

Überraschende Ergebnisse widersprechen den bisherigen Einbaurichtlinien

Thermisch induzierte Scheibensprünge

Zur Vermeidung von Tauwasser am Scheibenrand und zur Verringerung der Wärmeverluste, die durch den Randverbund von Isolierglaseinheiten entstehen, wurde seitens der Autoren schon seit einiger Zeit ein erhöhter Glaseinstand vorgeschlagen. Weitere Untersuchungen im Hinblick auf thermische Spannungen im Glaskörper zeigen ebenfalls den Vorteil eines erhöhten Glaseinstands und widersprechen den derzeit geltenden Einbaurichtlinien von Mehrscheiben-Isolierglas.

1. Überblick

Verfolgt man die Begründung für die Ablehnung des höheren Glaseinstandes, so stößt man auf die weit verbreitete Ansicht, daß der höhere Einstand die Gefahr von thermisch induzierten Sprüngen in den Verglasungen erhöhen würde. Eine erste experimentelle Überprüfung in der Wohnanlage des Passivhauses Darmstadt-Kranichstein (insgesamt 48 nahezu raumhohe Scheiben in Südausrichtung) bestätigte diese Befürchtung nicht. Im folgenden wird auf der Basis einer zweidimensional-instationären Berechnung der Temperaturfelder in den betroffenen Fenstern unter extremen Einstrahlbedingungen theoretisch erklärt, daß die Gefahr thermisch induzierte Scheibensprünge in Fenstern mit erhöhtem Glaseinstand eher reduziert wird. Es wird empfohlen, die theo-

retisch erhaltenen Ergebnisse systematisch experimentell zu überprüfen, um möglichst rasch eine entsprechende Änderung der Einbaurichtlinien vornehmen zu können.

2. Versuchsablauf

Für das Entstehen von thermischen Spannungen im Glas sind Temperaturdifferenzen verantwortlich. Diese resultieren vor allem aus räumlich und zeitlich ungleichmäßiger Erwärmung des Glases. Das Problem gliedert sich in zwei Teile:

1. Die Ermittlung der zeitlich-dynamischen Erwärmung der Glasscheibe unter dem Einfluß von solarer Einstrahlung.
2. Der Berechnung der durch die Temperaturgradienten und unterschiedlichen thermischen Ausdehnungen entstehenden Spannungen im Glas.

Der erste Teil dieser Aufgabe wurde von Dr. Feist am Passivhaus Institut gelöst, der zweite Teil durch Dr. Holtmann/VEGLA GmbH. Für die Simulation zum ersten Teil stand das zweidimensionale Finite-Differenzen-Programm „DynZwei“ des Instituts zur Verfügung. Das Programm ist auf der

Basis der internationalen Norm ISO 10211-1:1995 validiert.

Für die Untersuchung wurde ein möglichst kritischer Fall ausgewählt (Bild 1):

- Eine Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung mit zwei selektiven Schichten (auf Ebene 3 und 5) mit Kryptonfüllung,
- ein Standard-Aluminium-Randverbund,
- verschiedene, in Kapitel 3 beschriebene Rahmenkonstruktionen.

Die Außenklimabedingungen und die solare Last wurden jeweils mit gleichem Verlauf angenommen:

- Außentemperatur 9.00 bis 9.05 Uhr -15 °C ; ab 9.05 bis 16.00 Uhr -14 °C ; äußerer Wärmeübergangskoeffizient $1/\alpha_i = 0,04\text{ m}^2\text{K/W}$,
- Raumlufttemperatur konstant $+20\text{ °C}$; innerer Wärmeübergangskoeffizient $1/\alpha_i = 0,13\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.
- Bis 9.05 Uhr kein Strahlungseintrag,
- ab 9.05 Uhr schlagartige Wirkung der solaren Einstrahlung mit 1000 W/m^2 (in Richtung der Flächennormale der unverschatteten Außenoberfläche), die dann für den Rest der Zeit konstant bleibt.

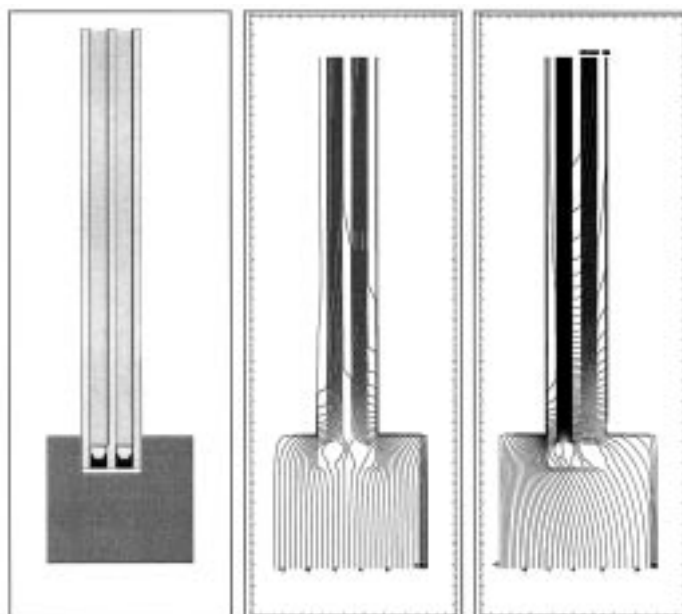


Bild 1: Links: Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung in Standard-Holzrahmen; 15 mm Glaseinstand. Mitte: Isothermenkarte ohne Einstrahlung. Rechts: bei 1000 Watt direkter Solareinstrahlung nach 7 Stunden

Die Randbedingungen sind als außerordentlich extrem anzusehen. Sie könnten in der Realität nur auftreten, wenn ein dem Sonnengang nachgeführtes Fenster plötzlich von einem außenliegenden Sonnenschutz befreit wird. Ein Problem der rechnerischen Behandlung des dynamischen Wärmeleitungssystems für diese Fragestellung ist, daß die Materialbelegung zu einem außerordentlich steifen Verhalten der Differentialgleichung führt: Die Zeitkonstanten der Elemente im hochwärmeleitenden Randverbund liegen im Bereich von 10^{-3} Sekunden, während sich die mittlere Scheibe im Ganzen nur mit einer Zeitkonstanten von um 4000 Sekunden erwärmt.

Eine Behandlung allein mit dem zeitabhängigen Finite-Differenz-Verfahren stößt somit auf Grenzen: wird die Zeitschrittweite an die kleinsten Zeitkonstanten angepaßt, so liegen die Temperaturänderungen anderer Teile unter der numerischen Darstellungsgrenze der verwendeten Software. Dieses Problem wurde zunächst durch eine Modifikation des Algorithmus in „DynZwei“ gelöst.

3. Dokumentation der Ergebnisse

3.1 Referenzfall: Schlagschatten auf ansonsten ungestörte Wärmeschutzverglasung

Die Entstehung von Schlagschatten auf der Verglasung ist in fast allen praktischen Einbausituationen unvermeidbar:

- In der Regel werfen bereits die Fenstergewände Schatten, insbesondere im Sturzbereich.
- Dachüberstände, Balkone, Gegenstände außen vor dem Fenster (z. B. Blumen) werfen Schlagschatten.

Aus den genannten Gründen muß eine marktgängige Verglasung in der Lage sein, Schlagschatten-Situationen der oben aufgeführten Art ohne thermisch induzierte Sprünge zu überstehen. Die Temperaturgradienten in diesem Fall eignen sich daher als Vergleichswerte für die Beurteilung der Gefahr thermisch induzierter Sprünge unter anderen Umständen.

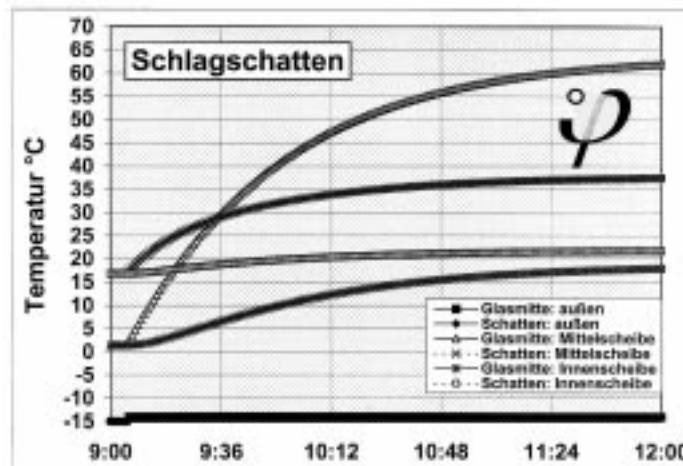


Bild 2: Zeitliche Entwicklung der Temperatur, wenn um 9.05 Uhr plötzlich 1000 W Solarstrahlung auftritt

Bild 2 zeigt die Temperaturverlaufskurven nach „Einhalten“ der Solareinstrahlung für den Fall des Schlagschattens und Bild 3 die Temperaturgradienten am Ende der Bestrahlungsperiode. Daraus ergibt sich folgendes Bild:

Sowohl die globalen Temperaturdifferenzen (zwischen wärmster und kältester Stelle in der mittleren Glasscheibe) als auch die lokalen Temperaturunterschiede nehmen permanent zu.

Damit herrschen die höchsten thermischen Spannungen jeweils am Ende einer Bestrahlungsperiode. In Übereinstimmung mit der Beobachtung in der Praxis ist also unter den hier gegebenen Randbedingungen nicht der Ablauf des Aufheizvorgangs, sondern der Endzustand des inhomogenen Temperaturfeldes verantwortlich für die höchsten thermischen Spannungen.

Der höchste Temperaturgradient besteht am Ende der Aufheizperiode an der Kante des Schlagschattens in

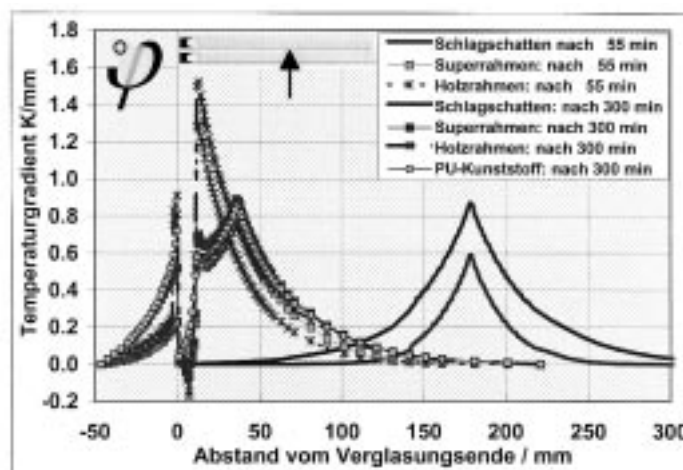


Bild 3: Die in der mittleren Scheibe auftretenden Temperaturgradienten

der mittleren Scheibe mit 0,9 K/mm (Bild 3). Die höchste Temperatur im bestrahlten Bereich beträgt 63,7 °C, die niedrigste im Schatten 2,2 °C.

Verglasungen, die den oben genannten Bedingungen nicht standhalten, können nicht eingesetzt werden, da deren Sprunghäufigkeit unhaltbar hoch wäre.

3.2 Standardrahmen und Standardrandverbund

Bild 1 zeigte bereits die Isothermenkarten für ein Standardfenster (Holzrahmen, Aluminiumrandverbund), einmal vor Einsetzen der Strahlung (mittleres Bild) und am Ende der Strahlungsperiode (rechtes Bild). Das Fenster wird ansonsten schattenfrei den Strahlungsbedingungen ausgesetzt. Es ist gut erkennbar, wie sich die Isothermen unter der Strahlung unmittelbar oberhalb des Randverbundes eng aneinander drängen. Der Zeitverlauf der Temperaturdifferenz zwischen Glasrand und Glasmitte der mittleren Scheibe ist in Bild 4 dargestellt. Der Vergleich mit der ebenfalls eingezeichneten Schlagschattenkurve läßt erkennen, daß in diesem Fall einer konventionell eingebauten Verglasung mit Standardrandverbund sowohl die Temperaturgradienten (Bild 3) als auch die absoluten Temperaturdifferenzen deutlich höher als im reinen Schlagschattenfall sind. Daher ist die Wahrscheinlichkeit thermisch induzierter Sprünge in der konventionellen Einbauvariante höher als im Referenzfall einer Schlagschattenbildung mit Abstand vom Randverbund.

3.3 Gedämmter Rahmen und tiefer Randverbund

Zur Verringerung der Verluste am Rand der Verglasung war von einem der Autoren bereits 1989 ein wesentlich tieferer Glaseinstand vorgeschlagen worden. Dieser Vorschlag wurde auch in einigen Projekten, entgegen der bestehenden Einbaurichtlinie, aufgenommen. Die vorherrschende Mei-

Bild 4: Zeitentwicklung der Temperaturdifferenz beim Standard-Einbau im Holzrahmen und im Schlagschattenfall

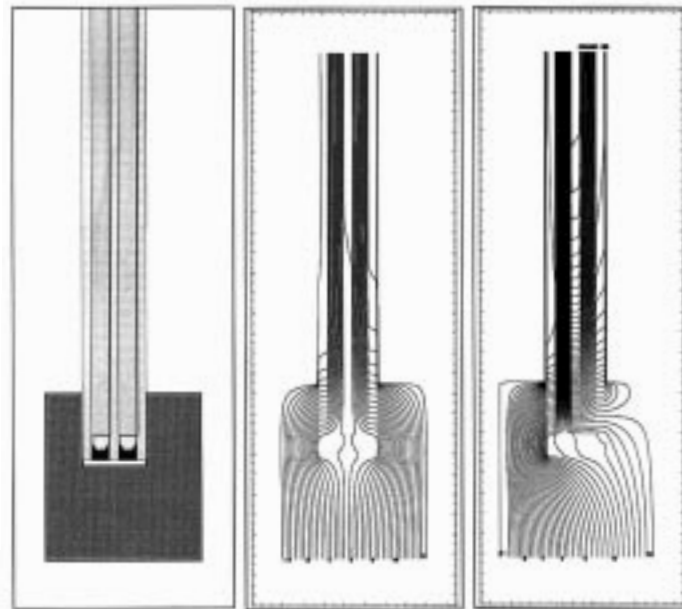
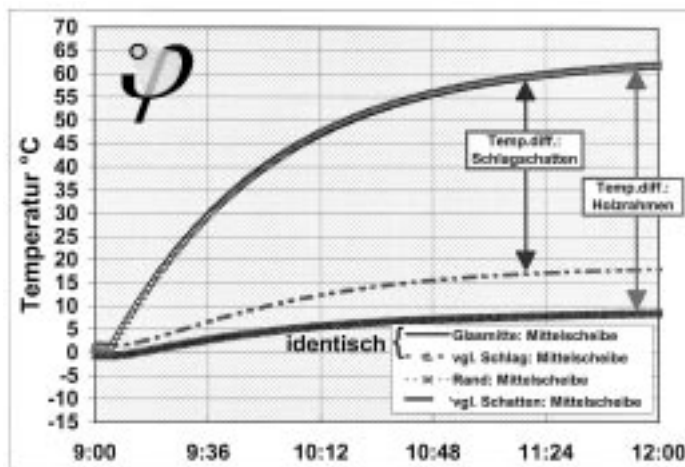


Bild 5: Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung in Polyurethan-Super-rahmen (30 mm Glaseinstand).

nung war bisher, daß die Wahrscheinlichkeit thermisch induzierter Sprünge durch den tieferen Glaseinstand zu nehmen würde. Die Erfahrungen mit den nunmehr seit 6 Jahren eingesetzten Fenstern bestätigten diese Sorge nicht und deuteten eher auf einen gegenteiligen Sachverhalt hin. Die instationäre wärmetechnische Simulation bestätigt dies eindrucksvoll (Bild 5). Wird der Glaseinstand im gedämmten Rahmen auf 30 mm erhöht, so entspricht die thermische Belastung in den Scheiben der Verglasung etwa dem bereits unter 3.1 behandelten Schlagschattenfall:

- Die Temperaturgradienten (Bild 3) und die absoluten Temperaturdifferenzen (Bild 6) steigen zeitlich streng an, so daß auch hier die höchsten Spannungen jeweils am Ende einer Bestrahlungsperiode auftreten.

- Durch den überstehenden Flügelrahmen am Rand des Schattens beträgt der höchste Temperaturgradient am Glaseinstand 0,89 K/mm und ist damit etwa gleich hoch wie im Referenzfall mit Schlagschatten.

Im Fall des erhöhten Glaseinstandes ist hier entgegen der vorherrschenden Meinung – die Wahrscheinlichkeit für thermisch induzierte Sprünge unter Sonneneinstrahlung nicht erhöht, sondern gegenüber den Standard-Einbaubedingungen sogar reduziert. Die in diesem Fall verbleibenden Spannungen liegen in der gleichen Größenordnung wie im Fall einer durch andere Einflüsse hervorgerufenen Schlagschattenbildung. Letztere Situation muß aber eine marktgängige Verglasung in der Regel schadfrei überstehen können.

4. Anmerkungen

Eine experimentelle Überprüfung der hier dargelegten Ergebnisse ist wegen der Tragweite der verbundenen Risiken angesagt und in Kooperation mit dem IfT Rosenheim in die Wege geleitet. Sollten sich die theoretisch ermittelten Ergebnisse experimentell

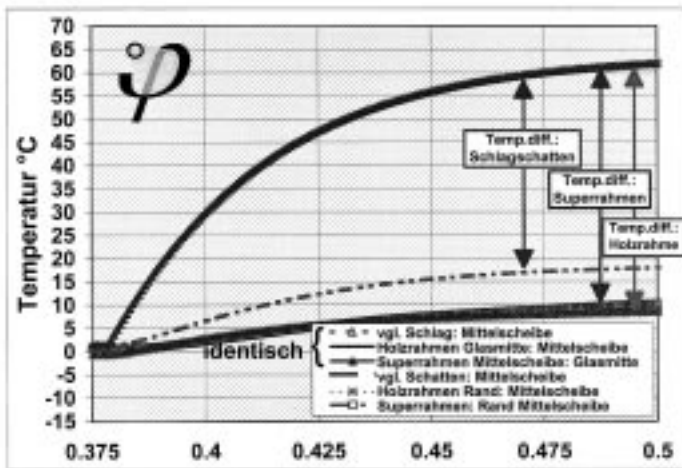


Bild 6: Zu keinem Zeitpunkt sind die Temperaturdifferenzen bei größtem Glaseinstand höher als beim Standardeinbau

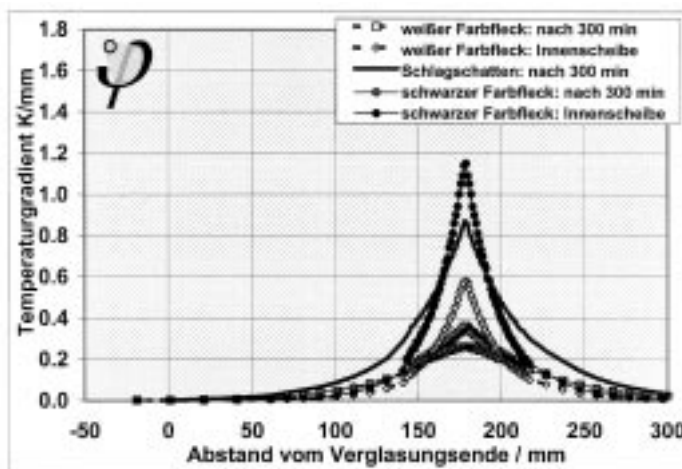


Bild 7: Temperaturgradienten in der Umgebung eines besonnten Farbflcks

bestätigen, so wären entsprechende Änderungen bei den Verglasungseinbaurichtlinien notwendig. Wärmedämmende Fenster mit erhöhtem Glaseinstand hätten dann neben der Energieeinsparung und der Tauwasserfreiheit auf der Innenseite noch einen weiteren Vorteil: Die Sprungwahrscheinlichkeit der Dreischeibenverglasungen unter extremen Einstrahlbedingungen wäre verringert. Die hier verwendete Methode eignet sich im übrigen auch dazu, die thermische Beanspruchung von Verglasungen unter anderen, häufig diskutierten Umständen zu behandeln. Dazu zwei weitere Beispiele:

1. Weißer Farbauftrag auf der inneren Scheibe (Bild 7)

Ein großer weißer Farbleck auf der Innenoberfläche der Verglasung führt

zu einer stärkeren Rückreflexion von Strahlung und daher zu einer noch höheren Absorption in der Mittelscheibe. Geht man, wie hier angenommen, davon aus, daß der Rest der Verglasung störungsfrei besonnt ist, so liegen die Temperaturgradienten sowohl der mittleren als auch der inneren Scheibe unter den Werten im Schlagschattenfall. Auch wenn sich die Effekte überlagern (Schlagschatten

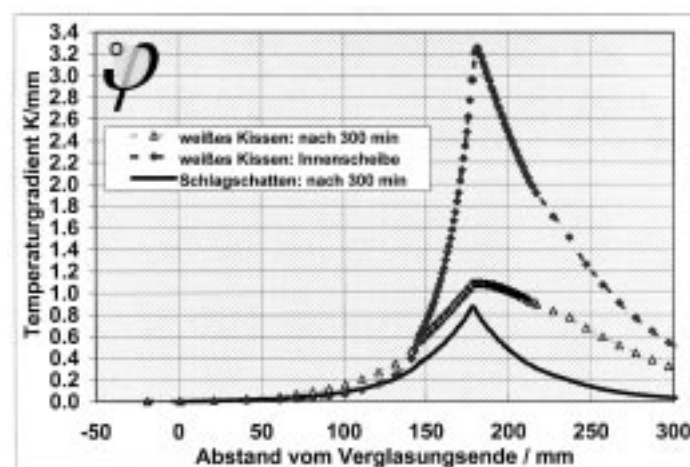


Bild 8: Temperaturgradienten an der Kante eines ausgedehnten wärmedämmenden und reflektierenden Daunenkissens, das an der Innenscheibe anliegt

in der Nähe eines weißen Farbflcks) sind die resultierenden Temperaturgradienten nicht höher, als am Randverbund eines Fensters mit Standardeinbau. Kritisch kann es allerdings werden, wenn die Problemstelle zusätzlich in der Nähe des Randes liegt.

2. Schwarzer Farbauftrag auf der inneren Scheibe (Bild 7)

Bei stark absorbierender schwarzer Farbe mit einem Absorptionskoeffizienten von 85 % liegen die Verhältnisse anders. Jetzt steigen die Temperaturgradienten auf der Innenscheibe an der Farbgränze auf Werte um 1,2 W/mm an. Diese Werte liegen in der Größenordnung der Gradienten, die in der Nähe des Randverbundes bei Standardeinbau vorliegen.

3. Innere Scheibe mit Dämmstoff abgedeckt (Bild 8). In der Praxis kann eine solche Situation dadurch entstehen, daß ein daunengefülltes Kissen einen Teil des Fensters abdeckt. Angenommen wurde hier, daß der Dämmstoff weiß ist (Reflexionskoeffizient 76 %), 100 mm Dicke und eine Wärmeleitfähigkeit von 0,04 W/(m²K) aufweist. Jetzt wird die Belastung der Innenscheibe extrem: an der Grenze von der ungestörten Besonnung zum Glas „am Kissen“ steigen die Gradienten auf über 3 K/mm an. Liegt die Stelle auch noch am Rand der Verglasung, so wird die Gefahr für einen Sprung der Innenscheibe außerordentlich hoch. Ähnliche Situationen können z. B. in einem besonnten, nicht abgedeckten Stapel von Isolierglaseinheiten auf dem Transportfahrzeug auftreten. Es ist daher ratsam, die Verglasungen beim Transport nicht-transparent abzudecken.

Wolfgang Feist,
Klaus Holtmann