BAUFORSCHUNG FÜR DIE PRAXIS, BAND 106

Andrea Dimmig-Osburg, Frank Werner, Jörg Hildebrand,
Alexander Gypser, Björn Wittor, Martina Wolf

Transluzente Glas-Kunststoff-Sandwichelemente

Fraunhofer IRB Verlag

Die vorliegende Arbeit wurde unter dem Förderkennzeichen
SF-10.08.18.7-09.5; II3-F20-09-028 vom Bundesinstitut für Bau,- Stadt- und
Raumforschung, Bonn, mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau gefördert.
Für den Inhalt sind allein die Verfasser verantwortlich.

Druck und Weiterverarbeitung:
IRB Mediendienstleistungen des
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB, Stuttgart

Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

© by Fraunhofer IRB Verlag, 2013
ISBN 978-3-8167-9025-9
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB
Postfach 80 04 69, 70504 Stuttgart
Telefon 0711 970-2500, Telefax 0711 970-2508
E-Mail info@irb.fraunhofer.de
URL www.baufachinformation.de

Alle Rechte vorbehalten
Dieses Werk ist einschließlich seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Fraunhofer IRB Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.
Die Wiedergabe von Warennamen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.
Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen werden oder aus ihnen zitiert werden, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Glas-Hybrid-Elemente mit transluzenten Zwischenschichten zur Verbesserung der Energieeffizienz von Gebäudehüllen

Kurztitel:
Transluzente Glas-Kunststoff-Sandwichelemente

Aktenzeichen: SF – 10.08.18.7-09.5/ II 3 – F20-09-028

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung

Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung

Bauhaus-Universität Weimar

GKS

Endbericht

Weimar, 28. 04. 2011

Zuwendungsgeber: Bundesinstitut für Bau-, Stadt-, und Regionalplanung (BBSR)

im

Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)

Auftragnehmer: Bauhaus-Universität Weimar

F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde
Professur Polymere Werkstoffe
(zuvor JP Polymere Bindemittel und Baustoffe)
Prof. Dr.-Ing. Andrea Dimmig-Osburg

Institut für Konstruktiven Ingenieurbau
Professur Stahlbau
Professor Dr.-Ing. habil. Frank Werner

Projektleitung: Prof. Dr.-Ing. Andrea Dimmig-Osburg
Prof. Dr.-Ing. habil. Frank Werner

weitere Bearbeiter: Prof. Dr.-Ing Jörg Hildebrand
Dipl.-Ing. Alexander Gypser
Dipl.-Ing. Björn Wittor
Dipl.-Ing. Martina Wolf

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.

(Aktenzeichen: SF – 10.08.18.7-09.5 / II 3 – F20-09-028)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 6
1.1 Motivation 6
1.2 Randbedingungen 8
2 Versuchskonzeption - Technologie 9
3 Grundlagen der Wärmeübertragung 13
4 Praktische Versuche 17
4.1 Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit 17
4.1.1 Entwicklung und Aufbau der Versuchseinrichtung 17
4.1.2 Versuchselemente und Ergebnisse 20
4.2 Bestimmung mechanischer Parameter 25
4.2.1 Prüfeinrichtung und Versuchsaufbau 25
4.2.2 Versuchselemente und Ergebnisse 26
5 Numerische Simulation 29
5.1 Vorbetrachtungen 29
5.2 Modellbildung 31
5.3 Verifizierung der numerischen Simulation durch praktische Versuche 32
5.4 Ergebnisse der Parameterstudien 36
6 Neuartige Variante eines Randverbundes 40
6.1 Fügetechnologie 40
6.2 Voruntersuchungen zur Wärmeleitfähigkeit 46
7 Zusammenfassung und Ausblick 47

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1 Glas-Kunststoff-Hybridelement (Beispiel) 8
Abb. 1-2 Glaskuppel aus Hybridelementen 8
Abb. 1-3 Wärmeleitfähigkeiten verschiedener Materialien [8, 9, 10, 11] 9
Abb. 2-1 Varianten der Versuchselemente 10
Abb. 2-2 Glas-Kunststoff-Sandwichelement - Variante 11
Abb. 2-3 Wärmestromdichte einer GKS-Variante 11
Abb. 2-4 Spannungsspitzen im Kontaktbereich der GKS-Bauteile 12
Abb. 2-5 Studie eines GKS-Versuchselementes mit evakuierbaren Füllkörpern 12
Abb. 3-1 Spektrum der elektromagnetischen Wellen [14] 14
Abb. 3-2 Spektrale Transmission eines üblichen Floatglases [15] 15
Abb. 3-3 Transmission elektromagnetischer Strahlung durch Floatglas [17] 15
Abb. 3-4 Spektrale Reflexion unterschiedlich behandelter Gläser [15] 16
Abb. 4-1 Wärmestrommessplattengerät schematisch 17
Abb. 4-2 Wärmestrommessplattengerät 18
Abb. 4-3 Wärmestrommessplattengerät - Peripherie 18
Abb. 4-4 Wärmestrommessplattengerät – Detail 18
Abb. 4-5 Diagramm Wärmeleitfähigkeitsmessung (Beispiel) 19
Abb. 4-6 Aufbau GKS mit Röhren als Füllkörper – schematisch 21
Abb. 4-7 Versuchselemente der Wärmeleitfähigkeitsuntersuchungen (Auswahl) 21
Abb. 4-8 Universalprüfmaschine 26
Abb. 4-9 Biegezugversuch schematisch 26
Abb. 4-10 Biegezugprüfung, GKS-Element Variante 1 - Röhren längs 27
Abb. 4-11 Biegezugprüfung, GKS-Element Variante 2 - Röhren quer 27
Abb. 4-12 Versuchsergebnisse Biegezugprüfung 28
Abb. 5-1 Zusammenhang Wärmeleitfähigkeit - Gasdruck 30
Abb. 5-2 FE-Modelle für die numerische Simulation 31
Abb. 5-3 Transmissionsspektrum Aerogel [20] 34
Abb. 5-4 Transmissionsspektrum transparenter Materialien [21] 35
Abb. 5-5 Wärmestromdichte GKS 36
Abb. 5-6 Temperaturverlauf GKS 36
Abb. 5-7 Zusammenhang U-Wert – Wandstärke der Füllkörper 37
Abb. 5-8 Zusammenhang U-Wert – Wärmeleitfähigkeit der Zwickelfüllung 38
Abb. 5-9 Zusammenhang U-Wert – Gasdruck im Füllkörper 38
Abb. 5-10 Zusammenhang U-Wert – Emissionskoeffizient der Oberflächen 39
Abb. 6-1 Vorverglaste Probe nach dem separaten Ofendurchgang [19] 41
Abb. 6-2 Kleinformatige Probe - Seitenansicht [19] 42
Abb. 6-3 Kleinformatige Probe - Draufsicht [19] 42
Abb. 6-4 Bohrung in der Glasplatte [19] 43
Abb. 6-5 Oberfläche der Schaumglasprobe - Laserankopplung [19] 44
Abb. 6-6 Streifenförmiger Probekörper – Gesamtansicht 44
Abb. 6-7 Streifenförmiger Probekörper – Detail 45
Abb. 6-8 Versuchselement - Glas mit Schaumglasrahmen verlötet [19] 45
Abb. 7-1 Stahlskelett des Experimentalbaus X.STAHL 50
Abb. 7-2 Experimentalbau X.STAHL – Studie 50

Tabellenverzeichnis

Tab. 4-1 Übersicht der untersuchten Elemente mit röhrenförmigen Füllkörpern 22
Tab. 5-1 Wärmeleitfähigkeiten verschiedener Baustoffe [8, 9] 29
Tab. 5-2 Technische Einteilung des Vakuums [13] 30
Tab. 5-3 Übersicht der Ergebnisse aus der numerischen Simulation 33
Tab. 6-1 Materialdaten der verwendeten Werkstoffe [19] 41
Tab. 6-2 Übersicht der untersuchten Elemente mit Schaumglas im Randbereich 46

1 EINLEITUNG

1.1 MOTIVATION

Der Umgang mit Tageslicht ist seit jeher ein wesentliches Thema in der Architektur. Bisher galt dabei das Hauptinteresse gestalterischen Aspekten und dem visuellen Komfort. Das gleichzeitige Erreichen eines thermischen Komforts im Gebäude stellt dabei häufig einen Zielkonflikt dar.

Die Problematik des thermischen Komforts, also auch des Wärmeschutzes eines Gebäudes, wird in erster Linie von der Hülle bzw. der Fassade beeinflusst [1]. Überlegungen diesbezüglich sind sowohl für winterliche als auch für sommerliche Umgebungsbedingungen anzustellen. Im Winter geht es vorrangig darum, Transmissionswärmeverluste zu minimieren und die passiven solaren Gewinne optimal zu nutzen. Diese sind vom Fensterflächenanteil, der Orientierung der Fenster und der Bauweise des Gebäudes abhängig. Zu beachten ist dabei, dass ein größerer Fensterflächenanteil stets zu einer Erhöhung des Heizwärmebedarfes führt. Selbst eine Südorientierung der Fenster führt in den meisten Fällen nicht zu einer Verringerung des Heizwärmebedarfs. Eine Vergrößerung der Fensterfläche für eine bessere Beleuchtung des Gebäudes ergibt damit immer eine Vergrößerung der Transmissionswärmeverluste, die durch die eingetragene Sonnenenergie nicht ausgeglichen werden kann.

Im Gegensatz dazu geht es bei der Fassadenplanung für den Sommerfall hauptsächlich darum, eine Überhitzung der Räume im Gebäude zu vermeiden. Den größten Einfluss auf die sommerlichen Raumtemperaturen haben ebenfalls der Fensterflächenanteil und die Bauweise des Gebäudes sowie zusätzlich die Wirksamkeit der vorhandenen Sonnenschutzmaßnahmen. Prinzipiell können große Fensterflächen auch für den sommerlichen Wärmeschutz als ungünstig eingestuft werden.

Mit einem transluzenten System kann ein ähnlicher Gesamtenergiedurchlassgrad wie für eine Verglasung mit innen liegendem Sonnenschutz erreicht werden. Der Tageslichttransmissionsgrad ist im Gegensatz dazu um etwa ein Drittel höher. Das heißt, dass bei einem vergleichbaren Energieeintrag die Raumausleuchtung mit einem transluzenten System verbessert wird. Ein weiterer Vorteil ist, dass auf zusätzliche Sonnenschutzmaßnahmen verzichtet werden kann, da das Licht durch die Elemente gebrochen und gestreut wird.

Gegenwärtig existieren transparente bzw. transluzente Fassadenelemente lediglich in Form von 1-, 2- oder Mehrscheibenverglasungen. Der Wärmedurchgangswiderstand ist durch den physikalischen Aufbau dieser Elemente definiert und begrenzt. Der baupraktisch erreichbare Wärmedurchgangskoeffizient bewegt sich gegenwärtig auf einem Gebiet um U = 1,5 W/(m²•K) und wird zukünftig mit 3-fach-Verglasung etwa bei U = 0,6 W/(m²•K) liegen. Solche Bauelemente sind hoch transparent, weisen aber ein ausgesprochen hohes Bauteilgewicht auf und sind aufgrund der notwendigen Technik kostenintensiv.

Der Wärmedurchgangswiderstand der Glas-Kunststoff-Sandwichelemente (GKS) wird infolge ihrer Struktur in der Größenordnung von Stahl-PUR-Stahl-Elementen o. ä. liegen. Damit sind die Elemente geeignet, in Gebäuden mit Passivhausstandard eingesetzt zu werden und können somit den Anforderungen der EnEV 2009 (Energieeinsparverordnung 2009) an Außenwände genügen.

In vielen Einsatzfällen kommt es nicht darauf an, dass eine hohe Transparenz erzeugt wird, sondern dass lediglich ein gewisser notwendiger Anteil des vorhandenen natürlichen Lichts Hüllelemente durchdringen kann. Dies ist insbesondere bei größeren Wänden oder Dachöffnungen interessant. Der Effekt der Lichtstreuung wird dabei in vielen Fällen sogar ausdrücklich gewünscht.

Werden diese Glas-Kunststoff-Sandwichelemente zur Substitution opaker Wandbauteile eingesetzt, kann sowohl der thermische als auch der visuelle Raumkomfort verbessert werden. Auf diese Weise ist es möglich, den Fensterflächenanteil zu reduzieren und gleichzeitig die Tageslichtversorgung des Raumes zu verbessern. Die Energiekosten für Heizung, Kühlung und künstliche Beleuchtung werden so reduziert. Auf einen zusätzlichen Sonnenschutz kann eventuell verzichtet werden.

Die GKS sind in der Lage, den Energiebedarf eines Gebäudes zu minimieren und gleichzeitig den Komfort zu steigern. Sie bilden damit einen wichtigen Grundbaustein zur strategischen Entwicklung nachhaltiger Gebäudehüllen, welche auf dem Konzept der Entkopplung von Energiebedarf und Raumkomfort beruht.

Es sollen praktisch einsetzbare Elemente entwickelt werden, die einerseits die notwendige Tragfähigkeit für Wandelemente mit Windlasten oder Dachelemente mit Wind-, Schnee- und möglichen Verkehrslasten aufweisen, und andererseits wärmedämmende Eigenschaften besitzen, die einen effektiven Einsatz auch bei großflächigen Anwendungen ermöglichen.

1.2 RANDBEDINGUNGEN

Bei vorangegangenen Forschungsprojekten [3, 4, 5] stand die Entwicklung von lastabtragenden, transparenten Bauelementen im Vordergrund. Die entwickelten Querschnitte bestehen aus Glas und Kunststoff, die durch geeignete Klebtechnologien verbunden werden (Abb. 1-1).

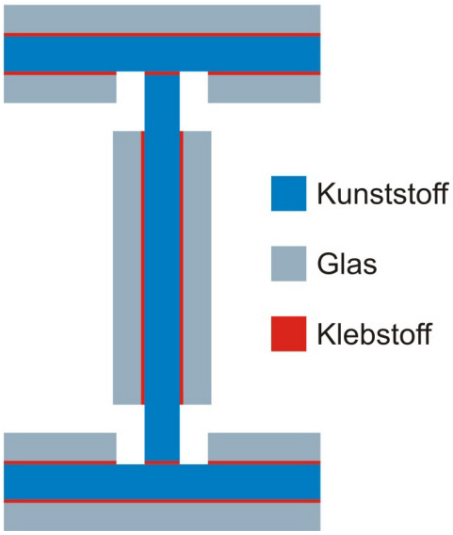


Abb. 1-1 Glas-Kunststoff-Hybridelement (Beispiel)

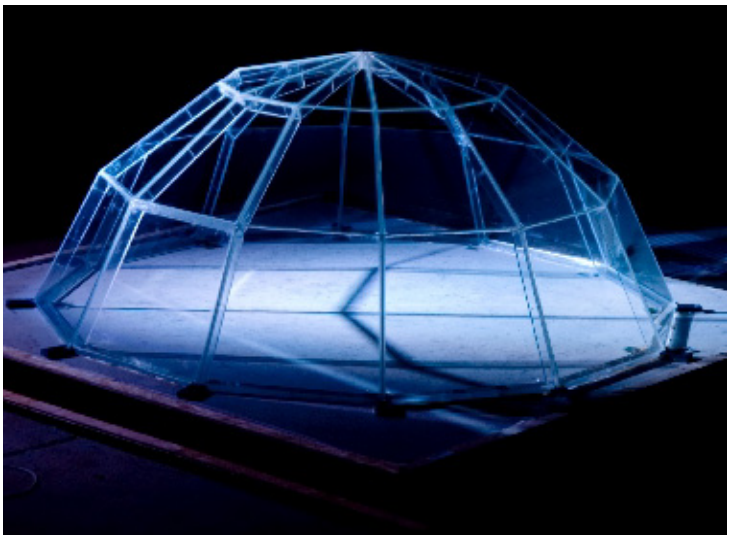


Abb. 1-2 Glaskuppel aus Hybridelementen

Der Kunststoff ermöglicht eine kontrollierte Schub- und Normalkraftabtragung zwischen den Querschnittsteilen und stellt eine ausreichende Resttragfähigkeit nach dem Versagen des spröden Glases sicher. Die Abb. 1-2 zeigt eine innovative Kuppelkonstruktion, deren gläserne Hülle von Rippen aus den beschriebenen Glas-Kunststoff-Hybridelementen getragen wird.

Für die aktuellen Anforderungen an die Energieeffizienz und die Nachhaltigkeit moderner Gebäude müssen auch bauphysikalische Eigenschaften, vor allem die Wärmeleitfähigkeit der verwendeten Materialien besondere Beachtung finden. Die außenliegenden Glasscheiben sind durch geeignete Zwischenschichten zu trennen bzw. zu koppeln, die einen Widerstand gegen den Wärmetransport durch Wärmeleitung, Wärmestrahlung und Konvektion erzeugen.

Die Abb. 1-3 zeigt die Wärmeleitfähigkeiten einiger Baustoffe im Vergleich zu ruhender Luft. Es ist deutlich erkennbar, dass die Verwendung von Vakuum als Zwischenschicht das größte Energieeinsparpotential bietet, wenn Effekte der Wärmestrahlung berücksichtigt werden. Allerdings besteht hierbei die Notwendigkeit der Schaffung eines gasdichten Randverbundes.

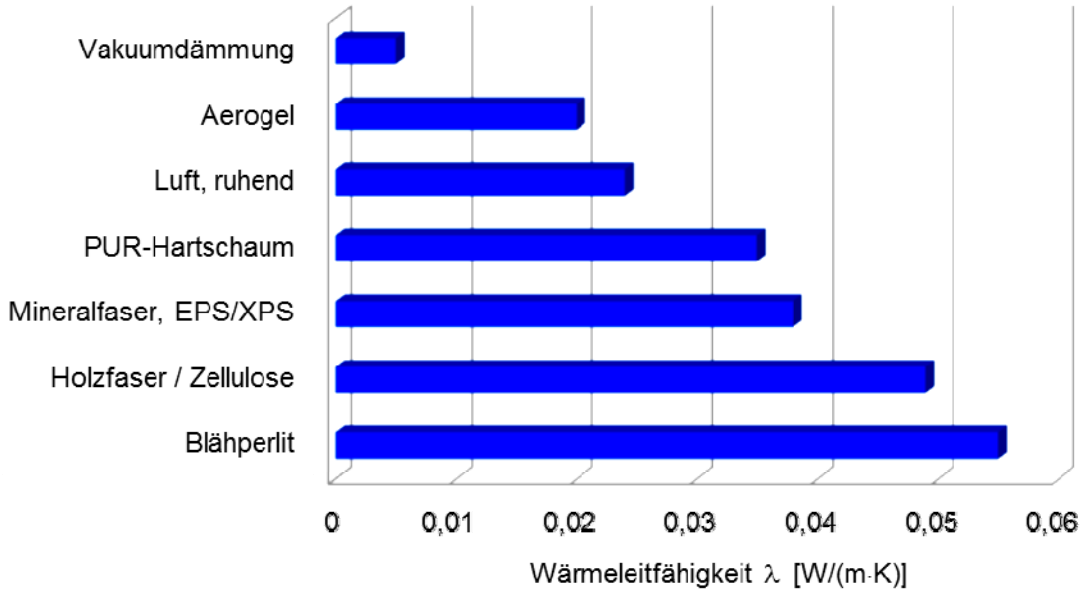


Abb. 1-3 Wärmeleitfähigkeiten verschiedener Materialien [8, 9, 10, 11]

Vor allem bei lichtdurchlässigen Bauteilen ergeben sich hier Probleme mit der Dauerhaftigkeit der Dämmwirkung. Für die Entwicklung transluzenter Hüllelemente ist außerdem der bei weitem größte Teil der Materialien, die als Dämmstoffe im Fassaden- und Dachbereich Verwendung finden, auf Grund unzureichender Lichtdurchlässigkeit ungeeignet. Eine wesentliche Aufgabe bei der Entwicklung der Glas-Kunststoff-Sandwichelemente liegt daher in der Untersuchung und der Auswahl geeigneter Materialien und deren Kombinationen.

2 VERSUCHSKONZEPTION - TECHNOLOGIE

Für die Konzeption der Glas-Kunststoff-Sandwichelemente stellt ein evakuierter Raum zwischen zwei Glasscheiben hinsichtlich des Wärmedurchgangs und der Lichtdurchlässigkeit den Idealfall dar. Allerdings existiert derzeit keine Technologie, den Randverbund der Elemente so herzustellen, dass die Aufrechterhaltung des Vakuums für die Lebensdauer des Bauteils gewährleistet werden kann. Außerdem wirken durch den äußeren Luftdruck auf ein evakuiertes Bauteil erhebliche Kräfte und bei einer punktuellen Schädigung der Deckschicht gehen die günstigen Wärmedämmeigenschaften vollständig verloren. Die alleinige Nutzung von Vakuum zwischen zwei Glasscheiben ist daher derzeit für praktische Einsatzzwecke technisch

kaum realisierbar und bedarf einer besonderen Berücksichtigung des Wärmetransportes durch Strahlung im gesamten System und Wärmeleitung im Randverbund, um die Vorteile der Evakuierung ausnutzen zu können.

Durch die Verwendung von Schäumen für die Zwischenschicht der Elemente sind zwar günstige Eigenschaften hinsichtlich des Wärmedurchlasswiderstandes zu erreichen, allerdings sind alle technisch bekannten Schäume opak.

Ein Lösungsansatz für die Entwicklung der Glas-Kunststoff-Sandwichelemente ist es, zwischen zwei Glasscheiben eine transluzente Zwischenschicht einzubringen, deren Wärmedurchlasswiderstand auf dem Niveau fortschrittlicher Industriebauprodukte liegt. Auf diese Weise lässt sich die hohe Beständigkeit von Glas mit den günstigen bauphysikalischen Eigenschaften der Kunststoffe kombinieren. Der Fokus der Forschung richtet sich auf die Untersuchung verschiedener, technisch herstellbarer und langlebiger Füllkörper, Füllmaterialien und deren Kombinationsmöglichkeiten für die Schaffung einer geeigneten Zwischenschicht.

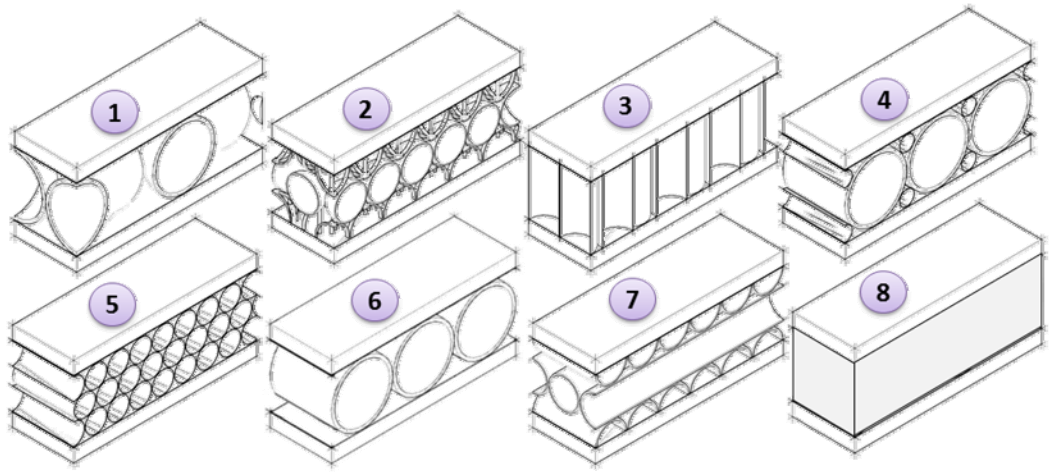


Abb. 2-1 Varianten der Versuchselemente

An Versuchselementen unterschiedlicher Konfiguration wurden mechanische und bauphysikalische Kennwerte messtechnisch erfasst, um die Kenntnisse zum Einfluss von Füllmaterial und möglichen Evakuierungstechniken der Füllkörper zu erweitern. Die daraus gewonnen Ergebnisse wurden mit Hilfe numerischer Simulationen verifiziert.

Im Vorfeld wurden in Variantenstudien Untersuchungen zum Aufbau der Sandwichelemente vorgenommen (Abb. 2-1). Diese wurden mit Hilfe numerischer Simulationen auf Vor- und Nachteile hinsichtlich des Wärmedurchgangswiderstandes und des Verhaltens unter Eigenlast untersucht. Für den Wärmetransport im Element

ist dabei von großer Bedeutung, dass möglichst wenig Querschnittfläche vorhanden ist, über die eine Wärmeleitung stattfinden kann. Um diesen Anteil zu minimieren, müssen die Füllkörper möglichst dünnwandig sein. Hinsichtlich der Tragfähigkeit des gesamten Elementes und der guten Verfügbarkeit erweisen sich röhrenförmige Füllkörper als besonders günstig. Ein solcher Aufbau entspricht prinzipiell dem Beispiel Nr. 6 in Abb. 2-1. Diese Variante ist in Abb. 2-2 als Sandwichelement dargestellt.

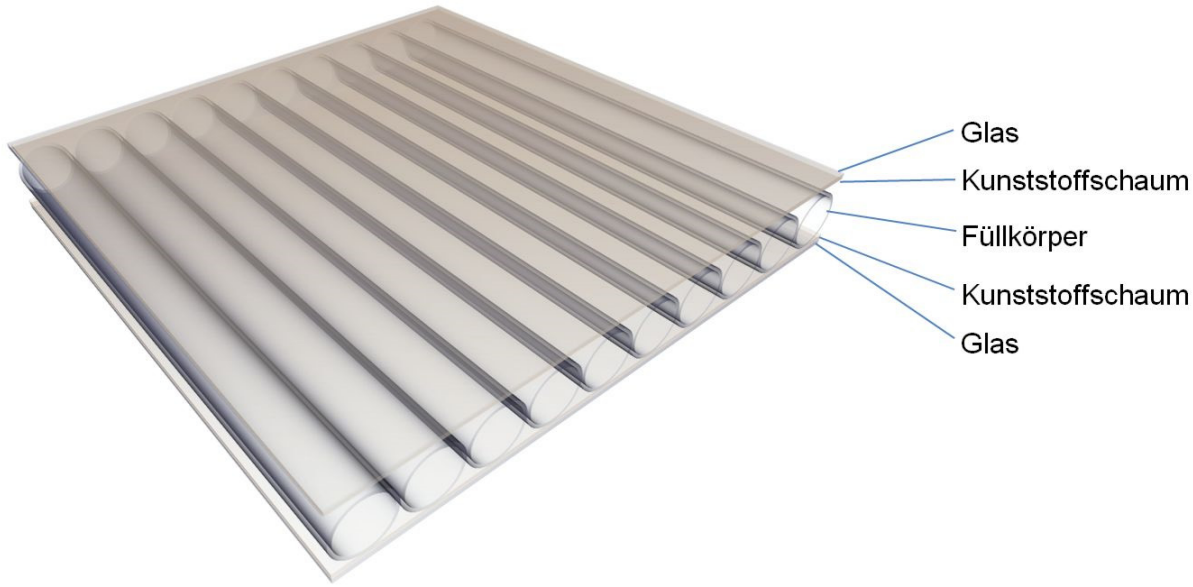


Abb. 2-2 Glas-Kunststoff-Sandwichelement - Variante

Für die innere und die äußere Deckschicht kommt Glas zum Einsatz. Die Ergebnisse der numerischen Simulation zeigen deutlich, dass die größte Wärmestromdichte an den Kontaktstellen von Deckschicht und Füllkörper auftritt (Abb. 2-3).

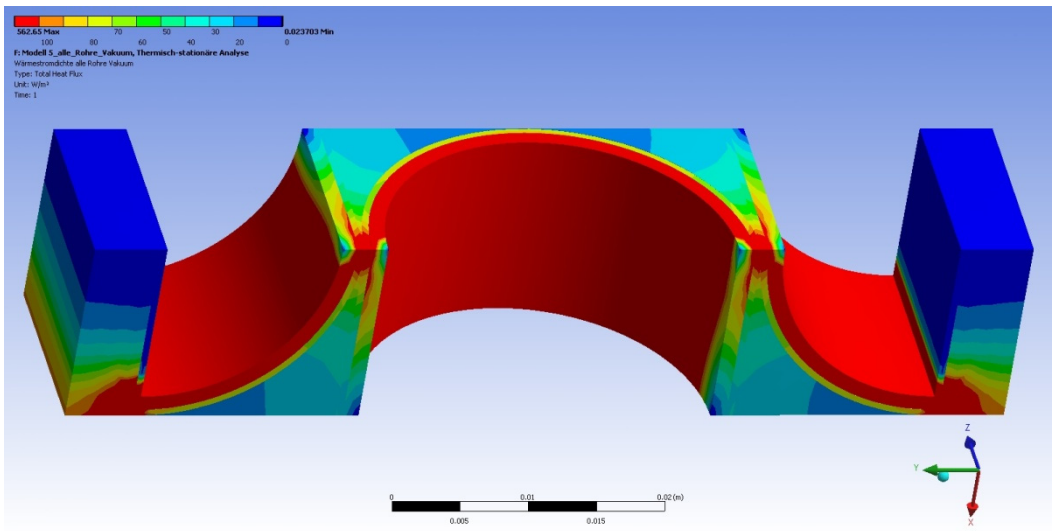


Abb. 2-3 Wärmestromdichte einer GKS-Variante

Aus diesem Grund wird zwischen den Deckschichten und den Füllkörpern eine dünne Schicht aus Kunststoffschaum angeordnet, die beide Konstruktionselemente voneinander entkoppelt. Diese Konstruktion hat außerdem den Vorteil, dass Spannungsspitzen durch äußere Einwirkungen, wie sie in Abb. 2-4 am Beispiel einer Variante mit kugelförmigen Füllkörpern dargestellt sind, vermindert werden und somit die Robustheit der Konstruktion erhöht wird.

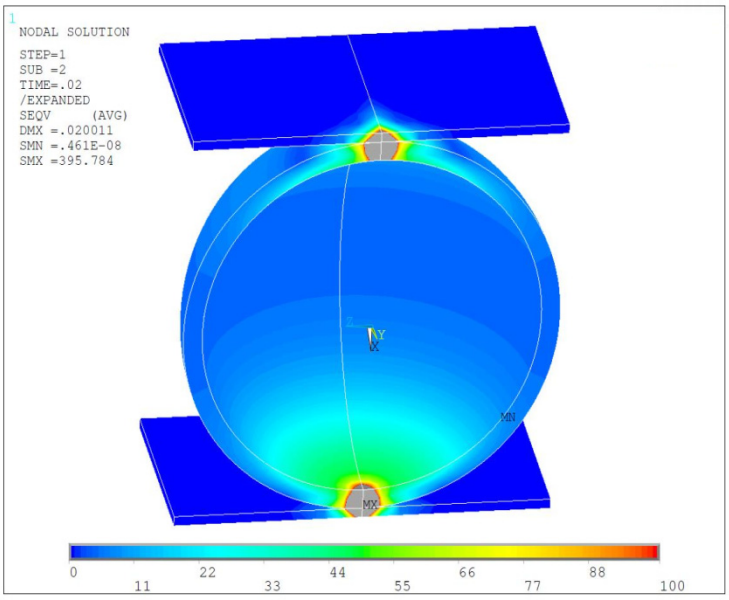


Abb. 2-4 Spannungsspitzen im Kontaktbereich der GKS-Bauteile

Die Glasfüllkörper des in Abb. 2-2 gezeigten Beispiels können evakuiert werden. Eine Studie, wie diese evakuierbaren Versuchselemente aufgebaut sein können, ist in Abb. 2-5 dargestellt.

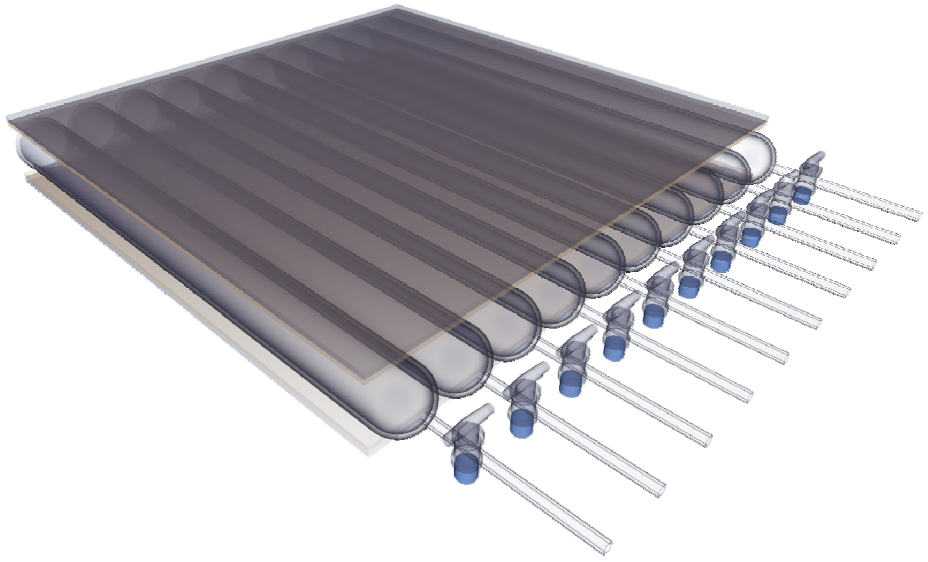


Abb. 2-5 Studie eines GKS-Versuchselementes mit evakuierbaren Füllkörpern

Der Einfluss einer Verringerung des Innendruckes der Füllkörper und verschiedener Varianten der Füllung der Hohlräume der Füllkörper und Zwickelbereiche wurden untersucht.

Im Verlauf der Projektbearbeitung zeigte sich, dass einige der als günstig eingestuften Materialien nicht als industrielle Produkte verfügbar sind. Dies betrifft im speziellen dünnwandige Füllkörper, die auf der Oberfläche eine die IR-Strahlung reflektierende Beschichtung aufweisen.

Hinsichtlich des Wärmedurchgangs ergibt sich ein sehr günstiger Elementaufbau, wenn auch der gesamte Raum zwischen den Deckschichten evakuiert wird, was mit der bereits erwähnten Notwendigkeit eines dichten Randverbunds einhergeht. Ein zielführendes Material für die Ausbildung des Randes könnte Schaumglas sein.

In Zusammenarbeit mit dem Günter-Köhler-Institut für Fügetechnik und Werkstoffprüfung GmbH in Jena entstanden mehrere Versuchskörper, die eine neue technische Entwicklung einleiten könnten. Zu Gunsten dieser Untersuchungen, die einen völlig neuen Elementaufbau ermöglichen und von hohem praktischen Nutzen sind, wurde auf die Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit der GKS-Elemente bisher verzichtet. Dauerhaftigkeitsuntersuchungen erfolgen nach Projektabschluss an entsprechenden Versuchsanlagen der Bauhaus-Universität Weimar im realen Maßstab.

3 GRUNDLAGEN DER WÄRMEÜBERTRAGUNG

Die Wärmeübertragung zwischen zwei Körpern unterschiedlicher Temperatur kann durch Wärmeleitung, konvektiven Wärmeübergang und Wärmestrahlung ablaufen. Dabei wird thermische Energie in Richtung der niedrigeren Temperatur transportiert [13].

Die Wärmeleitung beschreibt den Energietransport zwischen zwei benachbarten Atomen oder Molekülen mit unterschiedlichen Temperaturgradienten sowohl in Feststoffen als auch in Flüssigkeiten und Gasen. Dabei findet kein Materialtransport statt [13].

Die konvektive Wärmeübertragung innerhalb einer Flüssigkeit oder eines Gases ist der Energietransport durch Strömung des Fluids. Dieser Vorgang wird immer durch

die Wärmeleitung überlagert. Bei der Untersuchung der nachfolgend aufgeführten Modelle besitzt die konvektive Wärmeübertragung eine untergeordnete Bedeutung, da die Hohlräume relativ klein sind und die Füllkörper evakuiert werden sollen bzw. die Zwickelbereiche mit geeignetem Material gefüllt werden, welches die Konvektion deutlich vermindert.

Bei der Wärmeübertragung durch Wärmestrahlung wird Energie durch elektromagnetische Wellen übertragen. Die Abb. 3-1 zeigt, dass die Wärmestrahlung im Wellenlängenbereich zwischen 10^{-1} µm und 10^{3} µm, im Wesentlichen aber im infraroten Bereich mit Wellenlängen von 780 nm bis 1 mm liegt. Auch durch sichtbares Licht im Wellenlängenbereich von 380 nm bis 780 nm wird Wärme übertragen. Der Anteil der Wärmeübertragung durch Wärmestrahlung wird in seiner Wirkung in der Literatur häufig unterschätzt bzw. nicht ausführlich behandelt [14].

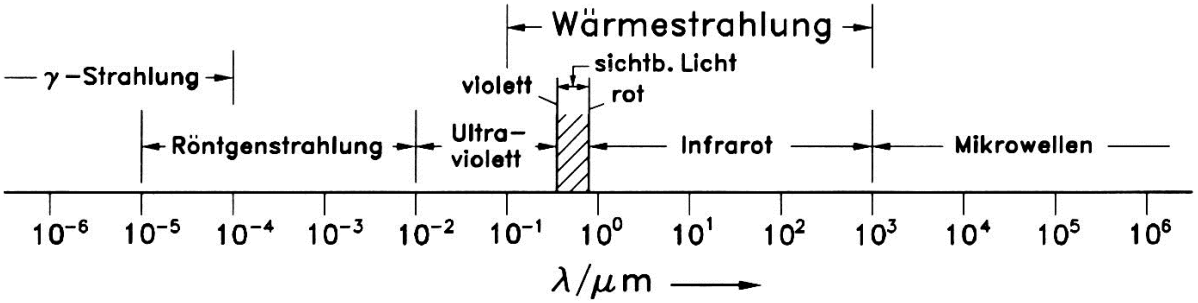


Abb. 3-1 Spektrum der elektromagnetischen Wellen [14]

Das Grundprinzip der Wärmestrahlung besteht darin, dass jeder Körper mit einer Temperatur oberhalb des absoluten Nullpunkts elektromagnetische Wellen in Form von Wärmestrahlung aussendet (Emission). Der Emissionsgrad jedes Körpers ist stark vom jeweiligen Grundmaterial sowie von der Oberflächenbeschaffenheit abhängig. Beim Auftreffen der elektromagnetischen Wellen auf andere Körper mit niedrigeren Temperaturen werden diese Wellen zum Teil reflektiert (*Reflexion r*), absorbiert (*Absorption a*) und bei transparenten Stoffen teilweise durchgelassen (*Transmission* τ). Die einzelnen Bestandteile aus *a*, *r* und τ sind abhängig vom Wellenlängen-Spektrum der auftreffenden Strahlung sowie der Raumrichtung [14].

Für die Untersuchungen im Rahmen dieses Forschungsvorhabens bedarf die Wärmeübertragung durch Wärmestrahlung einer besonderen Betrachtung. Die Abb. 3-2 zeigt die Verteilung von Reflexion, Transmission und Absorption von Floatglas in Abhängigkeit von der Wellenlänge der elektromagnetischen Strahlung. Die grau

hinterlegte Zone in Abb. 3-2 und Abb. 3-4 ist der Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichts. [15].

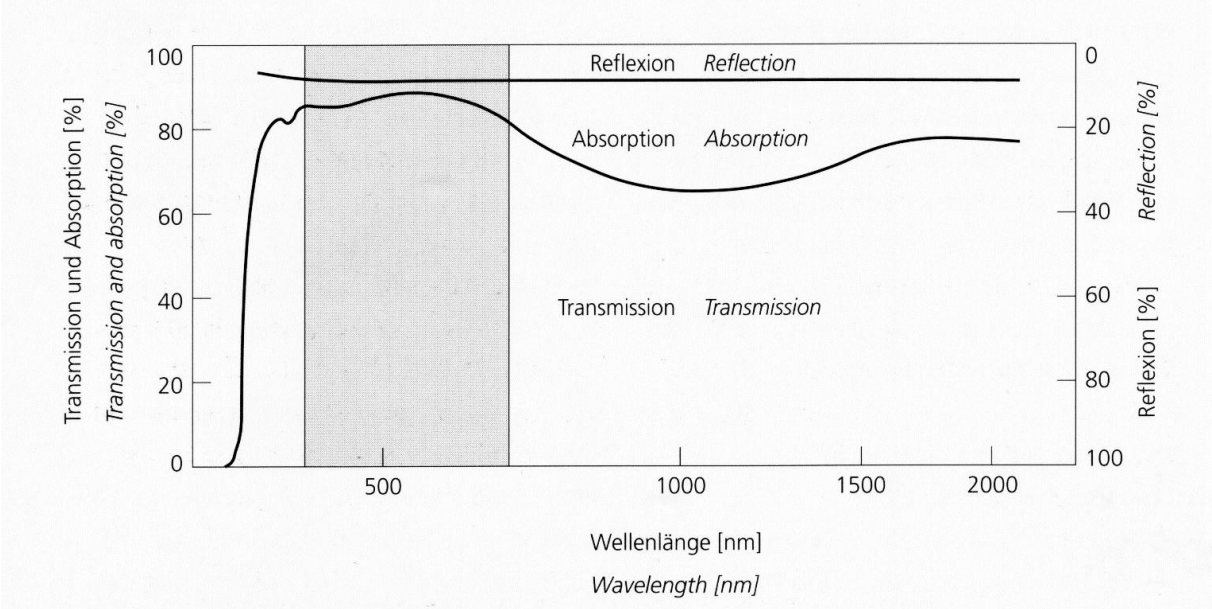


Abb. 3-2 Spektrale Transmission eines üblichen Floatglases [15]

Zur genaueren Betrachtung des Transmissionsvermögens von Glas ist in Abb. 3-3 der Transmissionsgrad der für die GKS-Elemente verwendeten Glasröhren auch für höhere Wellenlängen dargestellt [15]. Es ist deutlich erkennbar, dass der Anteil des sichtbaren Lichts beim Durchgang durch Glas kaum behindert wird. Auch ein großer Teil der Wärmestrahlung tritt nahezu ungehindert durch Glas hindurch, lediglich ab einer Wellenlänge von ca. 2500 nm wird die Transmission der Wärmestrahlung behindert [17].

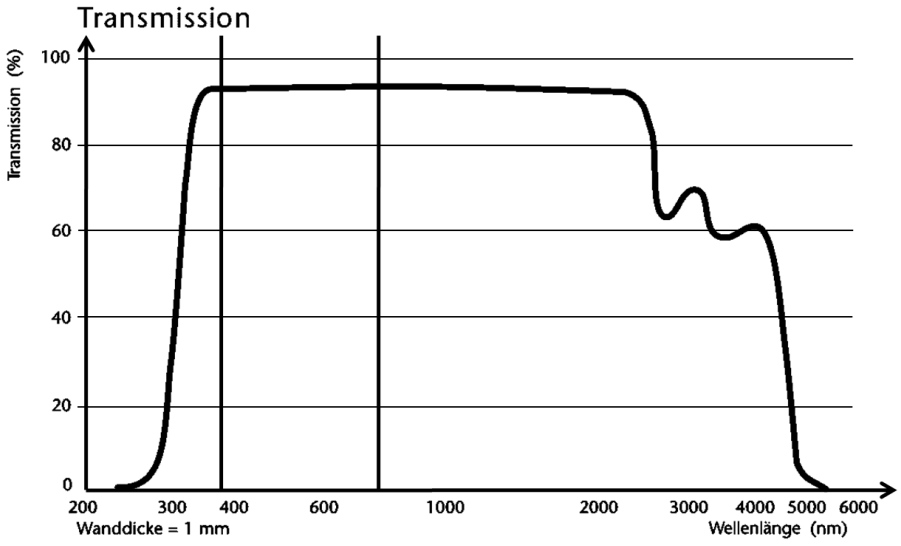


Abb. 3-3 Transmission elektromagnetischer Strahlung durch Floatglas [17]

Eine Reduzierung der Wärmetransmission kann mit dem Aufbringen von Low-e-Beschichtungen erreicht werden. Dabei handelt es sich um metalloxidische Beschichtungen mit niedriger Emissivität. Die Abb. 3-4 zeigt die spektrale Reflexion eines Low-e-beschichteten Glases im Vergleich mit einem unbehandelten Floatglas. Der Anstieg des reflektierten Strahlungsanteils oberhalb von λ = 700 nm ist deutlich zu erkennen.

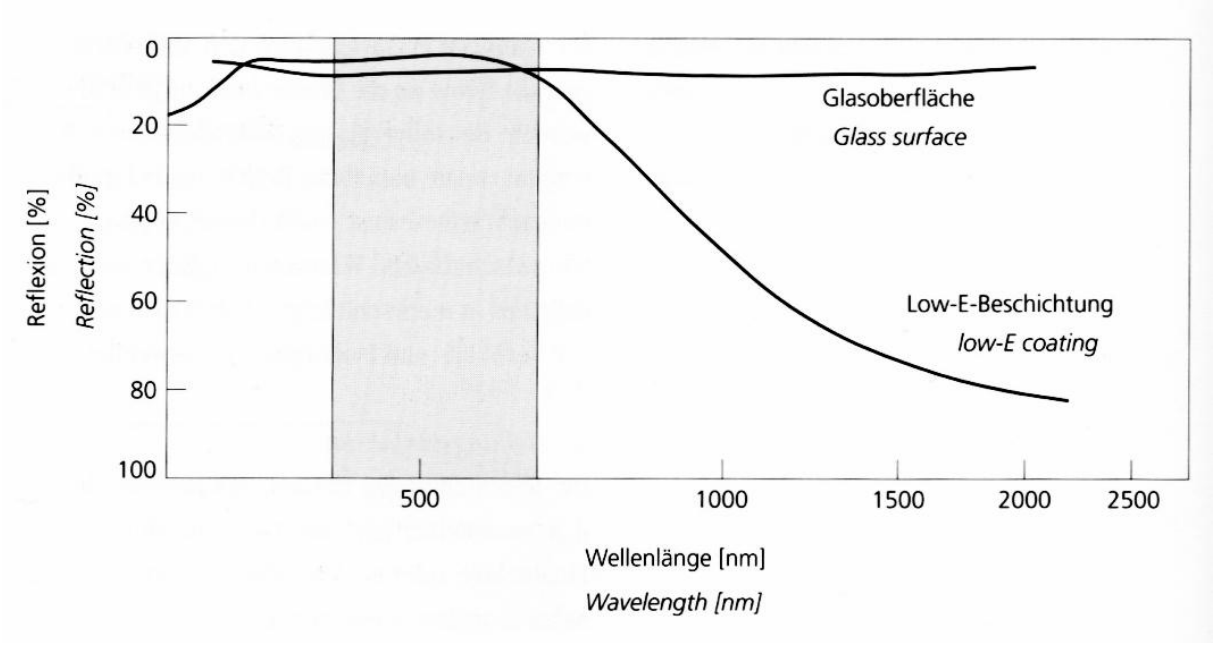


Abb. 3-4 Spektrale Reflexion unterschiedlich behandelter Gläser [15]

Die Funktionsweise der Low-e-Beschichtungen beruht auf einer mehrlagigen Anordnung von Edelmetall- und Metalloxidschichten. Glatte Metalloberflächen besitzen einen hohen Reflexionsgrad sowie einen geringen Transmissionsgrad. Dadurch wirken diese Schichten hinsichtlich des Spektrums der elektromagnetischen Wellen im sichtbaren Bereich transmittierend und im IR-Bereich stark reflektierend [15]. Zur Vermeidung von strahlungsbedingtem Wärmedurchgang sind in den endgültigen Ausführungen der GKS-Elemente Low-e-Beschichtungen für die Oberflächen vorgesehen.

4 Praktische Versuche

4.1 Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit

4.1.1 Entwicklung und Aufbau der Versuchseinrichtung

Der am F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde vorhandene Prüfstand zur Messung der Wärmeleitfähigkeit, mit dem auch die Voruntersuchungen für das Forschungsvorhaben durchgeführt wurden, erwies sich für die weiteren Versuche als ungeeignet, da vor allem eine einfache Anpassung an unterschiedliche Probendicken nicht möglich ist. Aus diesem Grund wurde die Konzeption und Anfertigung einer speziellen Apparatur notwendig, die für die Anforderungen des Vorhabens geeignet ist. Speziell die einfache Anpassung an unterschiedliche Probendicken und die Möglichkeit einer Modifizierung der Randdämmung, beispielsweise um Vakuumanschlüsse auszusparen, sollten dabei gewährleistet werden. Der Aufbau des Gerätes erfolgte in Anlehnung an das in DIN EN 12 667 [6] beschriebene Wärmestrommessplattengerät und ist schematisch in Abb. 4-1 dargestellt.

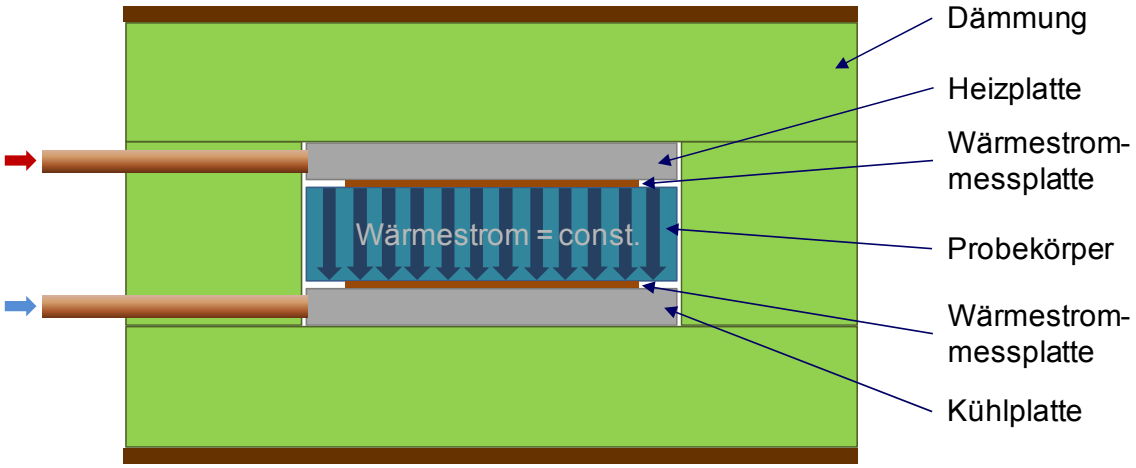


Abb. 4-1 Wärmestrommessplattengerät schematisch

Bei diesem Gerät wird über jeweils eine temperierbare Platte an der Ober- und Unterseite der Probe eine Temperaturdifferenz erzeugt, die zu einem konstanten Wärmestrom im Probekörper führt. Die Wärmestromdichte wird über Wärmestrommessplatten, die nach dem Prinzip des thermoelektrischen Effekts arbeiten, erfasst. An den Oberflächen der Probe wird zusätzlich die Temperatur mittels Folien-Thermoelementen gemessen. Diese Messgrößen werden über einen PC mit Datenlogger über die gesamte Versuchsdauer aufgezeichnet. Der vollständige Versuchsaufbau ist in den folgenden Abbildungen dargestellt (Abb. 4-2 bis Abb. 4-4).

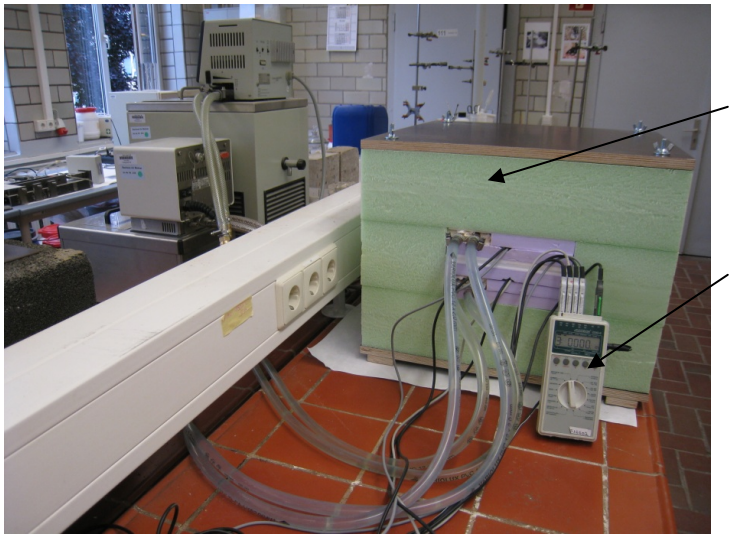


Abb. 4-2 Wärmestrommessplattengerät

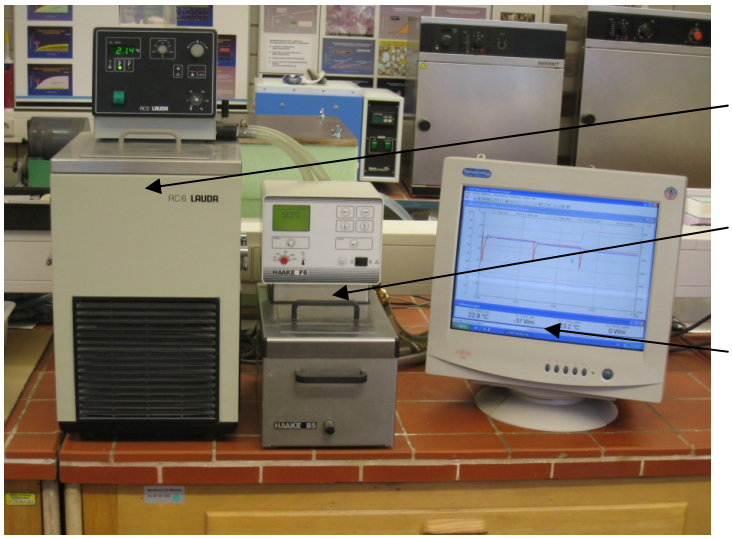


Abb. 4-3 Wärmestrommessplattengerät - Peripherie

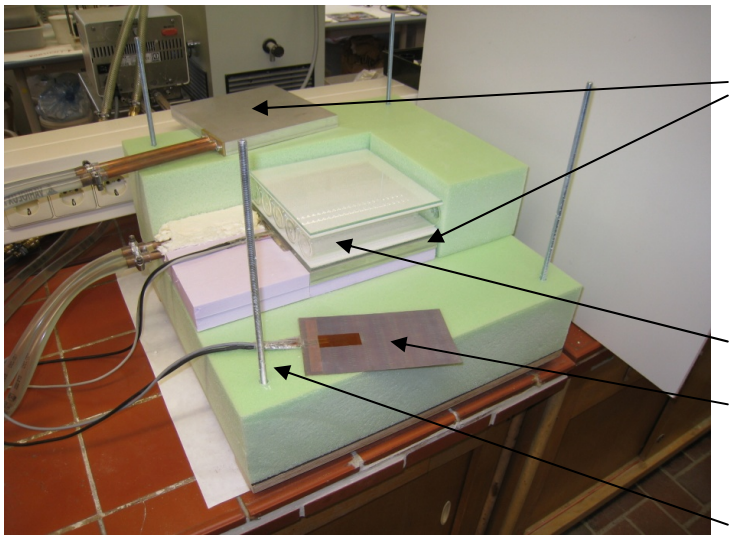


Abb. 4-4 Wärmestrommessplattengerät – Detail

Für einen Versuch wird die Probe drei unterschiedlichen Temperaturdifferenzen ausgesetzt. Dabei wird die Temperatur der „kalten“ Seite konstant gehalten und die Temperatur der „warmen“ Seite in zwei Stufen erhöht. Die Dauer einer Temperaturstufe wird dabei so gewählt, dass sich ein stationärer Zustand des Wärmestroms einstellt (Abb. 4-5).

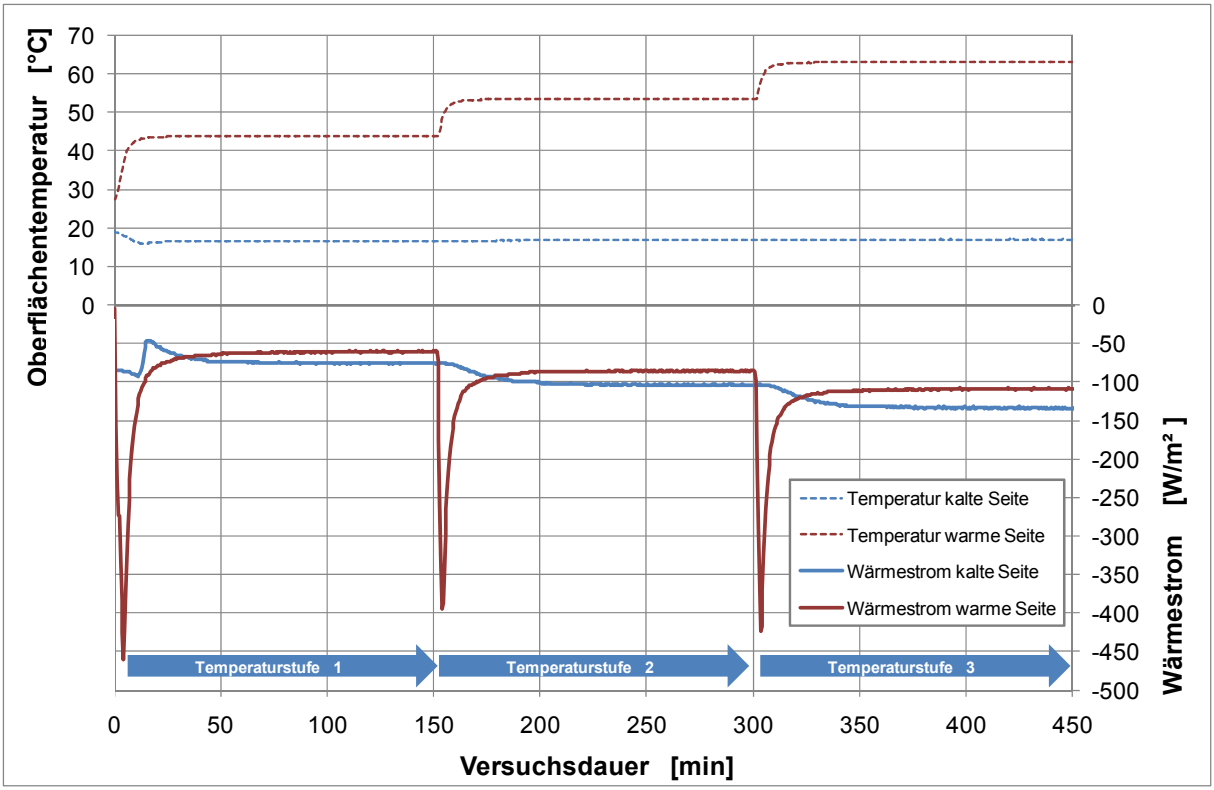


Abb. 4-5 Diagramm Wärmeleitfähigkeitsmessung (Beispiel)

Aus den gemessenen Wärmeströmen und den Oberflächentemperaturen der Probe lässt sich die Wärmeleitfähigkeit λ nach Gleichung 4.1 errechnen.

$$\lambda = \frac{\Phi \cdot d}{\Delta T}$$

λ	Wärmeleitfähigkeit	[W/(m•K]
Φ	mittlerer Wärmestrom	[W/m²]
d	Probendicke	[m]
ΔT	Temperaturdifferenz	[K]

Glg. 4.1

Die Berechnung der wärmetechnischen Kennwerte, einschließlich der U-Werte erfolgt entsprechend der Gleichungen 4.2 bis 4.4.

$R = \frac{d}{\lambda}$	R	Wärmedurchlasswiderstand	[m²•K/W]
	d	Dicke des Bauteils	[m]
	λ	Wärmeleitfähigkeit	[W/(m•K)]
$R_T = R_a + R + R_i$	R_T	Wärmedurchgangswiderstand	[m²•K/W]
	R_a	Wärmeübergangswiderstand außen	[m²•K/W]
	R_i	Wärmeübergangswiderstand innen	[m²•K/W]
$U = \frac{1}{R_T}$	U	Wärmedurchgangskoeffizient	[W/(m²•K)]

Glg. 4.2 – 4.4

Es ist zu beachten, dass der Aufbau dieses Gerätes nicht die tatsächliche Situation eines Fassadenelementes wiedergeben kann. Dies betrifft im Besonderen das Verhalten bei Beaufschlagung mit dem gesamten elektromagnetischen Wellenspektrum unter realen Bedingungen und den Einfallwinkel der Strahlung. Das Prüfgerät arbeitet lediglich mit nicht sichtbarer Strahlung im infraroten Bereich.

Der unbestrittene Vorteil dieses Versuchsstands liegt vor allem in der einfachen Handhabung für die vergleichenden Messungen unterschiedlich aufgebauter GKS.

4.1.2 Versuchselemente und Ergebnisse

Zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit wurden Versuchselemente hergestellt, deren Aufbau prinzipiell der Beschreibung in Kapitel 2 entspricht. Die beidseitigen Deckschichten bestehen aus Floatglasscheiben von 4 mm Dicke. Auf Grund der einfachen Verfügbarkeit und der günstigen Bearbeitungsmöglichkeiten wurden unterschiedliche Varianten mit röhrenförmigen Füllkörpern untersucht. Bei diesen Versuchselementen waren die Füllkörper sowohl auf der Innen- als auch auf der Außenseite durch eine 3 mm dicke Lage aus PMMI[1]-Schaum von den Deckschichten entkoppelt. Die einzelnen Bestandteile der Elemente wurden durch einen

[1] PMMI: Polymethacrylmethylimid

Zweikomponenten-Epoxidharz-Klebstoff miteinander verbunden. Der prinzipielle Aufbau ist in Abb. 4-6 dargestellt. Einige der untersuchten Versuchselemente zeigt Abb. 4-7.

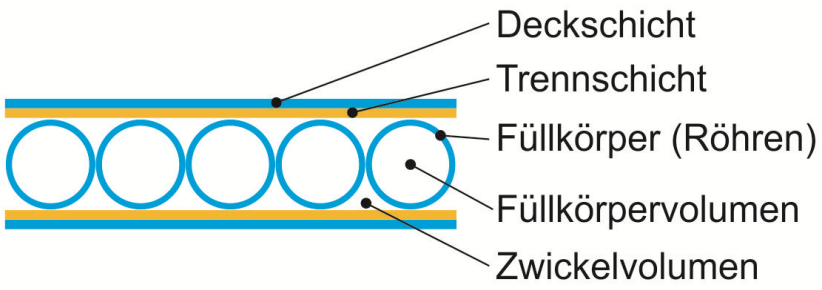


Abb. 4-6 Aufbau GKS mit Röhren als Füllkörper – schematisch

Abb. 4-7 Versuchselemente der Wärmeleitfähigkeitsuntersuchungen (Auswahl)

Variiert wurde bei den durchgeführten Untersuchungen:

- die Füllung des Zwickelvolumens (Luft oder Aerogel),
- die Füllung des Röhrenvolumens (Luft, Aerogel, Vakuum),
- das Material der Füllkörper (Glas, PMMA[2]).

Die unterschiedlichen Kombinationen der Füllung der Hohlräume der Elemente waren erforderlich, um mit Hilfe numerischer Simulationen über Differenzbetrachtungen die für den Wärmetransport relevanten Anteile Wärmeleitung, Konvektion und Wärmestrahlung zu ermitteln. Damit dienen die gewonnenen Messwerte als Validierung für die Berechnung des Wärmetransports mit Hilfe der numerischen Simulation.

[2] PMMA: Polymethylmethacrylat

Eine Übersicht über die untersuchten Kombinationen im Aufbau dieser Versuchselementkonfiguration mit den zugehörigen Messwerten zeigt Tab. 4-1.

Tab. 4-1 Übersicht der untersuchten Elemente mit röhrenförmigen Füllkörpern

Aufbau-Nummer	Röhren			Dicke Versuchs-element	Bemerkung	Zwickel-inhalt	Röhren-inhalt	Lambda	U-Wert
	Material	Durch-messer	Wand-stärke						
		[mm]	[mm]	[mm]				[W/(m•K)]	[W/(m²•K)]
1	Glas	40	1,5	54,5	Röhrenenden offen	Luft	Luft	0,143	1,82
						Aerogel	Luft	0,122	1,62
						Luft	Aerogel	0,102	1,42
						Aerogel	Aerogel	0,084	1,23
2	PMMA	40	3,0	54,5	Röhrenenden offen	Luft	Luft	0,126	1,66
						Aerogel	Luft	0,106	1,46
						Luft	Aerogel	0,071	1,07
						Aerogel	Aerogel	0,059	0,92
3	Glas	40	1,5	54,5	Röhrenenden geschlossen	Luft	Luft	0,141	1,80
						Aerogel	Luft	0,120	1,61
						Luft	Vakuum	0,144	1,82
						Aerogel	Vakuum	0,120	1,60
4	Glas	45	0,9	60,0	Röhrenenden geschlossen	Luft	Luft	0,170	1,91
						Aerogel	Luft	0,135	1,63
						Luft	Vakuum	0,167	1,89
						Aerogel	Vakuum	0,132	1,60

Aufbau Nr. 1:

- Die Röhren bestehen aus Kalk-Natron-Glas mit einer Wandstärke von d = 1,5 mm und einem Außendurchmesser von D = 40,0 mm.

Aufbau Nr. 2:

- Die Glasröhren wurden durch solche aus PMMA mit einer Wandstärke von d = 3,0 mm bei gleichem Außendurchmesser ersetzt.

Die Hohlräume der Aufbauvarianten 1 und 2 wurden mit Luft und/oder Aerogel in verschiedenen Kombinationen gefüllt.

Aufbau Nr. 3:

- Im Unterschied zu Aufbau Nr. 1 sind die Röhrenenden (Böden) hier geschlossen, wobei auf einer Seite am Boden ein Stutzen zur Evakuierung angebracht wurde. Bei diesem Aufbau wurden Kombinationen mit Luft bzw. Vakuum in den Röhren und Luft bzw. Aerogel in den Zwickeln untersucht.

Aufbau Nr. 4:

- Es wurden Glasröhren mit geschlossenen Enden verwendet, die einen Außendurchmesser von D = 45 mm bei einer Wandstärke von d = 0,9 mm besitzen. Auch diese Röhren besitzen einseitig einen Stutzen zur Evakuierung des Hohlraumes.

Als Grundfläche für diese Versuchselemente wurde eine Größe von 20 cm x 20 cm gewählt. Die Abmessungen sollten einen schnellen und einfachen Probenaufbau ermöglichen, um eine größere Anzahl verschiedener Varianten untersuchen und die Messwerte mit den Ergebnissen der numerischen Modellierung vergleichen zu können. Dabei stand nicht die spätere praxisrelevante Geometrie im Vordergrund, sondern die Herstellung von Versuchselementen, die eine sichere Erfassung der Messwerte für die Verifizierung der Simulation ermöglichen.

Den Ausgangspunkt für die Untersuchungen bildete Aufbau 1, ein Element mit offenen Röhrenenden. Hier wurde eine Wärmeleitfähigkeit von λ = 0,143 W/(m•K) gemessen. Durch komplettes Füllen der Hohlräume mit Aerogel ließ sich der Wert auf λ = 0,084 verbessern, was einer Verringerung um rund 40 Prozent entspricht.

Der zweite Elementaufbau enthält statt der Glasröhren Röhren aus PMMA. Durch die geringere Wärmeleitfähigkeit des Kunststoffes wird im Vergleich zum Ausgangselement eine Verbesserung um rund 10 Prozent erreicht. Auch bei diesem Element wurde eine Variante untersucht, bei der alle Hohlräume mit Aerogel gefüllt waren. Diese Maßnahme ergab ein deutliche Verbesserung um ca. 60 Prozent zum Ausgangspunkt (Aufbau 1, komplett luftgefüllt). Dieser Elementaufbau (Variante 2.4) ergab die geringste Wärmeleitfähigkeit der untersuchten Varianten. Bei Umrechnung auf eine Elementdicke von 100 mm bzw. 150 mm werden Wärmedurchgangskoeffizienten von U = 0,54 W/(m²•K) bzw. U = 0,36 W/(m²•K) erreicht. Diese Werte

lassen sich durch Aufbringen einer funktionierenden, die Wärmestrahlung vermindernde Beschichtung weiter verbessern.

Wie in Kapitel 2 beschrieben, sollten auch Elemente mit evakuierten Füllkörpern untersucht werden. Dazu war ein weiterer Versuchsaufbau (Aufbau 3) erforderlich, bei dem die Röhren an den Enden verschlossen wurden. Für die Ermittlung des Einflusses dieser veränderten Elementgeometrie wurden sowohl luftgefüllte als auch evakuierte Röhren für den Aufbau der Elemente hergestellt. Der Luftdruck in den evakuierten Röhren beträgt ca. $p = 10^{-3}$ bar. Unter Berücksichtigung der Geometrieveränderung durch die geschlossenen Röhren ergibt sich kein deutlicher Einfluss der Evakuierung. Dies zeigt, dass bei der Wärmeübertragung in den Elementen der Strahlungsanteil überwiegt. Die numerischen Simulationen und die in diesem Zusammenhang durchgeführte Literaturrecherche hatten diesen Effekt bereits aufgezeigt.

In Versuchsaufbau 4 wurde der Einfluss der Verringerung der Wandstärke betrachtet. Hier kamen Glasröhren von D = 45 mm Durchmesser und d = 0,9 mm Wandstärke zum Einsatz. Da solche Glasröhren nicht im Handel erhältlich sind, wurden sie von einem Glasbläser angefertigt, während die Röhren der Aufbauten Nr. 1 bis 3 handelsübliche Materialien sind. Vorversuche und Betrachtungen mit Hilfe numerischer Simulationen hatten ergeben, dass der Wärmedurchgang durch die Elemente in erheblichem Maß durch das Durchmesser-Wandstärke-Verhältnis D/d der Röhren beeinflusst wird. Für die Aufbauten Nr. 1 und 3 liegt dieser Wert bei 26. Bei Versuchsaufbau 4 ergibt sich für die Röhren der Wert D/d = 50.

Entgegen den Erwartungen trat bei diesem Versuchsaufbau keine signifikante Verbesserung der Wärmetransporteigenschaften ein. Diese Messungen wurden mehrfach wiederholt, um einen Fehler im Versuchsaufbau oder der Erfassung der Messwerte ausschließen zu können. Für diesen Effekt existiert derzeit keine plausible Erklärung. Das Ergebnis ist ein weiterer deutlicher Hinweis auf den großen Einfluss des Wärmetransportes durch Strahlung.

Für die Reduzierung dieses Anteils des Wärmetransports sind in erster Linie Röhren mit geeigneter Beschichtung niedriger Emissivität erforderlich. Diese Bauteile sind derzeit industriell nicht verfügbar. Durch Aufbringen einer Folie auf die Röhrenwandungen der PMMA-Röhren, die laut Herstellerangaben einen großen Teil der infraroten Strahlung reflektiert, wurde versucht, die Wärmeleitfähigkeit weiter zu

reduzieren. Diese Messwerte verdeutlichten allerdings keine signifikante Wirkung dieser Maßnahme. Die Ursache kann in einer möglicherweise verminderten Wirkung dieser Folie auf PMMA-Oberflächen liegen (siehe auch Kap. 5.3).

Beispielhaft wurde ebenfalls an Versuchsaufbau 2.1 untersucht, welchen Einfluss die Verklebung der Bauteile des Elementes auf die Wärmeleitfähigkeit hat. Hierbei konnte kein deutlicher Einfluss festgestellt werden, weshalb auf diese Untersuchungen bei den anderen Varianten verzichtet wurde.

Die Ergebnisse der numerischen Simulation (Kapitel 5) zeigen, inwieweit eine Veränderung verschiedener Parameter des Elementaufbaus über die durchgeführten Experimente hinaus einen Einfluss auf die Wärmetransporteigenschaften der Elemente ausübt. In Kapitel 5.3 wird außerdem detailliert darauf eingegangen, inwieweit das Ziel erreicht wurde, die im Versuch ermittelten Kennwerte zur Verifikation der Ergebnisse der numerischen Simulation heranzuziehen.

4.2 Bestimmung mechanischer Parameter

4.2.1 Prüfeinrichtung und Versuchsaufbau

Die mechanischen Kennwerte ausgewählter GKS-Elemente wurden mit der an der Professur Polymere Werkstoffe vorhandenen Universalprüfmaschine TIRAtest 28100 durchgeführt (Abb. 4-8). Mit dieser Prüfeinrichtung ist die Bestimmung mechanischer Kennwerte sowohl kraft- als auch weggesteuert bis zu einer Höchstkraft von 100 kN möglich. Zusätzlich ist eine Temperaturkammer vorhanden, die eine Kennwertermittlung bei Temperaturen im Bereich zwischen -40 °C und 250 °C erlaubt.

Für den geplanten Verwendungsbereich der GKS-Elemente ist speziell die Biegezugfestigkeit von Interesse. Geprüft wurde im 3-Punkt-Biegezugversuch mit 600 mm Auflagerabstand bei Raumtemperatur entsprechend dem Schema in Abb. 4-9. Die Lasteinleitung erfolgte kraftgesteuert. Über den Verfahrweg der Lasttraverse wurden die Verformungen aufgenommen. Die Bestimmung der Festigkeiten erfolgte beispielhaft an dem in Kapitel 2 beschriebenen Elementaufbau mit röhrenförmigen Füllkörpern. An dieser Elementkonfiguration erfolgte auch die Bestimmung der bauphysikalischen Kennwerte, die in diesem Projekt im Vordergrund stehen sollten.

Abb. 4-8 Universalprüfmaschine

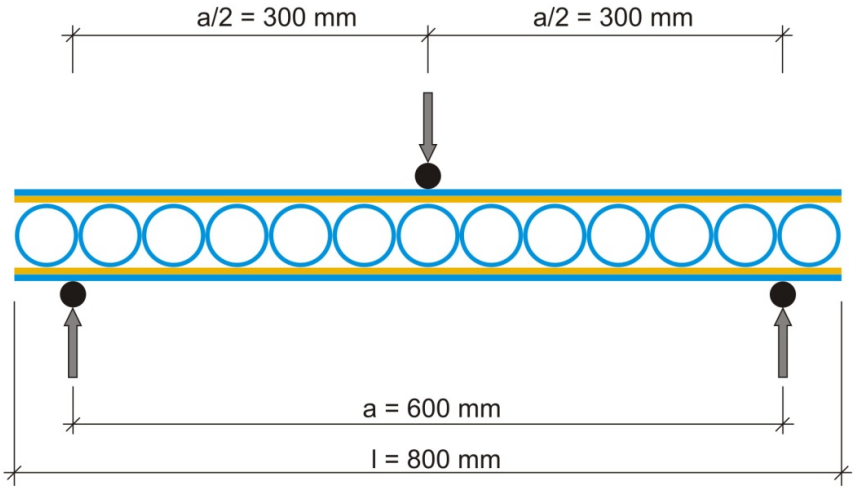


Abb. 4-9 Biegezugversuch schematisch

4.2.2 Versuchselemente und Ergebnisse

Es wurden Versuchselemente von 80 cm Länge und 20 cm Breite hergestellt. Die Gesamtdicke der Proben liegt, wie bei den Versuchselementen für die Wärmeleitfähigkeit beschrieben, bei 54 mm. Durch die einachsige Orientierung der Glasröhren ist ein deutlich anisotropes Materialverhalten zu erwarten. Aus diesem Grund wurden

zwei Typen der Versuchselemente hergestellt. Bei Variante 1 wurden die Glasröhren längs im Element angeordnet (Abb. 4-10) und bei Variante 2 quer (Abb. 4-11).

Versagenszustand

Abb. 4-10 Biegezugprüfung, GKS-Element Variante 1 - Röhren längs

Versagenszustand

Abb. 4-11 Biegezugprüfung, GKS-Element Variante 2 - Röhren quer

In Abb. 4-12 sind die Ergebnisse dieser Versuche dargestellt. Zum Vergleich wurde der Versuch auch an einfachem Floatglas von 4 mm Dicke, wie es für die Deckschichten der GKS-Elemente verwendet wurde, durchgeführt.

Die maximal aufnehmbare Kraft des Elementes mit den quer angeordneten Röhren wird mit dem Versagen der oberen Deckschicht von F = 1363 N erreicht. Bis zu diesem Punkt wirkt das Element als Gesamtstruktur. Die folgenden einzelnen Kraftpeaks in der blauen Kurve entstehen durch stufenweises Versagen der

Klebverbindungen der quer angeordneten Röhren untereinander und von den Deckschichten. Das Element versagte vollständig mit dem Bruch der unteren Deckschicht. Die Glasröhren blieben dabei intakt.

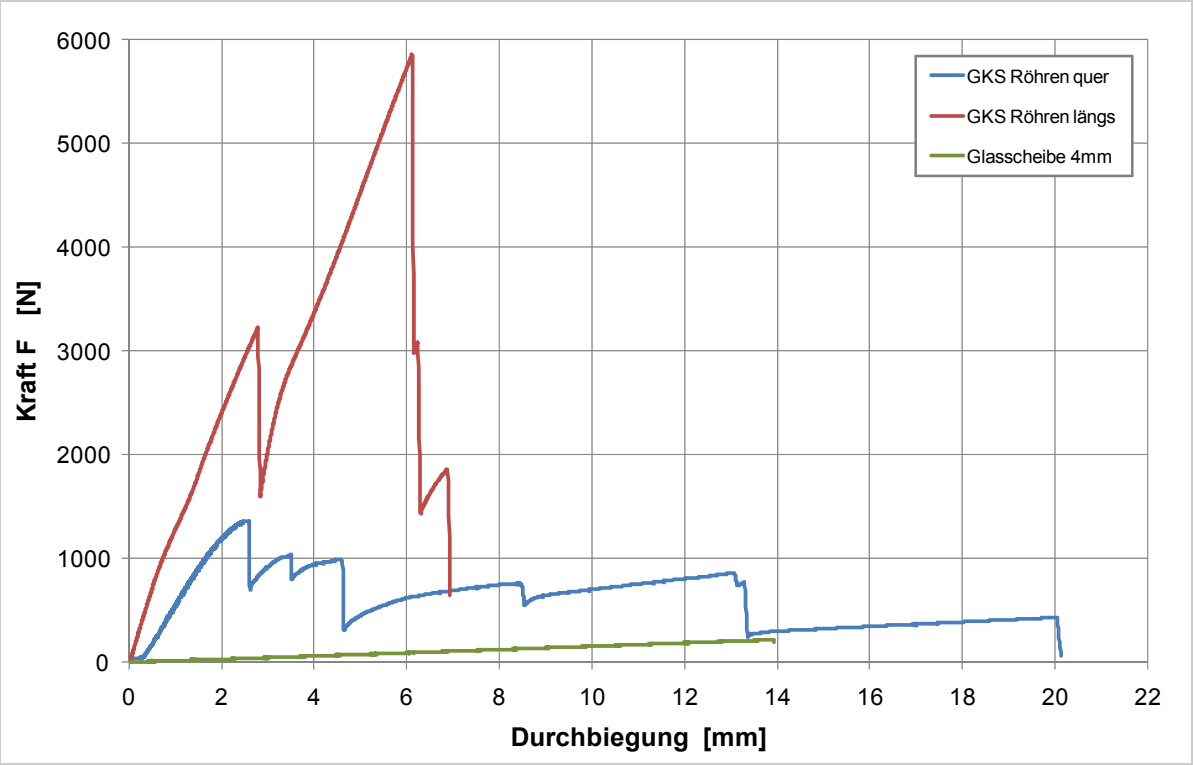


Abb. 4-12 Versuchsergebnisse Biegezugprüfung

Auch bei den Elementen mit den längs angeordneten Röhren kennzeichnet der erste Peak der roten Kurve das Versagen der oberen Deckschicht. Der folgende Kraftanstieg wird von den längs angeordneten Röhren aufgenommen. Bei dieser Versuchsanordnung versagen alle Röhren, die untere Deckschicht blieb intakt. Die maximal aufnehmbare Kraft betrug hier F = 5855 N.

Bei der einzelnen Floatglasscheibe wurde eine Höchstkraft von F = 213 N erreicht.

Auf Grund der inhomogenen Struktur der Elemente ist die Berechnung der Spannungen nicht sinnvoll, es werden deshalb nur die Kräfte angegeben. Wie erwartet, liegt die aufnehmbare Kraft bei der Variante mit längs angeordneten Röhren deutlich über der Kraft der Variante mit den quer angeordneten Röhren. Es ergibt sich ein Verhältnis von F_{quer} zu $F_{längs}$ von ca. 1 : 4.

Diese Ergebnisse zeigen, dass die GKS-Elemente geeignet sind, äußere Beanspruchungen, wie sie beispielsweise durch Winddruck oder Windsog entstehen, aufzunehmen. Die unterschiedlichen Festigkeiten in Längs- und Querrichtung der Elemente müssen für einen praktischen Einsatz durch Auswahl der geeigneten

Einbaulage berücksichtigt werden. Es konnte nachgewiesen werden, dass die GKS prinzipiell tragfähig sind und damit als Fassaden- und Dachelemente eingesetzt werden können.

5 NUMERISCHE SIMULATION

5.1 VORBETRACHTUNGEN

Die numerische Simulation ist heute eine sehr gute Möglichkeit, zeit- und kostenintensive Versuche zu optimieren und problemorientierte Forschung zu betreiben.

Im Rahmen des Projektes wurden verschiedene Materialien hinsichtlich ihrer Tansluzenz, Wärmeleitfähigkeit und Verarbeitbarkeit untersucht. Für diese Untersuchungen wurden verschiedene Modelle entworfen (siehe Kap. 2) und mit Hilfe numerischer Simulationen analysiert.

In Tab. 5-1 sind verschiedene Materialien mit ihren zugehörigen Wärmeleitfähigkeiten zusammengefasst. Aus diesen Werten lässt sich die Schichtdicke bestimmen, mit der beispielsweise ein Wert von U = 0,2 W/(m²•K) erreicht werden kann.

Tab. 5-1 Wärmeleitfähigkeiten verschiedener Baustoffe [8, 9]

Material	**Wärmeleitfähigkeit**	**Schichtdicke[3] für U = 0,2 W/(m²•K)**
	[W/(m•K)]	[m]
Stahl	≈ 42,0	≈ 210
Beton	2,00	10,0
Glas	0,76	3,8
PU-Schaum	0,024	0,12
Luft[1]	0,0261	0,13
Aerogel	0,020	0,10
Argon	0,01772	0,089
Krypton	0,00949	0,047
Xenon	0,00569	0,0285
Vakuum[2]	≈ 0,0	

[1] Konvektion und Strahlung wurden nicht berücksichtigt
[2] Einteilung des Vakuums siehe Tab. 5-2
[3] vereinfacht mit λ/d

Es ist festzustellen, dass im Vakuum nahezu keine Wärmeleitung stattfindet. Die Wärmeleitfähigkeit eines Raumes mit reduziertem Gasdruck ist wesentlich von der Anzahl der darin verbleibenden Teilchen und damit von der Qualität des Vakuums abhängig.

Technisch wird Vakuum entsprechend Tab. 5-2 eingeteilt.

Tab. 5-2 Technische Einteilung des Vakuums [13]

Druckbereich	**Druck**	**Anzahl der Moleküle pro cm^3**
	[mbar]	[-]
Umgebungsdruck	1013,25	$2{,}7 \cdot 10^{19}$
Grobvakuum	300 - 1	10^{19} - 10^{16}
Feinvakuum	1 - 10^{-3}	10^{16} - 10^{13}
Hochvakuum	10^{-3} - 10^{-7}	10^{13} - 10^{9}
Ultrahochvakuum	10^{-7} - 10^{-12}	10^{9} - 10^{4}
extremes Ultrahochvakuum	< 10^{-12}	< 10^{4}

Die Abb. 5-1 zeigt die Wärmeleitfähigkeit eines gasgefüllten Raumes in Abhängigkeit vom Gasdruck (logarithmisch aufgetragenen). Es ist deutlich erkennbar, dass eine Absenkung des Druckes unterhalb von p = 0,01 bar zu keiner nennenswerten Verringerung der Wärmeleitfähigkeit führt.

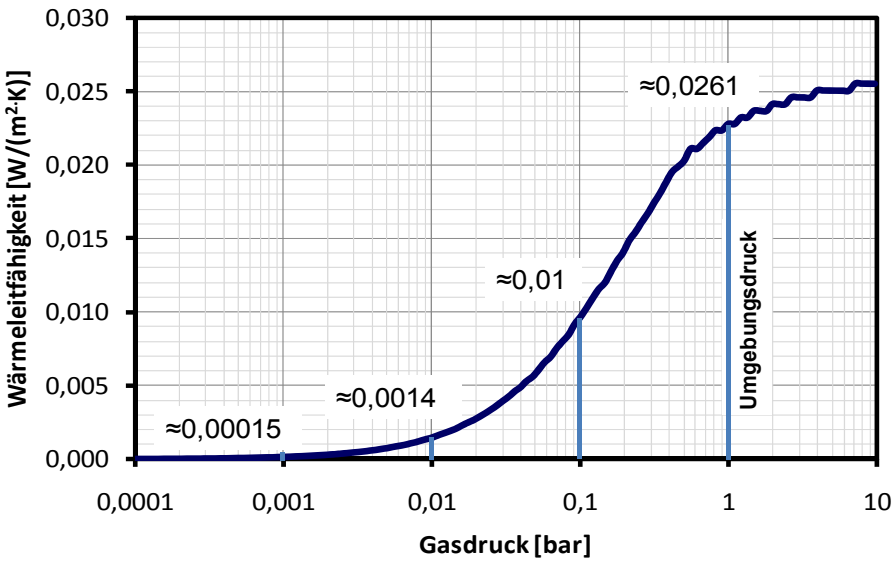


Abb. 5-1 Zusammenhang Wärmeleitfähigkeit - Gasdruck

5.2 MODELLBILDUNG

Entsprechend den Vorüberlegungen zur Versuchskonzeption (siehe Kap. 2) für die Konstruktion der Glas-Kunststoff-Sandwichelemente wurden verschiedene FE-Modelle erstellt, in denen die unterschiedlichen Füllkörpervarianten nachgebildet wurden. Diese Modelle wurden durch die Definition von Symmetriebedingungen soweit reduziert, dass der zeitliche Aufwand für die Berechnungen möglichst gering gehalten werden konnte. Die Abb. 5-2 zeigt beispielhaft einige dieser FE-Modelle.

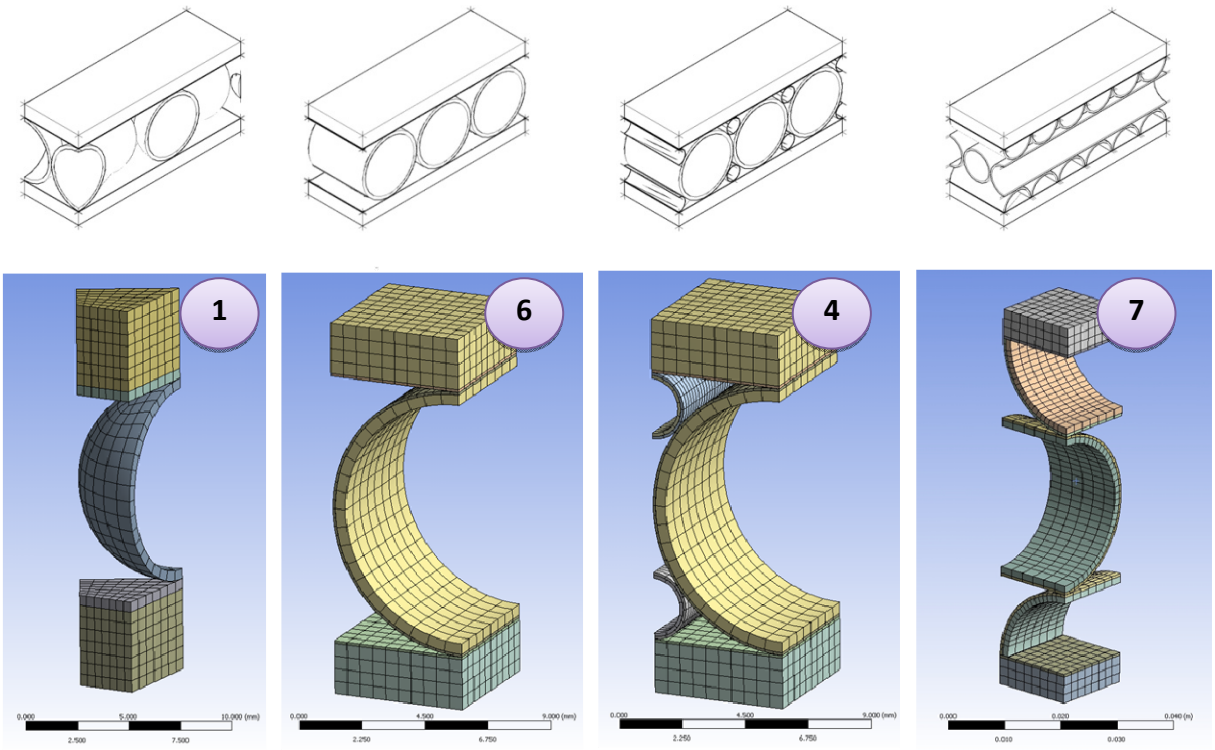


Abb. 5-2 FE-Modelle für die numerische Simulation

Wie bereits beschrieben, ergab die numerische Simulation bei Variante 6 ein besonders günstiges Verhalten hinsichtlich der Wärmeleitfähigkeit. An dieser Modellvariante wurden deshalb sowohl die praktischen Versuche als auch die numerischen Parameterstudien durchgeführt.

Zur Simulation und Analyse des Einflusses auf die Wärmeleitfähigkeit des gesamten Systems wurden folgende Parameter untersucht:

- Durchmesser und Wandstärke der Füllkörper-Röhren:
  - Rohrdurchmesser 40 mm, 80 mm, und 100 mm
  - Wandstärken von 0,5 bis 2,5 mm

- Wärmeleitfähigkeit der Hohlräume zwischen den Röhren (Zwickel)
  - 0,0002 bis 0,0261 W/(m•K)
- Gasdruck im Füllkörperhohlraum
  - entsprechend Abb. 5-1 von 0,002 bis 0,0261 W/(m•K)
- Emissionsbeiwerte für die freien Oberflächen
  - Schaumstoffschicht, Füllkörperaußen- und -innenseite
  - Emissionsbeiwerte von 0,05 bis 0,95

Die Dicke der Deckschichten blieb mit 4,0 mm konstant. Ebenso wurde für die Dicke der Schaumstoffschicht ein fester Wert von 3 mm gewählt, da in zahlreichen Voruntersuchungen nur ein marginaler Einfluss dieses Parameters ermittelt werden konnte. Für die Deckschichten und die Füllkörper kam herkömmliches Kalk-Natron-Glas mit einer Wärmeleitfähigkeit von λ = 1,0 W/(K•m²) zur Anwendung. Der Aufbau der Elemente entspricht dem in Kapitel 2 beschriebenen Prinzip.

Das auf diese Weise erstellte Modell wurde mit Hilfe der praktischen Versuche validiert und im Verlauf der weiteren Untersuchungen als Grundmodell für die numerischen Parameteruntersuchungen verwendet.

5.3 Verifizierung der numerischen Simulation durch praktische Versuche

Die Ergebnisse der praktischen Versuche aus Kapitel 4.1 wurden als Grundlage für die Validierung der numerischen Untersuchungen genutzt. Mit Hilfe von parametrischen Modellen konnten die durchgeführten Experimente nachgebildet werden. Die gezielte Modifikation der einzelnen Eingangsparameter erlaubte eine realitätsnahe Abbildung der Probekörper im FE-Modell.

Die relativ überschaubaren Prozesse der Wärmeübertragung in den vollständig mit Aerogel gefüllten Versuchskörpern waren der Ausgangspunkt für die folgenden Simulationen. Da in diesem Versuchsaufbau die freie Konvektion und Wärmestrahlung weitestgehend ausgeschlossen werden konnten, diente die Simulation der Überprüfung der einzelnen Wärmeleitfähigkeiten. Zwischen den errechneten Werten der numerischen Simulation und den Ergebnissen der Experimente wurde eine gute Übereinstimmung erreicht.

Mit diesen validierten Materialdaten wurden anschließend die teilweise mit Aerogel gefüllten Versuchskörper numerisch untersucht. Somit konnten die einzelnen Einflüsse aus Konvektion und Strahlung in den verschiedenen Hohlräumen des Versuchskörpers ermittelt werden. Hierfür war eine iterative Berechnung der einzelnen Temperaturgradienten innerhalb der luftgefüllten Hohlräume notwendig. Diese sind für die exakte Abbildung der Konvektions- und Strahlungsbeiwerte von großer Bedeutung. Auch hier waren die Abweichungen zu den Werten aus den Versuchen relativ gering.

Die auf diese Weise validierten Parameter konnten auch für die anderen Versuchsaufbauten gute Übereinstimmungen zwischen den Ergebnissen der numerischen Simulation und den Experimenten liefern.

Tab. 5-3 Übersicht der Ergebnisse aus der numerischen Simulation

Aufbau-Nummer	Röhren			Dicke Versuchs-element	Bemerkung	Zwickel-inhalt	Röhren-inhalt	Lambda	U-Wert	Abweichung zum Messergebnis
	Material	Durchmesser	Wandstärke							
		[mm]	[mm]	[mm]				[W/(m²•K)]	[W/(m²•K)]	%
1	Glas	40	1,5	54,5	Röhrenenden offen	Luft	Luft	0,138	1,76	3,2
						Aerogel	Luft	0,115	1,54	5,4
						Luft	Aerogel	0,117	1,56	-9,0
						Aerogel	Aerogel	0,081	1,18	3,3
2	PMMA	40	3,0	54,5	Röhrenenden offen	Luft	Luft	0,129	1,68	-0,9
						Aerogel	Luft	0,099	1,38	5,7
						Luft	Aerogel	0,109	1,48	-28,4
						Aerogel	Aerogel	0,060	0,90	1,3
3	Glas	40	1,5	54,5	Röhrenenden geschlossen	Luft	Luft	0,138	1,76	2,2
						Aerogel	Luft	0,115	1,54	4,3
						Luft	Vakuum	0,132	1,70	5,3
						Aerogel	Vakuum	0,105	1,44	10,8
4	Glas	45	0,9	60,0	Röhrenenden geschlossen	Luft	Luft	0,134	1,62	18,1
						Aerogel	Luft	0,118	1,47	10,6
						Luft	Vakuum	0,127	1,56	21,3
						Aerogel	Vakuum	0,107	1,37	17,1

In Tab. 5-3 sind die Ergebnisse der numerischen Simulationen zu den Kennwerten der Wärmeübertragung sowie die Abweichungen zu den Ergebnissen der Experimente wiedergegeben. Die ermittelten Unterschiede liegen bis auf wenige Ausnahmen im Bereich von maximal 10 Prozent, was die sehr gute Nachbildung des Verhaltens der Versuchselemente im Experiment mit Hilfe der numerischen Modellierung belegt.

Die große Abweichung des Versuches 2.3 zeigt offenbar einen besonderen Effekt der Wärmeübertragung durch Strahlung, der mit dem verwendeten numerischen Modell nicht abgebildet werden konnte.

Eine umfangreiche Recherche zeigte, dass sich in diesem Fall Interferenzerscheinungen zwischen den Strahlungsspektren von Aerogel und PMMA ergeben. Aerogel besitzt die Eigenschaft, langwellige Infrarotstrahlung teilweise zu absorbieren (Abb. 5-3) [20].

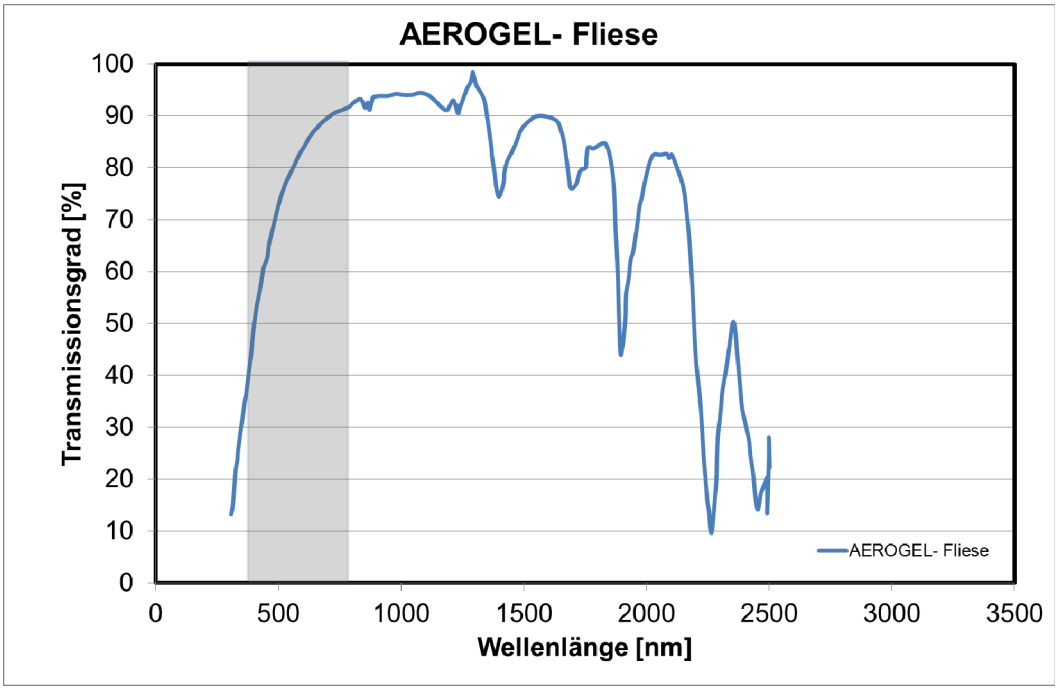


Abb. 5-3 Transmissionsspektrum Aerogel [20]

Dadurch entsteht eine Filterwirkung und eine Verschiebung der abgestrahlten Wellenlänge in einen Bereich längerwelliger Infrarotstrahlen [20]. Da PMMA im Gegensatz zu Glas einen geringeren Transmissionsgrad für Wellenlängen im Bereich $\lambda > 1700$ nm (Abb. 5-3) aufweist, absorbiert die PMMA-Röhre einen großen Teil der emittierten Strahlung [21]. Dies bewirkt eine Art Treibhauseffekt im inneren der PMMA-Röhre. Dieser Effekt bedarf weiterer Untersuchungen, die im Rahmen

dieses Projektes nicht vorgesehen waren und im vorgegebenen Zeitrahmen nicht mehr realisiert werden konnten. Der grau hinterlegte Wellenlängenabschnitt kennzeichnet den Bereich des sichtbaren Lichts.

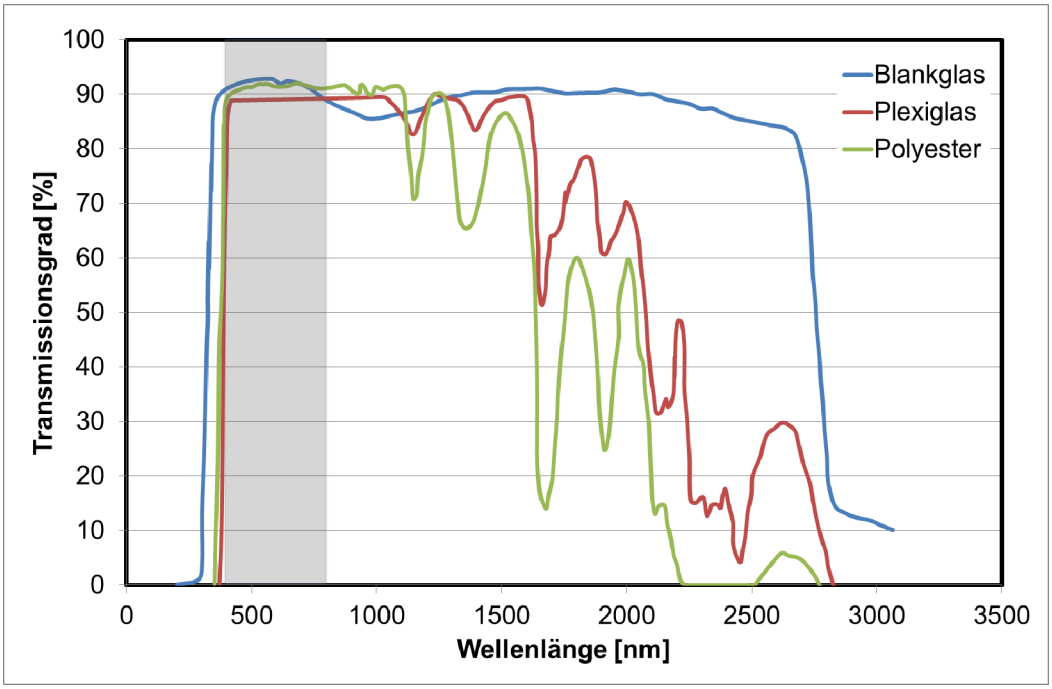


Abb. 5-4 Transmissionsspektrum transparenter Materialien [21]

Die größeren Abweichungen der Simulationsergebnisse zu den Messwerten bei Versuchsaufbau 4 resultieren aus den bisher nicht geklärten Effekten bei der experimentellen Kennwertbestimmung. Die Simulation lieferte hier die entsprechend des Elementaufbaus plausiblen Ergebnisse.

Bei numerischen Simulationen zu Wärmeübertragungsvorgängen lässt sich die Wärmeleitung sehr gut beschreiben. Hingegen können Konvektion und Wärmestrahlung beispielsweise durch den oben beschriebenen Interferenzeffekt, der sich schwierig im numerischen Modell abbilden lässt, zu Abweichungen führen.

Durch Messwerttoleranzen der praktischen Versuche und die erforderliche Idealisierung des numerischen Modells sind geringe Abweichungen zwischen den berechneten und den real gemessenen Lambda-Werten prinzipiell unvermeidbar.

5.4 ERGEBNISSE DER PARAMETERSTUDIEN

Die Abb. 5-5 zeigt die Wärmestromdichte und die Abb. 5-6 den Temperaturverlauf der GKS-Variante mit den röhrenförmigen Füllkörpern im stationären Zustand. Wie in Kapitel 3 bereits beschrieben, erfolgt die Wärmeübertragung zu einem großen Teil durch Wärmestrahlung sowie durch Wärmeleitung über die Wandung der Füllkörper. Der konvektive Anteil der Wärmeübertragung hatte bei den untersuchten Proben nur einen geringen Anteil, da die Hohlräume verhältnismäßig klein sind. Als kritischer Bereich aus Sicht der Wärmeübertragung ist auch die Kontaktzone von Deckschicht und Füllkörper zu erkennen.

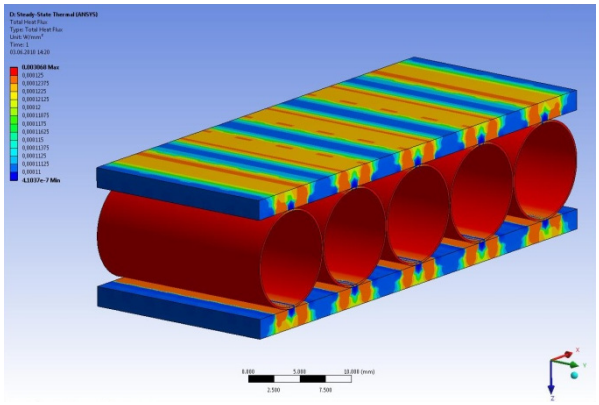


Abb. 5-5 Wärmestromdichte GKS

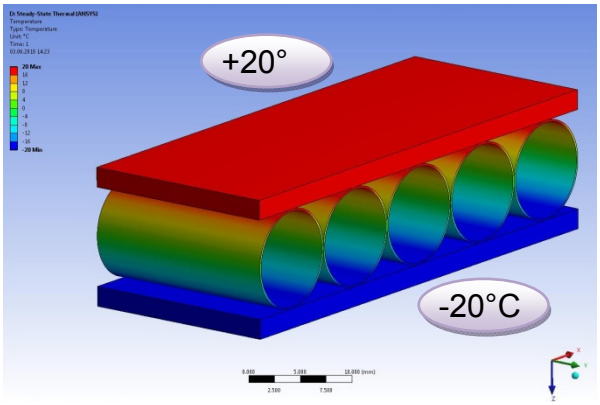


Abb. 5-6 Temperaturverlauf GKS

Die folgenden Diagramme Abb. 5-7 bis Abb. 5-10 zeigen die Ergebnisse der oben beschriebenen Parameterstudien. Es wurde ausgehend vom Grundelement, welches in Abschnitt 2 beschrieben ist, eine Variation einzelner Parameter durchgeführt. Um einen anschaulichen Vergleich über den wärmetechnischen Einfluss der Wärmestrahlung und der Konvektion aufzuzeigen, wurden jeweils Berechnungen ohne Berücksichtigung dieser Einflüsse realisiert. Diese Ergebnisse sind in den Abb. 5-7 bis Abb. 5-10 als gestrichelte Kurven dargestellt.

In Abb. 5-5 ist deutlich zu sehen, dass in den Wandungen der Füllkörper eine hohe Wärmestromdichte vorhanden ist. Dass heißt, in diesen Bereichen wird ein großer Teil der Wärme durch Wärmeleitung transportiert. Auf Grund der guten Wärmeleitfähigkeit von Glas hat die Wandstärke der Füllkörper daher einen entscheidenden Einfluss auf die Wärmeleitung innerhalb der GKS.

Das Diagramm in Abb. 5-7 zeigt die Ergebnisse der Simulation für die Variation der Wandstärken bei drei unterschiedlichen Röhren-Durchmessern. Durch den großen

Einfluss der Wärmestrahlung ist der Einfluss der Dicke der Rohrwandung relativ gering. Dies ändert sich aber, sobald geeignete Vorkehrungen zur Vermeidung von Wärmeübergängen durch Strahlung und Konvektion, beispielsweise durch Aufbringen einer Low-e-Beschichtung, vorgesehen werden. Dem Füllkörperinnenraum wurde bei diesen Betrachtungen der atmosphärische Luftdruck zugewiesen. Es ist deutlich erkennbar, dass sich mit steigendem Durchmesser und sinkender Wandstärke der Füllkörper der Wärmedurchgangskoeffizient der GKS erheblich reduziert. Dabei ist zu beachten, dass trotzdem eine ausreichende Steifigkeit der Elemente vorhanden ist, um die notwendige Tragfähigkeit zu gewährleisten.

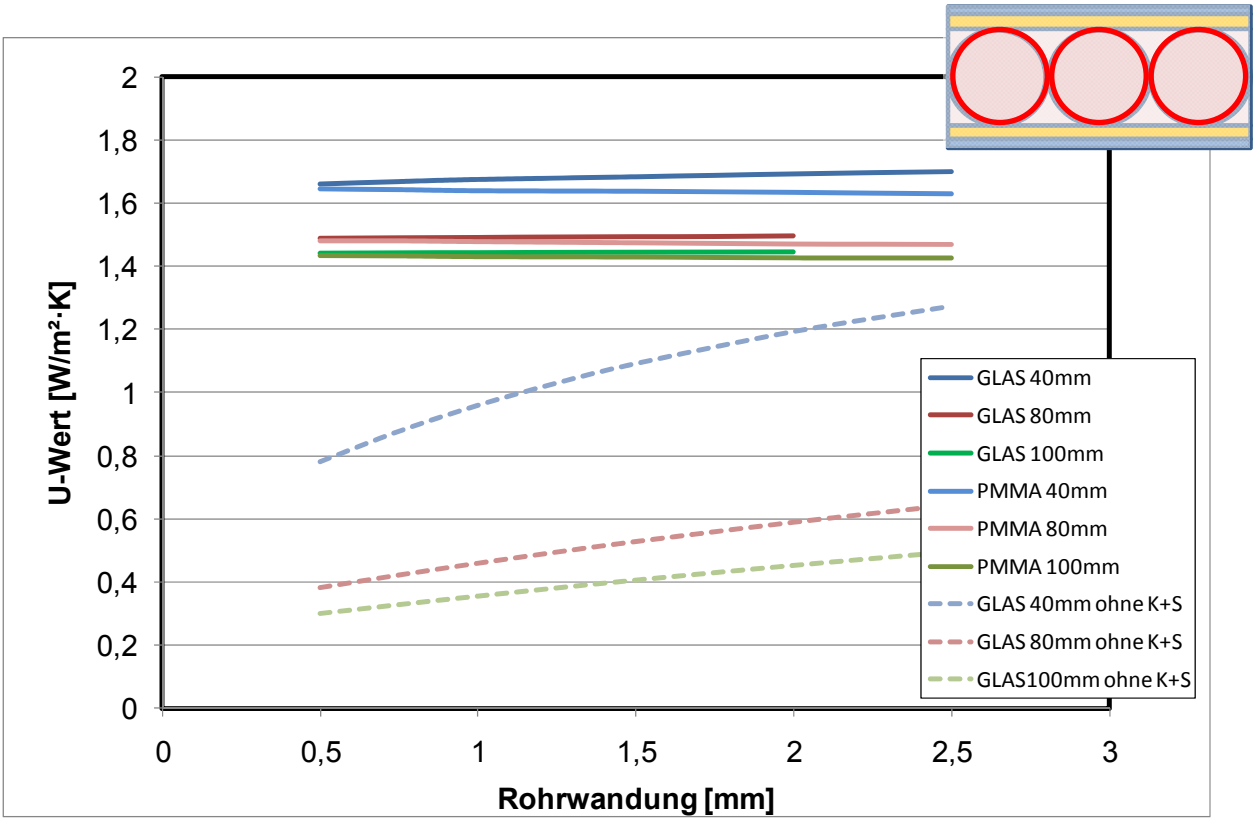


Abb. 5-7 Zusammenhang U-Wert – Wandstärke der Füllkörper

Die Wärmeleitfähigkeit der Zwickelbereiche hat ebenfalls einen großen Einfluss auf den U-Wert des gesamten Elementes. Dieser Zusammenhang ist in Abb. 5-8 dargestellt. Eine deutliche Reduzierung der U-Werte ergibt sich für Wärmeleitfähigkeiten unterhalb von λ = 0,01 W/(m•K). Diese Werte sind allerdings technisch nur schwer realisierbar. Die Möglichkeit einer Evakuierung dieser Bereiche ist mit dem Problem der Herstellung eines dichten Randverbundes behaftet. Der Nutzen einer Füllung mit Edelgas ist zu prüfen.

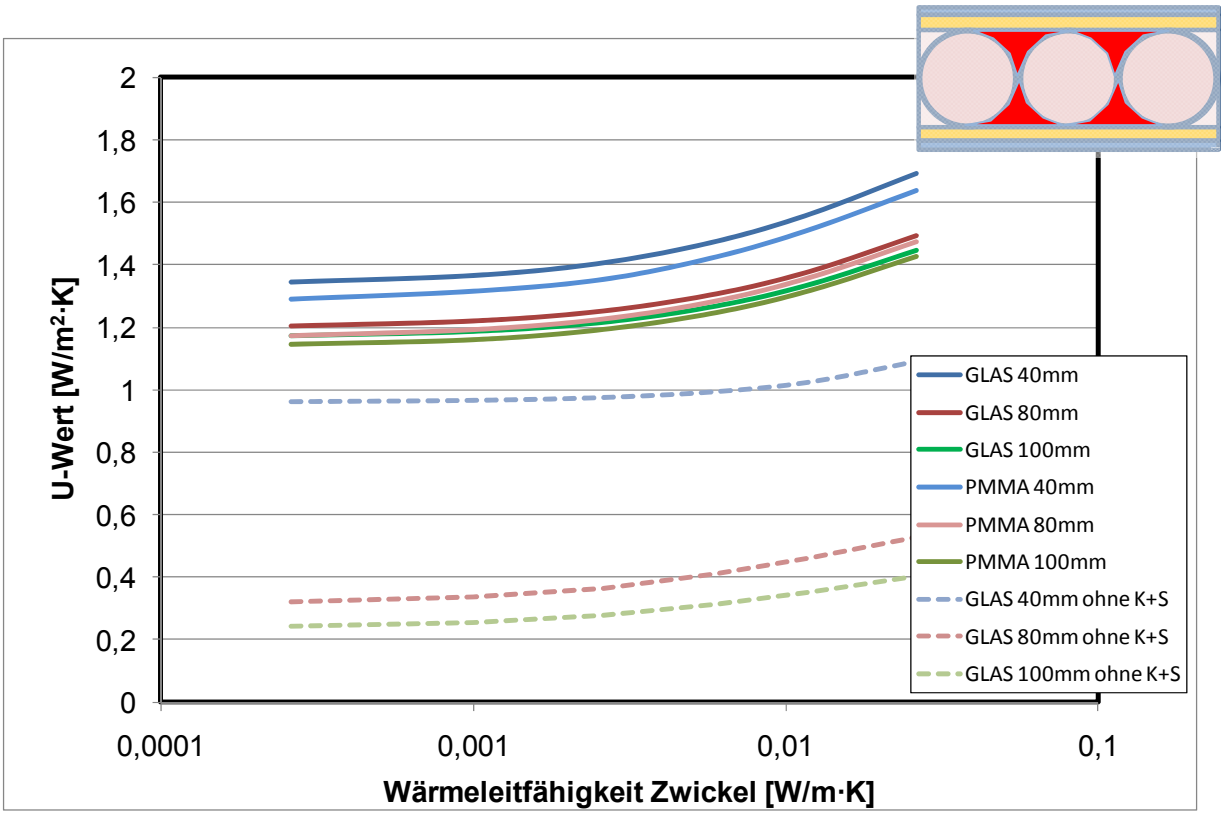


Abb. 5-8 Zusammenhang U-Wert – Wärmeleitfähigkeit der Zwickelfüllung

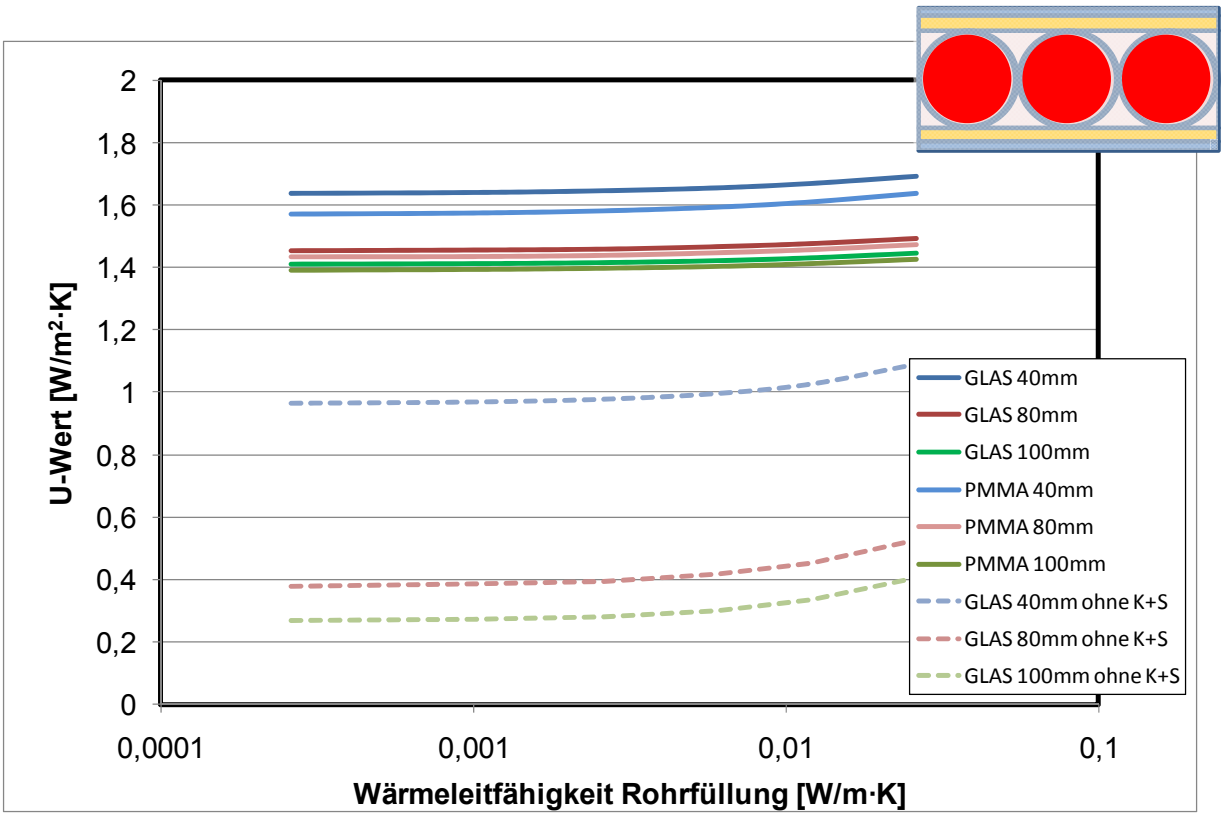


Abb. 5-9 Zusammenhang U-Wert – Gasdruck im Füllkörper

Der Einfluss des Gasdrucks in den Hohlräumen der Füllkörper auf den U-Wert des gesamten Elementes ist in Abb. 5-9 dargestellt. Es wird deutlich, dass eine Verringerung des Füllkörperinnendruckes (siehe Abb. 5-1) eine Absenkung des U-Wertes des gesamten Elementes bewirkt. Dieser Effekt wird ebenfalls durch den Einfluss aus Konvektion und Strahlung überlagert. Eine Verringerung des Innendruckes auf weniger als ein Hundertstel des Normaldruckes ist nicht sinnvoll, da unterhalb von 0,01 bar nur marginale Änderungen des U-Wertes zu erzielen sind (Abb. 5-1).

Das folgende Diagramm in Abb. 5-10 zeigt den Einfluss der Variation des Emissionskoeffizienten aller Oberflächen der Komponenten des GKS-Aufbaus auf den U-Wert des gesamten Elementes. Durch die Verwendung spezieller Oberflächenbeschichtungen (sogenannte Low-e–Beschichtungen) gelingt es, Werte von weniger als U = 0,8 W/(m²•K) zu erreichen.

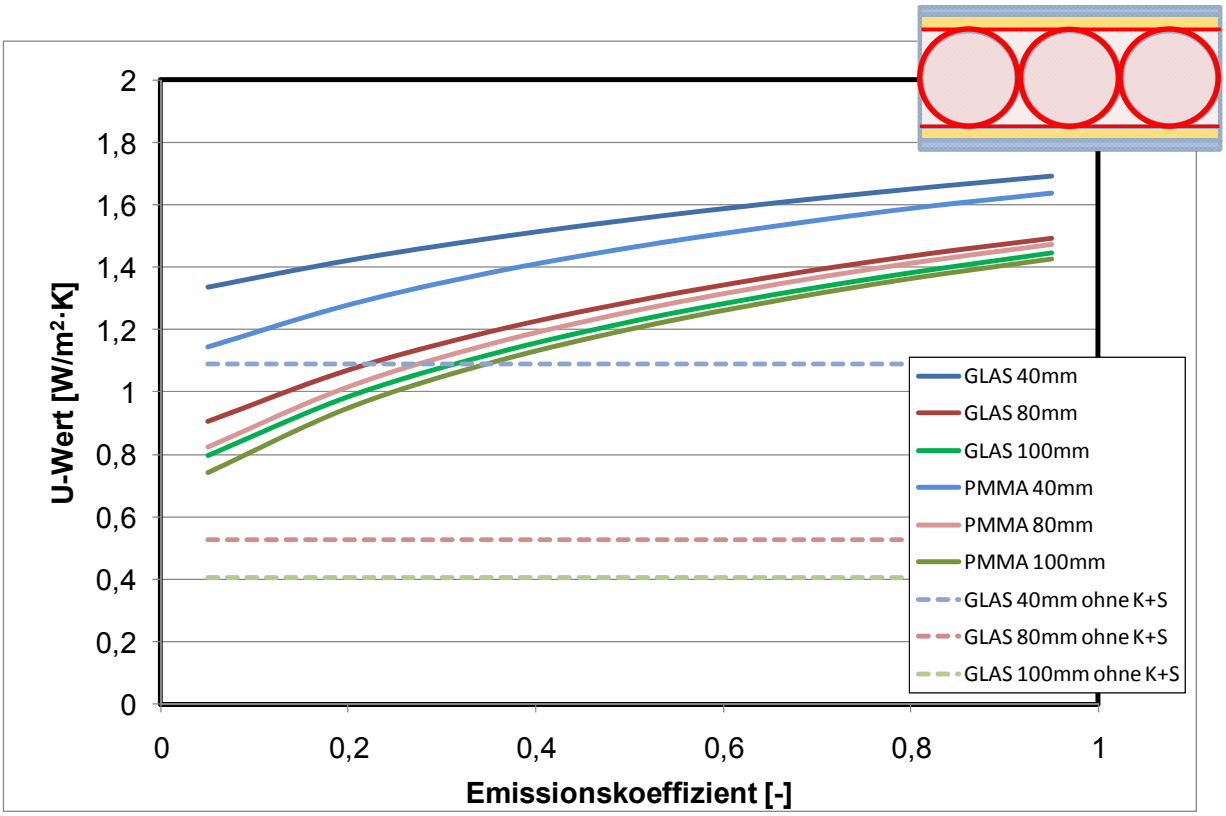


Abb. 5-10 Zusammenhang U-Wert – Emissionskoeffizient der Oberflächen

Durch eine geeignete Kombination der Aufbauvarianten lassen sich durch numerische Simulationen für die Elemente U-Werte unter U = 0,5 W/(m²•K) berechnen. **Beim energetisch effektivsten Aufbau besitzen die Röhren einen Durchmesser von 100 mm und sind evakuiert, die Zwickel sind mit Aerogel gefüllt und die Oberflächen sind mit einer Low-e-Beschichtung versehen.**

6 NEUARTIGE VARIANTE EINES RANDVERBUNDES

6.1 FÜGETECHNOLOGIE

Wie im Kapitel 2 bereits beschrieben, richtete sich ein Schwerpunkt der weiteren Bearbeitung des Forschungsthemas darauf, einen Ansatz für die technische Lösung des Problems des Randverbunds evakuierter Elemente zu erarbeiten.

Das Grundproblem besteht darin, die Deckschichten gasdicht mit einem geeigneten anorganischen Randmaterial zu verbinden. Dieses Randmaterial muss ebenfalls eine hohe Gasdichtheit aufweisen und in seinen thermischen Längenänderungseigenschaften an das Glas der Deckschichten angepasst sein. Zusätzlich muss es sehr gute Wärmedämmeigenschaften besitzen, damit der Randverbund sich nicht negativ auf den Wärmedurchgang des gesamten Elementes auswirkt.

Schaumglas besitzt für die vorgesehene Verwendung sehr günstige Eigenschaften hinsichtlich der Wärmeleitfähigkeit und des thermischen Verhaltens. Die üblichen technischen Anwendungen beschränken sich bisher hauptsächlich auf die Wärmedämmung an Gebäuden und Industrieanlagen. Erfahrungen auf dem Gebiet des Fügens mit anderen Glaswerkstoffen sind in der Literatur nicht nachweisbar.

In Zusammenarbeit mit dem Günter-Köhler-Institut für Fügetechnik und Werkstoffprüfung GmbH in Jena, einem kompetenten Partner mit umfangreicher Erfahrung auf dem Gebiet des Lötens und Schweißens von Glaswerkstoffen, entstanden mehrere Werkstoffproben. Die Zielstellung bestand in der Herstellung einer gasdichten Verbindung von herkömmlichem Fensterglas mit Schaumglas [19].

Zum Einsatz kamen das Ofenlöten und versuchsweise das Löten mittels Laserstrahlung. Für gefügte Bauteile an Gebäudefassaden, die durch Witterungseinflüsse großen Temperaturunterschieden ausgesetzt sind, ist es für eine dauerhafte Verbindung unbedingt erforderlich, die verwendeten Komponenten hinsichtlich ihrer thermischen Längenänderungskoeffizienten aufeinander abzustimmen. In Tab. 6-1 sind die relevanten Kenndaten der verwendeten Materialien zusammengefasst. Die Werte zeigen, dass eine gute Anpassung des Glaslotes an die zu verbindenden Materialien gegeben ist.

Tab. 6-1 Materialdaten der verwendeten Werkstoffe [19]

Eigenschaft		Kalk-Natron-Glas	Schaumglas	Glaslot
linearer thermischer Ausdehnungskoeffizient	[K^{-1}]	$9{,}0 \cdot 10^{-6}$	$9{,}0 \cdot 10^{-6}$	$8{,}2 \cdot 10^{-6}$
Transformationstemperatur	[°C]	520 - 550	554	385
Erweichungstemperatur	[°C]	500 - 800	778	-
Gebrauchstempratur bei thermischer Vorspannung	[°C]	200 (dauernd) 300 (kurzzeitig)	-	-
maximale Löttemperatur	[°C]	-	-	520

Ein sehr weit verbreitetes Verfahren zur Herstellung einer dauerhaften Verbindung ist das Ofenlöten. Um eine gute Haftung des Glaslotes zu erzielen, wurden die zu verbindenden Teile vor dem eigentlichen Fügen einzeln in einem separaten Ofendurchgang mit Glaslot verglast (Abb. 6-1).

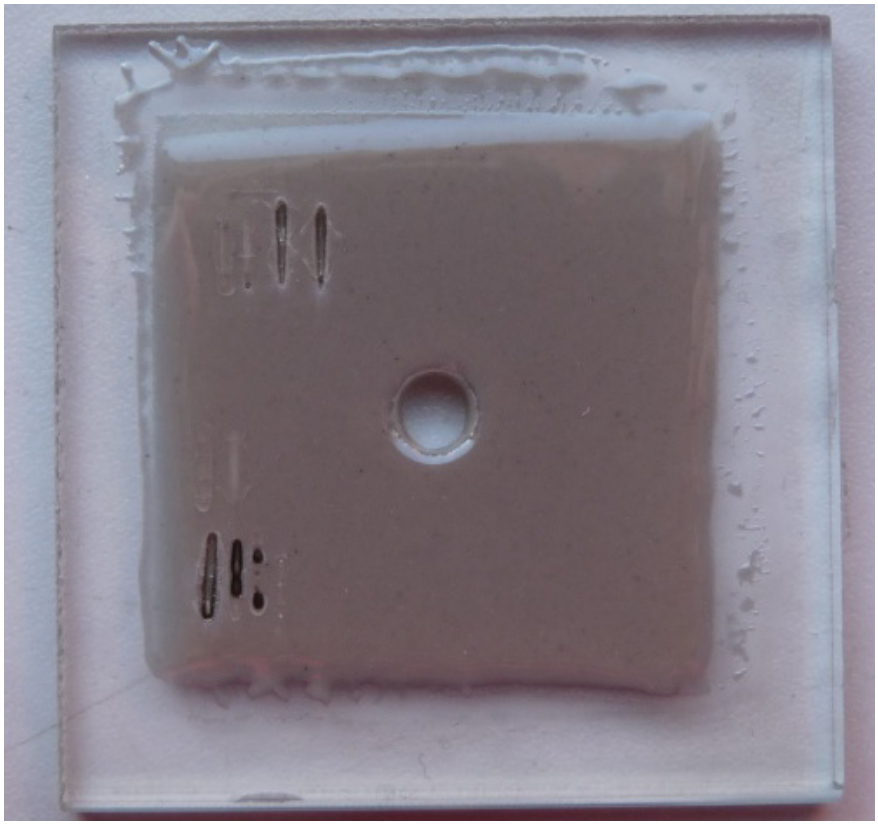


Abb. 6-1 Vorverglaste Probe nach dem separaten Ofendurchgang [19]

Die komplette Baugruppe wurde anschließend in einem Ofen auf die Verschlusstemperatur des Glaslotes aufgeheizt und so die Verbindung zwischen Glas und Schaumglas realisiert.

Mit der Herstellung eines kleinformatigen Musters mit einer Glasplatte von 5 x 5 cm² (Abb. 6-3 und Abb. 6-2) konnte die prinzipielle Möglichkeit des Verbindens der beiden Materialien nachgewiesen werden.

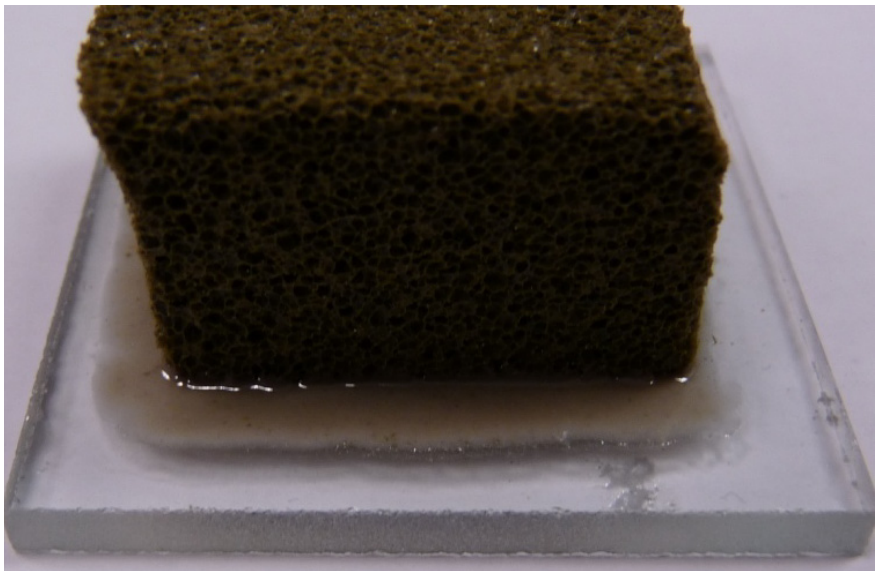


Abb. 6-2 Kleinformatige Probe - Seitenansicht [19]

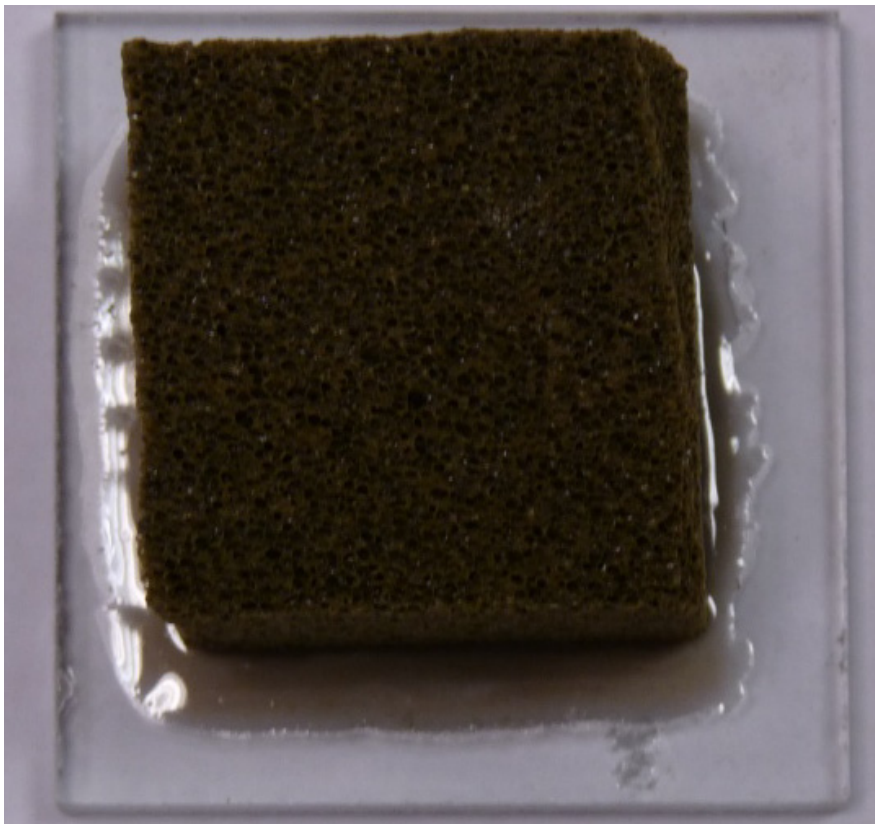


Abb. 6-3 Kleinformatige Probe - Draufsicht [19]

In die Flachglasprobe wurde vor dem Fügeprozess ein Loch von 5 mm Durchmesser eingebracht (Abb. 6-4), so dass am verlöteten Element durch Anlegen eines Unterdruckes und anschließende Leckratenprüfung die Gasdichtheit der Verbindung untersucht werden konnte.

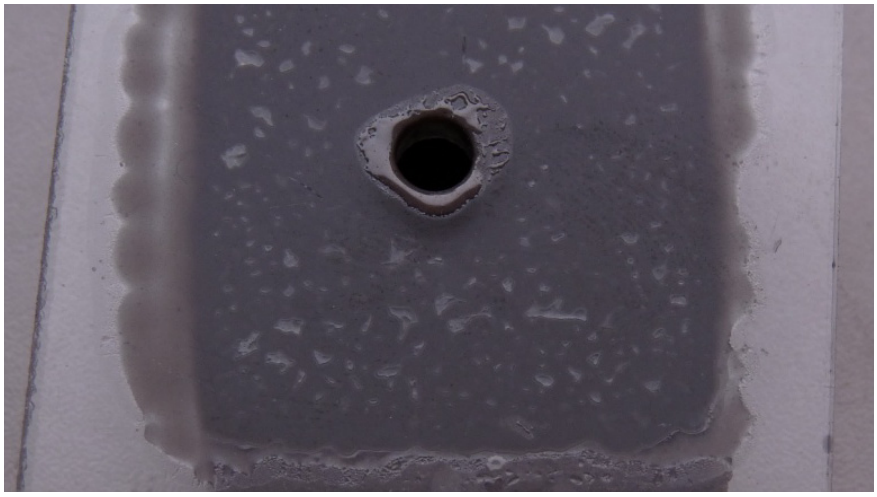
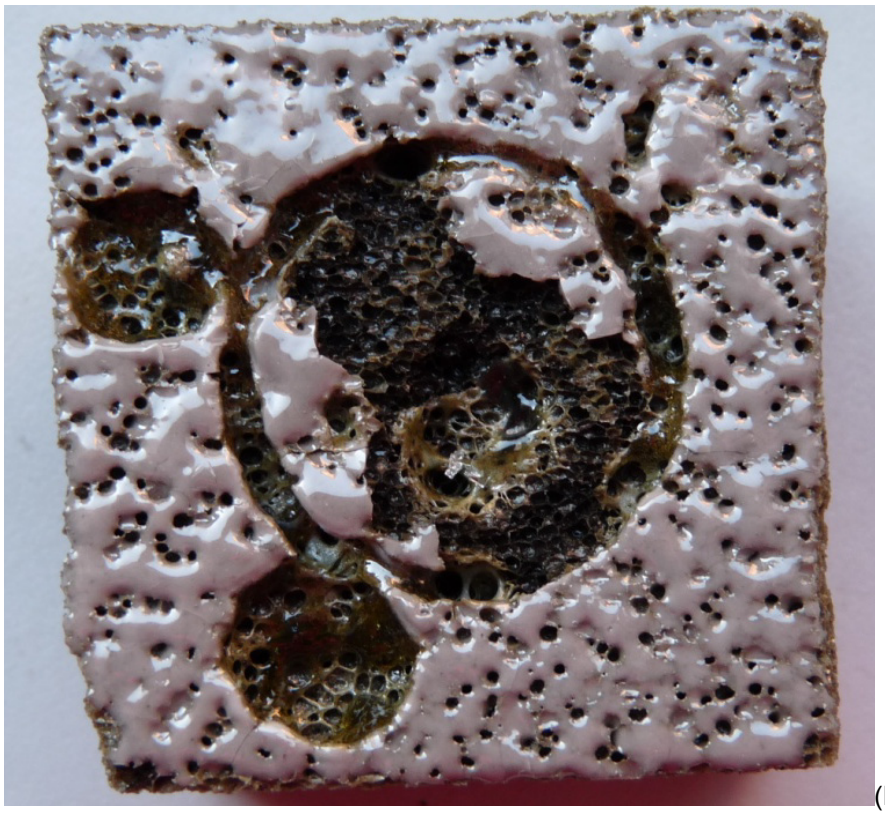


Abb. 6-4 Bohrung in der Glasplatte [19]

Bei der Einstufung der Dichtheit von Hochvakuumanlagen wird von sehr dichten Anlagen gesprochen, wenn die Leckrate kleiner als 10^{-6} mbar·l/s ist [18]. Der experimentell ermittelte Wert der Lötprobe betrug $4 \cdot 10^{-9}$ mbar·l/s und ist damit deutlich kleiner als der Vergleichswert. Auf diese Weise konnte nachgewiesen werden, dass im Ofenprozess eine gasdichte Verbindung zwischen Kalk-Natron-Glas und Schaumglas hergestellt werden kann.

Eine weitere Möglichkeit des Verbindens von Glaswerkstoffen mittels Löttechnologie ist das Laserverfahren. Dabei werden die zu verbindenden Flächen ebenfalls in einem separaten Ofenprozess mit dem Glaslot verglast. Anschließend werden bei geeigneter Parameteranpassung der Lasersteuerung die beiden Glaslotschichten so aufgeschmolzen, dass deren Verbindung erfolgt. Diese Versuche haben allerdings gezeigt, dass bei den gegebenen Randbedingungen eine Verbindung der beiden Materialien nicht möglich ist, da der Laser besonders gut im Schaumglas ankoppelt. Dies führte zu einer Gefügezerstörung, bevor das Glaslot schmilzt (Abb. 6-5). Die Laservariante erfordert umfangreiche weitere Untersuchungen, die im Rahmen des Forschungsthemas nicht realisiert werden konnten.



(Kantenlänge 35 mm)

Abb. 6-5 Oberfläche der Schaumglasprobe - Laserankopplung [19]

In einem weiteren Schritt wurde geprüft, ob bei größeren Abmessungen der zu fügenden Teile die Anwendung des Ofenverfahrens möglich ist. Besonders problematisch ist hier wegen der großen Temperaturunterschiede das Entstehen von Zwängungsspannungen auf Grund unterschiedlicher thermischer Längenänderungskoeffizienten der Materialien.

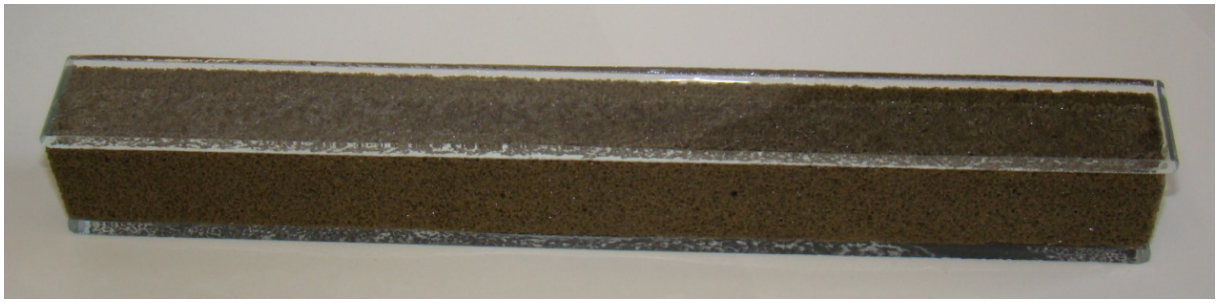


Abb. 6-6 Streifenförmiger Probekörper – Gesamtansicht

Getestet wurde das Verhalten an einem Sandwichstreifen von 20 mm Breite und 200 mm Länge, der aus Schaumglas von 20 mm Höhe mit beidseitig angeordnetem 4 mm dicken Kalk-Natron-Glas bestand. Wie in Abb. 6-6 und Abb. 6-7 zu sehen ist, sind die Materialien Floatglas und Schaumglas sowie das Glaslot hinsichtlich ihres thermischen Längenänderungsverhaltens ausreichend gut aufeinander abgestimmt, so dass dieser Aufbau erfolgreich verlötet werden konnte.

Abb. 6-7 Streifenförmiger Probekörper – Detail

Der folgende Schritt bestand in der Herstellung eines Elementes von 20 cm x 20 cm Grundfläche mit einem 20 mm breiten Rahmen aus Schaumglas als äußeren Abschluss.

Kantenlänge 20 cm

Abb. 6-8 Versuchselement - Glas mit Schaumglasrahmen verlötet [19]

Die numerischen Untersuchungen zu dieser Problemstellung ergaben, dass bereits bei diesen kleinformatigen Elementgrößen von 20 cm x 20 cm bei einer Evakuierung des Hohlraumes die Tragfähigkeit der Decklagen aus Glas erreicht wird, was eine zusätzliche Unterstützung zwischen den beiden Decklagen erforderlich macht. Diese Abstandshalter können durch evakuierte Füllelemente oder Schaumglasabschnitte gebildet werden.

Die Herstellung eines Versuchselementes mit Schaumglasrahmen, Abstandshaltern und beidseitiger Glasdeckschicht, welches eine Evakuierung des Hohlraumes ermöglicht, ist derzeit in der Erprobung. Hier sind noch Probleme speziell bei der Fixierung der einzelnen Bauteile des Elementes während des Fügevorganges zu lösen.

6.2 VORUNTERSUCHUNGEN ZUR WÄRMELEITFÄHIGKEIT

An Vorstufen dieses neuartigen Elementaufbaus, bei denen der Schaumglasrahmen noch nicht mit den Deckglasschichten verbunden ist, wurden Messungen zur Wärmeleitfähigkeit durchgeführt. Diese Ergebnisse sind in Tab. 6-2 dargestellt. Die Versuchselemente unterscheiden sich durch die Position der Low-e-Beschichtung am Element.

Tab. 6-2 Übersicht der untersuchten Elemente mit Schaumglas im Randbereich

Aufbau-Nummer	Schaumglas-rahmen		Dicke Versuchs-element	Bemerkung	Lambda	U-Wert
	Höhe	Breite allseitig				
	[mm]	[mm]	[mm]		[W/(m•K)]	[W/(m²•K)]
1	30	20	38,0	Deckschichten unbeschichtet	0,137	2,24
2	30	20	38,0	Low-e-Beschichtung an Pos.2 (warme Seite, Innenseite)	0,065	1,33
3	30	20	38,0	Low-e-Beschichtung an Pos. 3 (kalte Seite, Innenseite)	0,066	1,34
4	30	20	38,0	Low-e-Beschichtung an Pos.2 und 3 (beide Scheiben, Innenseite)	0,048	1,04

Ausgehend von Aufbau Nr. 1, bei dem beide Deckgläser keine Beschichtung aufweisen, wird eine Reduzierung der Wärmeleitfähigkeit λ um 65 Prozent erreicht, wenn an beiden Deckglaslagen eine Low-e-Beschichtung aufgebracht wird. Die Versuchsergebnisse zeigen auch, dass unter den gegebenen Bedingungen bei einseitiger Beschichtung kein nennenswerter Unterschied zwischen der Anordnung auf der warmen oder der kalten Seites des Versuchsaufbaus feststellbar ist. Die Werte des Elementes aus Aufbau Nr. 4 lassen sich auf eine Elementdicke von 100 mm bzw. 150 mm umrechnen, was Wärmedurchgangskoeffizienten von $U = 0{,}44$ W/(m²•K) bzw. $U = 0{,}30$ W/(m²•K) ergibt. Durch die Möglichkeit der Gasdruckreduzierung im Hohlraum der Elemente kann eine weitere Verbesserung der Wärmedämmeigenschaften erzielt werden. Die Verwendung geeigneter Beschichtungen auf der Oberfläche der Deckglasschichten ist in jedem Fall unabdingbar, um die Wärmeübertragung durch Strahlung zu minimieren.

7 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Ziel des Projektes war die Schaffung von Grundlagen für die Entwicklung von transluzenten, wärmedämmenden Fassadenelementen. Diese Elemente sollen primär nicht die transparenten Fenster- und Fassadenbauteile ersetzen, sondern als transluzenter neuartiger Raumabschluss die Nutzung des Tageslichts verbessern und so den Nutzungskomfort eines Gebäudes erhöhen. In Anbetracht der aktuellen Diskussionen zum Klimaschutz müssen diese Bauteile einen hohen Wärmedurchgangswiderstand aufweisen, um als zukunftsfähiges Bauelement Verwendung finden zu können.

Zum Erreichen dieses Zieles wurden geeignete Materialkombinationen auf ihre Eignung untersucht. Das Grundprinzip der Glas-Kunststoff-Sandwichelemente (GKS) besteht in der Anordnung geeigneter Füllkörper und Füllmaterialien zwischen zwei Deckschichten aus Kalk-Natron-Glas. Die Einzelteile dieser Konstruktion werden verklebt. Als besonders zweckmäßige Füllkörpergeometrie stellten sich Glas- bzw. Kunststoffröhren heraus. Zur Entkopplung der Füllkörper von den Deckschichten wurde aus wärmetechnischen Aspekten und zur Reduzierung von Spannungsspitzen im Aufbau der GKS beidseitig eine Schaumstofflage eingefügt. Die experimentelle Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit erfolgte an unterschiedlichen Varianten in einem

speziell dafür entwickelten Versuchsstand. Variiert wurden der Luftdruck in den Röhren, die Röhrengeometrie sowie die Füllung der Röhreninnen- und -zwischenräume (Aerogel, Luft). Die Ergebnisse dieser Versuche dienten zur Validierung der parallel durchgeführten numerischen Simulationen.

Durch die Anwendung numerischer Simulationen und gezielter Parameteruntersuchungen ist es gelungen, vor der Herstellung von Versuchselementen eine Auswahl geeigneter Elementvarianten zu treffen. Die gezielte Sondierung des Aufbaus der GKS mittels der numerischen Simulation kann somit den Materialeinsatz und den Aufwand bei den praktischen Versuchen erheblich minimieren. So sind beispielsweise die Effizienz einer vollständigen oder partiellen Evakuierung und die daraus resultierenden Auswirkungen auf den Wärmedurchgang bereits im Vorfeld abschätzbar. Die aus den Versuchen zur Wärmeleitfähigkeit gewonnenen Ergebnisse wurden zur Anpassung und Verifizierung der für die numerische Simulation benötigten Materialdatenbank verwendet.

Zur weiteren Präzisierung der Simulation wurden auch die Effekte der Konvektion und der Wärmestrahlung berücksichtigt. Auf diese Weise konnte die Abweichung der berechneten Werte von den Ergebnissen der praktischen Versuche deutlich verringert werden.

Für die Umsetzung der Erkenntnisse der numerischen Simulation und der experimentellen Studien in die Praxis ist die Verwendung von Füllkörpern mit geringerer Wandstärke und einer die IR-Strahlung reflektierende Oberfläche notwendig. Derzeit sind diese Röhren als technisches Produkt am Markt nicht verfügbar und waren auch als Sonderanfertigung nicht zu beschaffen.

Analog zu Konzeption und Aufbau des in Kapitel 4.1.1 beschriebenen Prüfstandes zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit für eine Probengrundfläche von 20 cm x 20 cm wurde auch eine Prüfeinrichtung für Versuchselemente der Größe 50 cm x 50 cm bei variabler Probenhöhe entwickelt. In dieser Apparatur ist die Messung der GKS mit größeren Füllkörperdurchmessern möglich, wie sie für die praktisch einzusetzenden Elemente vorgesehen sind. Zusätzlich können so auch die Ergebnisse der numerischen Simulation für diese Geometrien verifiziert werden.

Grundsätzlich ist es gelungen, einen der Zielstellung des Forschungsprojekts entsprechenden Typus eines Glas-Kunststoff-Sandwichelements zu entwerfen. Der

Elementaufbau mit der höchsten Wärmedämmung bei gleichzeitig ausreichender Tragfähigkeit und Transluzenz wird erreicht, wenn folgender Aufbau gewählt wird:

- Deckschichten aus Kalk-Natron-Glas von 4 mm Dicke
- Schaumstoff-Trennlage aus PMMI-Schaum von 3 mm Dicke
- Kunststoff-Röhren (PMMA) mit einem Durchmesser von 40 mm
- Aerogel in den Hohlräumen und den Zwickeln der Füllkörper.

Auf diese Weise konnte eine Wert von $\lambda = 0{,}059$ W/(m·K) erreicht werden. Durch Umrechnen auf eine Elementdicke von 100 mm bzw. 150 mm lassen sich so Wärmedurchgangskoeffizienten von $U = 0{,}54$ W/(m²·K) bzw. $U = 0{,}36$ W/(m²·K) erreichen. Bei Anwendung einer geeigneten Low-e-Beschichtung auf der Röhrenoberfläche lassen sich diese Werte weiter optimieren.

Im Verlauf der Bearbeitung des Projektes wurde deutlich, welches Potenzial ein Elementaufbau besitzt, bei dem der Zwischenraum der beiden Decklagen evakuiert und auf den Glasdecklagen eine Beschichtung mit niedriger Emissivität aufgebracht wird. Für diesen Lösungsweg ist die Schaffung eines gasdichten Randverbundes notwendig. In Zusammenarbeit mit dem Günter-Köhler-Institut für Fügetechnik und Werkstoffprüfung GmbH entstand eine neuartige Variante eines solchen Randverbundes. Dabei wurde erstmalig Schaumglas mit Kalk-Natron-Glas mittels Glaslöttechnologie verbunden. Die Gasdichtheit dieser Verbindung konnte nachgewiesen werden. In Voruntersuchungen wurde gezeigt, dass mit einem auf diese Weise hergestellten Element von 150 mm Dicke ein Wert von $U = 0{,}30$ W/(m²·K) erreicht werden kann.

In Weiterführung des Forschungsvorhabens und in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl Bauformenlehre (Fakultät Architektur) ist geplant, am Experimentalbau X.STAHL großformatige Prototypen der GKS-Röhrenelemente zu integrieren. Auf dem Gelände der Bauhaus-Universität entstehen derzeit unter Beteiligung verschiedener Professuren mehrere Experimentalbauten. Die Tragstruktur des Stahlskelettbaus X.Stahl wurde im Jahr 2010 errichtet (Abb. 7-1) und ermöglicht die Integration zukunftsweisender Bauelemente und Raummodule (Abb. 7-2). Auf diese Weise ist die Untersuchung relevanter Kenngrößen im Maßstab 1:1 möglich.

Abb. 7-1 Stahlskelett des Experimentalbaus X.STAHL

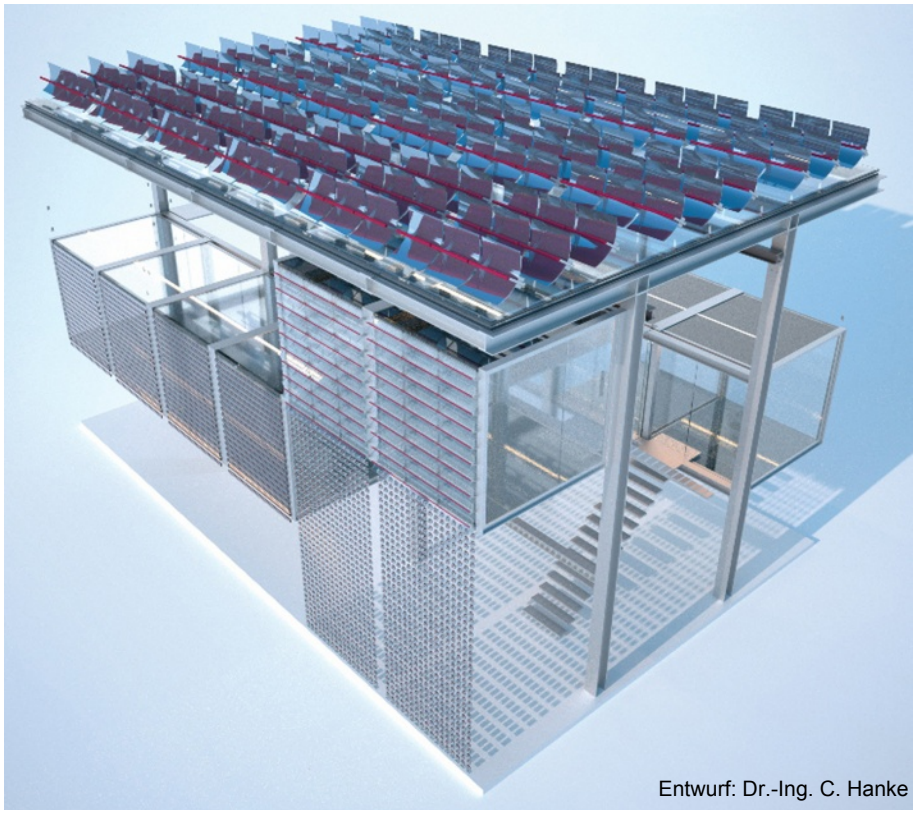


Abb. 7-2 Experimentalbau X.STAHL – Studie

In einem geeigneten Raummodul werden zwei verschiedene GKS-Prototypen der Abmessungen 1,0 m x 1,5 m montiert. Nach der Installation der Messtechnik können wärmetechnische Kennwerte in Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen aufgezeichnet und bewertet werden.

Damit wird eine Grundlage geschaffen, das Verhalten dieser neuartigen Bauelemente unter realen Bedingungen zu erfassen und so die Modelle numerischer Simulationen zu erweitern und zu präzisieren. Nur unter diesen Randbedingungen ist die notwendige Erfassung aller relevanten Parameter möglich.

Arbeitsgruppentreffen und Ergebnispräsentationen

1. Arbeitsgruppentreffen	Bauhaus-Universität Weimar Weimar, 12.11.2009
Hannover Messe 2010	Deutsche Messe Hannover Hannover, 19. – 23.04.2010 Präsentation der ersten Handmuster
2. Arbeitsgruppentreffen und Workshop	Erfurter Glaskontor Erfurt-Kerspleben, 04.06.2010
Thüringer Werkstofftag	Technische Universität Ilmenau Ilmenau, 24.03.2010 Projektvorstellung
Rosenheimer Fenstertage 2011	Institut für Fenstertechnik Rosenheim Rosenheim, 13. – 14.10.2010 Vortrag zum Projekt, Ergebnispräsentation
Bau 2011	Neue Messe München München, 17. – 22.01.2011 Vorstellung Anschauungselement am Stand des Fraunhofer Instituts Podiumsvortrag im Messeforum der Forschungsinitiative „Zukunft Bau“ Projektvorstellung, Ergebnispräsentation
Hannover Messe 2011	Deutsche Messe Hannover Hannover, 04. – 08.04.2011 Präsentation von Mustern und Ergebnissen
3. Arbeitsgruppentreffen und Workshop	Bauhaus-Universität Weimar Weimar, 28.04.2011 Abschlusspräsentation der Ergebnisse, Ausblick

Literatur und Veröffentlichungen

[1] **SCHULZE, BURKHARD D.:**
Energieeffiziente Wohngebäude, 3. Aufl., Berlin Verlag Solarpraxis (BINE-Informationspacket), 2009, S. 26-37

[2] **GYPSER, A.; WITTOR, B.; WOLF, M.; HILDEBRAND, J.; DIMMIG-OSBURG, A.:**
Glas-Kunststoff-Sandwichelemente mit transluzenten Zwischenschichten. In: Tagungsband, Thüringer Werkstofftag 2010, 24. März 2010, Ilmenau, S. 143-148

[3] **HILDEBRAND, J., WERNER, F., MÜLLER, K., NECHWATAL, A.:**
Hybridkonstruktionen – Transparente Tragelemente aus Glas-Kunststoff.

[4] **Hildebrand, J., Werner, F.:**
Hybridkonstruktionen – Transparente Träger aus Glas-Kunststoff. In: VDI-Wissensforum, 03. - 04. November 2009, Köln, VDI-Berichte 2084 - Bauen mit innovativen Werkstoffen, S. 103-115.

[5] **HILDEBRAND, J., WERNER, F., RECHNER, R., MÜLLER, M., JANSEN, J.:**
Experimentelle Untersuchungen zu Klebstoffen für Glas-Kunststoff-Hybridelemente. In: 17. ibausil, 23. - 26. September 2009, Weimar. Tagungsbericht-Band 2, S. 2-0961 bis 2-0966

[6] **DIN EN 12 667** : 05/2001: Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät; Deutsche Fassung EN 12 667 : 01/2001

[7] **DIMMIG-OSBURG, A.; GYPSER, A.; WERNER, F.; WOLF, M.; WITTOR, B.; HILDEBRAND, J.:**
Innovative Glas-Hybrid-Elemente für Gebäudehüllen - Verbesserung der Energieeffizienz mittels transluzenter Zwischenschichten. In: Rosenheimer Fenstertage; 07.-08. Oktober; Rosenheim; 2010, Seite 105 - 109.

[8] **GORIS, A. (HRSG.):**
Bautabellen für Ingenieure mit Berechnungshinweisen und Beispielen, 17. Auflage, Neuwied: Werner Verlag, 2006, Seiten 10.18 - 10.27

[9] **PRODUKTDATENBLATT CABOT NANOGEL**
Cabot Corporation, Interleuvenlaan, 15i, B-3001 Leuven, Belgium
Stand 2009

[10] **PRODUKTDATENBLATT VACUPOR**
Porextherm Dämmstoffe GmbH, Heisinger Strasse 8/10, D-87437 Kempten

[11] **PRODUKTDATENBLATT VA-Q-VIP**
va-Q-tec AG, Karl-Ferdinand-Braun-Str. 7, D-97080 Würzburg

[12] **BOLLINGER, H.; TEUBNER, W.:**
Industrielle Vakuumtechnik, Leipzig: VEB Verlag für Grundstoffindustrie, 1980, S: 32-33, 425

[13] **BAEHR, H.D.; STEPHAN, K.:**
Wärme- und Stoffübertragung,
Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006, S. 1-30

[14] **BAEHR, H.D.; STEPHAN, K.:**
Wärme- und Stoffübertragung,
Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006, S. 559-616

[15] **COMPAGNO, A.:**
Intelligente Glasfassaden, Birkhäuser-Publisher for Architecture, 2002, S. 41-51

[16] **DEHN, F.; KÖNIG, G.; MARZAHN G.:**
Konstruktionswerkstoffe im Bauwesen, Ernst & Sohn: Berlin, 2003, S.474 – 485

[17] **SCHOTT ROHRGLAS BROSCHÜRE**,
www.schott.com/rohrglas, aufgerufen am 14. 02. 2011

[18] **UMRATH, W. (Hrsg.):**
Grundlagen der Vakuumtechnik, Oerlikon leybold vacuum, 2007, S. 144-148
www.oerlikon.com, aufgerufen am 12. 04. 2011

[19] **MÜLLER, H.; KASCH, S.; HUBERT, D.:**
Kurzbericht – Verbinden von Kalk-Natron-Glas und Schaumglas mittels Glaslot, Günter-Köhler-Institut für Fügetechnik und Werkstoffprüfung GmbH: Jena, 2011, S. 1-4

[20] **REBER, G.:**
Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten von Aerogelfenstern im Vergleich mit konventionellen sowie evakuierten, Inauguraldissertation Universität Basel: Basel, 1991, S.89

[21] **JANSEN, H.; BACHTHALER, E.; FÖLSTER, E.; SCHARPF, H. C.:**
Gärtnerischer Pflanzenbau – Grundlagen des Anbaus unter Glas und Kunststoffen, Verlag Eugen Ulmer: Stuttgart, 1984