

Hochisolierendes Randverbundsystem für Isolierverglasungen mit Schaumglas als Abstandhalter

*Michael Löffler, Dipl.-Ing., Universität Karlsruhe (TH)
Fakultät für Architektur / TA, Englerstr.7, D-76128 Karlsruhe
Tel: +49 721 608 2890; Fax: 49 721 608 6157
e-mail: michael@fbta.uni-karlsruhe.de*

Zusammenfassung

Bei Fenstern und Türen wurden in den letzten Jahren große Verbesserungen im Bereich der thermischen Eigenschaften von Verglasung und Rahmen geschaffen [1, 2; 3]. Neuere Randverbände von Isolierverglasungen zielen auf eine Reduktion des Wärmeüberganges. Es werden verschiedene Anstrengungen in diese Richtung unternommen [4]. Die Verwendung von Schaumglas als Abstandhalter wurde mehrfach vorgeschlagen [5]. In einem Forschungsprojekt an der Universität Karlsruhe (TH) werden Testscheiben mit Schaumglas als Abstandhalter konzipiert, simuliert, in Zusammenarbeit mit den Firmen Kömmerling (Hersteller von Dichtstoffen) und Interpane (Hersteller von Isolierverglasungen) gebaut und der Klimawechselprüfung ausgesetzt.

Die thermische Verbesserung des Randverbundes bewirkt eine deutliche Erhöhung der Oberflächentemperatur der Innenscheibe am Rand der Verglasung. Das hat im wesentlichen zwei positive Auswirkungen auf das **Raumklima**: erstens erhöht sich die Strahlungstemperatur im Raum und zweitens kommt es im Bereich des Randverbundes vorwiegend in der Nähe der vertikalen Scheibenkanten zu einem geringeren Kaltluftabfall. Beide Effekte führen zu einer höheren Behaglichkeit und zu niedrigerem Heizenergieverbrauch. Außerdem wird der Zwang gelockert, Heizkörper in der Nähe der Verglasung vorzusehen.

1 Vorausgegangene Arbeiten

Am Institut für Fenstertechnik (ift) in Rosenheim wurden vor 3 Jahren Probescheiben mit Schaumglas als Abstandhalter gebaut. Das Trocknungsmittel wurde in Säckchen gefüllt und in den Scheibenzwischenraum eingebracht. Das Gas im Scheibenzwischenraum einer Scheibe hatte nach 6 Wochen Klimawechselprüfung einen Taupunkt bei -28°C , was auf Fehlstellen in der Verklebung zurückzuführen ist. Dichtstoffe und Klebetechniken werden in dem vorliegenden Projekt optimiert.

Ein neuartiger Randverbund kann an den Erfahrungen der Vorversuche ansetzen:

- die herkömmliche, doppelte Dichttechnik mit Polysulfid und Butyl muß beibehalten werden,
- sonstige Diffusionsstrecken für Wasserdampf und Füllgase sollten vermieden werden oder mit möglichst hohem Diffusionswiderstand ausgeführt werden.

Vor allem die Anforderungen „hohe Dichtigkeit“ und „niedrige thermische Leitfähigkeit des Randverbundes“ führen im Hinblick auf die Verwendung von Schaumglas im Abstandhalter auf eine neuartige Gestaltung des Randverbundes.

2 Gestaltung des Randverbundes und des Abstandhalters

Bei der Gestaltung des Abstandhalters werden bestimmte Ziele verfolgt:

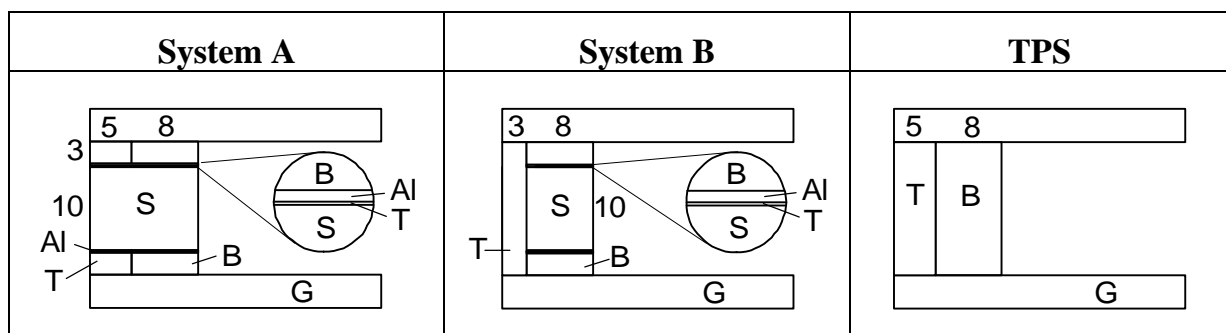
1. Geringe Wärmeleitfähigkeit des Randverbundsystems.
2. Verteilung der Lasten, Begrenzung der maximalen Spannungen im Schaumglas.
3. Unterbringung des erforderlichen Trocknungsmittels.
4. Geringe Gasdiffusionsraten.

Eine geringe Wärmeleitfähigkeit des Abstandhalter-Systems soll in erster Linie durch eine durchgehende Schaumglasebene im Abstandhalter und senkrecht zur Wärmestromrichtung erreicht werden (System A in Abbildung 1). Dieses System hat die geringsten Wärmeleitwerte im Randbereich der Verglasung. Allerdings muß der Schaumglaskörper dann auch alle zwischen den Rändern der Glasscheiben entstehenden Kräfte aufnehmen. Neben System A ist eine zweite Variante vorgesehen (System B), bei der die Zugkräfte zwischen den Glasscheiben durch eine Polysulfid-Sekundärdichtung aufgenommen werden, so daß das Schaumglas praktisch nur Druckkräften ausgesetzt ist, die es sehr viel besser aufnehmen kann als Zugkräfte. Das System TPS (TPS = **T**hermo**p**lastische **S**pacer) besteht nur aus Dichtstoffen und dient als Referenz.

Um die Handhabung der Abstandhalter bei der Herstellung der Isolierverglasungen zu erleichtern, sollen auf den Schaumglasabstandhalter beidseitig Aluminiumbleche aufgeklebt werden.

2.1 Berechnung des linearen Wärmeleitwertes (linearer U-Wert)

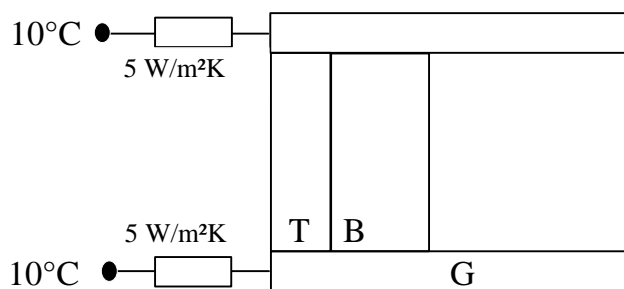
Mit dem 2-dimensionalen Finite-Elemente-Programm Quickfield wurde der lineare U-Wert für die drei Randverbundsysteme (siehe Abbildung 1) berechnet.



T=Polysulfid, B=Butyl mit Trocknungsmittel, S=Schaumglas, G=Glas, Al=Aluminium
(B und T: Wärmeleitfähigkeit $\lambda=0,35\text{W/mK}$, S: $\lambda=0,05\text{W/mK}$)

Abbildung 1: Gestaltungen der simulierten Randverbünde (Scheibenabstand: 16mm, Scheibendicke: 4mm)

Da sich im Rahmen neben der Verglasung im Bereich des Abstandhalters der luftgefüllte Glasfalz befindet, findet zwischen den beiden Scheiben der Isolierverglasung und der Glasfalzoberfläche ein Wärmeübergang durch Strahlung und Konvektion statt. Die Betrachtung des Wärmeüberganges im Glasfalz des Rahmens wurde in die Berechnungen mit aufgenommen. Aufgrund der geringen Breite des Glasfalzes (5mm), kann davon ausgegangen werden, daß konvektive Wärmeübertragung und Leitung gering sind [6]. Der Strahlungsaustausch zwischen den Glaskanten und den Oberflächen des Rahmens im Glasfalz wird in die Simulationsrechnungen aufgenommen. Dabei wird ein Wärmeübergang der Glasränder durch Strahlung (ca. $5\text{W/m}^2\text{K}$) gegen eine Fläche von $+10^\circ\text{C}$ in die Simulation eingefügt (Abbildung 2). Diese Abschätzung kann als konservativ gelten, da die Oberflächentemperaturen des Glasfalzes im (Sicht-) Bereich der kalten Scheibe eher niedriger als 10°C und im Bereich der warmen Scheibe eher höher als 10°C sind. Der Wärmestrom durch den Glasfalz ist in Wirklichkeit also geringer als in der Simulation.



Die linearen Wärmeleitwerte der Randverbände sind in der folgenden Tabelle 1 eingetragen.

Abbildung 2: Strahlungsaustausch im Falzbereich

Tabelle 1: lineare Wärmeleitwerte der drei untersuchten Systeme.

Randverbund	System A	System B	TPS
ohne Falzbetrachtung	0,0276 W/mK	0,0438 W/mK	0,0739 W/mK
mit Falzbetrachtung	0,0322 W/mK	0,0483 W/mK	0,0778 W/mK
relative Erhöhung	+17%	+10%	+5,3%

Ergebnis der thermischen Simulation:

Der lineare Wärmeleitwert neuerer sogenannter warm-edge-Randverbände liegt bei etwa $0,075\text{ W/mK}$ (wie die meisten der sog. warm-edge Randverbände). Durch die Verwendung von Schaumglas im Abstandhalter kann dieser Wert auf $0,03\text{ W/mK}$ (System A) bis $0,045\text{ W/mK}$ (System B) gesenkt werden.

2.2 Berechnungen zur mechanischen Belastung des Randverbundes

Dickere Klebefugen erlauben erstens eine stärkere Dehnung und Stauchung der Klebefuge, so daß der Innendruck im Scheibenzwischenraum bei dickeren Klebefugen nicht so stark zu- oder abnimmt (diesen Effekt kennt man von der TPS Technologie). Zweitens erleichtern dickere Klebefugen eine Verdrehung der Ränder der Glasscheibe und damit eine stärkere Bauchung der Glasscheibe, wodurch die Hebelwirkung der Scheibe vermindert wird. Die Maximalkräfte im Schaumglas werden durch eine dickere elastische Klebefuge also verringert und gleichmäßiger auf den Schaumglaskörper verteilt

[7]. Da die Kräfte im Schaumglas einen wesentlichen Einfluß auf den Erfolg des Projektes haben, wurden 3D-Simulationsrechnungen von Verglasungen durchgeführt (siehe Kapitel 3.2).

Bei Abstandhaltersystemen, bei denen der Schaumglaskörper die Kräfte aufnehmen soll (das sind die thermisch besseren Systeme, z.B. System A), ist eine gleichmäßige Lastverteilung unbedingt erforderlich, um zu hohe Spannungen im Abstandhalter und die Gefahr von Ribbildung und -fortpflanzung im Schaumglas zu vermeiden.

2.2.1 Belastung des Randverbundes: Größe der Verglasung und Randwinkel

Bei sehr kleinen Verglasungen entsteht durch die Druckdifferenz zwischen Scheibenzwischenraum und Umgebung eine relativ geringe Kraft ($F = \Delta p \cdot A_{\text{Scheibe}}$), die sich auf die Abstandhalter verteilt. Sehr kleine Scheiben biegen sich jedoch nicht stark, so daß kaum eine Ausbauchung der Scheiben auftritt, welche eine Reduktion der Druckdifferenz und damit der Randbelastung bedeuten würde. Sehr große Scheiben können leicht ausbauchen, so daß sich nur eine geringe Druckdifferenz einstellt. Die Verglasung mit der größten Belastung des Randverbundes ist also nicht sehr groß und nicht sehr klein. Theoretische Berechnungen und Simulationen zeigen, daß Verglasungen bei einer Größe von etwa 30cm*30cm bis 40cm*40cm Kantenlänge die größten Belastungen des Randverbundes aufweisen.

Ein zweiter Punkt, der beachtet werden muß, ist der entstehende Winkel durch die Ausbauchung der Verglasung (Randwinkel) [7]. Ein Winkel in der Verklebung bedeutet, daß die entstehende Last ungleichmäßig auf die Breite des Abstandhalters verteilt wird. Es könnten Spannungsspitzen entstehen, die zum Bruch des Schaumglases führen. Die Spannungsmaxima sind bei gegebenem Randwinkel geringer, je größer die Dicke der Klebefuge ist. Zu dicke Klebefugen sind jedoch thermisch von Nachteil, da dann bei konstantem Scheibenabstand die thermisch wirksame Dicke des Schaumglaskörpers abnimmt.

2.2.2 Simulationsergebnisse

Die mechanischen Kräfte in Testverglasungen der Größe 35cm*50cm mit Klebefugen von 1,8mm und 2,6mm Dicke wurden mit dem 3D-Finite-Elemente-Programm Abaqus berechnet. In der folgenden Abbildung 1 sind die Geometriedaten und Materialwerte der Simulation dargestellt. Außerdem sind Angaben über die Größe der Elemente der Struktur eingetragen. Die Spannungen wurden für das Abstandhalter-System mit dem System A simuliert. Der Überdruck im Scheibenzwischenraum wurde auf 8kPa gesetzt, was einer worst-case Betrachtung entspricht. In Tabelle 2 sind die E-Module und Poisson-Zahlen der Simulation tabellarisch dargestellt.

Material	Elastizitätsmodul E in N/m ²	Poisson-Zahl μ , dimensionslos
Glas	$7 \cdot 10^{10}$	0,22
Polysulfid	$5,5 \cdot 10^5$	0,49
Aluminium	$7,2 \cdot 10^{10}$	0,3
Schaumglas	$7 \cdot 10^7$	0,3

Tabelle 2: In der Simulation verwendete Materialdaten

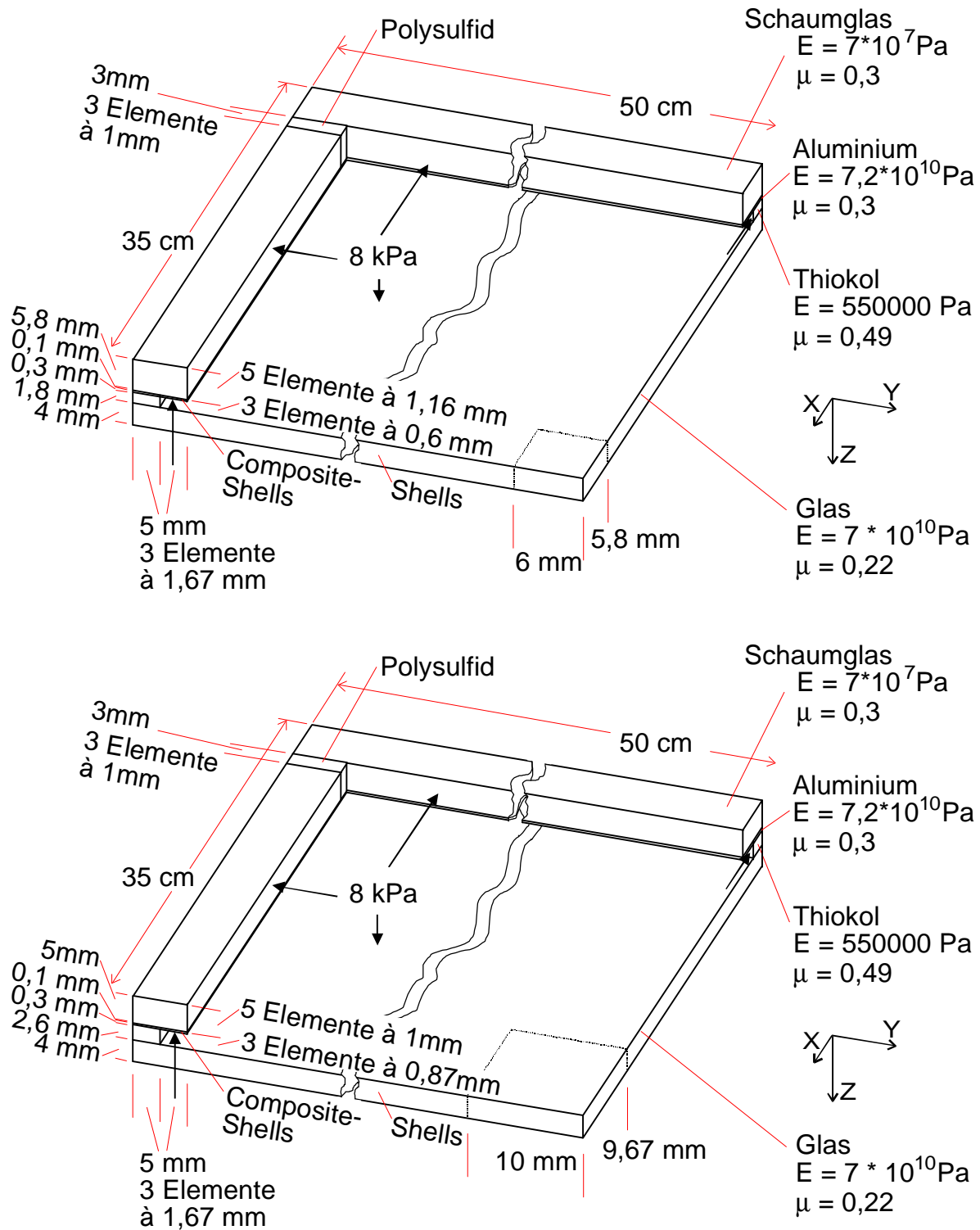


Abbildung 3: Daten für die 3-D-Strukturmechanik - Simulationen, oben: 1,8mm Polysulfid, unten: 2,6mm Polysulfid.

In den folgenden Abbildung 4 und 4 werden die Hauptspannungen im Schaumglaskörper dargestellt. Aus Symmetriegründen ist nur $\frac{1}{4}$ der Abstandhalter dargestellt {die Hälfte einer kurzen (oben) und die Hälfte einer langen Scheibenkante (unten)} Die danach folgende Tabelle 3 zeigt die maximale Zugbelastbarkeit verschiedener Schaumglastypen.

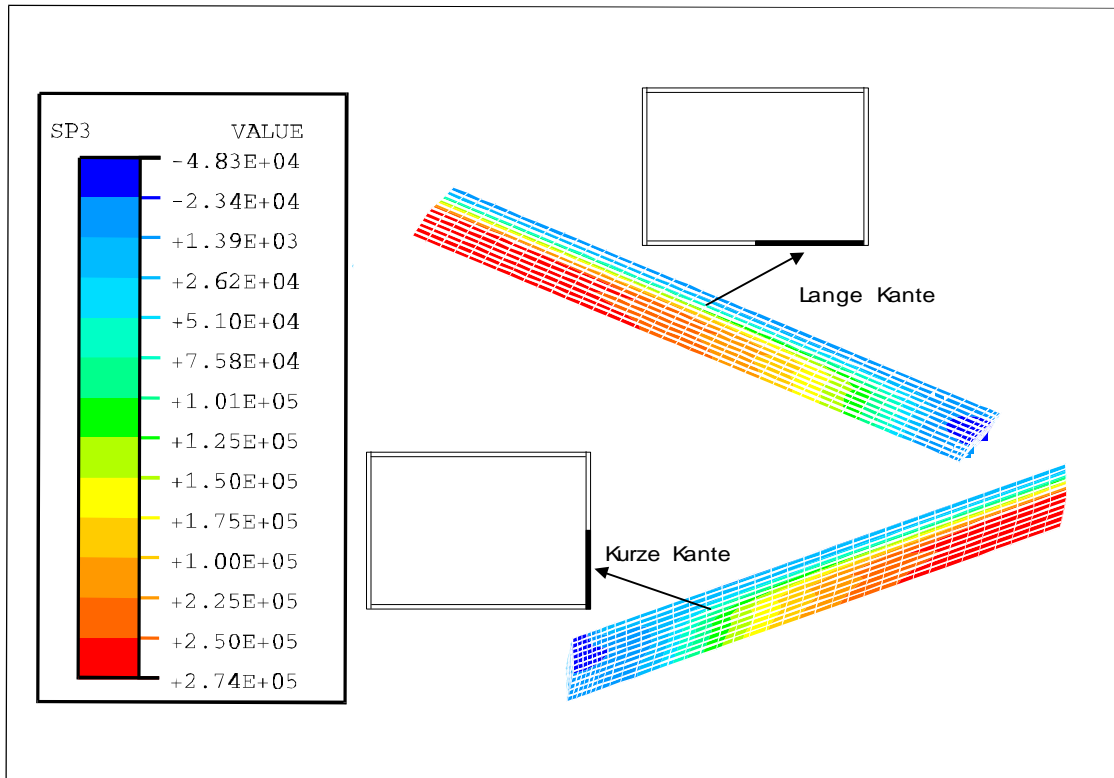


Abbildung 4: Mit dem Simulationsprogramm Abaqus simulierte Hauptspannungen in N/m^2 im Schaumglas bei 1,8mm Polysulfid-Klebefuge (rot: Zugspannung)

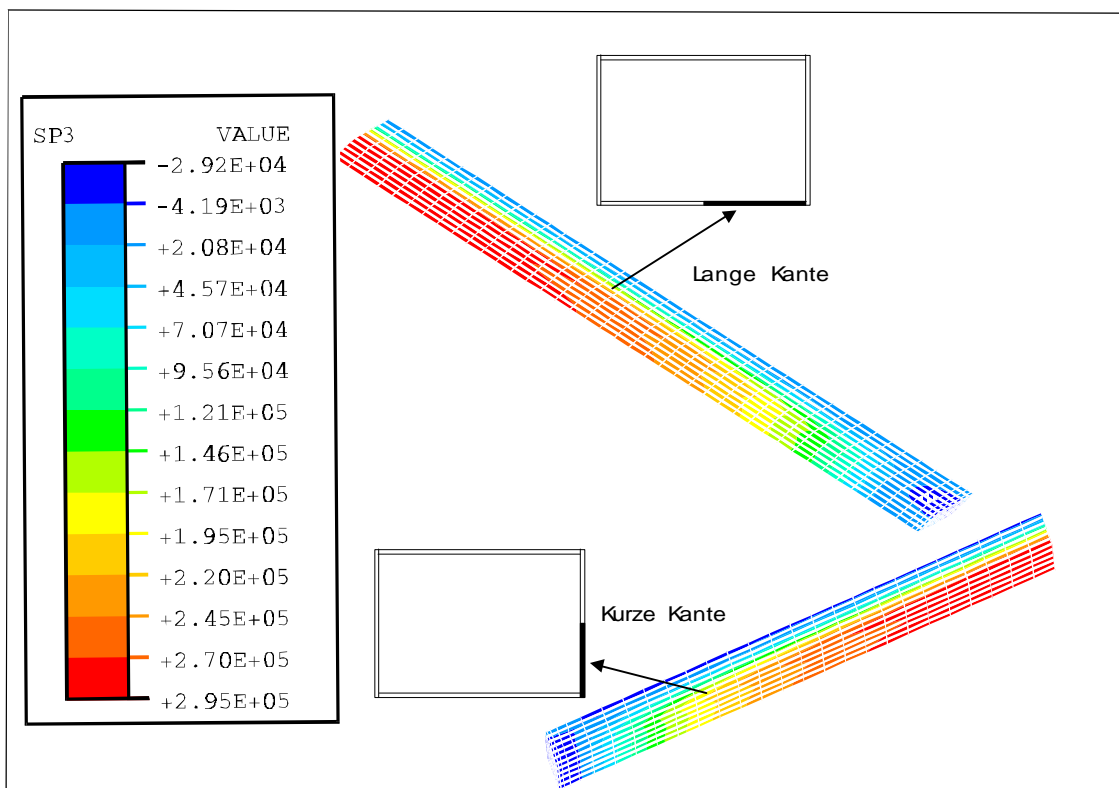


Abbildung 5: Mit dem Simulationsprogramm Abaqus simulierte Hauptspannungen in N/m^2 im Schaumglas bei 2,6mm Polysulfid-Klebefuge (rot: Zugspannung)

Tabelle 3: Physikalische Eigenschaften von Schaumglas (*=Extrapolation).

Foamglass Typ		T4-040	T4	T2	F
Eigenschaft	Dimension				
Dichte	kg/m ³	110	120	125	165
Wärmeleitfähigkeit	W/mK	0.04	0.045	0.05	0.055
Druckfestigkeit	10 ⁶ N/m ²	0.65	0.85	0.9	1.7
Zugfestigkeit	10⁶N/m²	0.18 *	0.24	0.25 *	0.48 *
E-Modul	N/mm ²	53-58	65	75	

Ein markantes Ergebnis ist, daß bei dem Innendruck von 8kPa die maximal erlaubten Zugspannungen in den **Glasscheiben** zu 93% erreicht werden, während die maximalen Zugspannungen im **Schaumglaskörper** etwa 60% der Zugfestigkeit des verwendeten Schaumglases erreichen.

Weiterhin kann festgestellt werden, daß bei einer Polysulfid-Klebefuge von 2,6mm Dicke die geringere Maximalspannung im Schaumglas auftritt und diese unterhalb der Zugfestigkeit des verwendeten Schaumglastyps liegt. Da die Unterbringung des Trocknungsmittels bei einer Fugendicke von 2,6mm und einer Fugenbreite von 8mm möglich ist, wurde eine Fugendicke von 2,6mm für den Testaufbau gewählt.

2.3 Trocknungsmittel

Das Trocknungsmittel wird, wie bei der TPS-Technologie, der Primärdichtung aus Butyl beigemischt. Der Querschnitt des Abstandhaltersystems muß eine Butylfläche von etwa 50mm² aufweisen, um genügend Trocknungsmittel aufnehmen zu können. Bei 2*3mm Fugendicke ergibt sich eine erforderliche Breite der Butyldichtung von 8mm.

2.4 Reduktion des Wärmebedarfes eines Gebäudes, ökonomische Betrachtung

2.4.1 Absolute Reduktion des Heizwärmebedarfes

Eine Reduktion des lin. Wärmeleitwertes um 0,045 (System A) bis 0,03 W/mK (System B) ist möglich. Bei 84000 Kh Heizgradstunden pro Jahr beträgt die jährliche Energieeinsparung pro 1m Randverbund 3,78 kWh (A) bis 2,52 kWh (B). Bei einem angestrebten maximalen Mehrpreis des Abstandhalters mit Schaumglas von 1DM pro Meter Randverbund gegenüber einem Abstandhalter der TPS-Technologie und bei Energiekosten von 5 Pf/kWh macht sich der Randverbund, betriebswirtschaftlich statisch betrachtet, in 5 bis 8 Jahren, durch die Einsparung der Heizkosten bezahlt.

2.4.2 Beispielgebäude: Niedrigenergiehaus

Bei einem Gebäude in Niedrigenergiebauweise mit 120 W/K Gebäude-Wärmeleitwert zur Umgebung, einer Fensterfläche von 30m² und einem Fensterumfang von 4m/m² ergibt sich der gesamte Fensterumfang zu 120m. Dann sinkt der Gebäude-Wärmeleitwert bei der Verwendung von Schaumglas um 5,4W/K bis 3,6W/K, was eine Reduktion des Gebäude-Wärmeleitwertes und damit (in etwa) eine Reduktion des jährlichen Heizwärmebedarfes um 4,5% bis 3% bedeutet. (Bei einem Passivhaus ist die prozentuale Reduktion des Heizwärmebedarfes etwa 15% bis 10%).

3 Herstellung der Isolierverglasung

3.1 Bearbeitung von Schaumglas

Zur Herstellung der Abstandhalter ist es erforderlich, eine geeignete Bearbeitungsmethode für das Schneiden von Schaumglas zu finden.

3.1.1 Tischkreissäge

Schaumglas kann nach Herstellerangaben mit Bandsägen und Kreissägen bearbeitet werden. Werden Abstandhalter mit geringem Querschnitt bearbeitet, so sollten die Kräfte, welche senkrecht zur Schnitttrichtung auftreten, nicht zu groß sein. Da das Band von Bandsägen mitunter pendelt und damit zu ungenau sägt, wurde eine schnelllaufende Tischkreissäge verwendet.

An einer Tischkreissäge der Universität Karlsruhe wurden Stangen mit den Maßen 9mm x 13mm gesägt. Die Stangen konnten problemlos und ohne Ausschuß gesägt werden.

3.1.2 Laserschneiden.

Es wurde die Möglichkeit des Schneidens mit einem Laserstrahl weiterverfolgt, so daß später evtl. die kritischen Schnittkanten (jene, welche verklebt werden und dicht sein müssen) mit einem Laser und die unkritischen mit einer Kreissäge geschnitten werden. Das Schneiden des Schaumglases mit einem Laser kann sich als vorteilhaft erweisen, insofern evtl. die Schnittfläche schmilzt und dadurch die kleinen Ausbrüche im Schaumglas ausbleiben, wie sie beim zerspanenden Sägen auftreten.

Die örtlich entstehende Hitze beim Laserschneiden kann aber auch zu thermischen Spannungen und in deren Folge zu Rissen im Schaumglas führen, welche als Kapillare wirken. Zur Behebung der (evtl.) auftretenden Spannungen muß das Material nach dem Schneiden getempert werden. Dies bedeutet aber einen zusätzlichen Prozessschritt mit weiteren Kosten.

Von der Firma Nutech wurden mit einem Laser Schnitte in 9mm dicke Scheiben geschnitten. Wie erwartet schmilzt die Oberfläche an. Dies hat zwei Konsequenzen:

1. Die Schnittfläche ist aufgrund der endlichen Tiefenschärfe des Lasersystems nicht eben, sondern konkav (siehe Pfeil in Abbildung 6), was negativ zu bewerten ist.
2. Die Schnittfläche ist angeschmolzen, wodurch Zacken und Risse an der Schnittfläche vermieden werden.

Die zusätzlichen Kosten für Laserschneiden betragen 2,50 DM/m. Diese Kosten lassen sich mit einem auf Schaumglas abgestimmten Lasersystem auf etwa 0,50 DM/m reduzieren.

In dem vorliegenden Projekt kamen Schaumglasstangen zum Einsatz, die auf einer Tischkreissäge geschnitten wurden.

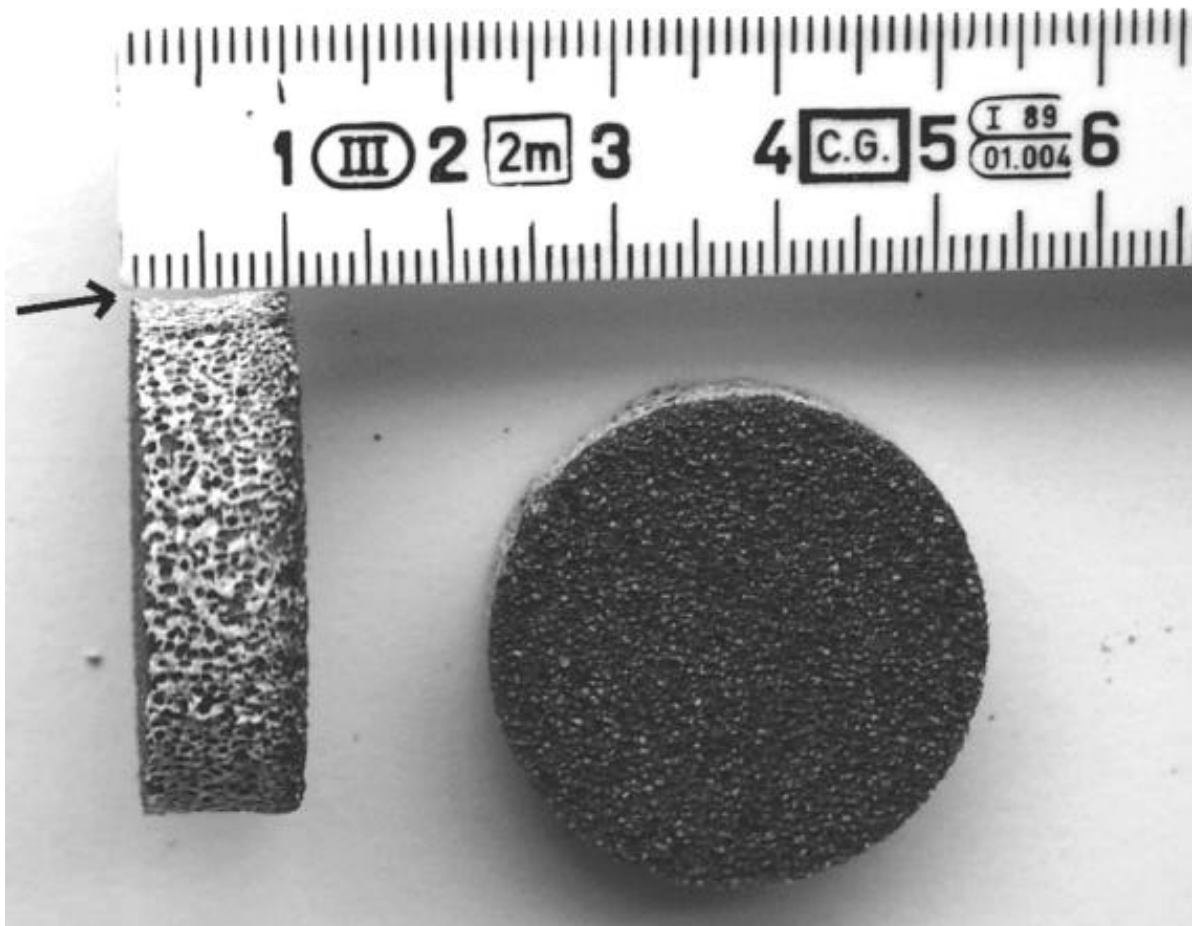


Abbildung 6: Lasergeschnittene Kreisscheiben aus Schaumglas

3.2 Herstellung des Abstandhalters

Das gesägte Schaumglas wurde der Firma Kömmerling zugesandt. Kömmerling führte damit erste Verklebungsversuche. Die geringe Festigkeit des Schaumglases bildet dabei eine besondere Herausforderung an die Ausführung der Verklebung.

4 Ergebnis

Zur Zeit wird die Produktion von Testscheiben vorbereitet. Aus den Vorversuchen ergab sich ein neuer und vielversprechender Ansatz für ein statisch stabiles Abstandhaltersystem mit Schaumglas.

Die thermischen 2-D Simulationen haben eindeutig gezeigt, daß die Verwendung von Schaumglasstangen als Abstandhalter gesehen bei einem System ohne Sekundärdichtung eine optimale Lösung für eine Isolierverglasung darstellt.

Die Kräfte im Randverbund nähern sich der Maximalbelastbarkeit von Schaumglas, allerdings erst bei so hohen Drücken im Scheibenzwischenraum (8kPa), daß auch die Scheiben zerbrechen würden. Demnächst werden weitere Ergebnisse in dem Forschungsprojekt erwartet.

5 Literaturangaben

- [1] Wolfgang Feist: Fensterrahmen und Randverbund - die bisher schwächsten Glieder. In: Tagungsband der 2. Passivhaustagung. Darmstadt, Februar 1998, S. 141-158.
- [2] Helmut Marquardt: Qual der Wahl: welche Wärmeschutzverglasung ist sinnvoll?. Deutsche Bauzeitung, db Nr. 12/98. S. 113-118.
- [3] Helmut, Günther und Hubert Pazen: Energieeffiziente Fenstersysteme. Firmenprospekt der Fa. Pazen GmbH. Zeltingen-Rachtig 1998.
- [4] Löffler Michael: Thermische Eigenschaften neuer Randverbundsysteme bei Mehrfachverglasungen, in: wksb, Heft 39, 42. Jahrgang, Juli 1997, Seite 27-31.
- [5] Svend Svendsen, Peter Fritzel: Spacers for highly insulating windows, in: Window Innovations 1995, Conference Proceedings, Toronto, Juni 1995.
Löffler Michael: Schaumglas als Abstandhalter bei Mehrfachverglasungen, Bauphysik 1/1996, S. 24-27.
Lehmann Jürgen, Löffler Michael: Schaumglas als Abstandhalter bei Mehrfachverglasungen, in: Tagungsbericht des internationalen Symposiums des Conseil International du Bâtiment in Wien, Wien, 1996. S. 435-440.
Löffler Michael: Foamglass as spacer in multiple-glazing, in: Building Research and Information, Bromley, UK, 1997, Vol. 25, Nr. 2, März 1997, S. 107-110.
Löffler Michael, Buck Doris: Glazing edge-seal using foamglass as spacer and frameless window design, in: Solar Energy, Great Britain, Nov. 1997, Vol. 61, No. 5, Seite 303-312.
- [6] Duffie, John A., Beckmann, William A.: Solar Engineering of Thermal Processes. 2. Ausgabe. New York: John Wiley and Sons 1991. oder: VDI-Wärmeatlas. 7. Auflage. Düsseldorf. 1994.
- [7] Löffler Michael: Schaumglas als Abstandhalter bei Mehrfachverglasungen, Bauphysik 1/1996, S. 24-27.