

**Ermittlung der äquivalenten  
Wärmeleitfähigkeit von wärme-  
technisch verbesserten Abstandhaltern**

**T 3297**

T 3297

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2013

ISBN 978-3-8167-8990-1

Vervielfältigung, auch auszugsweise,  
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

Bitte beachten:

Fehlende Seiten sind **Leerseiten**,  
die bei Erstellung  
der PDF-Datei für den Download nicht  
berücksichtigt wurden

Fraunhofer IRB Verlag



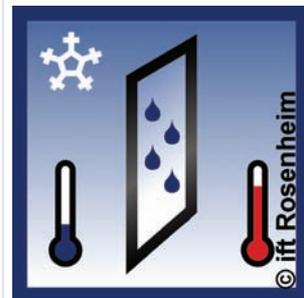
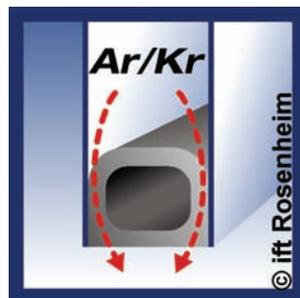
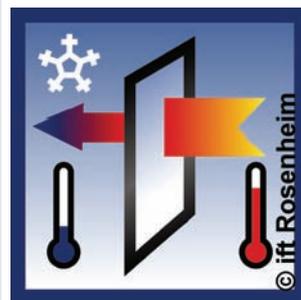
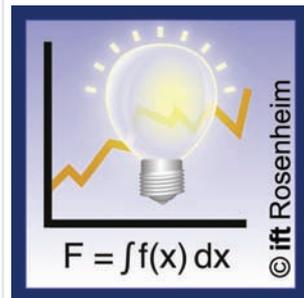
Das Institut für  
Fenster und Fassaden,  
Türen und Tore,  
Glas und Baustoffe

# Forschung & Entwicklung

Abschlussbericht

sei ]j UYbhY'K } fa Y'Y]hZ \ ][ \_Y]h  
K Ufa Y'? UbhY

Dezember 2012



## Äquivalente Wärmeleitfähigkeit Warme Kante Abschlussbericht

<b>Thema</b>	Ermittlung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit von wärmetechnisch verbesserten Abstandhaltern
<b>Kurztitel</b>	Äquivalente Wärmeleitfähigkeit Warme Kante
<b>Gefördert durch</b>	Deutsches Institut für Bautechnik
<b>Forschungsstelle</b>	ift gemeinnützige Forschungs- und Entwicklungsgesellschaft mbH Theodor-Gietl-Straße 7–9 83026 Rosenheim
<b>Projektleitung</b>	Dipl.-Phys. Norbert Sack
<b>Weitere Forschungsstellen</b>	Hochschule für angewandte Wissenschaften Rosenheim Prof. Dr. rer. nat. Franz Feldmeier  Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V., München Dipl.-Ing. (FH) Wolfgang Albrecht

Inhaltsverzeichnis	Seite
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Arbeitsablauf</b>	<b>5</b>
2.1 Arbeitsplan	5
2.2 Projektbesprechungen	6
<b>3 Untersuchungen Stufe 1</b>	<b>9</b>
3.1 Zielsetzung	9
3.2 Systeme für Untersuchungen der Stufe 1	9
3.3 Herstellung der Probekörper	10
3.4 Durchführung der Messung, Auswertung der Messergebnisse	11
3.5 Durchgeführte Untersuchungen und Ergebnisse	13
3.5.1 Einfluss der Orientierung von Hohlprofilen	13
3.5.2 Einfluss Trocknungsmittel und Feuchte des Trocknungsmittels	15
3.5.3 Untersuchungen zur Reproduzierbarkeit	17
3.5.4 Round Robin-Test	23
3.5.5 Untersuchungen zur Klebung der Abstandhalter auf die Glasplatten	26
3.6 Zusammenfassung	31
<b>4 Untersuchungen Stufe 2</b>	<b>33</b>
4.1 Zielsetzung	33
4.2 Systeme für Untersuchungen der Stufe 2	33
4.3 Herstellung der Probekörper	34
4.4 Ermittlung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit	37
4.5 Einfluss auf den linearen Wärmedurchgangskoeffizienten $\Psi$	38



4.6 Ergebnisse	38
4.7 Fehlerdiskussion	40
<b>5 Zusammenfassung</b>	<b>43</b>
<b>6 Literaturverzeichnis</b>	<b>45</b>
<b>7 Danksagung</b>	<b>46</b>
<b>Anhang A</b>	<b>47</b>
<b>Verfahren zur messtechnischen Ermittlung der äq. Wärmeleitfähigkeit von wärmetechnisch verbesserten Abstandhaltern</b>	

## 1 Einleitung

Durch die auch in Zukunft weiter steigenden Anforderungen an den baulichen Wärmeschutz werden Wärmbrücken in der energetischen Gesamtbeurteilung von Gebäuden und entsprechend auch von Bauteilen immer wichtiger.

Bei Fenstern und Fassaden kommt der wärmetechnischen Bewertung sowie Optimierung der „Wärmebrücke Glasrandverbund“ durch den Einsatz von hochwärmedämmenden Mehrscheiben-Isoliergläsern und hochwärmedämmenden Rahmen in Zukunft ein höherer Stellenwert zu.

Die wärmetechnische Kenngröße zur Beurteilung des Glasrandverbundes ist der sog. längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizient  $\Psi$ . Die Ermittlung des  $\Psi$ -Wertes erfolgt durch Berechnung nach EN ISO 10077-2 [1]. Hierfür ist neben dem exakten geometrischen Querschnitt des Abstandhalters auch die genaue Kenntnis der Wärmeleitfähigkeit der eingesetzten Materialien notwendig.

Wärmeleitfähigkeiten können z.B. für bestimmte Materialien einschlägigen Normen entnommen werden. Hierbei ist jedoch festzustellen, dass im speziellen bei wärmetechnisch verbesserten Abstandhaltern Materialien zum Einsatz kommen, deren Wärmeleitfähigkeiten normativ nicht festgelegt sind. Um die Wärmeleitfähigkeit solcher Materialien zu ermitteln wären nun zugehörige Messungen notwendig. Hierbei sind jedoch folgende „Probleme“ ungelöst:

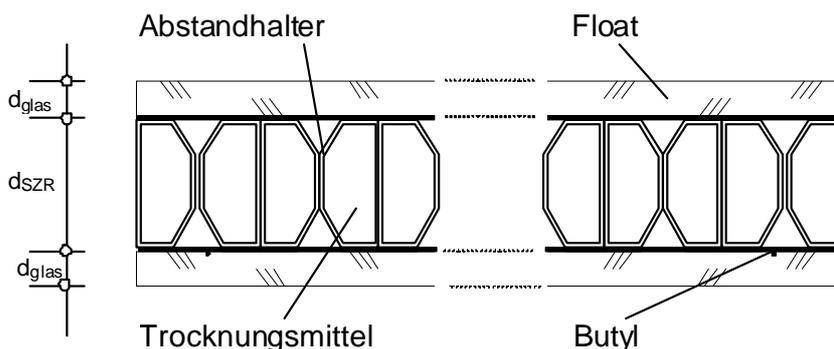
- Es ist kein eindeutiges Messverfahren festgelegt; ob dies überhaupt möglich ist kann angezweifelt werden, da das „richtige“ Messverfahren u.U. vom Material und weiteren Parametern abhängt
- Viele eingesetzte Materialien weisen eine anisotrope Wärmeleitfähigkeit auf, eine Messung müsste also die Wärmeleitfähigkeit in der Hauptwärmestromrichtung ermitteln. Bei Materialien ist im allgemeinen die spätere Anwendung nicht bekannt und daher auch nicht der „Hauptwärmestrom“
- Durch die Herstellung der Abstandhalter bzw. der darin verwendeten Komponenten kann sich die Wärmeleitfähigkeit gegenüber anderen Herstellungsverfahren ändern. So werden z.B. Edelstahlfolien gewalzt; durch diese Umformung findet eine Gefügeveränderung statt, welche die Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zu dicken Stahlblechen ändern kann.



- Es kann vorkommen, dass die Wärmeleitfähigkeit des Materials direkt nicht bestimmt werden kann. So z.B. Beispiel bei entsprechenden Folien die eine Beschichtung (z.B. Metall) im  $\mu\text{m}$  bis  $\text{nm}$  Bereich aufweisen können.

Eine Lösungsmöglichkeit besteht darin, nicht die einzelnen Wärmeleitfähigkeiten aller eingesetzten Materialien zu ermitteln, sondern eine „äquivalente Wärmeleitfähigkeit“ des kompletten Abstandhalters.

Zur Umsetzung wird ein Mehrscheiben-Isolierglas komplett mit Abstandhaltern gefüllt (siehe Abbildung 1). Von diesem wird der Wärmedurchlasswiderstand nach EN 12664 [2] ermittelt. Durch Subtraktion des Wärmedurchlasswiderstandes der beiden Glasscheiben vom Gesamtwärmedurchlasswiderstand kann auf die äquivalente Wärmeleitfähigkeit des Abstandhalters geschlossen werden.



**Abbildung 1** Schematische Darstellung des Probekörpers zur Ermittlung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit

Die Messung einer äquivalenten Wärmeleitfähigkeit bietet folgende Vorteile:

- Nur „eine“ Messung notwendig, auch wenn mehrere Materialien mit nicht bekannter Wärmeleitfähigkeit vorhanden sind. (Kostenreduktion für den Nachweis)
- Messung der Wärmeleitfähigkeit in der Hauptwärmestromrichtung der späteren Anwendung, Wärmeleitfähigkeit entspricht der späteren Anwendung
- Messung am Originalprodukt, Einflüsse des Herstellungsverfahrens (z.B. Extrusion, Umformung) auf die Wärmeleitfähigkeit werden berücksichtigt.
- Die ermittelte äquivalente Wärmeleitfähigkeit kann direkt im sog. „Two Box Modell“ zur Berechnung des  $\lambda$ -Wertes des Abstandhalters verwendet werden. Eine aufwändige detaillierte Modellierung des kompletten Querschnittes ist überflüssig. Das „Two Box Modell“ ist in der ift Richtlinie WA 08/1 [3] beschrieben und wird auch in EN ISO 10077-2 in Bezug genommen.



Im Rahmen einer internen Untersuchung am ift Rosenheim wurde die prinzipielle Umsetzbarkeit der Ermittlung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit durch Messung nach EN 12664 nachgewiesen. Es haben sich jedoch noch folgende „Schwierigkeiten“ gezeigt:

- Teilweise deutliche Unterschiede (20%) zwischen den an unterschiedlichen Instituten ermittelten Wärmeleitfähigkeiten
- Sehr aufwändige Probekörperherstellung, bei Verwendung von Standardabmessungen von 800 mm x 800 mm ist die Probekörperherstellung sehr aufwändig. Um die Scheibe zu verpressen müssen die Glasscheiben aus mindestens 8 mm dickem Float bestehen, zudem sind notwendigen Drücke zum Verpressen so hoch, dass keine „konventionelle Isolierglaspresse“ eingesetzt werden kann.
- Aus der momentan noch recht hohen Messunsicherheit resultiert im Rahmen einer vorgesehenen statistischen Auswertung ein sehr hoher Sicherheitszuschlag auf die äquivalente Wärmeleitfähigkeit
- In den Abstandhaltern befindet sich im Regelfall sog. Trocknungsmittel, das dazu dient, die ins Isolierglas eindiffundierte Feuchtigkeit zu binden. Hierbei können die Abstandhalter von allen Seiten des Isolierglases gefüllt sein oder es ist nur ein Teil, z.B. lange und kurze Seite gefüllt. Die Ermittlung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit von wärmetechnisch verbesserten Abstandhaltern sollte also mit integriertem Trocknungsmittel durchgeführt werden. Es ist jedoch nicht bekannt, welchen Einfluss der Feuchtegehalt des Trocknungsmittels auf die äquivalente Wärmeleitfähigkeit hat.

Das Vorhaben soll dazu dienen, die o.g. „Schwachstellen“ zu beseitigen und somit ein eindeutiges Prüfverfahren zur Ermittlung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit von wärmetechnisch verbesserten Abstandhaltern zu definieren. Ebenso sollen in diesem Vorhaben die äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten von marktgängigen Systemen ermittelt werden und hiermit auch Optimierungspotential aufgezeigt werden.

## 2 Arbeitsablauf

### 2.1 Arbeitsplan

Zur Erreichung des Forschungszieles war entsprechend des eingereichten Forschungsantrages der in Tabelle 1 dargestellte Arbeitsplan vorgesehen.

**Tabelle 1** Arbeitsplan des Forschungsvorhabens

Forschungsabschnitt	Leistungsbeschreibung
1	<p><b>Festlegung der zu untersuchenden Systeme</b>                      Zusammen mit allen Projektpartner, werden die zu vermessenden Systeme festgelegt. Hierbei sind zu berücksichtigen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Verwendete Materialien (Edelstahlsystem, Kunststoffsysteme)</li> <li>- Abmessung der Probekörper (Messapparaturen der beteiligten Messstellen)</li> <li>- Anzahl der Probekörper (Statistik)</li> </ul>
2	<p><b>Herstellung der Probekörper</b>                      Die in AP1 festgelegten Varianten von Probekörpern werden durch einen Industriepartner hergestellt.</p>
3	<p><b>Messung / Berechnung</b>                      Messung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit nach EN 12664. Die Messungen werden an mehreren Prüfstellen (ift Rosenheim, FIW München, Hochschule Rosenheim) durchgeführt. Die vermessenen Systeme werden parallel durch eine 2D. Simulation berechnet um einen Vergleich zur bisherigen Vorgehensweise der detaillierten Berechnung zu erhalten. Es wird von ca. 14 unterschiedlichen Abstandhalersystemen ausgegangen.</p>
4	<p><b>Auswertung der Untersuchungen</b>                      Die ermittelten Resultate werden detailliert ausgewertet:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Vergleich der Ergebnisse zwischen den Messstellen</li> <li>- Statistische Auswertung nach EN ISO 10456</li> </ul>
5	<p><b>Bericht/Dokumentation</b>                      Über das durchgeführte Vorhaben wird eine ausführliche Dokumentation erstellt. Aus den Ergebnissen wird ein Vorschlag für die Beschreibung einer eindeutigen Prüfmethode erarbeitet.</p>



Detaillierte Überlegungen zum Beginn des Projektes führten zu der Entscheidung, das Projekt in zwei Stufen durchzuführen:

**Stufe 1**

Durchführung von Untersuchungen/Messungen an ausgewählten Abstandhaltern mit dem Ziel

- einen Ringversuch zwischen unterschiedlichen Messstellen durchzuführen,
- Aussagen über den Einfluss des Feuchtgehaltes des Trocknungsmittel auf die äquivalente Wärmeleitfähigkeit zu ermitteln,
- den Einfluss der Probekörperherstellung zu analysieren,
- einen Vorschlag für das eindeutige Messverfahren zu erarbeiten.

**Stufe 2**

Ermittlung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit aller im AK Warme Kante vertretenen Systemen und Vergleich dieser mit den durch Berechnung ermittelten Wärmeleitfähigkeiten

**2.2 Projektbesprechungen**

Während der Projektbearbeitungszeit wurden folgende Besprechungen durchgeführt:

**Tabelle 2** Durchgeführte Projektbesprechungen

Datum	Ort	Teilnehmer	Ziel
13. Dezember 2011	ift Rosenheim	ift Rosenheim Hochschule Rosenheim	Festlegung der Probekörpervarianten für die Untersuchungen Stufe 1
17. April 2012	ift Rosenheim	ift Rosenheim Hochschule Rosenheim AK Warme Kante des Bundesverbands Flachglas	Vorstellung und Diskussion der ermittelten bislang ermittelten Ergebnisse der Stufe 1 Verabschiedung der weiteren Vorgehensweise Festlegung der Systeme für die Messungen der Stufe 2
5. Juli 2012	ift Rosenheim	ift Rosenheim Hochschule Rosenheim	Verabschiedung der Vorgehensweise zur Ermittlung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit von wärmetechnisch verbesserten Abstandhaltern

## Äquivalente Wärmeleitfähigkeit Warme Kante

### Arbeitsablauf



Datum	Ort	Teilnehmer	Ziel
16. November 2012	ift Rosenheim	ift Rosenheim Hochschule Rosenheim AK Warme Kante des Bundesverbands Flachglas	Vorstellung und Diskussion der Endergebnisse Diskussion und Verabschiedung des Abschlussberichtes

### 3 Untersuchungen Stufe 1

#### 3.1 Zielsetzung

Durchführung von Untersuchungen/Messungen an ausgewählten Abstandhaltern mit dem Ziel

- Aussagen über den Einfluss der Orientierung von Abstandhaltern auf die äquivalente Wärmeleitfähigkeit zu ermitteln,
- Aussagen über den Einfluss des Feuchtegehaltes des Trocknungsmittel auf die äquivalente Wärmeleitfähigkeit zu ermitteln,
- Aussagen über den Einfluss von gefülltem und nicht gefülltem Hohlprofil auf die äquivalente Wärmeleitfähigkeit zu ermitteln,
- die Reproduzierbarkeit der Messung zu analysieren,
- einen Ringversuch zwischen unterschiedlichen Messstellen durchzuführen,
- Untersuchungen zum Einfluss unterschiedlicher Techniken zur Klebung der Abstandhalter auf die Glasplatten durchzuführen sowie
- einen Vorschlag für das eindeutige Messverfahren zu erarbeiten.

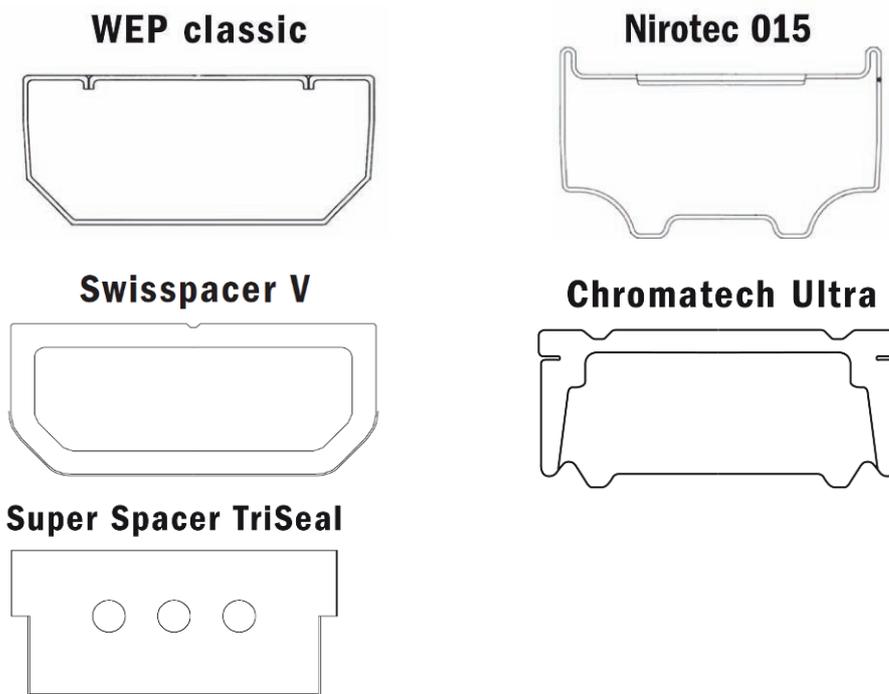
#### 3.2 Systeme für Untersuchungen der Stufe 1

Zusammen mit der Hochschule Rosenheim wurden in einer ersten Projektbesprechung die Abstandhaltersysteme festgelegt, an denen die Untersuchungen der Stufe 1 durchgeführt wurden.

**Tabelle 3** Ausgewählte Abstandhaltersysteme für die Untersuchungen der Stufe 1

Gruppe	Bezeichnung Abstandhalter	Hersteller
Abstandhalter (Hohlprofil) aus Edelstahl	WEP Classic	Glaswerke Arnold
	Nirotec 015	Lingemann
Polymerer Abstandhalter (Hohlprofil) mit Diffusions-sperre aus Metall	Chromatech Ultra	Rolltech
	Swisspacer V	Swisspacer
Abstandhalter mit integriertem Trocknungsmittel	Super Spacer Tri Seal	Edgetech Europe

Die Querschnitte der Abstandhalter können der nachfolgenden Abbildung entnommen werden. Alle untersuchten Abstandhalter hatten eine Profildicke für einen 16 mm-Scheibenzwischenraum des Isolierglases.



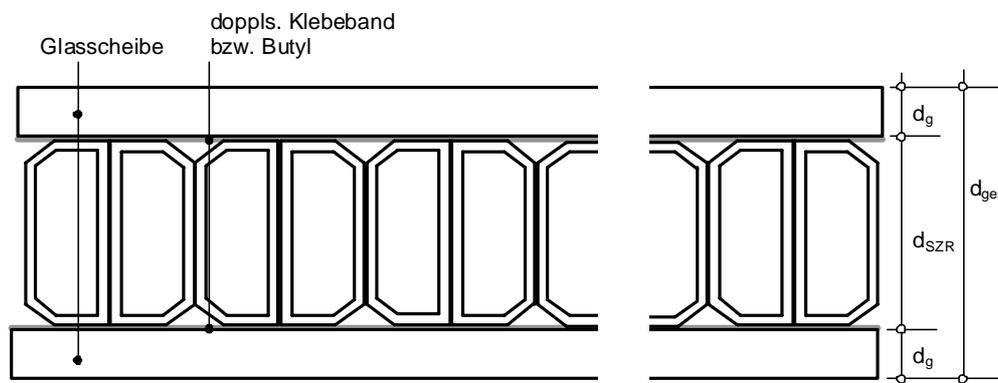
**Abbildung 2** Querschnitt durch die in der Stufe 1 untersuchten Abstandhalter

### 3.3 Herstellung der Probekörper

Abweichend vom vorgesehenen Arbeitsplan wurden die im Rahmen des Projektes untersuchten Probekörper alle am **ift** Rosenheim hergestellt.

Hierzu wurden von den Projektpartnern Abschnitte der zu untersuchenden Abstandhalter ans **ift** Rosenheim angeliefert. Die Abstandhalter waren hierbei für einen Scheibenzwischenraum von  $d_{\text{SZR}} = 16 \text{ mm}$  ausgelegt. Die Abstandhalter wurden zwischen zwei Glasplatten der Dicke  $d_g = 4 \text{ mm}$  gebettet. Die Klebung der Abstandhalter auf die Glasplatten wurde zum einen mit Hilfe von doppelseitigem Klebeband durchgeführt. Hierfür wurde das Klebeband Typ DC 378 FG der Fa. Lohmann verwendet. Ebenso wurde für die Verbindung Glas/Abstandhalter eine Klebung mit Butyl getestet. Hierfür wurden sowohl Butylfelle (sehr dünne

Platten aus Butyl) als auch Butylschnur verwendet. Bei der Verwendung von Butyl wurden die vorgefertigten Probekörper auf ca. 75 °C–80 °C erwärmt und anschließend mit einer Kraft von ca. 1.500 N auf eine Dicke  $d_{ges}$  von ca. 24 mm verpresst. Ein schematischer Probekörperquerschnitt ist in Abbildung 3 dargestellt.



**Abbildung 3** Querschnitt durch einen Probekörper

In der Stufe 1 wurden insgesamt 92 Probekörper unterschiedlicher Abmessungen hergestellt.

Für alle Messungen der Stufe 1 bis auf die Messungen zum Vergleich der „Verklebung der Abstandhalter“ wurden ausschließlich Probekörper verwendet, die mit doppelseitigem Klebeband hergestellt wurden.

### 3.4 Durchführung der Messung, Auswertung der Messergebnisse

An den hergestellten Probekörpern wurde der Wärmedurchlasswiderstand  $R_{ges}$  nach bzw. in Anlehnung an EN 12664 [2] ermittelt. Die Messungen wurden bei einer mittleren Temperatur der Probe von  $(10 \pm 0,5)^\circ\text{C}$  durchgeführt.

Der Wärmedurchlasswiderstand der gesamten Probe  $R_{ges}$  ergibt sich bei Verwendung einer Plattenapparatur wie folgt:

$$R_{ges} = \frac{A \cdot (T_1 - T_2)}{\Phi} \quad (1)$$



Mit

- $\Phi$  Mittlere Leistung in W, die der Heizplatte zugeführt wird.
- $A$  Messfläche in  $m^2$  (bei einer Zweiplattenapparatur 2 x die Fläche der Heizplatte)
- $T_1$  mittlere Temperatur der Warmseite der Probe in K
- $T_2$  mittlere Temperatur der Kaltseite der Probe in K

Aus dem gemessenen Wärmedurchlasswiderstand  $R_{ges}$  wurde der äquivalente Wärmedurchlasswiderstand der Abstandhalter  $R_{eq}$  wie folgt berechnet.

$$R_{eq} = R_{ges} - R_g \quad (2)$$

Der zur Berechnung benötigte Wärmedurchlasswiderstand der beiden Glasscheiben  $R_g$  wurde entsprechend Tabelle 4 verwendet. Hierbei wurde für Floatglas eine Wärmeleitfähigkeit von  $\lambda = 1 \text{ W/(m K)}$  angenommen. Die reale Dicke von Floatglas  $d_g$  bei einer nominellen Dicke von 4 mm beträgt 3,8 mm.

**Tabelle 4** Wärmedurchlasswiderstand beider Glasscheiben  $R_g$

Verwendetes Glas im Probekörper	Wärmedurchlasswiderstand beider Glasscheiben $R_g$ in ( $m^2K/W$ )
2 x 4 mm	0,0076

Die äquivalente Wärmeleitfähigkeit des Abstandhalters ergibt sich zu:

$$\lambda_{eq} = \frac{d_{SZR}}{R_{eq}} \quad (3)$$

Die Dicke des Scheibenzwischenraums  $d_{SZR}$  ergibt sich hierbei aus der ermittelten Gesamtdicke des Probekörper  $d_{ges}$  minus der Dicke der Glasplatten  $d_g$ .

$$d_{SZR} = d_{ges} - 2 \cdot d_g \quad (4)$$

Geht man davon aus, dass bei der Ermittlung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit im Wesentlichen der gemessene Wärmedurchlasswiderstand  $R_{ges}$  sowie die Gesamtdicke des Probekörpers  $d_{ges}$  die fehlerbehafteten Größen sind, so ergibt sich der Fehler der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit  $\Delta\lambda_{eq}$  entsprechend dem Gauß'schen Fehlerfortpflanzungsgesetz zu

$$\begin{aligned} \Delta\lambda_{eq} &= \sqrt{\left(\frac{\partial\lambda_{eq}}{\partial R_{ges}} \Delta R_{ges}\right)^2 + \left(\frac{\partial\lambda_{eq}}{\partial d_{ges}} \Delta d_{ges}\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{-(d_{ges} - 2 \cdot d_g)}{(R_{ges} - R_g)^2} \Delta R_{ges}\right)^2 + \left(\frac{(R_{ges} - R_g)}{(R_{ges} - R_g)^2} \Delta d_{ges}\right)^2} \end{aligned} \quad (5)$$

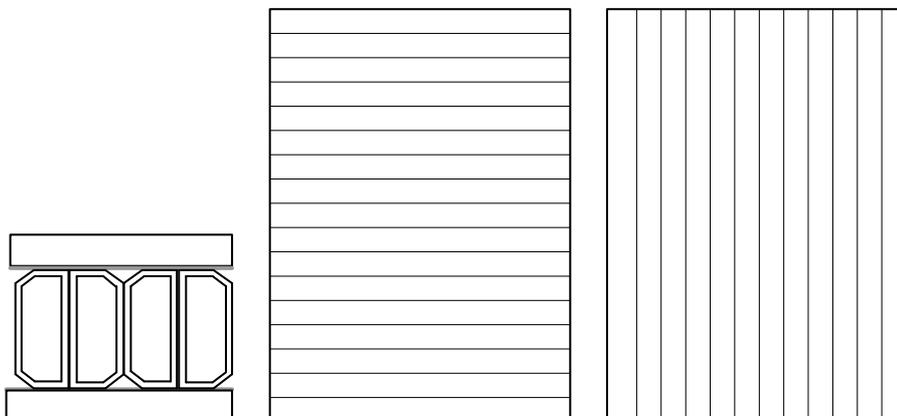
Nimmt man für die Ermittlung der Dicke des Probekörpers ein Fehler von  $\Delta d_{ges} = 0,1 \text{ mm}$  sowie für den gemessenen Wärmedurchlasswiderstand einen relativen Fehler von  $\Delta R_{ges}/R_{ges} = 5\text{-}6\%$  an, so ergibt sich ein relativer Fehler der ermittelten äquivalenten Wärmeleitfähigkeit von  $\Delta\lambda_{eq}/\lambda_{eq} = 8\text{-}9\%$ .

### 3.5 Durchgeführte Untersuchungen und Ergebnisse

#### 3.5.1 Einfluss der Orientierung von Hohlprofilen

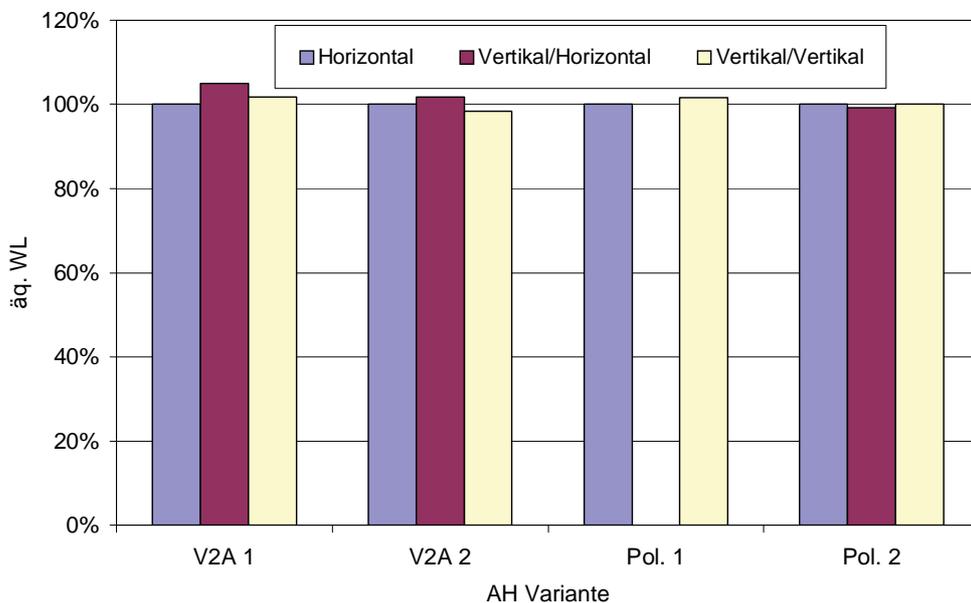
Es sollte untersucht werden, welchen Einfluss die Orientierung von Abstandhaltern aus Hohlprofilen auf die äquivalente Wärmeleitfähigkeit hat, wenn diese Hohlprofile nicht mit Trocknungsmittel gefüllt sind. Hierbei sind drei Einbausituationen zu unterscheiden:

1. Horizontaler Einbau der Hohlprofile
2. Vertikaler Einbau der Hohlprofile, die Hohlprofile selbst sind in der vertikalen Ebene horizontal ausgerichtet
3. Vertikaler Einbau der Hohlprofile, die Hohlprofile selbst sind in der vertikalen Ebene vertikal ausgerichtet



**Abbildung 4** Darstellung der unterschiedlichen Orientierung von Abstandhalter Hohlprofilen

Für die drei Orientierungen wurden Messungen an zwei Hohlprofilen aus Edelstahl sowie zwei Hohlprofilen aus Polymeren durchgeführt. Die ermittelten Ergebnisse sind in Abbildung 5 dargestellt. Aufgetragen ist die äq. Wärmeleitfähigkeit der untersuchten Abstandhaltervarianten (ohne Trocknungsmittel) in Abhängigkeit der Orientierung. Hierbei wurde die äq. Wärmeleitfähigkeit jeder Variante in horizontaler Orientierung auf 100% gesetzt.



**Abbildung 5** Relative äq. Wärmeleitfähigkeit der untersuchten Abstandhalter (ohne Trocknungsmittel) in Abhängigkeit der Orientierung

Es ist zu erkennen, dass kein signifikanter Einfluss der äq. Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Orientierung festzustellen ist. Die ermittelten Streuungen liegen alle im Rahmen der Messunsicherheit. Ebenso kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass für Abstandhalterhohlprofile, die mit Trocknungsmittel gefüllt sind, keine Abhängigkeit der äq. Wärmeleitfähigkeit von der Orientierung vorhanden sein sollte.

### 3.5.2 Einfluss Trocknungsmittel und Feuchte des Trocknungsmittels

Ziel der Untersuchungen war es festzustellen

- welchen Einfluss die Feuchtigkeit des Trocknungsmittels auf die äq. Wärmeleitfähigkeit hat sowie
- die Größe des Einflusses auf die äq. Wärmeleitfähigkeit bei Füllung bzw. Nichtfüllung des Abstandhalterhohlprofils mit Trocknungsmittel.

Um die Untersuchungen durchzuführen, wurden bei den hergestellten Probekörpern die Hohlprofile mit Trocknungsmittel gefüllt. Hierzu wurde sowohl trockenes als aufgefuchtetes Trocknungsmittel eingesetzt. Um das Trocknungsmittel aufzufuchten, wurde dieses vor dem Einfüllen in die Hohlprofile zuerst über einen Zeitraum von 15 Tagen bei 20 °C/95%rH und anschließend nochmals für drei Tage bei 20°C/50%rH gelagert.

Vom Abstandhalter mit integriertem Trocknungsmittel wurden „Stränge“ mit einer Länge von ca. 200 mm von einer Rolle abgetrennt. Diese Stränge wurden ebenfalls für einen Zeitraum von 15 Tagen bei 20°C/95%rH und anschließend nochmals für drei Tage bei 20°C/50%rH gelagert.

Für sowohl das „trockene“ als auch aufgefuchtete Trocknungsmittel sowie für den trockenen als auch aufgefuchteten Abstandhalter mit integriertem Trocknungsmittel wurden die Beladungen entsprechend EN 1279-2 [4] ermittelt. Die gemessenen Beladungen können Tabelle 5 entnommen werden.

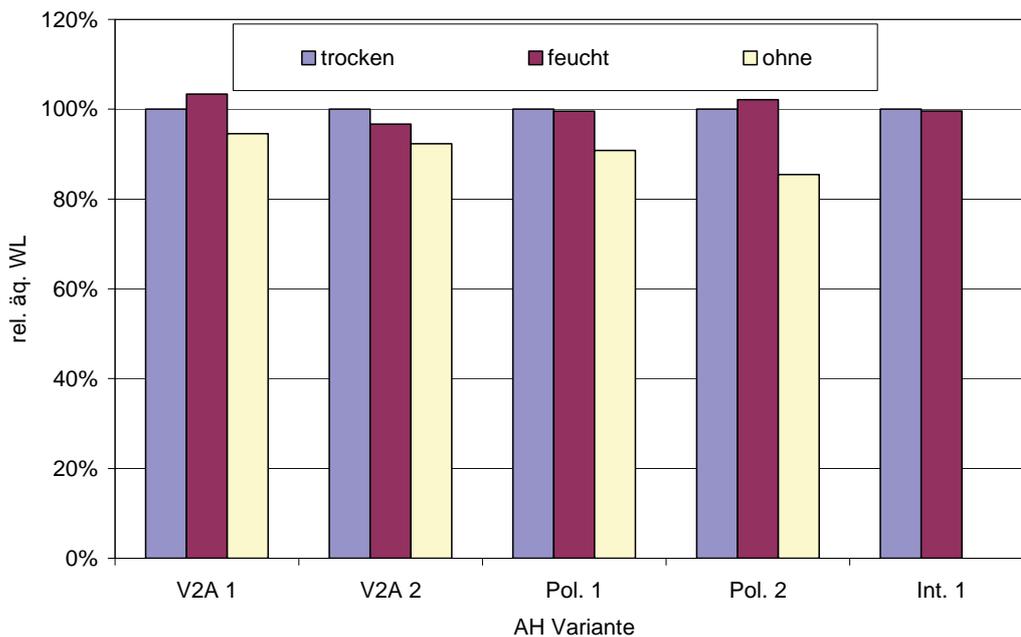
**Tabelle 5** Am Trocknungsmittel bzw. Abstandhalter mit integr. Trocknungsmittel ermittelte Beladungen

	Ermittelte Beladung	
	trocken	feucht
Trocknungsmittel	≈ 2,0%	≈ 20,8%
AH mit integr. Trockn.	≈ 1,5%	≈ 9,6%

Nach dem Herstellen der Probekörper (inkl. Befüllung mit Trocknungsmittel) wurden die Probekörper paarweise in Beutel aus metallbeschichteter Folie eingeschweißt, um ein Aufweichen der „trockenen“ Probekörper sowie weitere Einflüsse bei den aufgefuchteten Probekörpern auszuschließen.

An den Probekörpern mit trockenem und feuchtem Trocknungsmittel wurde der Wärmedurchlasswiderstand gemessen. Zusätzlich wurde der Wärmedurchlasswiderstand an Abstandhalterhohlprofilen ohne Trocknungsmittel gemessen. Die Messungen wurden alle von einer Messstelle durchgeführt, um Einflüsse auf die Ergebnisse aufgrund von Abweichungen unterschiedlicher Messstellen auszuschließen. Aus den gemessenen Wärmedurchlasswiderständen wurden die entsprechenden äq. Wärmeleitfähigkeiten berechnet. Abbildung 6 stellt die relativen äq. Wärmeleitfähigkeiten grafisch dar.

Hierbei wurde die äq. Wärmeleitfähigkeit jeder Abstandhaltervariante für trockenes Trocknungsmittel auf 100% gesetzt. Die äq. Wärmeleitfähigkeit für „ohne Trocknungsmittel“ sind für die Hohlprofile (V2A 1, V2A 1, Pol. 1, Pol. 2) zusätzlich mit aufgeführt.



**Abbildung 6** Relative äq. Wärmeleitfähigkeit der untersuchten Abstandhalter in Abhängigkeit des Trocknungsmittels (trocken, feucht, ohne)

Die dargestellten Werte belegen, dass die Feuchtigkeit des Trocknungsmittels keinen signifikanten Einfluss auf die äq. Wärmeleitfähigkeit der untersuchten Abstandhalter hat. Für alle fünf untersuchten Abstandhaltersysteme kann im Rahmen der Messgenauigkeit kein Unterschied in der Wärmeleitfähigkeit zwischen einem „trockenen“ und einem „feuchten“ festgestellt werden.

Bei den untersuchten Hohlprofilen, die kein Trocknungsmittel enthalten wurde festgestellt, dass die äq. Wärmeleitfähigkeit der Systeme ohne Trocknungsmittel niedriger ist, als für die identischen Systeme mit Trocknungsmittelfüllung. Der Unterschied in der äq. Wärmeleitfähigkeit ist umso größer, je geringer die äq. Wärmeleitfähigkeit des Abstandhaltersystems ist. So beträgt der Unterschied beim untersuchten System V2A 1 ca. 5%, beim System Pol. 2 hingegen ca. 15%.

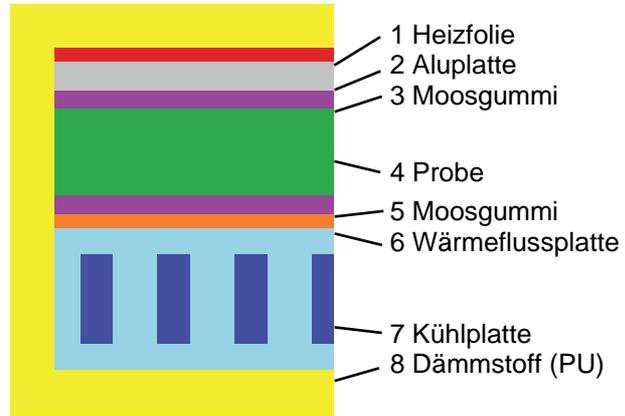
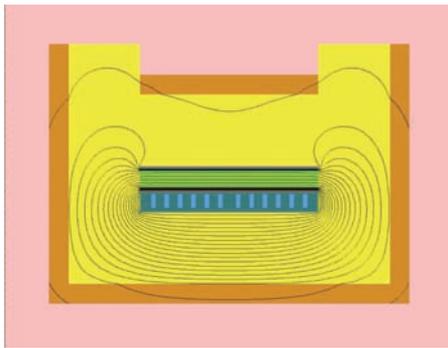
### 3.5.3 Untersuchungen zur Reproduzierbarkeit

Die Untersuchungen zur Reproduzierbarkeit wurden von der Hochschule Rosenheim durchgeführt. Hierzu wurde eine Einplattenapparatur nach DIN EN 12664 aufgebaut. Die Messungen erfolgten an je 11 Probekörpern. Für die Untersuchungen wurden sowohl ein Abstandhaltersystem (Hohlprofil) aus Edelstahl als auch ein polymeres Abstandhaltersystem (Hohlprofil) mit Diffusionssperre aus Metall betrachtet.

Der Probekörper mit Abmessung 200 x 200 mm<sup>2</sup> wird zwischen einer Kühl- und einer Heizplatte eingebaut. Aufgrund der konstanten Temperaturdifferenz stellt sich ein stationärer Wärmestrom durch die Probe ein und erlaubt die Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes der Probe.

Abbildung 7 zeigt den schematischen Aufbau der Messanordnung. Die Probe liegt zwischen einer geheizten und einer gekühlten Platte. Der Wärmestrom durch die Probe wird einerseits über die elektrische Heizleistung andererseits über eine Wärmeflussplatte ermittelt. Die Temperaturdifferenz zwischen der kalten und der warmen Probenoberfläche wird mit dünnen Thermoelementen gemessen, siehe Abbildung 8. Abbildung 9 zeigt die betriebsbereite Apparatur. Die beiden Schläuche auf der rechten Seite verbinden den Kryostaten mit der Kühlplatte. Die Verkabelung dient zum Heizen der Heizplatte und zur Messung der Temperatur der Probenoberfläche.

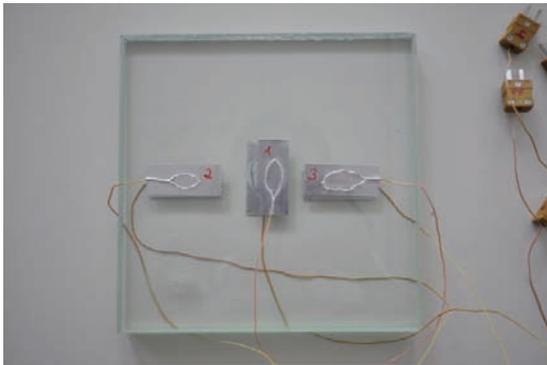
Äquivalente Wärmeleitfähigkeit Warme Kante  
Untersuchungen Stufe 1



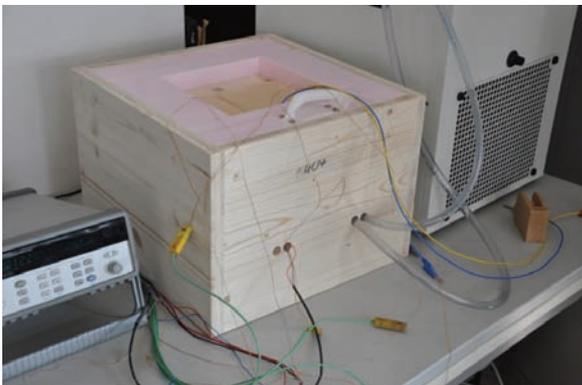
Schnitt durch den Messaufbau mit berechnetem Isothermenverlauf

Schichtaufbau der Versuchsanordnung

**Abbildung 7** Prinzipieller Aufbau des Plattengerätes der Hochschule Rosenheim



**Abbildung 8** Referenz-Probe mit Thermoelementen



**Abbildung 9** Messaufbau Plattengerät mit eingebautem Probekörper

Aus der Messung von Spannung und Strom der Heizfolie ergibt sich die elektrische Leistung an der Heizplatte. Diese elektrische Leistung fließt im Wesentlichen durch den Probekörper zur Kühlplatte. Ein geringer Teil fließt jedoch in den Raum bzw. über Nebenwege zur Kühlplatte. Diese Anteile werden mit Hilfe von 3D- Wärmestromberechnungen abgeschätzt und korrigiert.

Für die Wärmestromdichte  $q_p$  durch den Probekörper gilt dann:

$$P_{el.} = U \cdot I \quad q_p = \frac{U \cdot I - P_{kor.}}{A_p} \quad (6)$$

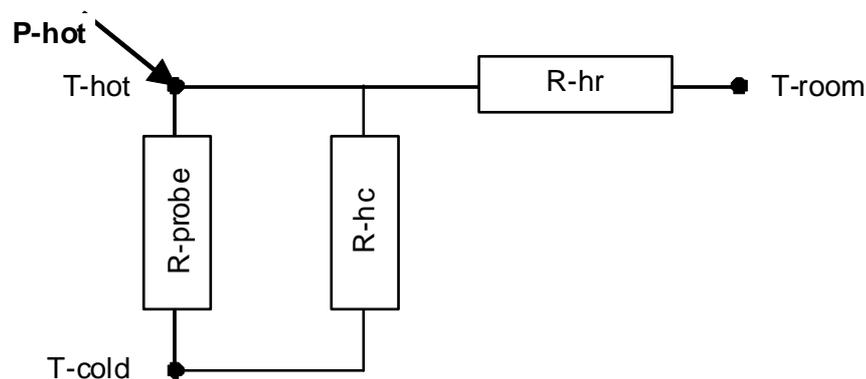
dabei ist

$U \cdot I$  die elektrische Leistung der Heizfolie in W

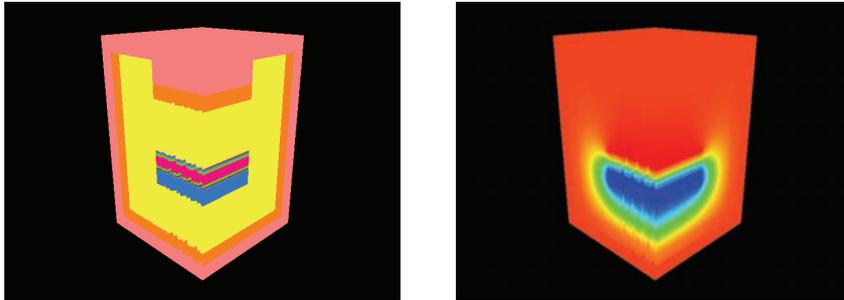
$P_{kor.}$  die Leistungskorrektur in W

$A_p$  die Fläche der Probe in  $m^2$ .

Zur Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes der Probe  $R_p$  werden die elektrische Heizleistung  $P_{hot}$  und die Temperaturen gemessen. Zur Abschätzung der parasitären Wärmeströme von der Heizplatte zum Raum und über Nebenwege zur Kühlplatte werden beide Ströme durch Widerstände  $R_{hr}$  und  $R_{hc}$  und die entsprechenden Temperaturdifferenzen ausgedrückt, siehe hierzu Abbildung 10.



**Abbildung 10** Schematischer Schaltplan zur Berücksichtigung der parasitären Wärmeströme



**Abbildung 11** 3D-Berechnung der Wärmeströme.  
Links: 1/4-Modell der Prüfvorrichtung  
Rechts: Temperaturdarstellung bei kalter Kühlplatte mit 0 °C sowie Temperatur Heizplatte und Raum von jeweils 20 °C

Die parasitären Wärmestrom-Widerstände wurden mit Hilfe einer 3D-Wärmestromberechnung bestimmt:

$$R_{-hc} = 0,006 \text{ W/K}$$

$$R_{-hr} = 0,030 \text{ W/K}$$

Die Korrektur ergibt sich somit zu:

$$P_{kor} = R_{hr} \cdot (T_{hot} - T_{room}) + R_{hc} \cdot (T_{hot} - T_{cold}) \quad (7)$$

Bezeichnungen siehe Abbildung 10

Um die Korrektur des Wärmestroms möglichst gering zu halten wird bei der Messung die Temperatur der Heizplatte an die Raumtemperatur angeglichen. Die Korrektur bleibt so jeweils kleiner 5% und liegt bei typisch 3% des Gesamtwärmestromes.

Abbildung 12 zeigt die verwendete Wärmeflussplatte. Die Größe entspricht der Probengröße von 200 x 200 mm<sup>2</sup> und überdeckt damit die Probe vollständig. Der Einbau erfolgte zwischen Probe und Kühlplatte,

Die Wärmeflussplatte liefert ein zum Wärmestrom bzw. zur Wärmestromdichte proportionales Spannungssignal in der Größenordnung von mV. In einer vorab durchgeführten Messreihe wurde die Wärmeflussplatte kalibriert. Das Ergebnis zeigt Abbildung 13.

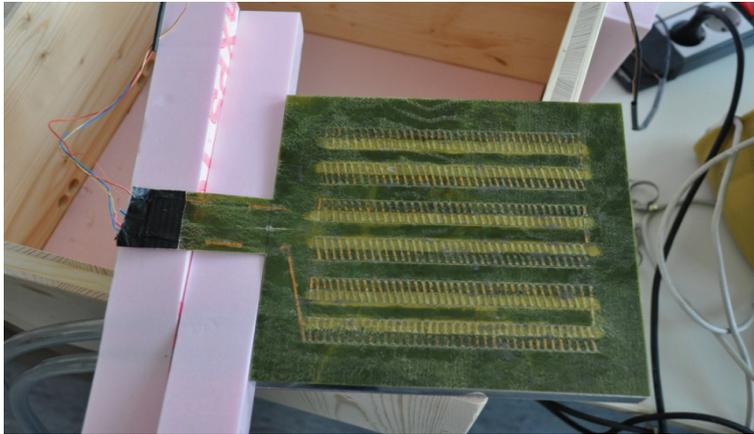


Abbildung 12 Wärmeflussplatte 200 x 200 mm<sup>2</sup>

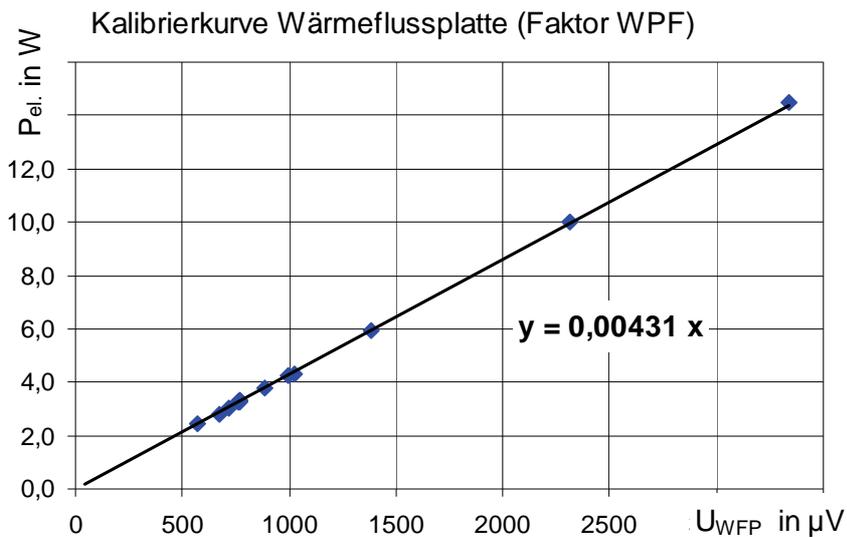


Abbildung 13 Kalibriergerade der Wärmeflussplatte

Der Wärmedurchlasswiderstand des Probekörpers ergibt sich mit Hilfe der an den Probekörperoberflächen gemessenen Temperaturdifferenz und der gemessenen Wärmestromdichte:

$$P_{el.} = U \cdot I \quad R_p = \frac{T_{S,hot} - T_{S,cool}}{q_p} \quad (8)$$



Die Wärmeleitfähigkeit des Materials zwischen den Glasplatten des Probekörpers ergibt sich dann entsprechend Kapitel 3.4.

In Tabelle 6 sind die bei den einzelnen Messungen ermittelten relativen Wärmeleitfähigkeiten dargestellt. Die angegebenen Werte beziehen sich hierbei auf den Mittelwert der jeweils 11 Messungen.

**Tabelle 6** Relative Wärmeleitfähigkeiten der einzelnen Messungen der beiden untersuchten Abstandhaltersysteme.

Nr.	Relative Wärmeleitfähigkeit bezogen auf den Mittelwert der je 11 Probekörper	
	Abstandhalter Edelstahl	Abstandhalter Polymer mit Diffusionsbarriere
1	100,3%	99,8%
2	97,5%	101,5%
3	108,1%	100,6%
4	103,4%	99,8%
5	101,9%	100,6%
6	100,6%	99,8%
7	101,9%	99,8%
8	90,7%	98,9%
9	100,6%	99,8%
10	99,0%	99,8%
11	96,2%	99,8%

Aus den dargestellten Werten sowie zeigt sich, dass für Systeme mit höherer Wärmeleitfähigkeit (Edelstahl) mit einer höheren Standardabweichung zu rechnen ist, als für Systeme mit einer geringeren Wärmeleitfähigkeit (polymere System). Die relative Standardabweichung aus den Messreihen beträgt für

- das Abstandhaltersystem aus Edelstahl 4,3% und für
- das polymere Abstandhaltersystem 0,7 %.

### 3.5.4 Round Robin-Test

Ziel des Ringversuches war es, die Streuung der äq. Wärmeleitfähigkeit zu ermitteln, wenn der Wärmedurchlasswiderstand von Abstandhaltersystemen von unterschiedlichen Messstellen ermittelt wird.

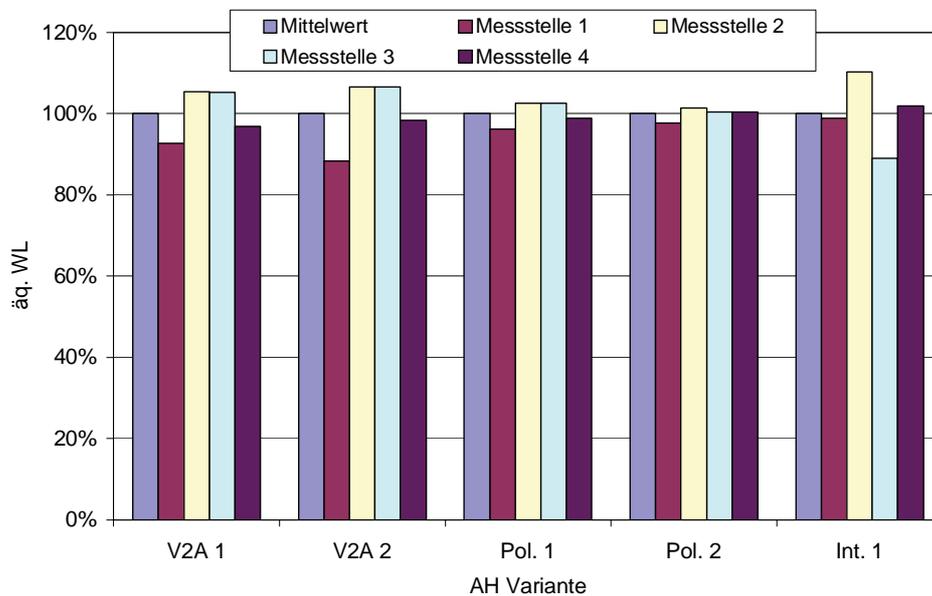
Im Rahmen des Ringversuches nahmen folgende Institutionen an der Messung teil:

- Bayerisches Zentrum für angewandte Energieforschung, ZAE Würzburg
- Forschungsinstitut für Wärmeschutz, FIW München
- Hochschule für angewandte Wissenschaften, Rosenheim
- **ift** Rosenheim

Da bei den teilnehmenden Institutionen keine einheitlichen Probekörperabmessungen vermessen werden konnten, wurde für jeden Teilnehmer des Ringversuches ein separater Probekörpersatz hergestellt. Dies hatte auch den Vorteil, dass die Messungen parallel ablaufen konnten, was einen enormen Zeitvorteil brachte.

Die Abmessungen der Probekörper betragen hierbei 500 mm x 500 mm, 200 mm x 200 mm sowie 150 mm x 150 mm.

Aus den von den unterschiedlichen Messstellen gemessenen Wärmedurchlasswiderständen wurden die äq. Wärmeleitfähigkeiten berechnet. Abbildung 14 stellt die entsprechenden Ergebnisse für die fünf untersuchten Abstandhaltersysteme dar.



**Abbildung 14** Relative äq. Wärmeleitfähigkeit der untersuchten Abstandhalter, ermittelt im Rahmen des Rundversuches an 4 unterschiedlichen Messstellen

Aufgetragen ist jeweils die relative äq. Wärmeleitfähigkeit eines jeden Abstandhaltersystems der auf Grundlage der Messung an der jeweiligen Messstelle (1 bis 4) ermittelt wurde. Die jeweiligen Werte in Abhängigkeit der Messstelle sind auf den Mittelwert der jeweiligen vier Messungen bezogen.

Im Rahmen der durchgeführten Messungen konnte eine gute Übereinstimmung festgestellt werden. So variieren die Einzelergebnisse der Messstellen in einem Intervall von ca.  $\pm 10\%$  um den zugehörigen Mittelwert.

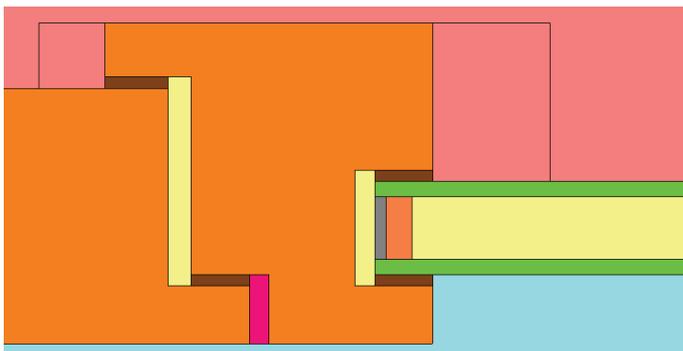
Es zeigt sich auch, dass für Abstandhaltersysteme mit geringer äq. Wärmeleitfähigkeit, geringere Streuungen der einzelnen Messstellen zu verzeichnen sind. Dies ist theoretisch auch plausibel, da bei Messungen mit der Plattenapparatur bei Probekörpern mit geringerer Wärmeleitfähigkeit einfacher eine höhere Temperaturdifferenz aufgeprägt werden kann (bei im Vergleich zu Probekörpern mit höherer Wärmeleitfähigkeit geringerer Heizleistung).

So haben die beiden untersuchten Abstandhalter aus Edelstahl (V2A1 und V2A2) eine deutlich größere Streuung als die beiden „polymeren“ Abstandhalter (Pol.1 und Pol. 2). Der Abstandhalter mit integriertem Trocknungsmittel (Int. 1) zeigt entsprechend Abbildung 14 jedoch wieder eine größere Streuung. Dies würde den

oben gemachten Ausführungen widersprechen. Es zeigt sich jedoch, dass im speziellen die Messergebnisse der Messstelle 2 und Messstelle 3 starke Unterschiede aufweisen. Bei den Messungen der vier anderen Systeme zeigten die Messergebnisse der Messstelle 2 und der Messstelle 4 jedoch eine hervorragende Übereinstimmung. Daraus könnte geschlossen werden, dass die Unterschiede zwischen Messstelle 2 und Messstelle 4 bei der Messung von Int. 1 durch einen Messausreißer begründen sein könnten. Im Rahmen der Untersuchungen der Stufe 1 wurden hierzu jedoch keine weiteren Analysen durchgeführt.

Aus dem durchgeführten Rundversuch konnte geschlossen werden, dass die Messgenauigkeit bei der Ermittlung der äq. Wärmeleitfähigkeit von wärmetechnisch verbesserten Abstandhaltern eine Unsicherheit von ca.  $\pm 10 - 15\%$  angenommen werden kann.

Um die Auswirkung der Unsicherheit der äq. Wärmeleitfähigkeit auf den linearen Wärmedurchgangskoeffizienten  $\Psi$  zu ermitteln, wurden vergleichende Berechnungen nach **ift** Richtlinie WA-08/1 [3] an dem Rahmenprofil aus Holz durchgeführt. Die Berechnungen wurden hierbei mit dem sog. „Two-Box“-Modell durchgeführt, welche auch in der Richtlinie beschrieben ist. Abbildung 15 zeigt das entsprechende Simulationsmodell.



**Abbildung 15** Simulationsmodell des Rahmenprofils aus Holz zur Ermittlung des linearen Wärmedurchgangskoeffizienten  $\Psi$  nach **ift**-Richtlinie WA-08/1

Die Berechnung wurde für unterschiedliche äq. Wärmeleitfähigkeiten von  $0,10 \text{ W/(m K)}$  bis  $0,70 \text{ W/(m K)}$  durchgeführt. Hierbei wurde die im Modell angenommene Wärmeleitfähigkeit um den Mittelwert mit  $10\%$  variiert. Die entsprechend verwendeten Wärmeleitfähigkeiten können Tabelle 7, die korrespondierenden  $\Psi$ -Werte Tabelle 8 entnommen werden.



**Tabelle 7** In der Berechnung angesetzte Wärmeleitfähigkeiten in W/(m K) zur Berechnung des Einflusses der Ungenauigkeit der äq. Wärmeleitfähigkeit unter der Annahme von  $\Delta\lambda/\lambda = 10\%$  auf den linearen Wärmedurchgangskoeffizient  $\Psi$ .

$\lambda - \Delta\lambda$	0,09	0,27	0,45	0,63
$\lambda$	<b>0,10</b>	<b>0,30</b>	<b>0,50</b>	<b>0,70</b>
$\lambda + \Delta\lambda$	0,11	0,33	0,55	0,77

**Tabelle 8** Nach WA-08/1 für das Holzprofil berechnete linearen Wärmedurchgangskoeffizient  $\Psi$  in W/(m K) unter Verwendung der Wärmeleitfähigkeiten entsprechend Tabelle 7.

$\Psi(\lambda-\Delta\lambda)$	0,027	0,038	0,045	0,050
$\Psi(\lambda)$	<b>0,028</b>	<b>0,039</b>	<b>0,046</b>	<b>0,051</b>
$\Psi(\lambda+\Delta\lambda)$	0,029	0,040	0,048	0,052

Es zeigt sich, dass eine vorhandene Ungenauigkeit von  $\Delta\lambda/\lambda = \pm 10\%$  bei der messtechnischen Ermittlung der äq. Wärmeleitfähigkeit zu einer Ungenauigkeit bei der Berechnung des  $\Psi$ -Wertes von  $\Delta\Psi = \pm 0,001$  W/(m K) führt.

### 3.5.5 Untersuchungen zur Klebung der Abstandhalter auf die Glasplatten

Bereits im Rahmen der in Kapitel 1 angesprochenen internen Untersuchungen wurden zwei unterschiedliche Möglichkeiten zur Befestigung der Abstandhalter auf den Glasplatten getestet.

1. Verwendung eines doppelseitigen Klebebandes mit einer Dicke von ca. 0,2 mm
2. Verwendung von Butyl, mit dem die Abstandhalter auf den Glasplatten „geklebt“ werden.

Für die Verwendung von doppelseitigem Klebeband zur Herstellung der Probekörper sprechen viele Vorteile wie die einfache und schnelle sowie reproduzierbare Herstellung der Probekörper. Ein Verpressen der Probekörper in einer speziellen Presse ist nicht notwendig. Durch die Verwendung von transparenten Klebebändern ist auch nach der Herstellung der Probekörper eine visuelle Kontrolle möglich.

Für die Verwendung von Butyl spräche, dass hiermit der realistischere „Nachbau“ eines Randverbundes erreicht werden könnte. Die Herstellung der Probekörper ist jedoch aufwändig und langwierig. Die Probekörper müssen im Herstellprozess verpresst werden. Dies führt im Speziellen bei „fragilen“ Systemen zu einer geringeren Reproduzierbarkeit des Probekörpers. Ebenso ist zu beachten, dass speziell bei großen Probekörperabmessungen z.B. 500 mm x 500 mm die Kräfte zum Verpressen eine entsprechende „Vorrichtung“ erfordern.

Im Rahmen der vorab durchgeführten internen Untersuchungen wurden Probekörper im begrenzten Umfang nach den beiden oben angegebenen Verfahren hergestellt. Hierzu wurde zum einen ein transparentes Acryklebeband der Fa. Lohmann (Produktbezeichnung DC 378FG) mit einer Dicke von 0,22 mm eingesetzt. Zur Umsetzung der Butylklebung wurde Butylband mit einem Durchmesser von ca. 1 mm auf die Abstandhalter appliziert. Die Abstandhalter wurden dann auf die Glasplatte aufgelegt und leicht per Hand angepresst. Für die Fertigstellung wurden die Probekörper in einer Zug-/Druckprüfmaschine mit einem Druck von ca. 50 kN/m<sup>2</sup> auf eine Nenndicke von ca. 24 mm verpresst.

Im Rahmen der internen Voruntersuchungen wurden zwei Systeme, ein Edelhohlprofil sowie ein polymeres Hohlprofil vermessen. Die ermittelten Wärmedurchlasswiderstände  $R_{ges}$  sind in Tabelle 9 dargestellt

**Tabelle 9** Im Rahmen der Voruntersuchungen ermittelte Wärmedurchlasswiderstände in Abhängigkeit der Präparation der Probekörper für zwei unterschiedliche AH-Systeme

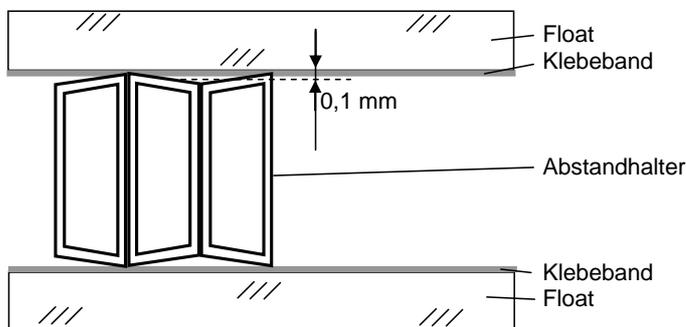
AH-Typ	Wärmedurchlasswiderstand $R_{ges}$ in (m <sup>2</sup> K)/W	
	mit Klebeband	mit Butyl
Edelstahl	0,027	0,019
Polymer	0,107	0,102

Während für das polymere Abstandhalterprofil für beide Präparationsarten ein nahezu identischer Wärmedurchlasswiderstand ermittelt wurde, wurde beim Abstandhalterprofil aus Edelstahl ein deutlicher Unterschied festgestellt. Für den Probekörper, der mit Klebeband hergestellt wurde, ist der gemessene Wärmedurchlasswiderstand  $R_{ges}$  um ca. 40% höher als der für am mit Butyl hergestellten Probekörper. Dies würde in der Konsequenz bedeuten, dass auch die äq. Wärmeleitfähigkeit des Abstandhaltersystems auf Grundlage der Messung mit Klebeband um ca. 40% besser wäre, als auf Grundlage der Messung mit Butyl.

Der festgestellte Unterschied konnte nicht alleine mit den beiden unterschiedlich verwendeten Materialien begründet werden, da sowohl die Materialstärke im Probekörper als auch die Wärmeleitfähigkeiten der beiden Materialien (Butyl, Acrylklebeband) nahezu gleich bzw. sehr ähnlich sind.

Als Grund für die Unterschiede wurden zusätzliche Kontaktwiderstände beim Übergang vom Klebeband auf den Abstandhalter vermutet. Folgende Überlegung soll den Einfluss grob abschätzen.

Kann das Klebeband keine Unebenheit des Abstandhalters ausgleichen, so entstehen beim Übergang vom Klebeband zum Abstandhalter zusätzliche Kontaktwiderstände. Nimmt man z.B. an, dass die Flanken des Abstandhalters nicht planparallel zueinander sind, so sind bei fehlender Elastizität des Klebebandes nur gewisse Bereiche des Abstandhalters geklebt. In Abbildung 16 ist eine solche Situation vereinfacht dargestellt, indem angenommen wird, dass der Abstandhalter nicht die Form eines Rechteckes, sondern eines Trapezes aufweist.



**Abbildung 16** Schematische Darstellung von evtl. Kontaktwiderständen bei der Verwendung von Klebeband

Zur Abschätzung wird vereinfacht angenommen, dass sich hierdurch auf beiden Seiten ein zusätzlicher mittlerer Luftspalt von 0,1 mm ergibt. Bei einer Wärmeleitfähigkeit des Luftspaltes von  $0,025 \text{ W}/(\text{m K})$  ergibt sich ein Kontaktwiderstand von  $0,004 \text{ (m}^2\text{K)}/\text{W}$ , bei insgesamt zwei Luftspalten ein Gesamtwiderstand von  $0,008 \text{ (m}^2\text{K)}/\text{W}$ . Der Widerstand des Abstandhalters kann grob mit  $0,016 \text{ (m}^2\text{K)}/\text{W}$  abgeschätzt werden; hierbei ist eine Höhe von 16 mm sowie eine äq. Wärmeleitfähigkeit von  $1 \text{ W}/(\text{m K})$  zu Grunde gelegt. Der Kontaktwiderstand durch eine nicht vollflächige Verklebung kann also entsprechend obiger Abschätzung in der Größenordnung von 50% des Widerstandes des Abstandhalters selbst liegen.

Um einen solchen möglichen Effekt quantitativ weiter zu analysieren wurden im Rahmen dieses Vorhabens weitere messtechnische Untersuchungen angestellt. Hierzu wurden weitere Probekörper hergestellt, bei denen die Klebung des Abstandhalters mit folgenden Varianten durchgeführt wurde.

1. Acrylklebeband I

transparentes Acrylklebeband mit einer Dicke von ca. 0,2 mm, Hersteller: Lohmann, Produktbezeichnung DC 378FG

2. Acrylklebeband II

transparentes Acrylklebeband mit einer Dicke von ca. 0,5 mm, Hersteller: Lohmann, Produktbezeichnung DuploCOLL<sup>®</sup> CPT 500. Dieses Klebeband wurde gewählt, da es eine größere Dicke aufweist und dadurch evtl. Unebenheiten besser ausgleichen kann. Die Herstellung der Probekörper war hiermit genauso einfach möglich wie mit dem Klebeband I.

3. Butylfelle

Butylmasse, die durch einen Kalandersprozess auf eine gleichmäßige Dicke ausgewalzt ist. Die Fläche des Butylfells ist mindestens so groß wie die Fläche der Glasplatte. Die Butylfelle wurden von einem der Industriepartner hergestellt. Leider hatten die Butylfelle bei der Anlieferung nicht die Dicke von den gewünschten 0,2 mm sondern eine Dicke von ca. 1 mm. Die Herstellung der Probekörper war aufgrund dieser Dicke schwierig. Die Probekörper mussten mit einem hohen Druck verpresst werden. Trotz vorheriger Temperierung der Probekörper vor dem Pressen auf ca. 80 °C konnte die angestrebte Dicke von ca. 0,2 mm für den gesamten Probekörper nicht realisiert werden. Es gelang lediglich eine Dicke von ca. 0,24 mm herzustellen. Aufgrund des hohen Druckes verschoben sich teilweise auch Abstandhalter zwischen den Glasplatten.

4. Butylschnur

Butylschnüre mit einem Durchmesser von ca. 1 mm, die auf den Abstandhalter appliziert wurden. Nach dem Fügen der Glasplatten und der Abstandhalter wurden die Probekörper auf ca. 75 °C erwärmt und mit einem Druck von ca. 50 kN/m<sup>2</sup> verpresst. Wie auch bei den Probekörpern mit Butylfell, war auch hier ein teilweise leichtes Verschieben der Abstandhalter zwischen den Glasplatten nicht ganz zu verhindern. Da der Druck beim Pressen aber deutlich unter dem bei der Herstellung mit Butylfell lag, war dieser Effekt deutlich geringer.

Für die Herstellung der Probekörper wurden die Abstandhaltersysteme aus Edelstahl herangezogen. Grund für die Untersuchungen nur AH-Systeme aus Edelstahl heranzuziehen war, dass aufgrund der höheren äq. Wärmeleitfähigkeit von



AH-Systemen aus Edelstahl ein Effekt, der durch zusätzliche Kontaktwiderstände bedingt ist, deutlicher ist, als bei AH-Systemen aus Polymeren.

Tabelle 10 stellt die auf Grundlage der durchgeführten Messungen ermittelten relativen äq. Wärmeleitfähigkeiten dar. Die äq. Wärmeleitfähigkeit bei Präparation mit Klebeband I wurde hierbei als Referenz herangezogen.

**Tabelle 10** Ermittelte relative äq. Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Präparationsart. Die Präparation mit Klebeband I wurde als Referenz gesetzt.

AH System	Relative äq. Wärmeleitfähigkeit bei Präparation mit			
	Klebeband I	Klebeband II	Butylfell	Butylschnur
V2A 1	100 %	110 %	127 %	136 %
V2A 2	100 %	101 %	111 %	110 %

Die Ergebnisse bestätigen die auch bereits in den Voruntersuchungen gefunden Effekte. Bei Verwendung von Butylschnur zeigen sich höhere äq. Wärmeleitfähigkeiten als bei Verwendung von Klebeband. Besonders deutlich wird der Effekt beim untersuchten System V2A 1. Hier ergibt sich eine fast um 40% höhere äq. Wärmeleitfähigkeit als bei der Verwendung des Klebebandes I. Beim AH-System V2A 2 ist dieser Effekt nicht mehr so deutlich ausgeprägt, hier ist die äq. Wärmeleitfähigkeit um 10% höher. Die Verwendung eines elastischeren Klebebandes zeigt nicht den erhofften Effekt. Zwar werden auch hier in der Messung höhere äq. Wärmeleitfähigkeiten ermittelt; die Werte liegen jedoch immer noch deutlich unteren denen, die mit Butylschnur ermittelt wurden.

An Probekörpern die mit Butylfell hergestellt wurden, wurden ähnliche äq. Wärmeleitfähigkeiten ermittelt wie bei den Probekörpern mit Butylschnur. Aufgrund der Dicke von ca. 1 mm gestaltete sich die Herstellung der Probekörper beim Verpressen jedoch zum Teil sehr schwierig. Ebenso ist zu berücksichtigen, dass Butylfelle nicht „frei“ am Markt verfügbar sind.

Aufgrund der ermittelten Resultate wurde der ursprüngliche Plan, die Probekörper für die Messungen der Stufe 2 mit Klebeband herzustellen, verworfen. Aufgrund der deutlich sichtbaren Effekte auf die äq. Wärmeleitfähigkeit sollen die Probekörper unter Verwendung von Butylband hergestellt werden.

### 3.6 Zusammenfassung

Die Ergebnisse der Untersuchungen der Stufe 1 lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Die Orientierung von Abstandhaltern aus Hohlprofilen hat keinen signifikanten Einfluss auf wärmetechnischen Kenndaten.
2. Der Feuchtegehalt des Trocknungsmittels hat keinen signifikanten Einfluss auf wärmetechnischen Kenndaten des AH-Systems
3. Die äq. Wärmeleitfähigkeiten für AH-Systeme (Hohlprofile) gefüllt mit Trocknungsmittel sind höher als für AH-Systeme (Hohlprofile), die nicht gefüllt sind.
4. Im Rahmen der Ringmessung wurde eine Genauigkeit bei der Ermittlung der äq. Wärmeleitfähigkeit von  $\Delta\lambda/\lambda \approx \pm 10\%$  ermittelt.
5. Eine Ungenauigkeit der äq. Wärmeleitfähigkeit von  $\Delta\lambda/\lambda \approx \pm 10\%$  wirkt sich auf die Ungenauigkeit des linearen Wärmedurchgangskoeffizienten  $\Psi$  mit  $\Delta\Psi \approx \pm 0,001 \text{ W}/(\text{m K})$  aus.
6. Die ursprünglich geplante Vereinfachung, bei der Herstellung der Probekörper Klebebänder einzusetzen musste aufgrund möglicher zusätzlicher thermischer Kontaktwiderstände verworfen werden.

Mit den entsprechenden Erkenntnissen konnte die detaillierte Vorgehensweise zur Ermittlung der äq. Wärmeleitfähigkeit verabschiedet werden.

Das vorgeschlagene Verfahren zur Messung der äq. Wärmeleitfähigkeit von wärmetechnisch verbesserten Abstandhaltern ist im Anhang A explizit beschrieben.

## 4 Untersuchungen Stufe 2

### 4.1 Zielsetzung

Ziel der Untersuchungen Stufe 2 war die Ermittlung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten aller im AK Warme Kante vertretenen Systeme und Vergleich dieser mit denen durch Berechnung ermittelten äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten. Ebenso wurde mit den messtechnisch ermittelten äq. Wärmeleitfähigkeiten der längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizient nach **ift**-Richtlinie WA-08/1 berechnet und mit den bisher veröffentlichten Werten verglichen.

### 4.2 Systeme für Untersuchungen der Stufe 2

Im Rahmen der Untersuchungen Stufe 2 wurden an nachfolgend aufgelisteten Abstandhalter die äquivalente Wärmeleitfähigkeit durch die im Anhang A dargestellte Vorgehensweise ermittelt. Es wurden 14 Systeme untersucht. Hierfür wurden insgesamt 84 Probekörper hergestellt.

**Tabelle 11** Abstandhaltersysteme für die Untersuchungen der Stufe 2

Gruppe	Bezeichnung Abstandhalter	Hersteller
Abstandhalter (Hohlprofil) aus Edelstahl	Allmetall GTS	Allmetall
	WEP Classic	Glaswerke Arnold
	Nirotec 017	Lingemann
	Nirotec 015	
Abstandhalter (Hohlprofil) aus Edelstahl mit Polymer	Nirotec Evo	
Polymerer Abstandhalter (Hohlprofil) mit Diffusionssperre aus Metall	Chromatech	Rolltech
	Chromatech Plus	
	Chromatech Ultra	
	Swisspacer	Swisspacer
	Swisspacer V	
	TGI	Technoform
Thermix TX.N plus	Ensinger	
Abstandhalter mit integriertem Trocknungsmittel	Super Spacer Tri Seal	Edgetech Europe
	Ködispace	Kömmerling



Anmerkungen:

- Das im BF Datenblatt dargestellte System WEP Premium wird entsprechend den Angaben des Herstellers Glaswerke Arnold nicht mehr angeboten. Daher wurde es im Rahmen des Vorhabens nicht untersucht.
- Das Abstandhaltersystem Thermix TX.N plus der Fa. Ensinger ist eine Weiterentwicklung des Systems Thermix TX.N. Im Rahmen des Vorhabens wurde das neue System Thermix TX.N plus untersucht und mit dem alten System Thermix TX.N verglichen.
- Das Abstandhaltersystem Chromatech Ultra der Fa. Rolltech wurde nach Angaben des Herstellers weiterentwickelt und trägt nun den neuen Namen Chromatech Ultra F. Im Rahmen des Vorhabens wurde das modifizierte System des Abstandhalters Chromatech Ultra untersucht und mit den im Datenblatt dargestellten Werten des „alten“ Systems verglichen.
- Das Abstandhaltersystem Nirotech EVO der Fa. Lingemann wurde nach Angaben des Herstellers weiterentwickelt. Im Rahmen des Vorhabens wurde das modifizierte System des Abstandhalters Nirotech EVO untersucht. Für das weiterentwickelte System Nirotech EVO lag zum Zeitpunkt der Berichtserstellung kein Datenblatt vor. Daher wurden die im Rahmen des Forschungsvorhabens ermittelten Werte mit den Werten aus dem **ift** Prüfbericht Nr. 12-000604-PR02 verglichen.

Die Datenblätter des Bundesverbandes Flachglas können unter <http://www.bundesverband-flachglas.de/shop/kostenfreie-downloads/bf-datenblaetter> heruntergeladen werden.

### 4.3 Herstellung der Probekörper

Die für die Ermittlung der äq. Wärmeleitfähigkeit notwendigen Probekörper wurden alle am **ift** Rosenheim hergestellt. Hierzu wurden von den Projektpartnern Abschnitte der zu untersuchenden Abstandhalter ans **ift** Rosenheim angeliefert. Die Abstandhalter waren hierbei für einen Scheibenzwischenraum von  $d_{\text{SZR}} = 16 \text{ mm}$  ausgelegt. Die Abstandhalter wurden zwischen zwei Glasplatten der Dicke  $d_g = 4 \text{ mm}$  gebettet.

Die Klebung der Abstandhalter an die Glasplatten erfolgte hierbei mit Butyl. Hierzu wurde auf die Abstandhalter Butylschnur mit einem Durchmesser von ca. 1 mm aufgebracht; anschließend wurden die Abstandhalter auf die Glasplatten

appliziert. Die so hergestellten Sandwichaufbauten wurden anschließend in einem Ofen auf ca. 80°C erwärmt und mit einer Presse auf die Nenndicke des Isolierglases von ca. 24 mm verpresst.

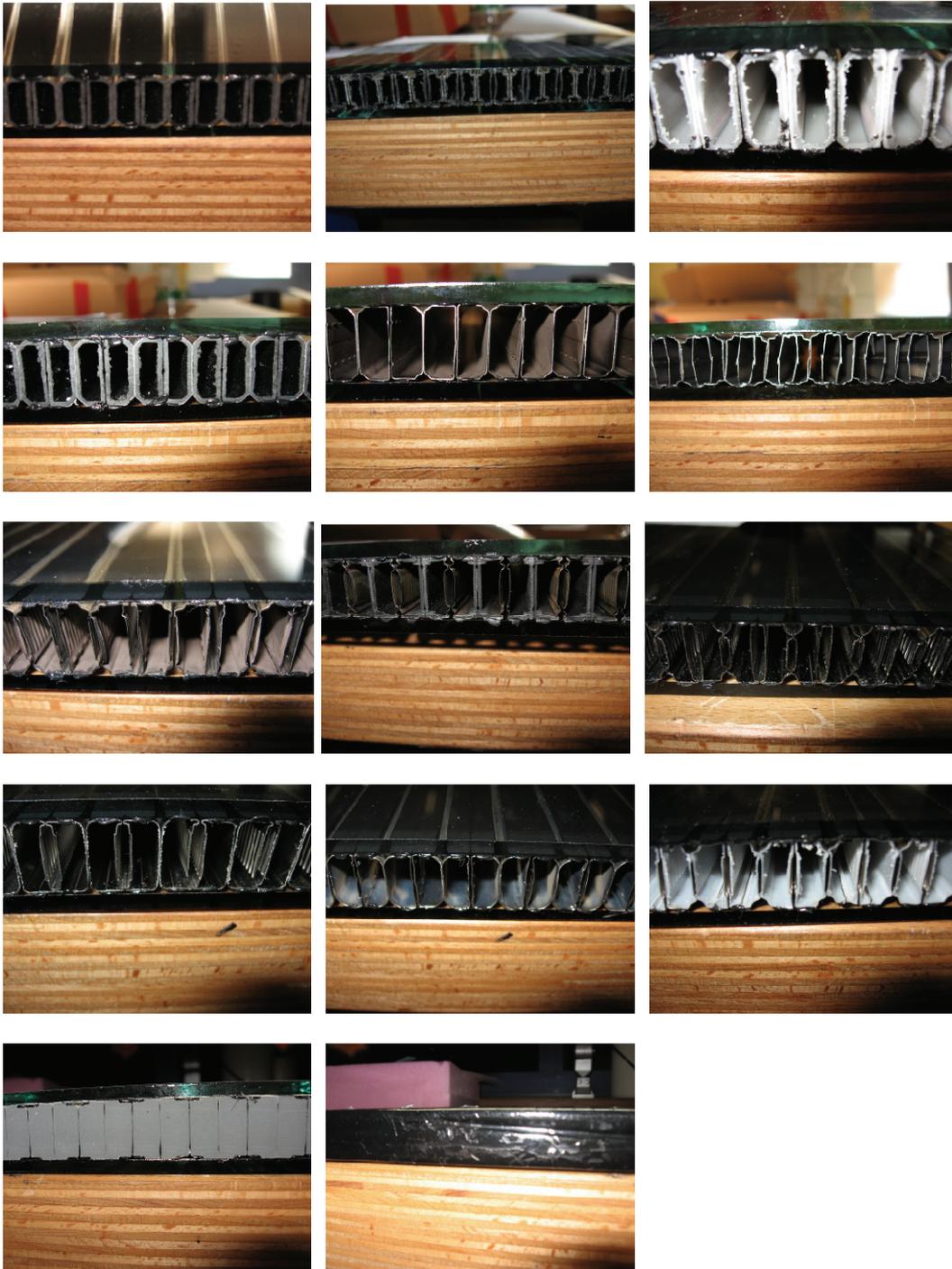
Für die Abstandhalter Systeme Super Spacer Tri Seal sowie TPS wurde hierbei von der oben dargestellten Vorgehensweise abgewichen. Am System Super Spacer Tri Seal ist bereits eine selbstklebende Folie sowie eine Butylierung angebracht. Die Abstandhalter wurden aus diesem Grunde direkt wie vorgesehen auf die Glasplatten aufgeklebt.

Zur Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit des Systems TPS wurden vom Hersteller Platten des Materials mit einer Dicke von ca. 18 mm hergestellt. Die Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit erfolgte direkt an diesen Platten, es wurde kein Sandwichtaufbau hergestellt.

Von jedem AH-System wurden 3 Probekörperpaare der Abmessung 200 mm x 200 mm hergestellt. Die AH-Hohlprofile wurden anschließend mit trockenem Molekularsieb PHONOSORB 551 gefüllt. Alle Probekörper wurden bis zur Messung der Wärmeleitfähigkeit in verschweißten luftdichten Folienbeuteln aufbewahrt.

Die hergestellten Probekörper sind in Abbildung 17 dargestellt. Die Hohlprofile sind hierbei noch nicht mit Trocknungsmittel gefüllt.

Äquivalente Wärmeleitfähigkeit Warme Kante  
Untersuchungen Stufe 2



**Abbildung 17** Fotos der hergestellten Probekörper

#### 4.4 Ermittlung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit

Die Ermittlung der äq. Wärmeleitfähigkeit erfolgte für je drei Probekörperpaare wie bereits in Kapitel 3.4 beschrieben.

Die äquivalente Wärmeleitfähigkeit für das wärmetechnisch verbesserte Abstandhaltersystem  $\lambda_{eq,2B}$  wurde aus den ermittelten Einzelwerten von  $\lambda_{eq}$  auf Grundlage einer statistischen Berechnung entsprechend ISO 10456 [5] Anhang C für eine 90% Fraktile berechnet und entsprechend den Rundungsregeln nach EN ISO 10456 angegeben.

Die Berechnung des  $\lambda_{eq,2B}$ - Wertes entsprechend ISO 10456 Anhang C ist hierbei wie folgt

$$\lambda_{eq,2B} = \bar{\lambda}_{eq} + k_2(n, p, 1 - \alpha) \cdot s \quad (9)$$

Mit

$\bar{\lambda}_{eq}$	Mittelwert der einzelnen gemessenen äq. Wärmeleitfähigkeiten
$k_2(n, p, 1 - \alpha)$	Koeffizient für ein einseitiges Toleranzintervall, für $n = 3$ , $p = 90\%$ und $1 - \alpha = 0,9$ ist $k_2 = 4,26$
$s$	Standardabweichung der einzelnen gemessenen äq. Wärmeleitfähigkeiten

Beispiel:

Es wurden folgende drei Wärmeleitfähigkeiten ermittelt:

$$\lambda_{eq,1} = 0,676 \text{ W/(m K)}, \lambda_{eq,2} = 0,683 \text{ W/(m K)}, \lambda_{eq,3} = 0,678 \text{ W/(m K)}$$

Hieraus ergibt sich der Mittelwert der Wärmeleitfähigkeit  $\bar{\lambda}_{eq}$  und die Standardabweichung  $s$  zu

$$\bar{\lambda}_{eq} = 0,679 \text{ W/(m K)} \quad s = 0,004 \text{ W/(m K)}$$

Mit  $k_2 = 4,26$  und unter Beachtung der Rundungsregeln nach ISO 10456 ergibt sich

$$\begin{aligned} \lambda_{eq,2B} &= 0,679 \text{ W/(m K)} + 4,26 \times 0,004 \text{ W/(m K)} = 0,695 \text{ W/(m K)} \\ &= 0,70 \text{ W/(m K)} \end{aligned}$$



#### 4.5 Einfluss auf den linearen Wärmedurchgangskoeffizienten $\Psi$

Mit der entsprechend 4.4 ermittelten äquivalenten Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{\text{eq},2B}$  wurden die repräsentativen linearen Wärmedurchgangskoeffizienten  $\Psi$  jedes untersuchten Abstandhaltersystems berechnet. Die Berechnung wurde hierbei nach **ift**-Richtlinie WA-08/1 „*Wärmetechnisch verbesserte Abstandhalter Teil 1 Ermittlung des repräsentativen  $\Psi$ -Wertes für Fensterrahmenprofile*“ durchgeführt.

Abweichend zur Richtlinie wurden für die Berechnungen der repräsentativen linearen Wärmedurchgangskoeffizienten  $\Psi$  für 2-fach und 3-fach Isolierglasaufbauten dieselben Wärmeleitfähigkeiten  $\lambda_{\text{eq},2B}$  zugrunde gelegt.

#### 4.6 Ergebnisse

Tabelle 11 stellt die für die untersuchten AH-Systeme ermittelten relativen Ergebnisse dar.

## Äquivalente Wärmeleitfähigkeit Warme Kante

### Untersuchungen Stufe 2



**Tabelle 11** Darstellung der im Rahmen des Vorhabens ermittelten rel. äq. Wärmeleitfähigkeit und den entsprechenden Unterschiede im  $\psi$ -Wert

System	Rel. äq. Wärmeleitfähigkeit	$\Delta\psi$ -Wert in W/(m K)													
		2-fach MIG							3-fach MIG						
		Alu	Holz-Alu	Holz	PVC	Alu	Holz-Alu	Holz	PVC	Alu	Holz-Alu	Holz	PVC		
1	88%	-0,002	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001	-0,002	-0,001	-0,002	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001
2	97%	-0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
3	82%	-0,004	-0,003	-0,002	-0,002	-0,002	-0,002	-0,004	-0,002	-0,004	-0,003	-0,002	-0,002	-0,002	0,000
4	124%	0,005	0,003	0,003	0,002	0,002	0,002	0,004	0,002	0,004	0,003	0,003	0,003	0,002	0,002
5	99%	-0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,002
6	78%	-0,004	-0,003	-0,004	-0,003	-0,004	-0,003	-0,004	-0,003	-0,004	-0,003	-0,003	-0,003	-0,002	-0,002
7	89%	-0,003	-0,002	-0,001	-0,002	-0,001	-0,002	-0,002	-0,002	-0,002	-0,001	-0,001	-0,001	0,000	0,000
8	183%	0,011	0,009	0,009	0,007	0,007	0,011	0,011	0,011	0,011	0,010	0,010	0,010	0,007	0,007
9	88%	-0,003	-0,002	-0,001	-0,002	-0,001	-0,002	-0,003	-0,002	-0,003	-0,001	-0,001	-0,001	0,000	0,000
10	113%	0,005	0,004	0,004	0,004	0,004	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006
11	85%	-0,001	0,000	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001	0,000	0,000	-0,001	-0,001	-0,001
12	88%	-0,004	-0,003	-0,001	-0,002	-0,001	-0,003	-0,003	-0,002	-0,003	-0,001	-0,001	-0,001	0,000	0,000
13	89%	-0,002	-0,001	0,000	-0,001	0,000	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001
14	91%	-0,003	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001	0,001	0,001



Die im Rahmen des Vorhabens durch Messung ermittelten äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten stimmen für die meisten untersuchten Systeme gut mit den in den Datenblättern des Bundesverbandes Flachglas publizierten Werten überein. Bei einem System ist eine hohe Abweichung des messtechnisch ermittelten Wertes von dem entsprechend bislang verwendetem Wert festzustellen. Die Ursachen hierfür konnten im Rahmen des Forschungsvorhabens nicht mehr festgestellt werden, bedürfen jedoch einer Analyse im Nachgang zum Vorhaben.

Die mit den messtechnisch ermittelten äq. Wärmeleitfähigkeiten berechneten  $\Psi$ -Werte zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit den in den Datenblättern des Bundesverbandes Flachglas publizierten Werten. Vergleicht man die in den Datenblättern veröffentlichten  $\Psi$ -Werte mit den  $\Psi$ -Werten, die im Rahmen des Forschungsvorhabens ermittelt wurden, so kann festgestellt werden, dass die Abweichungen für nahezu alle Systeme, geringer als  $0,005 \text{ W}/(\text{m K})$  sind. Unterschiede von weniger als  $0,005 \text{ W}/(\text{m K})$  sind im Rahmen der Ermittlung des U-Wertes von Fenstern nicht signifikant. Für eine Vielzahl der Systeme liegt die Abweichung der  $\Psi$ -Werte auf Grundlage der unterschiedlich ermittelten Wärmeleitfähigkeiten in der Größenordnung von  $0,002 \text{ W}/(\text{m K})$ .

Die im Rahmen des Vorhabens entwickelte Vorgehensweise zur experimentellen Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit von wärmetechnisch verbesserten Abstandhaltern führt somit zu äq. Wärmeleitfähigkeiten und zu linearen Wärmedurchgangskoeffizienten  $\Psi$  der wärmetechnisch verbesserten Abstandhalter, die mit der bislang angewandten Methode der numerischen Berechnung vergleichbar sind.

#### 4.7 Fehlerdiskussion

Bei der Diskussion der durch das Messverfahren zu erwartenden Fehler bei der äq. Wärmeleitfähigkeit sind zwei Aspekte zu unterscheiden:

1. Fehler durch das Messverfahren selbst
2. Fehler durch den Probekörper

##### **Fehler durch das Messverfahren**

Im Rahmen des Projektes konnte gezeigt werden, dass eine generelle Messgenauigkeit bei der Ermittlung der äq. Wärmeleitfähigkeit von  $\pm 10 - 15\%$  erreicht werden kann. So wurde im Rahmen des durchgeführten Rundversuches (mit einer begrenzten Teilnehmerzahl) eine Genauigkeit von  $\Delta\lambda/\lambda \approx \pm 10\%$  ermittelt.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Qualifizierung“ eines Referenzmaterials als Gebrauchsnorm für die Wärmeleitfähigkeit von  $\lambda = 0,2 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  [6] wurden im Rahmen eines Rundversuches Messungen der Wärmeleitfähigkeit von PMMA Platten durchgeführt. Die im Rahmen dieses Vorhabens vorhandenen Unterschiede der gemessenen Wärmeleitfähigkeit zwischen den Teilnehmern lagen in einer vergleichbaren Größenordnung.

### **Fehler bzw. Abweichungen bedingt durch den Probekörperaufbau**

Die im Rahmen des Vorhabens entwickelten Probekörper stellen einen Kompromiss zwischen Umsetzbarkeit und Abbildung der realen Einbausituation von Abstandhaltern im Isolierglas dar. So ist z.B. in der realen Situation der Abstandhalter auch über die zweite Dichtstufe thermisch an die Glasscheibe angeschlossen, was im Rahmen des entwickelten Probekörperaufbaus nicht umgesetzt werden konnte.

Generell ist die thermische Anbindung der Glasscheibe an den Abstandhalter, insbesondere der Materialien mit hoher Wärmeleitfähigkeit von großer Bedeutung. Dies konnte u.a. durch die durchgeführten Untersuchungen in 3.5.5 gezeigt werden. Durch die thermische Anbindung des Abstandhalters an die Glasplatte durch Verwendung von Butyl, kann jedoch für die untersuchten Systeme eine sehr gute Übereinstimmung mit der Realität gezeigt werden. Mit der jetzt gewählten Vorgehensweise kann eine gute Übereinstimmung der aus der Messung ermittelten äquivalenten Wärmeleitfähigkeit mit der aus der numerischen Berechnung ermittelten äq. Wärmeleitfähigkeit gezeigt werden.

Es kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass bei zukünftigen Abstandhaltersystemen, die Präparation der Probekörper nochmals überarbeitet bzw. angepasst werden muss, um speziellen Aspekten, wie z.B. der thermischen Anbindung, Rechnung zu tragen.

## 5 Zusammenfassung

Ziel des durchgeführten Vorhabens war die Definition eines Messverfahrens zur Ermittlung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit von wärmetechnisch verbesserten Abstandhaltern. Die äquivalente Wärmeleitfähigkeit dient hierbei zur Berechnung des linearen Wärmedurchgangskoeffizienten  $\Psi$  des Übergangs zwischen Rahmen und Glas bei Fenstern.

Im Rahmen des Projektes wurden zunächst Messungen an ausgewählten Abstandhaltern durchgeführt, mit folgenden Zielen:

- Aussagen über den Einfluss der Orientierung von Abstandhaltern auf die äquivalente Wärmeleitfähigkeit zu ermitteln,
- Aussagen über den Einfluss des Feuchtgehaltes des Trocknungsmittel auf die äquivalente Wärmeleitfähigkeit zu ermitteln,
- Aussagen über den Einfluss von gefülltem und nicht gefülltem Hohlprofil auf die äquivalente Wärmeleitfähigkeit zu ermitteln,
- die Reproduzierbarkeit der Messung zu analysieren,
- einen Ringversuch zwischen unterschiedlichen Messstellen durchzuführen,
- Untersuchungen zum Einfluss unterschiedlicher Techniken zur Klebung der Abstandhalter auf die Glasplatten durchzuführen sowie
- einen Vorschlag für das eindeutige Messverfahren zu erarbeiten.

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen konnten Aussagen für die o.g. Fragestellungen ermittelt werden. Ebenso konnte ein eindeutiges Messverfahren definiert werden. Im Rahmen der Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass das definierte Messverfahren die Ermittlung der äq. Wärmeleitfähigkeit eines Abstandhalters mit einer Genauigkeit von ca.  $\pm 10 - 15\%$  erlaubt.

Anschließend wurden alle wärmetechnisch verbesserten Abstandhalter, die im AK „Warme Kante“ des Bundesverbandes Flachglas vertreten sind, vermessen und die äq. Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{eq,2Box}$  ermittelt. Mit der so ermittelten äq. Wärmeleitfähigkeit wurden die repräsentativen linearen Wärmedurchgangskoeffizienten  $\Psi$  nach ift-Richtlinie WA-08/1 berechnet und mit den bisher publizierten Werten verglichen.

Äquivalente Wärmeleitfähigkeit Warme Kante  
Zusammenfassung



Die im Rahmen des Vorhabens entwickelte Vorgehensweise zur experimentellen Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit von wärmetechnisch verbesserten Abstandhaltern kann zukünftig zur wärmetechnischen Charakterisierung von Abstandhaltersystemen herangezogen werden.



## 6 Literaturverzeichnis

- [1] EN ISO 10077-2 : 2012  
Wärmetechnisches Verhalten von Fenstern, Türen und Abschlüssen – Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten – Teil 2: Numerisches Verfahren für Rahmen  
Berlin, Beuth Verlag GmbH
- [2] EN 12664 : 2001  
Wärmetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten – Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät – Trockene und feuchte Produkte mit mittlerem und niedrigem Wärmedurchlasswiderstand  
Berlin, Beuth Verlag GmbH
- [3] **ift** Richtlinie WA-08/1  
Wärmetechnisch verbesserte Abstandhalter – Teil 1 Ermittlung des repräsentativen  $\Psi$ -Wertes für Fensterrahmenprofile  
**ift** Rosenheim
- [4] EN 1279-2 : 2002  
Glas im Bauwesen - Mehrscheiben-Isolierglas – Teil 2: Langzeitprüfverfahren und Anforderungen bezüglich Feuchtigkeitsaufnahme  
Berlin, Beuth Verlag GmbH
- [5] EN ISO 10456 : 2009  
Baustoffe und Bauprodukte - Wärme- und feuchtetechnische Eigenschaften – Tabellierte Bemessungswerte und Verfahren zur Bestimmung der wärmeschutztechnischen Nenn- und Bemessungswerte  
Berlin, Beuth Verlag GmbH
- [6] Ulf Hammerschmidt  
Qualifizierung eines Referenzmaterials als Gebrauchsnorm für die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda = 0,2 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$   
Physikalisch Technische Bundesanstalt, Braunschweig, September 2002



## 7 Danksagung

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wird mit Mitteln des Deutschen Instituts für Bautechnik DIBt gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt des Berichts liegt bei den Autoren.

Besonderer Dank gebührt auch den Mitgliedern des Arbeitskreises Warme Kante des Bundesverbandes Flachglas, die das gesamte Projekt sowohl ideell als auch finanziell unterstützen und somit zum Gelingen beitragen:



Bundesverband Flachglas e.V., Troisdorf



Allmetal GmbH, Wiedemar



Edgetech Europe GmbH, Heinsberg



Ensinger GmbH, Nufringen



Glas Trösch GmbH Sanco Beratung, Nördlingen



Glaswerke Arnold GmbH & Co. KG, Merkendorf



Helmut Lingemann GmbH & Co. KG, Wuppertal



Kömmerling Chemische Fabrik GmbH, Pirmasens



NEDEX Chemie Deutschland GmbH, Moers



Rolltech A/S, Hjørring, Dänemark



Saint-Gobain Glass Solutions Suisse, Swisspacer, Kreuzlingen, Schweiz



Technoform Glass Insulation GmbH, Lohfelden

## Anhang A

### Verfahren zur messtechnischen Ermittlung der äq. Wärmeleitfähigkeit von wärmetechnisch verbesserten Abstandhaltern

#### 1 Anwendungsbereich des Verfahrens

Das beschriebene Verfahren legt eine Vorgehensweise zur Ermittlung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit von wärmetechnisch verbesserten Abstandhaltern durch Messung fest.

Die entsprechend dieses Verfahrens ermittelte äquivalente Wärmeleitfähigkeit ist nicht für den Produktvergleich anwendbar, sondern ausschließlich für die Berechnung von linearen Wärmedurchgangskoeffizienten entsprechend **ift**-Richtlinie WA 08/1 gedacht.

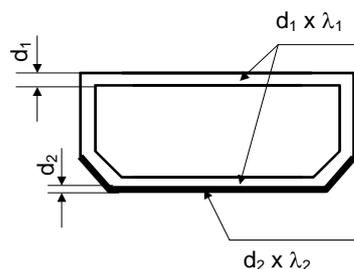
Wärmetechnisch verbesserte Abstandhalter sind nach EN ISO 10077-1 definiert:

$$\sum d \cdot \lambda \leq 0,007 \text{ W / K}$$

mit

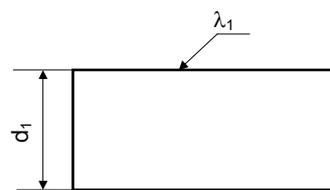
$d$  Dicke der Wand des Abstandhalters in m

$\lambda$  Wärmeleitfähigkeit des Materials des Abstandhalters in  $\text{W}/(\text{m K})$



a) hohle Abstandhalter

$$\sum (d \times \lambda) = 2(d_1 \times \lambda_1) + (d_2 \times \lambda_2)$$



b) feste Abstandhalter

$$\sum (d \times \lambda) = d_1 \times \lambda_1$$

**Abbildung A.1** Schematische Darstellung der Definition von wärmetechnisch verbesserten Abstandhaltern entsprechend EN ISO 10077-1



## 2 Mitgeltende Normen

Die im Folgenden aufgeführten Normen enthalten Festlegungen, die in Verbindung mit den in dieser Richtlinie genannten Verfahrensweisen benötigt werden. Es ist darauf zu achten, dass jeweils die aktuellen Versionen dieser Dokumente benutzt werden.

Zum Zeitpunkt der Festlegung dieses Verfahrens waren die angegebenen Ausgaben gültig. Alle Normen unterliegen der Überarbeitung. Vertragspartner, deren Vereinbarungen auf diesem Verfahren basieren, werden gebeten, die Möglichkeit zu prüfen, ob die jeweils neuesten Ausgaben der im Folgenden genannten Normen angewendet werden können. Mitglieder von CEN und ISO führen Verzeichnisse der gegenwärtig gültigen Normen.

- EN ISO 7345 : 1995  
Wärmeschutz – Physikalische Größen und Definitionen (ISO 7345 : 1987).
- EN ISO 10077-1 : 2006  
Wärmetechnisches Verhalten von Fenstern, Türen und Abschlüssen – Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten – Teil 1: Allgemeines
- EN ISO 10077-2 : 2003  
Wärmetechnisches Verhalten von Fenstern, Türen und Abschlüssen – Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten – Teil 2: Numerisches Verfahren für Rahmen
- EN ISO 10456 : 2000  
Baustoffe und -produkte - Verfahren zur Bestimmung der wärmeschutz-technischen Nenn- und Bemessungswerte
- EN 12667 : 2001  
Wärmetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten – Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplattengerät – Produkte mit hohem und mittlerem Wärmedurchlasswiderstand

### 3 Definitionen, Symbole und Einheiten

#### 3.1 Definitionen

In Verbindung mit dieser Richtlinie sind die in den Normen EN ISO 7345, EN ISO 10077-1 und EN ISO 10077-2 angegebenen sowie die nachfolgend definierten Begriffe anzuwenden.

#### 3.2 Symbole und Einheiten

Symbol		Einheit
$A$	Fläche	$m^2$
$R$	Wärmedurchlasswiderstand	$(m^2K)/W$
$T$	Temperatur	K
$b$	Breite	mm
$d$	Dicke	mm
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit	$W/(mK)$
$\Phi$	Heizleistung	W

#### 3.3 Indizes

eq	äquivalent
g	Glas
ges	Gesamt
SZR	Scheibenzwischenraum
2B	Two Box Modell

## 4 Durchführung

Die Ermittlung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit von wärmetechnisch verbesserten Abstandhaltern erfolgt im Wesentlichen auf der Grundlage von EN 12667. Hierzu wird der Wärmedurchlasswiderstand  $R_{ges}$  eines „speziellen“ Probekörpers ermittelt. Der Probekörper besteht aus zwei Glasplatten zwischen die die wärmetechnisch verbesserten Abstandhalter integriert sind. Der Aufbau des Probekörpers ist in 4.1 beschrieben.

Von dem ermittelten gesamten Wärmedurchlasswiderstand  $R_{ges}$  wird der Wärmedurchlasswiderstand der Glasplatten  $R_g$  abgezogen. Hieraus ergibt sich der äquivalente Wärmedurchlasswiderstand des Abstandhalters  $R_{eq}$ . Die Ermittlung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit erfolgt an Abstandhaltern für einen Scheibenzwischenraum von 16 mm.

Die äquivalente Wärmeleitfähigkeit von wärmetechnisch verbesserten Abstandhaltern liegt im Allgemeinen im Bereich zwischen 0,15 W/(m K) und 0,90 W/(m K). Nach derzeitigem Kenntnisstand existieren keine Probekörpernormale, die den kompletten Bereich der zu erwartenden Wärmeleitfähigkeiten abdecken. Solche Probekörpernormale sind jedoch beim Einsatz von Wärmestrommessplatten notwendig. Es wird daher empfohlen die Ermittlung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit von wärmetechnisch verbesserten Abstandhaltern nach den Messprinzipien der Plattenapparatur durchzuführen.

### 4.1 Probekörper

Der prinzipielle Aufbau der Probekörper ist in Abbildung A.2 dargestellt.

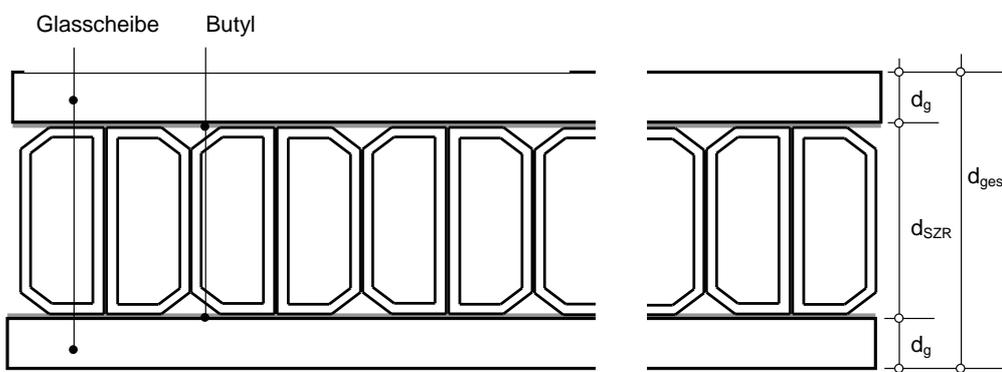


Abbildung A.2 Aufbau des Probekörpers

Zwischen zwei quadratischen Glasplatten der Dicke  $d_g$  sind die zu prüfenden Abstandhalter durch Klebung eingebracht. Die Dicke der Glasplatten  $d_g$  beträgt 4 mm.

Die Abstandhalter werden hierbei parallel „Rücken an Rücken“ bzw. „Bauch an Bauch“ angeordnet. Als „Kleber“ zwischen den Glasplatten und den Abstandhaltern wird Butyl verwendet. Hierzu wird Butylschnur mit einem Durchmesser von ca. 1 mm auf beide Seiten des Abstandhalters appliziert. Nach der ersten Fixierung der Abstandhalter zwischen den Glasplatten durch leichtes Zusammendrücken des Probekörpers wird die nominelle Enddicke von ca. 24 mm durch anschließendes Verpressen in einer hierfür geeigneten Vorrichtung erreicht. Der Anpressdruck sollte einen Wert von  $50 \text{ kN/m}^2$  nicht überschreiten. Es ist sinnvoll den Probekörper vor dem Verpressen auf ca.  $75 \text{ °C}$  zu erwärmen.

Sollten die Abstandhalter eine eigene Klebeschicht aufweisen, so wird auf das Butyl verzichtet. Evtl. am Abstandhalter fixiertes Butyl ist jedoch bei der Messung zu belassen.

Bestehen die Abstandhalter aus Hohlprofilen werden diese vor der Messung mit getrocknetem Molekularsieb gefüllt. Das einzusetzende Molekularsieb ist ein kugelförmiges Trocknungsmittel, das aus einer Mischung von zeolithischem Molekularsiebpulver und tonhaltigem Binder besteht. Das zu verwendende Molekularsieb muss Porenöffnungen von  $3 \text{ \AA}$  (Ångström) aufweisen. Als Referenz wird das Molekularsieb PHONOSORB 551 (Grace Davison) eingesetzt. Andere Typen oder Hersteller von Molekularsieb dürfen nur zum Einsatz kommen, wenn nachgewiesen ist, dass keine signifikanten Einflüsse auf die äq. Wärmeleitfähigkeit vorhanden sind.

Abstandhalter mit integriertem Trocknungsmittel bedürfen keiner Füllung mit zusätzlichem Trocknungsmittel. Sollten zwischen Befüllung der Abstandhalter mit Trocknungsmittel und der Durchführung der Messung mehr als 12 Stunden liegen, so sind die Probekörper in gasdichte, metallisierte Folienbeutel einzupacken. Die Folienbeutel sind entsprechend zu verschweißen und erst unmittelbar vor Durchführung der Messung zu öffnen.

#### 4.2 Durchführung der Messung

Die Messungen müssen bei einer mittleren Temperatur der Probe von  $(10 \pm 0,5) \text{ °C}$  durchgeführt werden. Es wird empfohlen eine mittlere Temperaturdiffe-



renz zwischen der warmen und der kalten Oberfläche der Probe zwischen 10 und 15 K zu verwenden, um die Messabweichung bei der Ermittlung der Temperaturdifferenz zu minimieren.

Zur Bestimmung der mittleren Oberflächentemperaturen sind auf den Proben diagonal auf jeder Seite mindestens drei Thermoelemente in gleichem Abstand anzubringen. Die Dicke dieser Thermoelemente darf 0,2 mm nicht überschreiten.

### 4.3 Auswertung

#### 4.3.1 Heizplattenapparat – Ermittlung des Wärmedurchlasswiderstandes

$R_{ges}$

Der Wärmedurchlasswiderstand der gesamten Probe  $R_{ges}$  ergibt sich wie folgt:

$$R_{ges} = \frac{A \cdot (T_1 - T_2)}{\Phi}$$

Mit

- $\Phi$  Mittlere Leistung in W, die der Heizplatte zugeführt wird.
- A Messfläche in  $m^2$  (bei einer Zweiplattenapparat 2 x die Fläche der Heizplatte)
- $T_1$  mittlere Temperatur der Warmseite der Probe in K
- $T_2$  mittlere Temperatur der Kaltseite der Probe in K

#### 4.3.2 Wärmestrommesser Verfahren – Ermittlung des Wärmedurchlasswiderstandes $R_{ges}$

$$R_{ges} = \frac{2 \cdot (T_1 - T_2)}{\phi_1 + \phi_2}$$

Mit

- $\phi_1 \phi_2$  Wärmestromdichten, die mit den Wärmestrommessplatten auf beiden Seiten der Probe ermittelt wurden in  $W/m^2$ .
- $T_1$  mittlere Temperatur der Warmseite der Probe in K
- $T_2$  mittlere Temperatur der Kaltseite der Probe in K

### 4.3.3 Ermittlung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit

Aus dem entsprechend 4.3.1 bzw. 4.3.2 ermitteltem Wärmedurchlasswiderstand  $R_{ges}$  wird der äquivalente Wärmedurchlasswiderstand der Abstandhalter  $R_{eq}$  wie folgt berechnet.

$$R_{eq} = R_{ges} - R_g$$

Der zur Berechnung benötigte Wärmedurchlasswiderstand der beiden Glasscheiben  $R_g$  ist Tabelle 4 zu entnehmen.

**Tabelle A.1** Wärmedurchlasswiderstand beider Glasscheiben  $R_g$

Verwendetes Glas im Probekörper	Wärmedurchlasswiderstand beider Glasscheiben $R_g$ in (m <sup>2</sup> K/W)
2 x 4 mm	0,0076

$$\lambda_{eq} = \frac{d_{SZR}}{R_{eq}}$$

Die Dicke des Scheibenzwischenraums  $d_{SZR}$  ergibt sich hierbei aus der ermittelten Gesamtdicke des Probekörper  $d_{ges}$  minus der Dicke der Glasplatten  $d_g$ .

$$d_{SZR} = d_{ges} - 2 \cdot d_g$$

Für die Dicke der Glasplatten sind folgende Werte zu verwenden:

**Tabelle A.2** Glasdicken  $d_g$

Nominelle Glasdicke	Glasdicke $d_g$
4 mm	3,8 mm

Es sind mindestens 3 Probekörper (bzw. Probekörperpaare) zu messen. Die äquivalente Wärmeleitfähigkeit für das wärmetechnisch verbesserte Abstandhaltersystem  $\lambda_{eq,2B}$  ergibt sich aus den ermittelten Einzelwerten von  $\lambda_{eq}$  auf Grundlage einer statistischen Berechnung entsprechend ISO 10456 Anhang C für eine 90% Fraktile.

$\lambda_{eq,2B}$  ist entsprechend den Rundungsregeln nach EN ISO 10456 anzugeben.



## 5 Bericht

Der Nachweis (Bericht) über die äquivalente Wärmeleitfähigkeit von wärmetechnisch verbesserten Abstandhaltern hat folgende materialbedingten und geometrisch bedingten Informationen zu den Probekörpern sowie das Ergebnis zu enthalten:

### ***Materialdaten/Produktbezeichnungen des Abstandhalters***

Produktbezeichnung,

Verwendete Materialien des Abstandhalters

Geometrische Daten des Abstandhalters wie Breite, Höhe, Materialstärken in mm

Querschnittsdarstellungen des Abstandhalters

### ***Materialdaten/Produktbezeichnungen des Probekörpers***

Außenabmessung

Dicke  $d_g$  der Glasplatten

Ermittelte Gesamtdicke  $d_{ges}$  jedes Probekörpers

Anzahl der Abstandhalter, die im Probekörper integriert sind

### **Ergebnis**

Messfläche

mittlere Oberflächentemperatur auf der warmen Seite jeder Probe (in °C);

mittlere Oberflächentemperatur auf der kalten Seite jeder Probe (in °C);

mittlere Temperaturdifferenz zwischen der warmen und kalten Seite jeder Probe (K);

mittlere Temperatur jeder Probe (in °C);

mittlere zugeführte Leistung bei jeder Messung

Wärmedurchlasswiderstand  $R_{ges}$  bei jeder Messung

Äquivalente Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{eq}$  bei jeder Messung

Äquivalente Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{eq,2B}$  des wärmetechnisch verbesserten Abstandhaltersystems



**ift** Rosenheim  
Theodor-Gietl-Str. 7-9  
83026 Rosenheim  
Telefon +49 (0) 8031 261-0  
Telefax +49 (0) 8031 261-290  
E-Mail: [info@ift-rosenheim.de](mailto:info@ift-rosenheim.de)  
<http://www.ift-rosenheim.de>