



Merkblatt für thermisch induzierte Spannungen bei Vertikalverglasungen

Zusammenstellung aus dem Schlussbericht
zum WIPANO-Projekt (FKZ: 03TN0007A-D)
Laufzeit: 01.10.2020 bis 30.09.2022

Thermisch induzierte Spannungen bei Vertikalverglasungen

Dieses Merkblatt wurde erarbeitet von:

Dr. Ing. Frank Ensslen (Fraunhofer ISE) und Gregor Schwind M.Sc. (Glass Competence Center, TU Darmstadt)
im Namen des Fachverband Konstruktiver Glasbau e. V., Köln und Bundesverband Flachglas e. V., Troisdorf



© 2024

Bildnachweis Titelseite/Seite 4: stock.adobe.com; Rückseite: freepik.com

HAFTUNGSAUSSCHLUSS

Alle Informationen in diesem Merkblatt sind nach bestem Wissen und Gewissen zusammengestellt. Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass keine Haftung für die Richtigkeit, Aktualität und Vollständigkeit der Informationen übernommen wird. Insbesondere ersetzt der Inhalt dieses Merkblattes keine technische Beratung in dieser komplexen Thematik im Einzelfall.

INHALTSVERZEICHNIS

1. Struktur des Merkblatts.....	4
2. Einleitung.....	5
2.1 Problemstellung.....	5
2.2 Anwendungsbereich und Ziel des Merkblatts.....	6
2.3 Grundlage für dieses Merkblatt.....	6
2.4 Wissenstransfer	6
3. Parameter für thermisch induzierte Beanspruchungen	7
3.1 Einleitung.....	7
3.2 Einflussgrößen bei Verglasungen.....	7
4. Beispiel für Thermobrüche bei Verglasungen	8
4.1 Einleitung	8
4.2 Beispiel 1 – Brüstungsverglasung	8
4.3 Beispiel 2 – Dreifach-Isolierglas als Wärmedämmglas	9
4.4 Beispiel 3 – Zweifach-Isolierglas als Wärmedämmglas.....	9
4.5 Beispiel 4 – Zweifach-Isolierglas als Wärmedämmglas	10
4.6 Beispiel 5 – Dreifach-Isolierglas als Wärmedämmglas	10
5. Meteorologische Randbedingungen	11
5.1 Einleitung	11
5.2 Kritische meteorologische Bedingungen	11
6. Parameterstudien für Verglasungen mittels der Methode der Finiten Elemente.....	12
6.1 Einleitung	12
6.2 Ergebnisse	12
7. Berechnungen für eine beispielhafte Verglasung	13
7.1 Einleitung	13
7.2 Ergebnisse	13
7.3 Zusammenfassung für diese Untersuchungen.....	17
8. Fazit	17
9. Verweise auf Literaturquellen	18

Thermisch induzierte Spannungen bei Vertikalverglasungen



1. STRUKTUR DES MERKBLATTS

Mit der Einleitung in die Thematik in Kapitel 2 werden die Problemstellung, der Anwendungsbereich und die Zielstellung des Merkblatts und seine Grundlage erläutert. Im Kapitel 3 werden die relevanten Einflussgrößen für thermisch induzierte Beanspruchungen (im Folgenden gleichbedeutend mit Spannungen verwendet) bei Verglasungen wiedergegeben. Exemplarische Schadensbilder für einen „Therm-

bruch“ bei Verglasungen in verschiedenen Einbausituationen sind in Kapitel 4 dargestellt. Die Grundlagen von kritischen meteorologischen Randbedingungen für thermisch induzierte Spannungen sind in Kapitel 5 erläutert und anhand von Karten visualisiert. Kapitel 6 geht auf wesentliche Schlussfolgerungen hinsichtlich der relevantesten Einflussfaktoren und deren Auswirkungen auf die thermisch induzierte

Glasspannung ein, die anhand von numerischen Simulationen mittels der Finite-Elemente-Methode (FEM) abgeleitet werden konnten. Abschließend sind in Kapitel 7 beispielhaft Ergebnisse aus der Anwendung von verschiedenen Berechnungsverfahren für eine Vertikalverglasung mit unterschiedlichen Orientierungen und Jahreszeiten präsentiert. Nach dem Fazit in Kapitel 8 weist Kapitel 9 auf nennenswerte Literaturquellen hin.

2. EINLEITUNG

2.1 Problemstellung

Fassadenverglasungen sind unterschiedlichen Einwirkungen wie Eigengewicht, Windlasten sowie sogenannten „Klimalasten“ (äußere und innere Druckänderungen) ausgesetzt und müssen nach einschlägigen Normen dimensioniert werden. Die Einwirkung infolge direkter Sonneneinstrahlung gepaart mit der Umgebungslufttemperatur wird häufig vernachlässigt. Beide können jedoch für die Dimensionierung der Verglasung – insbesondere von Mehrscheiben-Isolierglas – relevant sein, wie viele Schadensfälle („Thermobruch“) aus der Praxis zeigen. Trifft die Sonneneinstrahlung auf unverschattete Bereiche der Verglasung, so erwärmen sich diese, während die verschatteten Bereiche (z. B. der Glasrand im Fensterrahmen) kühl bleiben. Aufgrund

dieser ungleichmäßigen Erwärmung der Glasscheibe in der Ebene dehnt sich der wärmere, mittige Bereich der Glasscheibe stärker aus als die kühlere Kante des Glases, was einer Einschränkung der Ausdehnung des wärmeren, zentralen Bereichs gleichkommt. Daraus entstehen in den meisten Einbausituationen Zugspannungen am Glasrand und Druckspannungen in der Glasmitte, was in Abbildung 2.1 a) verdeutlicht ist. Werden die Temperaturunterschiede zu groß, können thermisch induzierte Glasbrüche auftreten, wie Abbildung 2.1 b) zeigt. Um in der Praxis einen thermisch induzierten Bruch zu identifizieren, wird empfohlen die Gashalteleisten zu entfernen, sodass die Glaskanten sichtbar werden. Für typische „Thermobrüche“ zeigt sich ein senkrecht verlaufender Riss über die Dicke der Einzelscheibe, vgl. [6], welcher in der Ebene geschwungen ist oder auch fächerförmig verlaufen kann, siehe Abb. 2.1 b).

Beispiel für einen thermisch induzierten Glaskantenbruch



Abbildung 2.1 b) (Quelle: Fraunhofer ISE)

Phänomen des thermisch induzierten Glaskantenbruchs

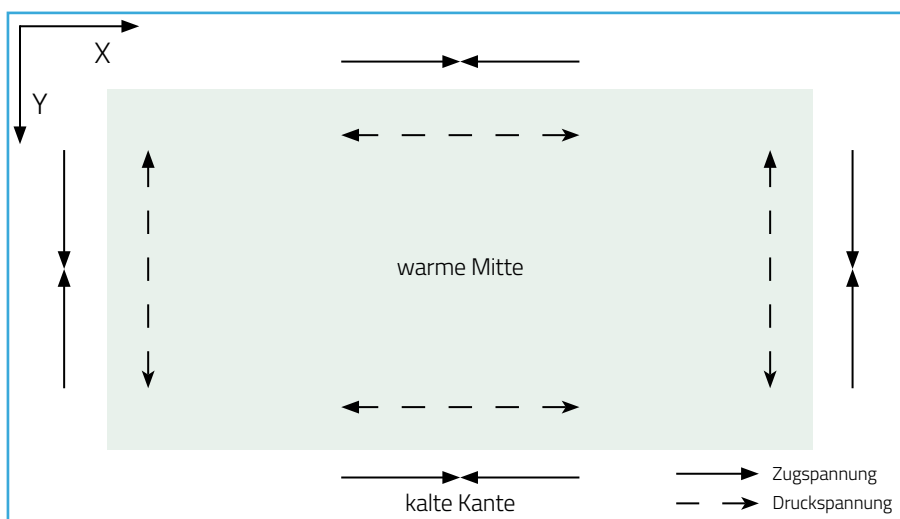


Abbildung 2.1 a) (Quelle:[5])

Thermisch induzierte Spannungen bei Vertikalverglasungen

2.2 Anwendungsbereich und Ziel des Merkblattes

Das Merkblatt stellt den umfassenden Forschungsbericht Verbundprojekt »Thermobbruch«: Normentwurf zur Ermittlung der thermischen Beanspruchung von Glas und Glas-PV-Modulen (BIPV) im Bauwesen [2] als komfortables Nachschlagewerk zusammenzufassend dar, um das Thema für die Praxis handhabbarer zu machen.

Das Dokument soll dabei den Planern, dem produzierenden Gewerbe in der Glasveredelung und den ausführenden Firmen mit Glaserzeugnissen die Thematik (ohne Berechnung) aufzeigen und diese hierfür sensibilisieren. Damit können ggf. mit geeigneten Maßnahmen thermisch induzierten Spannungen in Verglasungen vorgebeugt werden.

Der Anwendungsbereich dieses Merkblattes umfasst Vertikalverglasungen (Rahmenkonstruktion sowie Einfachglas und Mehrscheiben-Isolierglas).

Auf die Thematik im Kontext mit BIPV-Modulen (Bauwerkintegrierte Photovoltaik), bestehend aus Glas, wird in diesem Merkblatt nicht näher eingegangen. Details und Ergebnisse hierzu sind [1] zu entnehmen. Ebenfalls sind Horizontalverglasungen, Konstruktionen mit Sonnenschutz im Scheibenzwischenraum von Mehrscheiben-Isolierglas als auch Vakuumisolierglas und Kombinationen von Mehrscheiben-Isolierglas mit Vakuumisolierglas in diesem Merkblatt nicht berücksichtigt.

Des Weiteren wird nicht auf die Einflüsse aus der sogenannten „Klimalast“ (Isolierglaseffekt), ggf. mit der Überlagerung von thermisch induzierten Glasspannungen, und die Beanspruchbarkeit (Widerstandsseite) des Glases, d. h. die Glaskantenfestigkeit, eingegangen.

2.3 Grundlage für dieses Merkblatt

Dieses Merkblatt wurde auf Grundlage des Forschungsberichts „Thermobbruch“ [2], welcher öffentlich zugänglich ist, erstellt.



Das Verbundprojekt »Thermobbruch«: Normentwurf zur Ermittlung der thermischen Beanspruchung von Glas und Glas-PV-Modulen (BIPV) im Bauwesen wurde durch das Deutsche Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz mit dem Förderkennzeichen O3TN0007A-D gefördert.

2.4 Wissenstransfer

Durch die Mitarbeit in den Normungsgremien für Verglasungen

- CEN/TC 129/WG 8/TG „Thermal fracture“
 - NA 005-09-25 AA „Bemessungs- und Konstruktionsregeln für Bauprodukte aus Glas“ (DIN 18008)
 - CEN/TC 250/SC 11/WG 1 – zuständig für CEN/TS 19100 – Design of glass structures und in den Normungsgremien für Bauwerkintegrierte Photovoltaik-Module (BIPV)
 - CENELEC TC 82 – zuständig für EN 50583 – und
 - „Joint Working Group 11 on BIPV“ von IEC TC 82 bzw. ISO TC 160 WG9 – verantwortlich für IEC 63092
- wurden im Forschungsprojekt die entwickelten Berechnungsverfahren in den jeweiligen Gremien präsentiert und stehen momentan zur Diskussion.

3. PARAMETER FÜR THERMISCH INDUZIERT BEANSPRUCHUNGEN

3.1 Einleitung

Die Größe von thermisch induzierten Beanspruchungen (Spannungen) in Gläsern wird durch verschiedene Parameter (z. B. meteorologische Gegebenheiten, konstruktiver Aufbau der Verglasung, etc.) beeinflusst. Im Forschungsprojekt „Thermobruch“ [2] wurden basierend auf den Erfahrungen der Partner allgemein Einflussgrößen und Parameter identifiziert und im Anschluss durch experimentell validierte Simulationsmodelle numerisch untersucht. Schlussfolgerungen daraus sind in diesem Merkblatt in Kapitel 6 dargestellt.

3.2 Einflussgrößen bei Verglasungen

Verglasungen werden täglich weltweit verbaut, in der Regel als definierte und größtenteils standardisierte Systeme in den verschiedensten Bauwerkstypen und Fassaden, wobei es festgelegte Parameter gibt, u. a. Standort, Konstruktionsart, Gebäudenutzung, etc.. Die hieraus resultierenden Einflussfaktoren bzw. Einflussgrößen auf die thermisch induzierten Glasspannungen lassen sich in drei Hauptbereiche aufteilen.

■ Außenseite der Gebäudehülle

Von besonderer Relevanz auf der Außenseite sind: Die standortabhängigen meteorologischen Randbedingungen (Sonneneinstrahlungsintensität, ggf. die Albedo, d. h. die Reflektion aus der Umgebung, Außenlufttemperatur, Windgeschwindigkeit, Wärmeübergangskoeffizient), die Orientierung (Himmelsrichtung/Azimuth) und Neigung der Verglasung (Einbauwinkel), die (Teil)Verschattung, verursacht durch die Umgebungsbedingungen (Bäume, Gebäude usw.), ggf. vorhandene externe Verschattungssysteme (z. B. Jalousie, Paravent) oder außenliegende konstruktionsbedingte Verschattungseinflüsse (z. B. Dachüberstand, Fensterleibung). Spezifischer können z. B. die Geometrie der Teilverschattung oder auch die Intensität der Verschattung (gleichbedeutend mit diffuser Einstrahlung) genannt werden.

■ Konstruktionsebene (Mitte)

Die Konstruktionsebene beinhaltet das Verglasungssystem mit all seinen Komponenten und konstruktiven Einflüssen. Dazu gehören insbesondere die Art der Verglasung (z. B. Einfachfenster, Kastenfenster, Pfosten-Riegel, Elementfassade, Shadow-Box, etc.) sowie die Zusammensetzung der Verglasungseinheit und deren energetische Eigenschaften (z. B. monolithischer Glasaufbau, Isolierglasaufbau mit Beschichtungen). Spezifischer sind z. B. die Rahmenfarbe, die energetische Beschaffenheit des Rahmens und die Art des Abstandhalters bzw. des gesamten Isolierglas-Randverbundes.

■ Raumseite des Gebäudes

Die Raumseite bildet den Abschluss mit allen im Gebäude vorhandenen Einflüssen. Auf die jeweilige Verglasung wirken die Randbedingungen im Inneren wie die Innenlufttemperatur und der Wärmeübergangskoeffizient. Zudem können „thermische“ Hindernisse bzw. Barrieren den Wärmestrom bzw. den Belüftungsgrad hinter der raumseitigen Glasscheibe beeinflussen oder ändern. Dies erfolgt z. B. durch in unmittelbarer Umgebung befindliche Sofas, schwere Vorhänge abgesenkte Decken, Säulen, Heizkörper, innenliegende Blend-/Verdunklungssysteme (u. a. Paravents, schwere Vorhänge, Plisseees). Der Mindestabstand zwischen diesen vorgenannten Barrieren und der raumseitigen Glasscheibe bei der ein thermischer Bruch ausgeschlossen werden kann, ist bisher noch unzureichend erforscht. Ein Grund hierfür ist, dass die „thermischen“ Hindernisse nicht getreu des in der Praxis auftretenden vielseitigen Nutzungsverhaltens und der Konstruktionsvariationen abgebildet werden können.

Thermisch induzierte Spannungen bei Vertikalverglasungen

4. BEISPIELE FÜR THERMOBRÜCHE BEI VERGLASUNGEN

4.1 Einleitung

Im Folgenden werden verschiedene Beispiele für thermisch induzierte Glasbrüche an Verglasungen aus der Praxis vorgestellt. Die Bilder entstanden – beispielhaft für die Glasbranche – im Rahmen von Reklamationsbearbeitungen bei der Firma AGC Interpane und nicht unter dem Gesichtspunkt als Verwendung in einer wissenschaftlichen Ausarbeitung.

4.2 Beispiel 1 – Brüstungsverglasung

Bei diesem Beispiel handelt sich um eine Brüstungsverglasung in einem Bürogebäude in Belgien. Das Mehrscheiben-Isolierglas hatte folgenden Aufbau:

- 6 mm Teilvorgespanntes Glas (TVG) mit einer Sonnenschutzbeschichtung auf Pos. 2
- 9 mm Scheibenzwischenraum mit Argon befüllt
- 8 mm emailliertes Glas (TVG) mit einer dunkelgrauen Farbe auf Pos. 4

Nach Anlieferung ergaben sich bereits thermisch bedingte Glasbrüche auf den Glasgestellen. Des Weiteren ereigneten sich thermische Glasbrüche im eingebauten Zustand (siehe rote Umkreisung in Abbildung 4.1). Beide Schadensvorkommnisse waren durch eine erhöhte Absorption infolge der TVG-Emaillierung in Kombination mit einer einhergehenden Festigkeitsreduzierung verursacht. Das dichte hintereinander Lagern der Glaselemente auf den Gestellen führte zusätzlich zu einem Wärmestau und somit einer erhöhten Scheibenaufheizung.

Thermisch induzierter Bruch an einer Brüstungsverglasung

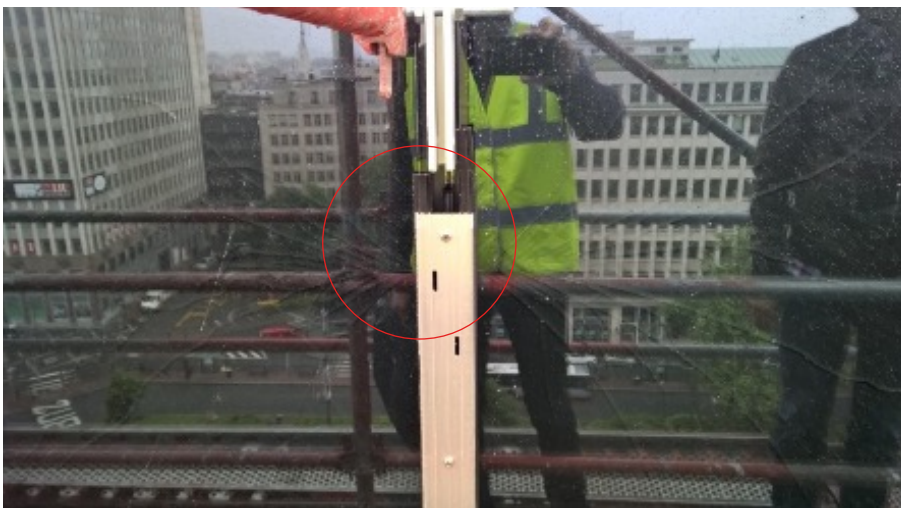


Abbildung 4.1 (Quelle: AGC Interpane)

4.3 Beispiel 2 – Dreifach-Isolierglas als Wärmedämmglas

Der Projektstandort ist in Deutschland (Bergisch Gladbach). Die Fassade ist in Abbildung 4.2 dargestellt. Dieser Glasbruch eines Dreifach-Wärmedämmglases stellte sich im Rahmenbereich (siehe rote Umkreisung in Abbildung 4.3) ein. Das Mehrscheiben-Isolierglas setzte sich dabei wie folgt zusammen:

- 6 mm Einscheiben-Sicherheitsglas (ESG), Weißglas mit einer Wärmeschutzbeschichtung auf Pos. 2
- 14 mm Scheibenzwischenraum mit Argon befüllt

- 6 mm ESG, Weißglas
- 14 mm Scheibenzwischenraum mit Argon befüllt
- Verbundsicherheitsglas (VSG) 44.2 aus Floatglas (thermisch entspannt), mit einer Wärmeschutzbeschichtung auf Pos. 5.

Bruchauslösend waren hier dunkle Gegenstände auf der Rauminnenseite mit direktem Kontakt zur Verglasung, was einen Wärmestau verursachte.

Thermisch induzierter Bruch an einem Sonnenschutzglas – Übersicht

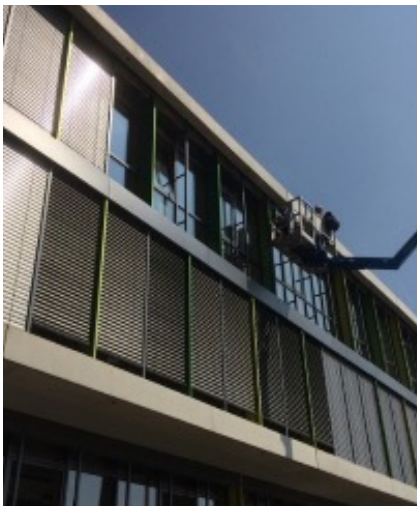


Abbildung 4.2 (Quelle: AGC Interpane)

Thermisch induzierter Bruch an einem Sonnenschutzglas – Detail



Abbildung 4.3 (Quelle: AGC Interpane)

4.4 Beispiel 3 – Zweifach-Isolierglas als Wärmedämmglas

Dieser Bruch ereignete sich an einem Zweifach-Isolierglas in einem Bürogebäude in der Tschechischen Republik. Es handelt sich um ein Zweifach-Isolierglas, wobei eine der Scheiben bläulich eingefärbt und zusätzlich mit einer Low-E-Beschichtung (Pos. 3) versehen war. Bei der Glasqualität handelte es sich um (thermisch entspanntes) Floatglas. Als Bruchursache wurde der Heizkörper identifiziert (siehe rote Umkreisung in Abbildung 4.4), welcher sich zu nah an der Verglasung befand. In der Kombination mit der höheren Absorption der eingefärbten Scheibe führte dies schließlich zu einer ungleichmäßigen Erwärmung des Glases und somit zu einem thermischen Glasbruch.

Thermisch induzierter Bruch an einem Zweifach-Isolierglas in einem Bürogebäude

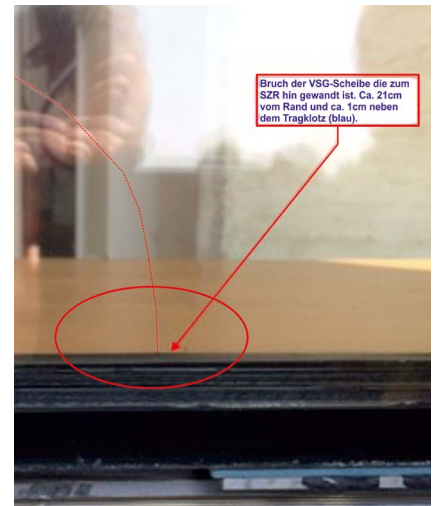


Abbildung 4.4 (Quelle: AGC Interpane)

Thermisch induzierte Spannungen bei Vertikalverglasungen

4.5 Beispiel 4 – Zweifach-Isolierglas als Wärmedämmglas

Bei diesem Beispiel handelt es sich um eine Zweifach-Isolierverglasung mit zwei nicht vorgespannten Einzelscheiben aus Floatglas. Bei der Planung wurde lediglich eine äußere Verschattung berücksichtigt. Die Ursache des Bruchs war jedoch in diesem Fall ein Wasserkocher (siehe rote Umkreisung in Abbildung 4.5). Der Wasserdampf „erhitzte“ einen Teil der Innenscheibe. Der Temperaturunterschied, der nun zwischen dem erhitzten Bereich und dem „kalten“ Rand der Glasscheibe entstand, war zu groß und führte hier zum thermischen Glasbruch.

Thermisch induzierter Bruch an einem Zweifach-Isolierglas in einem Wohngebäude



Abbildung 4.5 (Quelle: AGC Interpane)

4.6 Beispiel 5 – Dreifach-Isolierglas als Wärmedämmglas

Dieses Beispiel zeigt einen thermisch induzierten Glasbruch an einer Verglasung in einem Kindergarten, bei dem die Ursache zunächst nicht direkt erkennbar war, da laut Planung und Berechnungen alle konstruktiven Einflüsse berücksichtigt wurden. Das Mehrscheiben-Isolierglas setzte sich dabei wie folgt zusammen:

- 6 mm Floatglas, thermisch entspannt mit Low-E-Beschichtung auf Pos. 2
- 16 mm Scheibenzwischenraum mit Argon befüllt
- 6 mm Floatglas, thermisch entspannt
- 16 mm Scheibenzwischenraum mit Argon befüllt
- VSG 66.2 aus Floatglas, thermisch entspannt mit einer Low-E-Beschichtung auf Pos. 5

Der Bruchursprung befand sich an der unteren Kante des Mehrscheiben-Isolierglases. Um festzustellen, ob es sich um einen thermischen oder mechanisch verursachten Bruch handelte, musste es ausgebaut werden. Nach dem Entfernen der Glashalteleisten, konnte man, wie in Abbildung 4.6 (rote Umkreisung) erkennbar, Reste von Fenstermal Farben erkennen. Nach Rücksprache mit den Mitarbeitern des Kindergartens wurde bestätigt, dass hier eine großflächige Bemalung mit dunklen Fenstermal Farben entfernt wurde. Diese war aber zur Zeit des Glasbruches noch auf der Scheibe. Durch die dunkelgrüne Farbe hat sich die innere bemalte Scheibe stärker

aufgehitzt als der Rand der Verglasung. Dieser Temperaturunterschied zwischen dem bemalten und den unbemalten Bereichen hat in diesem Fall den thermischen Glasbruch ausgelöst.

Thermisch induzierter Bruch an einem Dreifach-Isolierglas in einem Kindergarten

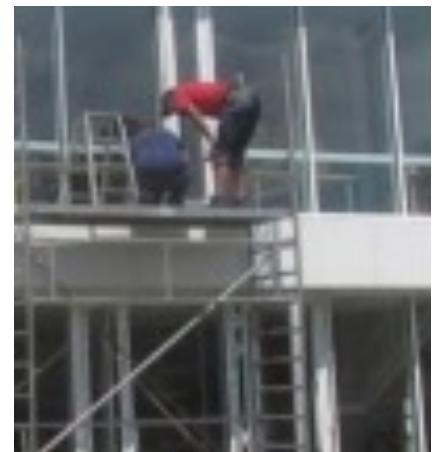


Abbildung 4.6 (Quelle: AGC Interpane)

5. METEOROLOGISCHE RANDBEDINGUNGEN

5.1 Einleitung

Meteorologische Randbedingungen, im Besonderen die solare Einstrahlung und die Außenlufttemperatur, bestimmen wesentlich die in den Gläsern auftretende thermisch induzierte Spannung. Um relevante Spannungen zu ermitteln, ist es somit von großer Bedeutung die real auftretenden Extrembedingungen von Einstrahlung und Außenlufttemperatur, welcher die Gläser ausgesetzt sind und standhalten sollen, standortbezogen zu bestimmen.

Prinzipiell steigt die thermisch induzierte Spannung mit steigender Einstrahlung, während in Bezug auf die Außenlufttemperatur sowohl besonders hohe als auch besonders niedrige Werte relevant werden können. Da Einstrahlung und Temperatur meteorologisch gekoppelte Größen sind, weisen die auftretenden Werte Korrelationen auf, die nicht vernachlässigt werden sollten. Ziel muss es daher sein, die auftretenden Extremwerte für Einstrahlung und Temperatur nicht separat, sondern als Wertepaar zu ermitteln. Extremwerte zu ermitteln, erfordert somit eine Datengrundlage in der auch Extremwerte und keine – wie sonst üblich – gemittelten Testreferenzjahre enthalten sind.

5.2 Kritische meteorologische Bedingungen

Mit Hilfe von in dem Forschungsprojekt [2] entwickelten Modellen konnten aus den Datensätzen der meteorologischen Extremwerte (Einstrahlungs-Außenlufttemperatur-Wertepaare – Betrachtungszeitraum 10 Jahre) die Situationen maximaler thermischer Glasbeanspruchung identifiziert werden. Die Vorgehensweise wurde für einen bestimmten Rasterdatensatz jeweils so angewandt und schlussendlich in Tabellen mit kritischen Bedingungen für die thermische Beanspruchung in der

Region Deutschland und über die Landesgrenzen hinaus zusammengestellt. Derartige Datensätze waren vorher nicht verfügbar und werden hier erstmalig bereitgestellt. Der zur Verfügung gestellte Datensatz zeichnet sich durch die Transparenz des Erzeugungsprozesses sowie die Validierung durch Messwerte aus. In Abbildung 5.1 sind zur Veranschaulichung aus den Tabellenwerten für eine Südorientierung generierte Karten visualisiert. Für die anderweitigen Orientierungen sind aus Praktikabilitätsgründen in [2] Tabellenwerte vorhanden.

Kritische meteorologische Wertepaare für eine vertikale (Neigung 90°) und nach Süden (Azimut 180°) orientierte Fassade im Sommer und im Winter.

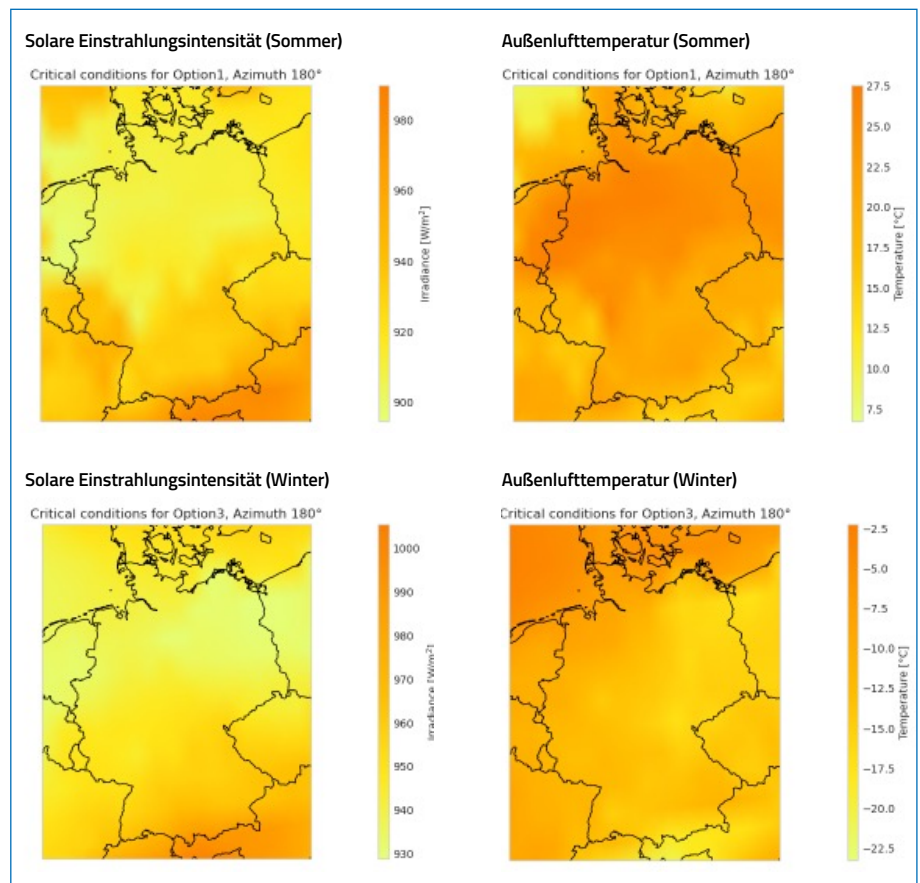


Abbildung 5.1

Thermisch induzierte Spannungen bei Vertikalverglasungen

6. PARAMETERSTUDIEN FÜR VERGLASUNGEN MITTELS DER METHODE DER FINITEN ELEMENTE

6.1 Einleitung

Im Folgenden sind als Auszug aus dem Forschungsbericht [2] die ermittelten, für die Praxis relevantesten Einflussfaktoren und deren Auswirkungen auf die thermisch induzierte Glasspannung kurz wiedergegeben.

6.2 Ergebnisse

Die wesentlichen Schlussfolgerungen aus den Parameterstudien sind:

- Die windinduzierte Konvektion wirkt sich für die Glasspannungen auf der äußeren Glasscheibe vorteilhaft aus, während er für die Spannungen an der inneren Glasscheibe (bei Dreifach-Isolierverglasungen auch die Mittelscheibe) ungünstig wirken kann.
- Die spontan entstehende solare Einstrahlung (Aufklaren des Himmels) auf eine Verglasung muss nicht gesondert betrachtet werden, weil durch die kontinuierliche solare Einstrahlung über den Tag die relevanten Spannungen entstehen.
- Eine Teilverschattung ist zu berücksichtigen, da sich die Spannungen an der Glaskante drastisch erhöhen können.

Für die Berücksichtigung der Verschattungsgeometrie an einer real vorhandenen Fassade ist eine Schattenwurfanalyse erforderlich. Falls diese Information jedoch nicht einholbar ist, so kann mit Hilfe einer rund 10 % horizontal oder vertikal verlaufenden Teilverschattung der Verglasung (bezogen auf die sichtbaren Glasabmessungen) eine weitestgehend abgesicherte Spannungsermittlung (mittels 2D-/3D-Modellen, vgl. Abs. 7.1) erfolgen.

- Falls Schattengeometrien mit Winkeln entstehen (z. B. eine doppelt diagonal verlaufende Teilverschattung), so ist ggf. zu überprüfen, wie hoch die solare Einstrahlungsintensität im Übergangsbereich zwischen unverschattetem und verschattetem Bereich ist, um lokale Spannungsüberhöhungen zu vermeiden. Die Berechnungen sollten nur mit 3D-Modellen durchgeführt werden.
- Die spontan entstehende Teilverschattung einer Verglasung muss nicht gesondert betrachtet werden, weil durch die zeitlich unveränderliche Teilverschattung über den Tag die relevanten Spannungen entstehen.
- Die bewegliche und zeitlich veränderliche Teilverschattungsgeometrie ist für die Bemessung einer Verglasung nicht relevant.
- Hohe U_f -Werte von Rahmenkonstruktionen sind nachteilig.

■ Helle Rahmenfarben wirken sich ungünstig (niedrige Absorption, dadurch vornehmlich kalte Glaskante), dunkle Rahmenfarben wirken sich günstig (hohe Absorption, dadurch eher warme Glaskante) aus.

■ Der Einsatz der „warmen Kante“ als technisch aktuelle Variante der Abstandhalter in Kombination mit technisch aktuellen Rahmen wirkt sich günstig aus.

■ Dickere (unbeschichtete) Gläser sind wegen einer höheren Absorption tendenziell ungünstig.

■ Der Bauzustand (z. B. einer noch nicht geschlossenen Fassade) bzw. die Lagerung von Gläsern in mehreren Lagen auf Glasgestellen kann zu relevanten Spannungen führen.

■ Es ist von Vorteil, die korrekte Einbausituation der Verglasung auch auf der Rauminnenseite zu erfassen. Die Absorption der Gläser wird durch helle reflektierende und dunkle hinter der Verglasung liegende Gegenstände (z. B. helles Plissee, Sicht-/Blendschutz, Sofa, schwerer Vorhang) nachteilig erhöht.

■ Eventuelle Nutzungsänderungen der Innenräume, die mit der Zeit auftreten können, können vom Planer und der Glasbemessung bei Bauwerkerrichtung nicht berücksichtigt werden. Falls Nutzungsänderungen (Installation von Sichtschutz, Möbel, etc.) eintreten, muss die Situation (auch hinsichtlich der Hinterlüftung) neu bewertet werden.

7. BERECHNUNGEN FÜR EINE BEISPIELHAFTE VERGLASUNG

7.1 Einleitung

Die im Forschungsprojekt entwickelten Berechnungsverfahren wurden im Folgenden exemplarisch für eine ausgewählte Vertikalverglasung (1,0 x 2,0 m) in allen Orientierungen am Standort Darmstadt angewandt. Hierbei handelte es sich um eine Dreifach-Isolierglas (4/Ar16/4/Ar16/4 mm) mit einer Low-E-Beschichtung auf Position 3 und 5 sowie einer "warmen" Kante ($\lambda_{eq} = 0,28 \text{ W/(mK)}$). Der Rahmen bestand aus Holz mit einer angenommenen Absorption von 20 %. Die Teilverschattung betrug 10 % der längeren Glaskante als horizontal verlaufender Streifen. Im verschatteten Bereich wurde eine diffuse Einstrahlung von 10 % der maximalen solaren Einstrahlung angesetzt. Weitere Berechnungsparameter sind dem Forschungsbericht [2] (dort in Kapitel 17) zu entnehmen.

Die jeweilige Berechnung der Temperatur erfolgte stationär (zeitunabhängig) und transient/instationär (zeitabhängig). Die Bezeichnungen 1D, 2D und 3D beinhalten folgende Ansätze:

- 1D - ohne Berücksichtigung der Rahmenkonstruktion, ohne Wärmeleitung in der Glasebene und mit vereinfachter Teilverschattung (analog zu [8]); analytische Spannungsberechnung.
- 2D - mit Rahmenkonstruktion, mit Wärmeleitung in der Glasebene und vereinfachter Geometrie der Teilverschattung; numerische Spannungsberechnung (mittels FEM).
- 3D - mit Rahmenkonstruktion, mit Wärmeleitung in der Glasebene und genauer Geometrie der Teilverschattung; numerische Spannungsberechnung (mittels FEM).

Im Verlauf des Forschungsprojekts ergab sich die Erkenntnis, dass repräsentativ für jede Orientierung vier relevante meteorologische Bemessungszeitpunkte (Kombination aus Außenlufttemperatur und Einstrahlungsintensität) bei der Ermittlung der thermisch induzierten Spannung betrachtet werden müssen. Die Bemessungszeitpunkte sind: Kalter Tag („Winter“), warmer Tag („Sommer“), kalter/warmer Übergangstag („Frühling“/„Herbst“).

7.2 Ergebnisse

Vergleichend dargestellt sind im Folgenden die thermisch induzierten Spannungen – ermittelt mit dem stationären 1D, 2D und 3D sowie dem transienten 3D Berechnungsverfahren.

Es zeigen sich in den gleich skalierten Balkendiagrammen in Abbildung 7.1 bis Abbildung 7.6 zwei unterschiedliche Spannungsniveaus. Einerseits mit Spannungswerten kleiner 13 MPa, andererseits mit Spannungswerten größer 20 MPa.

Thermisch induzierte Spannungen bei Vertikalverglasungen

Vergleich der thermisch induzierten Spannungen für den kalten Tag (stationär und transient) und den kalten Übergangstag (nur transient möglich) für die Außenscheibe des Dreifach-Isolierglases.

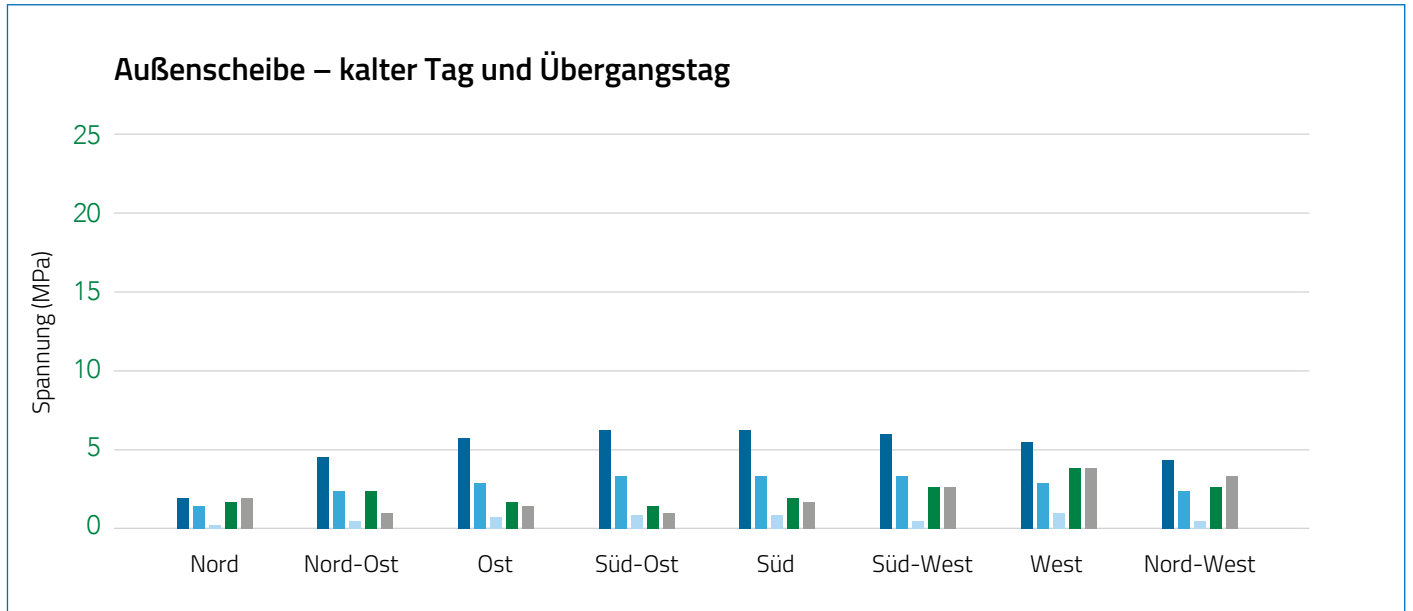


Abbildung 7.1

Vergleich der thermisch induzierten Spannungen für den kalten Tag (stationär und transient) und den kalten Übergangstag (nur transient möglich) für die Mittelscheibe des Dreifach-Isolierglases.

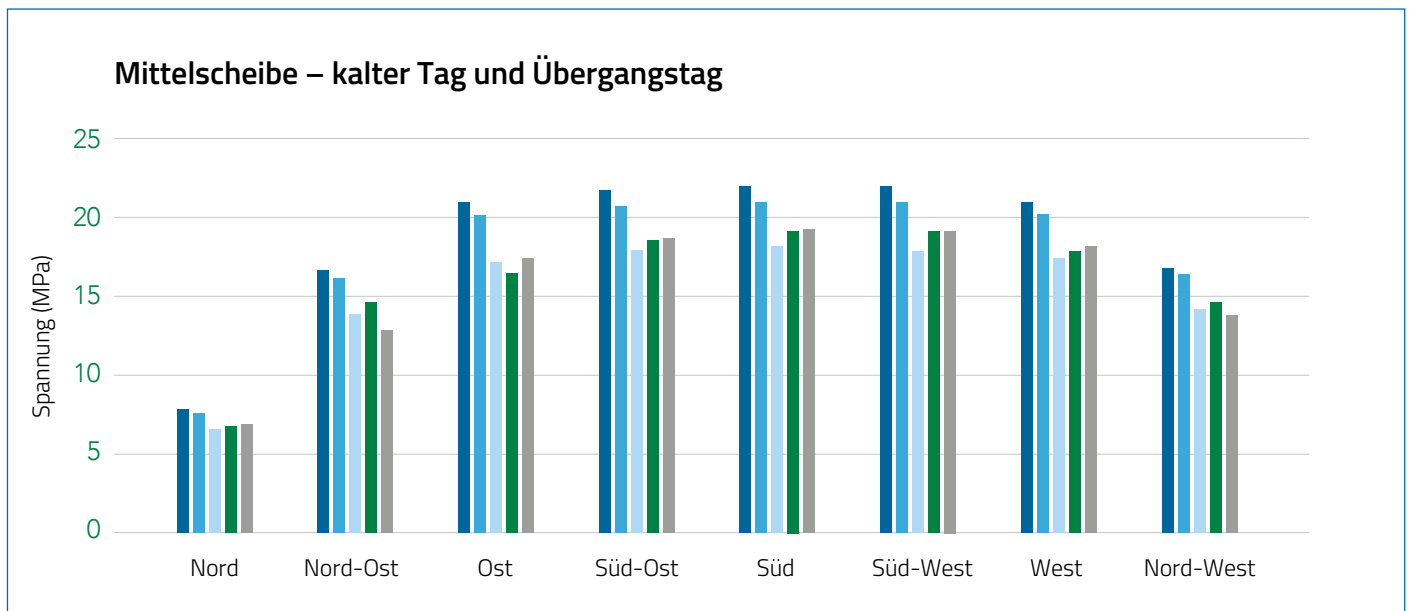


Abbildung 7.2

- stationär - 1D
- stationär - 2D
- stationär - 3D
- transient - 3D
- transient Übergangstag - 3D

Vergleich der thermisch induzierten Spannungen für den kalten Tag (stationär und transient) und den kalten Übergangstag (nur transient möglich) für die Innenscheibe des Dreifach-Isolierglases.

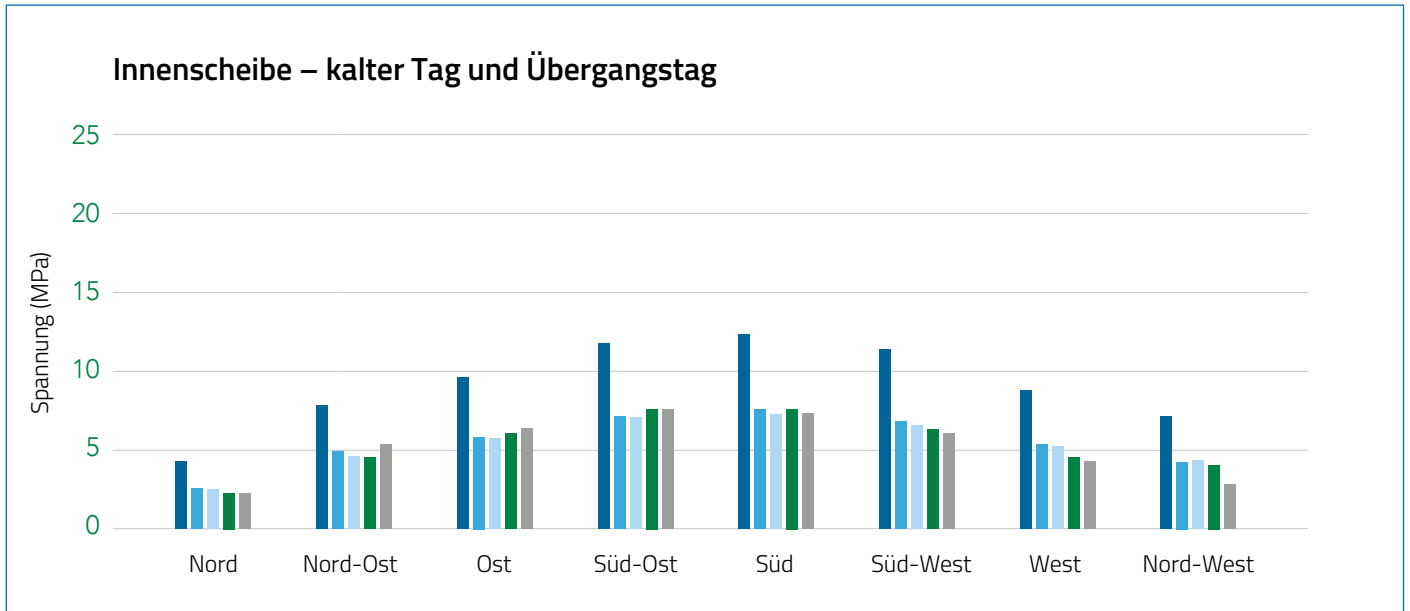


Abbildung 7.3

Vergleich der thermisch induzierten Spannungen für den warmen Tag (stationär und transient) und den warmen Übergangstag (nur transient möglich) für die Außenscheibe des Dreifach-Isolierglases.

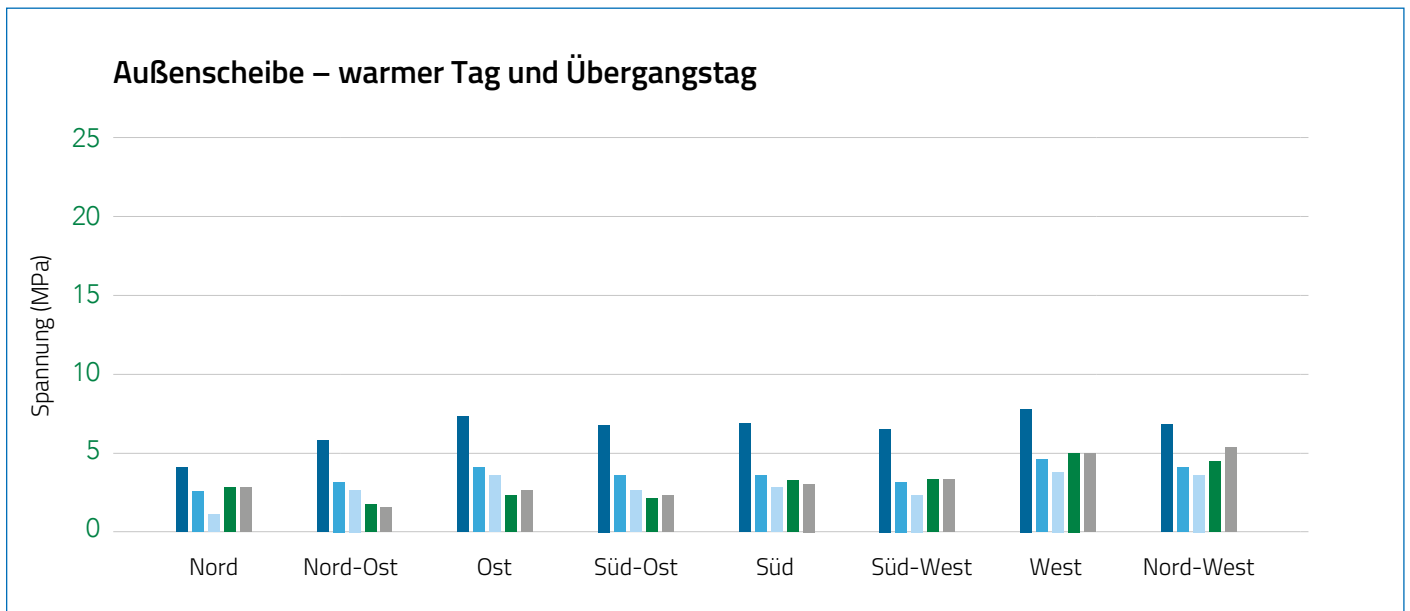


Abbildung 7.4

- stationär - 1D
- stationär - 2D
- stationär - 3D
- transient - 3D
- transient Übergangstag - 3D

Thermisch induzierte Spannungen bei Vertikalverglasungen

Vergleich der thermisch induzierten Spannungen für den warmen Tag (stationär und transient) und den warmen Übergangstag (nur transient möglich) für die Mittelscheibe des Dreifach-Isolierglases.

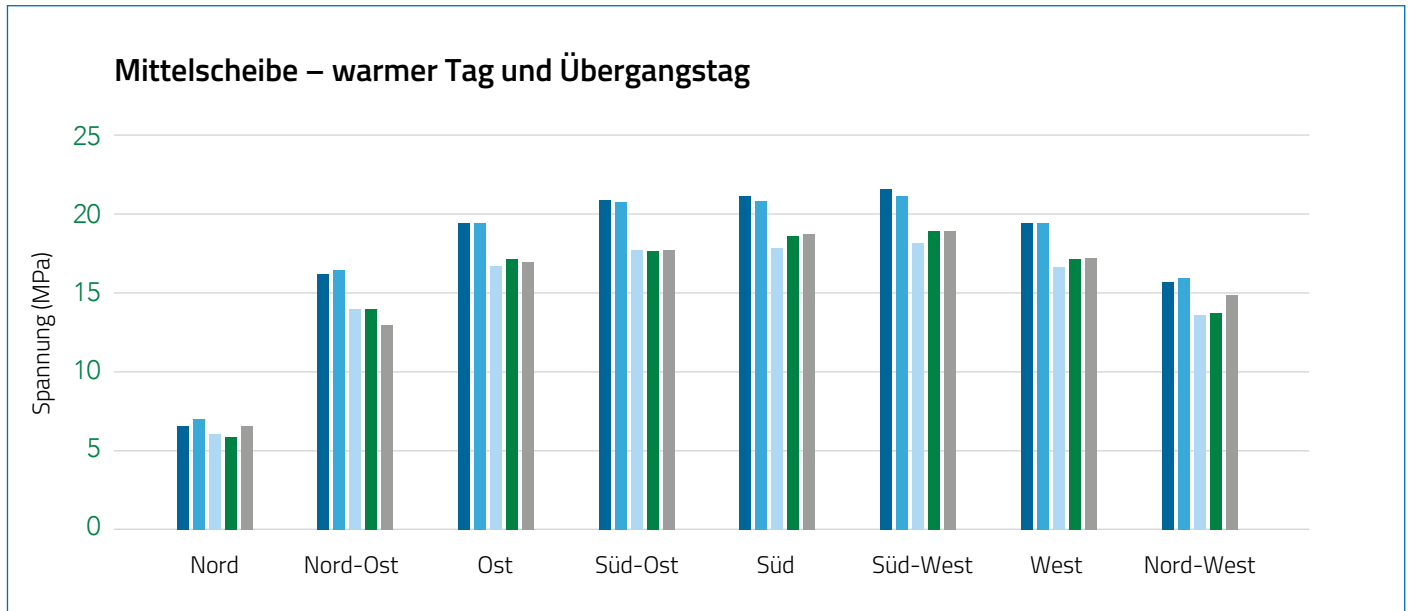


Abbildung 7.5

Vergleich der thermisch induzierten Spannungen für den warmen Tag (stationär und transient) und den warmen Übergangstag (nur transient möglich) für die Innenscheibe des Dreifach-Isolierglases.

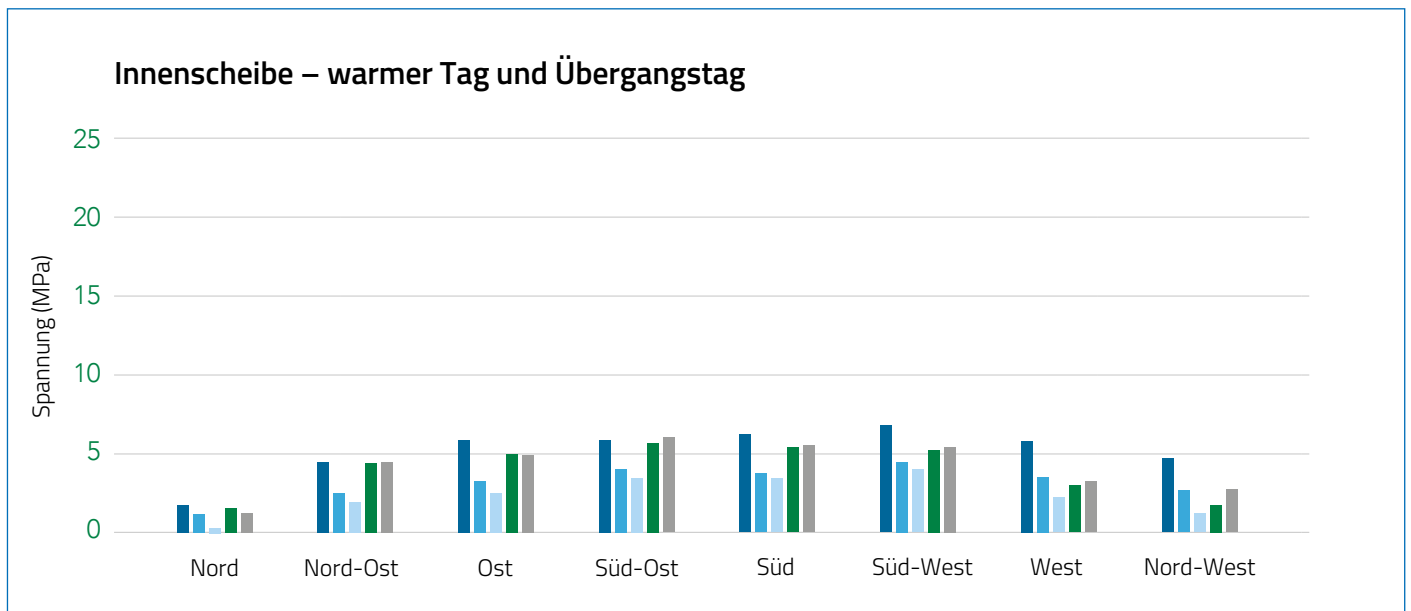


Abbildung 7.6

- stationär - 1
- stationär - 2D
- stationär - 3D
- transient - 3D
- transient Übergangstag - 3D

7.3 Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich bzgl. der untersuchten Berechnungsverfahren folgendes festhalten:

- Das stationäre 1D-Verfahren (mittels analytischer Handformeln) ohne Berücksichtigung der Rahmenkonstruktion führt zu Ergebnissen auf der sicheren Seite. Vorteil: Geringer Berechnungsaufwand. Nachteil: In bestimmten Fällen können die Ergebnisse infolge der Ermittlung von zu hohen Glasspannungen unwirtschaftlich in Bezug auf die Glasdicke, Glasqualität (z. B. vorgespannt) und Kantenqualität sein.
- Bei steigender räumlicher Dimensionalität (softwaregestützte 2D- oder 3D-Berechnung mittels FEM) mit Berücksichtigung der Rahmenkonstruktion und transients numerischer Simulation reduzieren sich die resultierenden thermisch induzierten Spannungen, weil die Temperaturverteilung im Glas genauer abgebildet wird. Vorteil: In bestimmten Fällen können die Ergebnisse dadurch wirtschaftlicher (siehe oben) sein. Nachteil: Der Berechnungsaufwand wird größer.

Bzgl. des thermisch induzierten Spannungsniveaus lässt sich folgendes feststellen:

- Für die unbeschichtete Außen- und Low-E-beschichtete Innenscheibe resultiert für alle Orientierungen und meteorologischen Bemessungszeiträume Spannungen auf einem niedrigen Niveau (kleiner 13 MPa). Für die Innenscheibe ergeben sich tendenziell die höheren Spannungen an den kalten Tagen und für die Außenscheibe an den warmen Tagen.
- Für die Low-E-beschichtete Mittelscheibe entstehen für alle Orientierungen (Nord ausgenommen) und meteorologischen Zeiträume Spannungen auf einem hohen Niveau (größer 20 MPa).
- Die Einordnung, ob die ermittelten Spannungen als kritisch bzw. bruchauslösend (bei Einsatz von thermisch entspanntem Glas) zu kategorisieren sind, muss über eine detaillierte Bemessung, basierend auf gültigen Normungsansätzen, erfolgen. In besonderen Fällen bedarf es einer genauen Ermittlung der Kantenfestigkeit bei den für den Einbau vorgesehenen Gläsern.
- Die Low-E-Beschichtung (Pos. 3) auf der Mittelscheibe bewirkt eine höhere Absorption dieser und daraus höhere thermisch induzierte Spannung.

Thermisch induzierte Spannungen bei Vertikalverglasungen

8. FAZIT

Bei der in diesem Merkblatt behandelten Thematik handelt es sich um eine komplexe Materie. Eine genaue Einschätzung für das Risiko eines thermisch bedingten Glasbruchs lässt sich häufig im Vorfeld aufgrund der vielen Einflussfaktoren – im Wesentlichen eine Kombination aus bauphysikalischen und mechanischen Randbedingungen – nicht pauschal abgeben und erfordert eine genaue thermische Spannungsanalyse.

Dabei ist zu prüfen, ob die jeweilige Einbausituation mit u. a. Standort, Orientierung, Schattengeometrie, Rahmenkonstruktion (vgl. Abs. 3.2 und Abs. 6.2) und die für den Einbau vorgesehenen Gläser mit ihrer, in diesem Zusammenhang relevanten Einflussgröße, hier die Kantenfestigkeit, den einwirkenden thermischen und mechanischen Spannungen widerstehen.

9. VERWEISE AUF LITERATURQUELLEN

Veröffentlichungen

- [1] Beinert, A., Mahfoudi, A., Ensslen, F., Erban, C. (2023). Thermomechanische Bewertung von BIPV-Modulen mittels FEM-Simulation, 38. PV-Symposium/BIPV-Forum, Kloster Banz, Bad Staffelstein.
- [2] 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. (2023). 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. Fraunhofer ISE. <https://doi.org/10.2314/KXP:1870984862>
- [3] Polakova, M.; Schäfer, S.; Elstner, M (2018). Thermal Glass Stress Analysis – Design Considerations. Challenging Glass Conference Proceedings (Vol. 6), <https://doi.org/10.7480/cgc.6.2193>.
- [4] Schwind, Gregor, Franz Paschke, and Jens Schneider (2022). "Case studies on the thermally induced stresses in insulating glass units via numerical calculation." Challenging Glass Conference Proceedings. Vol. 8., <https://doi.org/10.47982/cgc.8.388>.
- [5] Schwind, G., Paschke, F., Schneider, J., Seel, M. (2023). Numerische Studien zur Glaskantentemperatur im verschatteten Bereich von Isoliergläsern. Glasbau 2023, TU Dresden, <https://doi.org/10.1002/9783433611739.ch18>.
- [6] Wagner, E. (2020). Glasschäden Oberflächenbeschädigungen, Glasbrüche in Theorie und Praxis. Fraunhofer IRB Verlag.

Normen und Technische Regelwerke

- [7] CNR-DT 210 (2013). Guide for the Design, Construction and Control of Buildings with Structural Glass Elements. NATIONAL RESEARCH COUNCIL OF ITALY. CNR – Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction <https://www.cnr.it/en/node/3843>.
- [8] NF DTU 39 P3 (2006). Travaux de bâtiment – Travaux de vitrerie-miroiterie – Partie 3: Mémento calculs des contraintes thermiques.
- [9] CEN/TS 19100-1 (2021). Design of glass structures – Part 1: Basis of design and materials. <https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/news/cents-191002021-design-glass-structures>

Merkblätter

- [10] Flachglas Schweiz AG (2021). Thermische Beanspruchung von Glas, <https://www.flachglas.ch/wp-content/uploads/2024/03/PI-018-DE.pdf>.
- [11] Glass & Glazing Association of Australia (2015). AGGA Technical fact sheet, Thermal Stress Glass Breakage. <https://www.festivalglass.com.au/wp-content/uploads/2015/08/Thermal-Stress-Glass-Breakage-factsheet.pdf>.
- [12] Verband Fenster + Fassade e.V. (2012). Thermische Beanspruchung von Gläsern in Fenstern und Fassaden.

**DIE VERANTWORTUNG FÜR DEN INHALT DES FORSCHUNGSBERICHTS
LIEGT BEIM PROJEKTKONSORTIUM.**



Frank Ensslen
Andreas Beinert
Achour Mahfoudi
Wiebke Herzberg
Elke Lorenz
Markus Heck



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Gregor Schwind
Miriam Schuster
Matthias Seel
Jens Schneider

ISM+D

The Institute of Structural Mechanics and Design
Das Institut für Statik und Konstruktion



Glass
Competence
Center



Michael Elstner
Steffen Schäfer
Michaela Wondrakova

SUNOVATION

Christof Erban
Dominik Götz

BETEILIGTE PARTNER:



Robert Sommer
Sebastian Hinmüller



Joachim Röhner



Fachverband Konstruktiver Glasbau e. V.

Wüllnerstraße 113
50931 Köln
+49 221 80108710
www.glas-fkg.org
info@glas-fkg.org



**Bundesverband
Flachglas**

Mülheimer Straße 1
53840 Troisdorf
Telefon +49 2241 8727-0
Telefax +49 2241 8727-10
www.bundesverband-flachglas.de
info@bundesverband-flachglas.de