N® Plus*, h2=7 mm) [2] und Wärmedämmgas Argon (90%).

Das Wärmedämmgas wurde als gleichmäßiger Druck im Zwischenraum des Isolierglases berücksichtigt. Für die Berechnungen wurde eine Parameterstudie mit unterschiedlichen 2-Box-Modellen für 2-fach und 3-fach Isoliergläsern mit unterschiedlichen Beschichtungspositionen für Wärmeschutz- und Sonnenschutzgläsern durchgeführt. In Abstimmung mit den Teilnehmern der Ad hoc Gruppe Thermische Beanspruchung wurden die zu untersuchenden, repräsentativen Glasaufbauten nach Abbildung 2.4 zusammengestellt. Die FE-Berechnungen wurden jeweils für die Beschichtungstypen *Semco Star S*, *Semco Klima 400 S*, *Semco Klima 500 S* und *Semco Klima 700 S* der Firma Semcoglas Holding GmbH an unterschiedlichen Positionen durchgeführt.

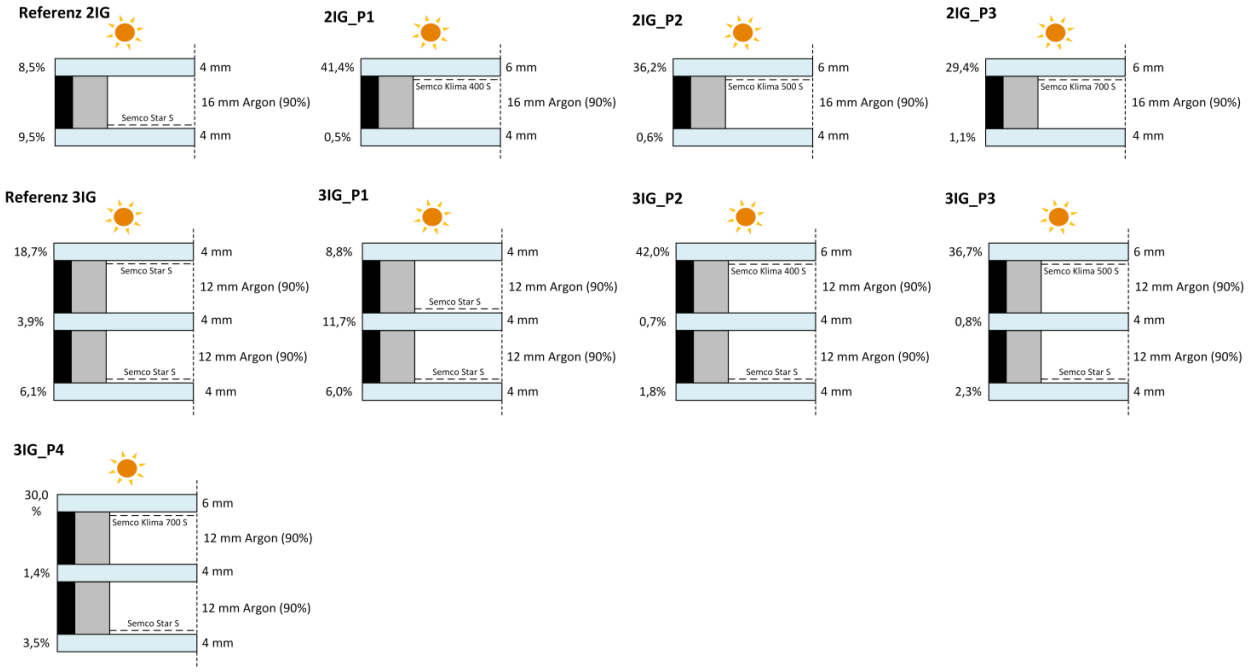


Abbildung 2.4 Untersuchte Glasaufbauten mit Beschichtungsposition und Absorptionsgrad

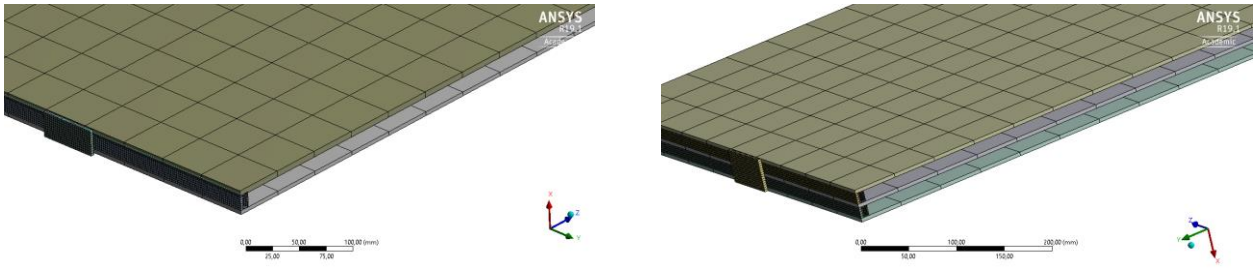
2.2. FE-Modell

Das Temperaturfeld und das daraus resultierende Spannungsfeld in der Glasebene wurde an einem Volumenmodell mit Hilfe der Finite Elemente Software Ansys [1] berechnet. Das Isolierglas mit der Abmessung 1,0 m x 2,0 m und dem entsprechenden Aufbau wurde als feststehende Verglasung modelliert (vgl. Abbildung 2.5).

Abbildung 2.5 Lagerung – Feststehende Verglasung

In den Untersuchungen wurde eine halbseitige Verschattung der Verglasung berücksichtigt. Dabei wurde die bestrahlte Seite mit der Einwirkungskombination (Außentemperatur + Strahlung) und

die verschattete Seite nur mit der Außentemperatur belastet. Die Innentemperatur (Temperatur des Innenraums) wurde bei 20°C konstant über den Tag angenommen. Bei der Modellierung wurde die Symmetrie um die Längsachse berücksichtigt.



a) b)

Abbildung 2.6 FE-Netz des Volumenmodells für das 2-Box-Modell in Ansys: a) 2-fach Isolierglas und b) 3-fach Isolierglas; Die Längssymmetrie wurde ausgenutzt. Im Bild ist ein Tragklotz zusehen.

2.3. Ergebnisse

Für die Berechnungen wurde zunächst das Temperaturfeld über den Tag berechnet. Hierzu wurde das Programpaket Ansys [1] angewendet. Der Temperatur-Zeit-Verlauf über den gewählten Sommertag über die Tagesstunden ist beispielhaft in Abbildung 2.7 dargestellt. Dabei sind die oben beschriebenen Randbedingungen berücksichtigt. Das aus dem Temperatur-Zeit-Verlauf resultierende Temperaturfeld ist beispielhaft für ein 2-fach Isolierglas zum Zeitpunkt der maximalen Temperatur (ca. 14 Uhr) in Abbildung 2.8 dargestellt.

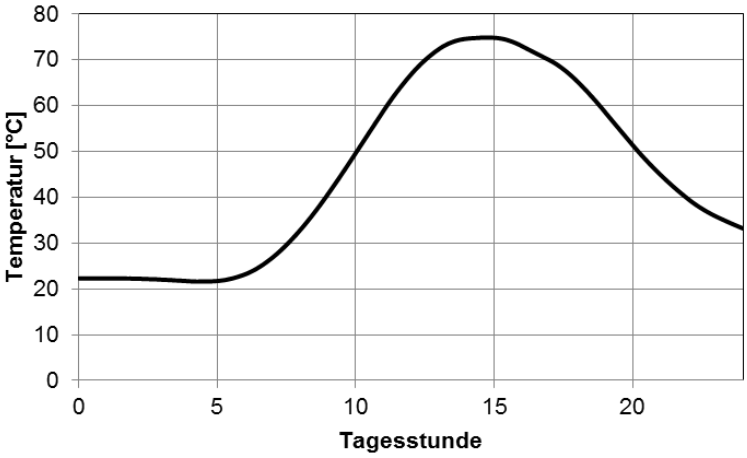
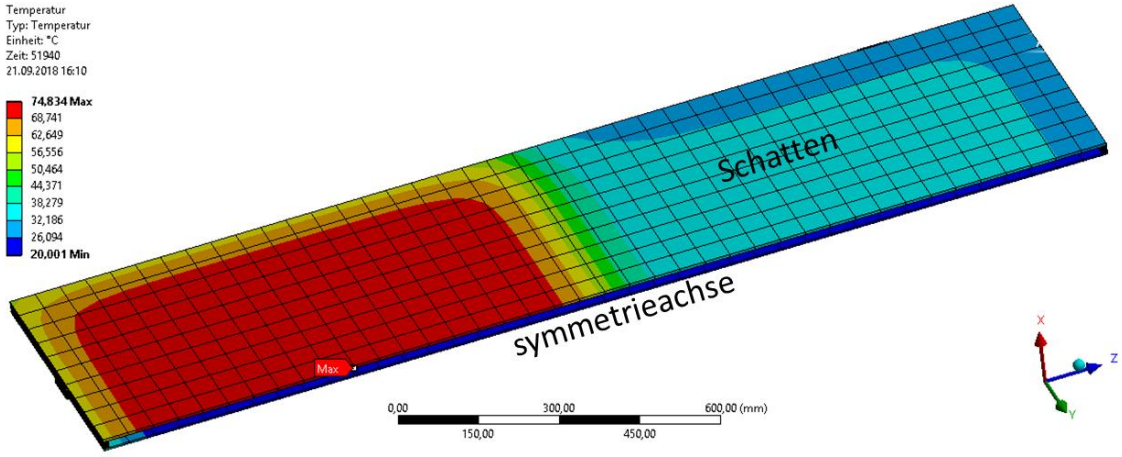
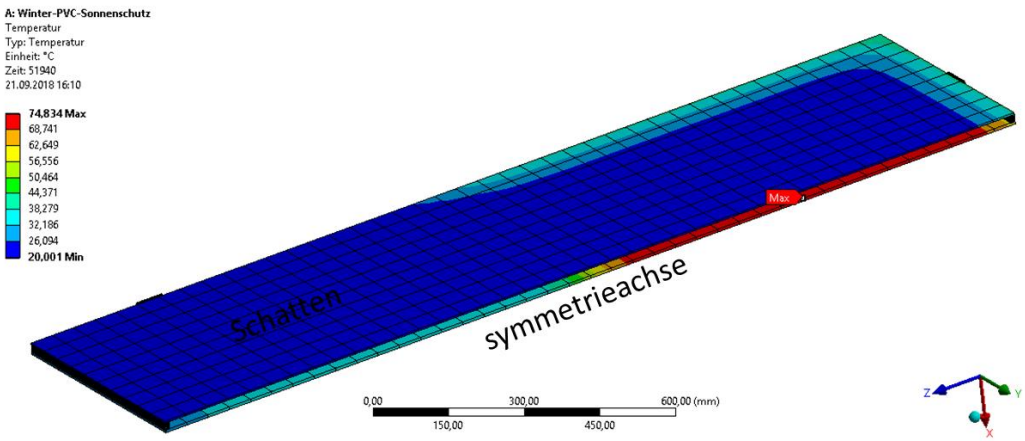


Abbildung 2.7 Beispiel des Temperatur-Zeit-Verlaufs (Außentemperatur + Strahlung) über den gewählten Sommertag für das 2-Box-Modell „Referenz 2IG", hier: äußere Glasscheibe



a)



b)

Abbildung 2.8 Beispiel für ein Temperaturfeld zur Mittagsstunde des gewählten Sommertages für das 2-Box-Modell „Referenz 2IG"; halbseitige Verschattung a) äußere Glasscheibe b) innere Glasscheibe

Das ermittelte Temperaturfeld wird als Belastung auf das Modell angesetzt und die Spannungen berechnet. Damit ergibt sich für das oben dargestellte Referenzmodell (Referenz 2IG) der Spannungs-Zeit-Verlauf in Abbildung 2.9. Die maximale Hauptzugspannung der äußeren Scheibe beträgt ca. 12 MPa und tritt in der bestrahlten Hälfte und an der unteren Kante im Bereich zwischen den Tragklötzen auf. Die maximale Hauptzugspannung der inneren Scheibe beträgt ca. 6 MPa. Diese Spannung tritt im Bereich der unteren Ecke (unmittelbar oberhalb der Tragklötze) auf (vgl. Abbildung 2.10).

Bei der Simulation entsteht an der verschatteten Seite der Verglasung eine maximale Hauptzugspannungen von ca. 3 MPa, die ebenso im Bereich der Kante auftritt.

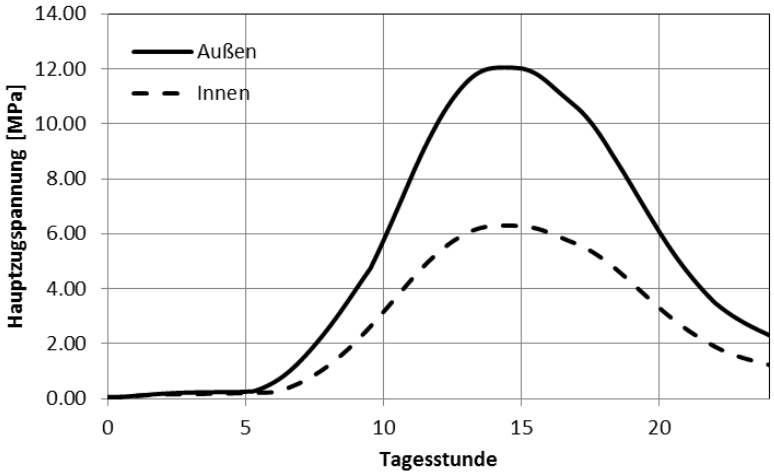
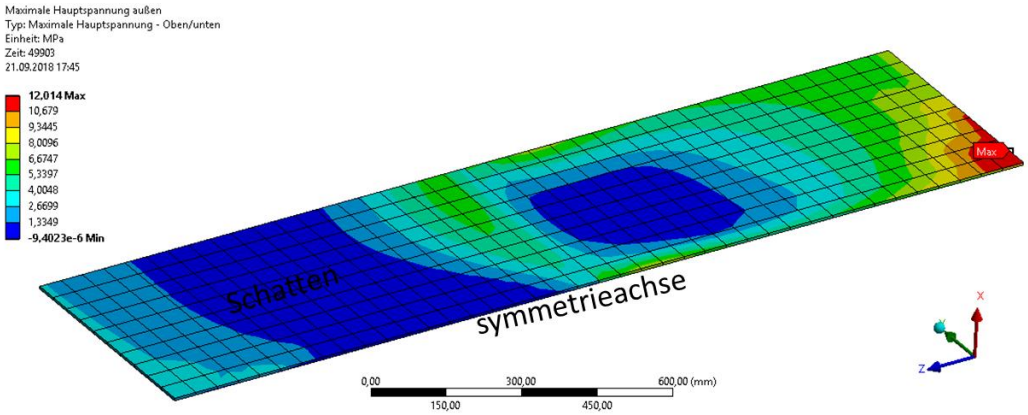
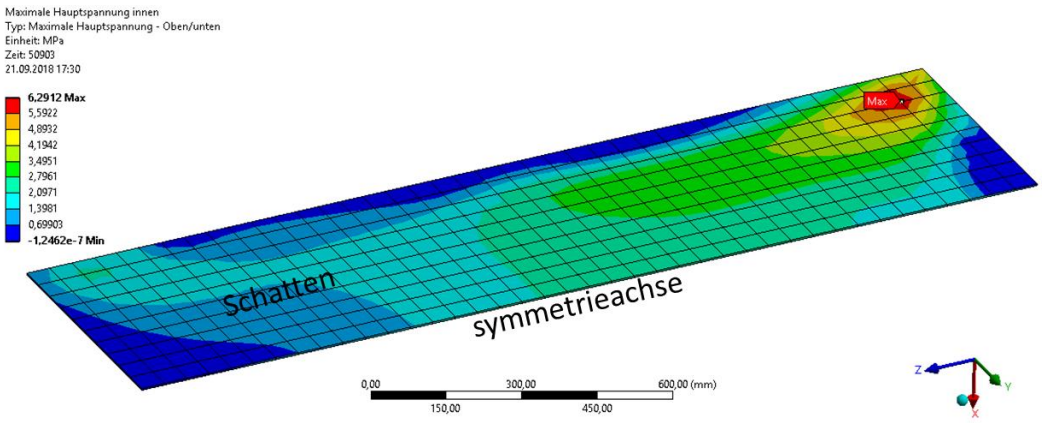


Abbildung 2.9 Beispiel des Spannungs-Zeit-Verlaufs über den gewählten Sommertag für das 2-Box-Modell „Referenz 2IG", hier: äußere Glasscheibe



a)



b)

Abbildung 2.10 Beispiel der maximalen Hauptzugspannung am gewählten Sommertag für das 2-Box-Modell „Referenz 2IG", a) äußere Scheibe, b) Innere Scheibe

In Tabelle 1 und Tabelle 2 sind die Werte der maximalen Hauptzugspannung für die unterschiedlichen 2-Box-Modelle (vgl. Abbildung 2.4) aufgelistet.

Tabelle 1 FE-Ergebnisse der maximalen Hauptzugspannung – berechnet für 2-fach Isolierglas (siehe Abbildung 2.4)

	Sommer		Winter	
	σ_{max} [MPa]		σ_{max} [MPa]	
	Außen	Innen	Außen	Innen
Refernz 2IG	11,83	12,01	4,21	5,58
2IG_P1	65,23	1,04	6,09	11,04
2IG_P2	58,47	1,08	5,78	9,76
2IG_P3	13,05	1,67	4,84	9,26

Tabelle 2 FE-Ergebnisse der maximalen Hauptzugspannung – berechnet für 3-fach Isolierglas (siehe Abbildung 2.4)

	Sommer			Winter		
	σ_{max} [MPa]			σ_{max} [MPa]		
	Außen	Mitte	Innen	Außen	Mitte	Innen
Refernz 3IG	34,91	3,48	9,75	16,22	12,13	9,78
3IG_P1	11,96	48,54	9,73	12,83	19,38	9,86
3IG_P2	65,58	1,10	2,27	16,07	9,68	9,74
3IG_P3	50,31	1,13	3,21	15,46	8,76	8,78
3IG_P4	48,10	1,88	3,41	12,56	7,89	8,01

3. Zusammenfassung und Fazit

In der Stufe 1 des zweistufigen Projekts sollten Gläser im Bauwesen hinsichtlich des Erfordernisses eines normativen Verfahrens gegen thermisch induzierte Beanspruchung untersucht werden. Um die Problemstellung zu verdeutlichen und eine Notwendigkeit eines Nachweiskonzeptes zu prüfen wurden numerische Untersuchungen an feststehende 2-fach und 3-fach Isolierverglasungen hinsichtlich der thermisch induzierten Beanspruchung durchgeführt. Dabei wurde die thermisch induzierte Beanspruchung ausgewählter Fassaden-verglasungen bei ausgewählten Randbedingungen ermittelt. Dabei wurde die Einwirkungskombination Außentemperatur und Strahlung als Belastung angesetzt.

Für jeweils Winter und Sommer wurden für einen repräsentativen Standort (Deutschland, Potsdam nach EnEV) und für die Fassadenorientierungen Südost die Strahlungsganglinien und die dazugehörige Außentemperatur erarbeitet. Dabei wurde ein Testreferenzjahr (TRY) des Deutschen Wetterdienstes (DWD) zugrunde gelegt. Die Strahlungswerte wurden aus der Summe der direkten und der diffusen Strahlung des Testreferenzjahres TRY2011 ermittelt.

Unterschiedliche 2-Box-Modelle, ausgeführt mit einem Randverbund als „warme Kante“, mit unterschiedlichen Beschichtungspositionen wurden untersucht. Für die Untersuchungen wurden die Isolierverglasungen als Volumenmodelle in der FE-Software Ansys modelliert. Zunächst wurde das über den Tag transiente Temperaturfeld in der Glasebene numerisch berechnet, sodass zu jeder Tagesstunde ein Temperaturfeld ermittelt wurde. Dann wurde das Temperaturfeld als eine Belastung auf das Modell unter der Berücksichtigung der Materialeigenschaften der unterschiedlichen Elemente der Isolierverglasung aufgesetzt und die dabei durch die Temperaturunterschiede entstandene Spannungen in der Glasebene berechnet. In Tabelle 1 und Tabelle 2 wurden jeweils für 2-fach und 3-fach Isolierverglasungen die maximale thermisch induzierte Hauptzugspannung dargestellt.

Die Untersuchungen haben verdeutlicht und gezeigt, dass ein normativ geregeltes Nachweisverfahren für einen Nachweis gegen thermische Beanspruchung für Glas im Bauwesen notwendig ist. Die meisten untersuchten Modelle (2IG_P1, 2IG_P2, 3IG_P1, 3IG_P2, 3IG_P3 und 3IG_P4) können gemäß den Untersuchungen nicht mit dem Floatglas (mit den angegebenen Dicken) ausgeführt werden, da hier die zulässige Festigkeit von 36 MPa überschritten wird. Diese Modelle bedürfen den Einsatz von Ein-Scheiben-Sicherheitsglas um die Umsetzung ohne einen Nachweis rechtfertigen zu können. Deshalb wird an dieser Stelle auf die Notwendigkeit eines Nachweiskonzepts für Gläser im Bauwesen unter thermisch induzierter Beanspruchung hingewiesen.

Somit wurde in der Stufe 1 des Projekts die Rahmenbedingungen als Vorbereitung für weitere Untersuchungen in Form eines öffentlich geförderten Forschungsantrags erarbeitet. In einer zweiten

Stufe kann und soll jetzt die Erarbeitung eines Vollantrags für ein öffentlich gefördertes Forschungsprojekt (z.B. WIPANO des BMWi) erfolgen.

4. Literaturverzeichnis

[1] ANSYS, Inc.: Ansys, 19.1 (2017)

[2] Ensinger GmbH – Datenblatt Psi-Werte Fassadenprofile – auf Basis messtechnischer Ermittlung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit der Abstandhalter – Arbeitskreis ‚Warme Kante' (2016)

[3] DIN EN ISO 10077-2:2018-01 – Wärmetechnisches Verhalten von Fenstern, Türen und Abschlüssen - Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten - Teil 2: Numerisches Verfahren für Rahmen (ISO 10077-2:2017); Deutsche Fassung EN ISO 10077-2:2017

Darmstadt, 26.09.2018

Prof. Dr.-Ing. J. Schneider

Dipl.-Ing. Navid Pourmoghaddam