

# **Psi-Wert Fenster**

**T 3022**

T 3022

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

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.

Im Originalmanuskript enthaltene Farbvorlagen, wie z.B. Farbfotos, können nur in Grautönen wiedergegeben werden. Liegen dem Fraunhofer IRB Verlag die Originalabbildungen vor, können gegen Berechnung Farbkopien angefertigt werden. Richten Sie Ihre Anfrage bitte an die untenstehende Adresse.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2003, ISBN 3-8167-6526-2

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.fhg.de](mailto:irb@irb.fhg.de)

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

# Forschungsvorhaben

Qualitätskriterien für die Berechnung des  
längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten  $\Psi_{fg}$   
(Psi-Wert) des Übergangs Rahmen-Glasrand-Glas  
und Vergleich mit experimentellen Daten

Kurztitel:

Psi-Wert Fenster

April 2003

Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin  
P 32-5-5.65-1013/02

**Projektleitung:**

Fachhochschule Rosenheim  
Labor für Wärmeschutz und Energieeinsparung  
Prof. Dr. Franz Feldmeier  
Hochschulstraße 1  
D 83024 Rosenheim

Berechnung

**Beteiligte Forschungsstellen:**

Institut für Fenstertechnik e.V.  
Theodor-Gietl-Straße  
D 83026 Rosenheim

Berechnung und  
Messung

Fraunhofer-Institut für Bauphysik  
Nobelstraße 12  
D 70569 Stuttgart

Berechnung und  
Messung

Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V.  
Lochhamer Schlag 4  
D 82166 Gräfelfing

Berechnung und  
Messung

ebök, Ingenieurbüro für Energieberatung,  
Haustechnik und ökologische Konzepte GbR  
Reutlinger Straße 16  
D 72072 Tübingen

Berechnung

Passivhaus Institut Darmstadt  
Rheinstraße 44  
D 64283 Darmstadt

Berechnung

**Industriepartner**

Bundesverband Flachglas  
Mühlheimer Str.1  
D 53840 Troisdorf

Chemetall GmbH  
Trakehner Straße 3  
D 60487 Frankfurt a. M.

Ensinger GmbH  
Goetheplatz 4  
D 88214 Ravensburg

Henkel Teroson GmbH  
Henkel Teroson Str. 57  
D 69123 Heidelberg

Kömmerling Chemische Fabrik GmbH  
Postfach 2162  
D 66929 Pirmasens

ROLL TECH A/S  
W.Brüels Vej 20  
DK 9800 Hjoring

Swisspacer AG  
Sonnenwiesenstraße 15  
CH 8280 Kreuzlingen

TGI Glas Insulation Systems GmbH  
Ostring 4  
D 34277 Fuldabrück

## Kurzfassung

Das vorliegende vom DIBt geförderte Forschungsvorhaben untersucht die wichtigsten Einflüsse auf den längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten (Psi-Wert) des Übergangs Rahmen-Glasrand-Glas. Hierzu wurde der längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizienten bei üblichem Wärmeschutzglas mit unterschiedlichen Isolierglasabstandhaltern in verschiedenen Rahmensystemen aus Aluminium, Kunststoff und Holz nach DIN EN ISO 10077-2 rechnerisch untersucht und mit experimentellen Ergebnissen an drei ausgewählten Rahmensystemen verglichen.

Die Berechnung wurden unabhängig an sechs Forschungsstellen durchgeführt. Die Streuung der Ergebnisse liegt unter 10 %, dies bedeutet ca. 0,005  $W/(m \times K)$  für thermisch verbesserte Randverbundsysteme. Die rechnerische Sensitivitätsanalyse zeigt, dass der Einfluss üblicher Fertigungstoleranzen eine Unsicherheit von ebenfalls 0,005  $W/(m \times K)$  bedingt. Wesentliche Qualitätskriterien der Berechnung sind validierte Rechenprogramme, eine geeigneten Modellierung, insbesondere des Isolierglasrandverbundes, die korrekte Behandlung der Hohlräume und das konsequente Vermeiden systematischer Fehler.

Die experimentelle Bestimmung längenbezogener Wärmedurchgangskoeffizienten erfordert eine aufwändige Differenzmessung. Die Prüfungen wurden an drei akkreditierten Prüfstellen durchgeführt. Die Analyse nach GUM liefert eine einfache Messunsicherheit von 25%. Die Einzelwerte der Messung stimmen mit den berechneten Werte ausgezeichnet überein.

Zur Ermittlung von Produktkennwerten des Isolierglasrandverbundsystems sollte das Rahmenprofil und die Verglasung festgelegt werden. Die so ermittelten Kennwerte können im allgemeinen innerhalb der oben angegebenen Unsicherheit auch für andere Rahmen-Glas-Kombinationen verwendet werden.

## Abstract

The present research project, promoted by the DIBt, investigated the linear thermal transmittance caused by the interaction of frame and glazing. For this the linear thermal transmittance of common insulating glass units with different glazing spacer bars in various frame systems made of aluminium, plastics and wood were calculated and compared to experimental data for three selected frame systems.

The calculations were performed independently by six research institutes. The variance of the results turns out to be less than 10%, that means about  $0,005 \text{ W}/(\text{m}\times\text{K})$  for a glazing spacer bar with improved thermal performance. The calculated sensitivity analysis shows also an uncertainty of  $0,005 \text{ W}/(\text{m}\times\text{K})$  caused by accepted production tolerances. Essential criteria of quality of the calculation is a validated software, a suitable modelling, especially of the edge seal of the insulating glass unit, the accurate treatment of cavities and the consequent prevention of systematic errors.

The experimental determination of the linear thermal transmittance requires a complex differentiation measurement. The tests were performed at three accredited laboratories. The analyses according GUM shows an uncertainty of 25%. The single values of the measurements agree with the calculated values excellently.

For the declaration of characteristic values of products the frame profile and the glazing should be defined. Characteristic values thus obtained may generally be accepted for other combinations of frame and glazing within the uncertainty above mentioned.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Problemstellung</b>	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>Berechnungsgrundlagen</b>	<b>9</b>
2.1	Normen.....	9
2.1.1	DIN EN ISO 10211 .....	9
2.1.2	DIN EN ISO 10077-1 .....	12
2.1.3	DIN EN ISO 10077-2.....	13
2.1.4	DIN V 4108-4: 2002-02.....	16
2.2	Berechnungsprogramme.....	17
2.2.1	WINISO .....	17
2.2.2	Physibel BISCO 5.0.....	18
2.2.3	MSC.Nastran.....	18
2.2.4	Finite-Differenzen-Programm STATWL .....	19
2.3	Modellierung .....	20
2.3.1	Ausgangsdaten .....	20
2.3.2	Erfassung der Geometrie .....	20
2.3.3	Geometrische Modellierung.....	20
2.3.4	Zuordnung der Wärmeleitfähigkeit.....	21
2.3.5	Zuordnung der Übergangswiderstände .....	22
2.4	Berechnung .....	23
2.4.1	Allgemein .....	23
2.4.2	Einsatz von Hilfsebenen .....	23
2.4.3	Durchführung der Berechnung .....	23
2.4.4	Überprüfung der Unterteilung .....	24
2.5	Genauigkeit des Rechenverfahrens .....	25
2.5.1	Grundlage .....	25
2.5.2	Anforderungen nach DIN EN ISO 10211-1.....	26
2.5.3	Berechnung.....	26
2.5.4	Angabe von gültigen Stellen.....	27
<b>3</b>	<b>Sensitivitätsanalyse</b>	<b>28</b>
3.1	Vorbemerkungen .....	28
3.2	Rahmenprofilssystem .....	28
3.3	Verglasung.....	31
3.4	Fertigungstoleranzen .....	34
3.5	Schubstange des Beschlages.....	36



3.6	Isolierglas Abstandhalter.....	37
3.6.1	Modellierung des Abstandhalters .....	37
3.6.2	Geometrie und Material des Standard-Abstandhalters .....	37
3.7	Ergebnis der Sensitivitätsanalyse .....	39
<b>4</b>	<b>Vergleichsrechnung</b>	<b>40</b>
4.1	Ziel.....	40
4.2	Durchführung der Berechnungen .....	40
4.3	Ergebnisse der Vergleichsrechnung.....	41
<b>5</b>	<b>Messungen</b>	<b>44</b>
5.1	Ziel.....	44
5.2	Durchführung.....	44
5.3	Messung M1 (Al).....	46
5.3.1	Durchführung .....	46
5.3.2	Ergebnisse .....	46
5.3.3	Messunsicherheit .....	47
5.4	Messung M2 (PVC).....	49
5.4.1	Durchführung .....	49
5.4.2	Ergebnisse .....	49
5.4.3	Fehlerbetrachtung .....	50
5.5	Messung M3 (Holz).....	51
5.5.1	Durchführung .....	51
5.5.2	Ergebnisse .....	51
5.5.3	Messunsicherheit .....	52
5.6	Vergleich Rechnung – Messung .....	53
<b>6</b>	<b>Vorschlag zur Umsetzung</b>	<b>54</b>
6.1	Berechnung .....	54
6.2	Angabe von Kennwerten.....	54
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>56</b>
7.1	Berechnung .....	56
7.2	Vergleich mit Messung.....	57

## 1 Problemstellung

Für den Nachweis des Wärmeschutzes im Rahmen der Energieeinsparverordnung (EnEV) sind die Wärmedurchgangskoeffizienten von Fenstern nach DIN EN ISO 10077-1:11-2000 zu ermitteln oder sind technischen Produktspezifikationen zu entnehmen. Grundlage ist das detaillierte Verfahren nach DIN EN ISO 10077-1 welches neben den Wärmedurchgangskoeffizienten des Rahmens und der Verglasung auch den längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten des Übergangs Rahmen-Glasrand-Glas berücksichtigt.

Die Ermittlung des längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten kann durch Messung oder Rechnung erfolgen. Das numerische Berechnungsverfahren DIN EN ISO 10077-2 "Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten: Numerisches Verfahren für Rahmen" ist auch für die Berechnung längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten gültig. Diese Norm war zur Zeit der Antragstellung noch im Entwurf. Das formelle Abstimmungsverfahren (formal vote) wurde im September 2002 eingeleitet, mit Zustimmung ist zu rechnen.

Die rechnerischen Verfahren zur Bestimmung von Wärmedurchgangskoeffizienten, welche auch DIN EN ISO 10077-2 zugrunde liegen, sind obwohl schon lange bekannt [1; 2] im Vergleich zur Messung noch wenig abgesichert. Die bisherige Erfahrung zeigt, dass sich die an verschiedenen Stellen erzielten Berechnungsergebnisse signifikant unterscheiden können. Eventuelle Ursachen hierfür können die verwendeten Rechenprogramme, Unterschiede in der Modellierung, sowie Unvollständigkeit der Eingangsdaten bzw. unterschiedliche Interpretation der Daten durch den Bearbeiter sein.

Ein Vergleich von Messergebnissen mit Berechnungen bei verschiedenen Rahmensystemen [3] hat die prinzipielle Tauglichkeit der Rechenverfahren für übliche Rahmensysteme gezeigt. Bisher wurden an verschiedenen Stellen Vorleistungen [3, 4] zu unterschiedlichen Teilproblemen erbracht. Diese Erfahrungen sollen zusammengeführt und erweitert werden. Ziel des Forschungsvorhabens ist, die wesentlichen Kriterien aufzufinden und diese so festzulegen, dass eine Gleichwertigkeit von Berechnungen an unterschiedlichen Stellen, sowie eine Gleichwertigkeit von Rechnung und Messung im üblichen Maße sicher gestellt werden kann. Damit soll der Gefahr von Ungleichbehandlung von Bauteilen im baurechtlichen Nachweisverfahren entgegengewirkt werden.

## 2 Berechnungsgrundlagen

### 2.1 Normen

#### 2.1.1 DIN EN ISO 10211

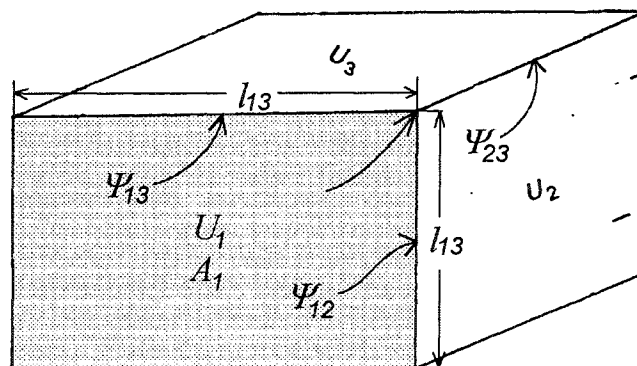
DIN EN ISO 10211:1995-11 "Wärmebrücken im Hochbau, Wärmeströme und Oberflächentemperaturen, Teil 1: Allgemeine Berechnungsverfahren" definiert die Grundlagen zur Berechnung von Wärmebrücken. Dabei war das Gesamtgebäude und hier vor allem der Massivbau Ausgangspunkt. Die Bereiche mit eindimensionaler Wärmeströmung werden durch den Wärmedurchgangskoeffizienten (Symbol  $U$ , nach alter DIN  $k$ ) und die zugeordnete Fläche (Symbol  $A$ ) charakterisiert. Alle anderen Bereiche werden als Wärmebrücken mit entsprechenden Leitwerten  $L^{2D}$  oder  $L^{3D}$  behandelt. Für den Wärmestrom gilt in vereinfachter Schreibweise:

$$\Phi = L \cdot (\theta_i - \theta_a) \quad \text{wobei} \quad L = \sum L^{3D} + \sum L^{2D} \cdot l + \sum U \cdot A$$

Die "ungestörten" Flächen  $A$  berechnen sich nicht aus den Außen- oder Innenabmessungen des Gebäudes, sondern aus willkürlich festgelegten Trennlinien zwischen Wärmebrücke und ungestörten Flächen.

Im Anhang C der Norm wird die heute bevorzugte Art der Berücksichtigung von Wärmebrücken angegeben. Diese vermeidet eine willkürliche Festlegung von Trennlinien, allerdings ist auch hier die genaue Festlegung der Maße zu beachten, z.B. Innen- oder Außenmaß bzw. bei Fenstern die Trennlinie Glas-Rahmen. Die Kennwerte der Wärmebrücken sind der längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizient (Symbol  $\psi$ , kurz: Psi-Wert) bzw. der punktbezogene Wärmedurchgangskoeffizient  $\chi$ :

$$\Phi = L \cdot (\theta_i - \theta_a) \quad \text{wobei} \quad L = \sum \chi + \sum \Psi \cdot l + \sum U \cdot A$$

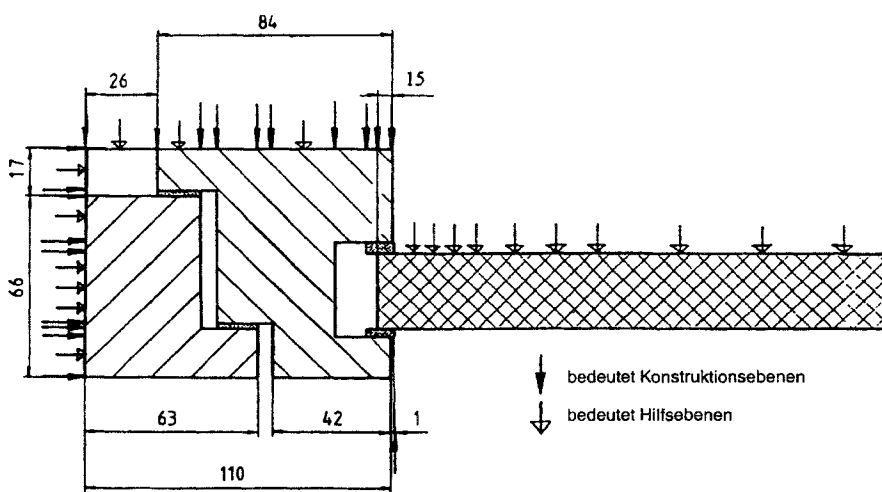


**Bild 1:** Gebäudehülle, unterteilt in Flächen mit Wärmedurchgangskoeffizienten  $U$  und Längen mit längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten  $\Psi$  (Bild aus Entwurf zu EN ISO 10211-1)

## Anwendungsbereich

In Teil 1 dieser Norm sind die Spezifikationen von geometrischen 3-D- und 2-D-Modellen von Wärmebrücken zur numerischen Berechnung von Wärmeströmen und Oberflächentemperaturen festgelegt. Diese Spezifikationen beinhalten die geometrischen Randbedingungen, die Unterteilungen des Modells, die wärmetechnischen Randbedingungen und die zu verwendenden wärmetechnischen Kennwerte.

Teil 2 gibt weitere Spezifikationen für linienförmige Wärmebrücken und gilt speziell für die Ermittlung längenbezogener Wärmedurchgangskoeffizienten und Oberflächentemperaturkennzahlen. Durch Bild 2 wird verdeutlicht, dass der Anwendungsbereich sich auch auf Fenster erstreckt.



**Bild 2: Beispiel von Konstruktionsebenen und Hilfsebenen im 2-D-geometrischen Modell eines Fensterrahmens (Bild 5 aus DIN EN ISO 10211-2)**

## Definitionen

**Konstruktionsebenen:** Ebenen im 3-D- oder 2-D-Modell, welche unterschiedliche Baustoffe oder das geometrische Modell von der verbleibenden Konstruktion trennen.

**Schnittebenen:** Jene Konstruktionsebenen, die Begrenzungen des 3-D- oder 2-D-Modells darstellen, indem sie das Modell von der verbleibenden Konstruktion trennen.

**Hilfsebenen:** Ebenen, die das geometrische Modell zusätzlich zu den Konstruktionsebenen in eine Anzahl von Zellen unterteilen.

**Längenbezogener Wärmebrückenverlustkoeffizient  $\Psi$ :** Korrekturwert für den längenbezogenen Einfluss einer Wärmebrücke zur Berechnung des thermischen Leitwertes  $L$  aus einer 1-D-Berechnung.

*Anmerkung: Diese Kenngröße wird in anderen Normen mit längenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient  $\Psi$  bezeichnet.*

**Temperaturdifferenz-Quotienten:** Die Temperatur zwischen Innenoberfläche und Außenlufttemperatur, bezogen auf die Differenz der Temperatur von Innen- und Außenluft.

*Anmerkung: Diese Kenngröße wird in anderen Normen mit **Temperaturfaktor**  $f_{RSi}$  bezeichnet.*

### **Regeln für die modellhafte Abbildung**

**Korrekturen an den Maßen:** Korrekturen an den Maßen des geometrischen Modells hinsichtlich der körperlichen Wirklichkeitstreue sind zulässig, wenn sie keinen signifikanten Einfluss auf das Berechnungsergebnis haben.

**Hilfsebenen:** Die Zahl der Hilfsebenen in einer Wärmebrücke muss so gewählt werden, dass ein Hinzufügen weiterer Unterteilungen keine gravierenden Änderungen der signifikanten Rechenwerte der Wärmebrücke bewirkt. Folglich darf die Änderung des Temperaturdifferenz-Quotienten bei Maximierung des Gitters nicht größer als 0,005 sein.

### **Äquivalente Wärmeleitfähigkeit von Hohlräumen**

Ein Hohlraum ist als homogen leitfähiges Material mit einer Wärmeleitfähigkeit von  $\lambda_{cav}$  zu betrachten. Wenn der Wärmedurchlasswiderstand einer Luftschicht oder eines Hohlraums bekannt ist, ergibt sich die Wärmeleitfähigkeit nach:

$$\lambda_{cav} = \frac{d_{cav}}{R_{cav}}$$

### **Allgemeine Hinweise und Anforderungen an Berechnungsverfahren**

Die genauen Berechnungsverfahren sind als numerische Verfahren (finites Element-, finites Differenz-, Wärmebilanzverfahren) bekannt. Diese numerischen Verfahren erfordern eine Diskretisierung des betrachteten Objektes. Das Verfahren besteht aus einer Reihe von Regeln zur Bildung eines Systems von Gleichungen, deren Anzahl proportional der Anzahl der Unterteilungen ist. Das Gleichungssystem wird entweder iterativ oder mittels eines direkten Lösungsverfahrens gelöst. Aus der Lösung des Gleichungssystems können normalerweise die Temperaturen an speziellen Punkten sowie an jedem beliebigen Punkt des betrachteten Objektes (durch Interpolation) abgeleitet werden; außerdem können die Wärmeströme durch bestimmte Oberflächen abgeleitet werden. Das zu validierende numerische Verfahren hat folgenden Anforderungen zu genügen:

- Das Verfahren muss die Berechnung von Temperaturen und Wärmeströmen ermöglichen.
- Der Umfang der Diskretisierung des Objektes (d. h. die Anzahl der Zellen, Knotenpunkte) ist nicht "verfahrensbestimmt", sondern "anwenderbestimmt", obgleich in der Praxis der Grad der Aufteilung "maschinenlimitiert"

ist. Deshalb muss bei Betrachtung der Prüferferenzfälle das zu validierende Verfahren es ermöglichen, Temperaturen und Wärmeströme an anderen als den aufgelisteten Orten zu berechnen.

- Mit steigender Anzahl der Unterteilungen muss die Lösung des zu validierenden Verfahrens gegen die analytische Lösung konvergieren, wenn eine solche gegeben ist.
- Die Anzahl der Unterteilungen muss wie folgt bestimmt werden: die Summe der Absolutwerte aller Wärmeströme, die in das Objekt eindringen, wird zweifach berechnet: für n- und für 2n- Unterteilungen. Die Differenz zwischen diesen beiden Ergebnissen darf 2% nicht überschreiten. Andernfalls sind weitere Unterteilungen vorzunehmen, bis dieses Kriterium erfüllt ist.
- Wenn das Gleichungssystem iterativ gelöst wird, ist die Iteration so lange fortzuführen, bis die Summe aller Wärmeströme (positive oder negative), die in das Objekt eindringen, dividiert durch die halbe Summe der Absolutwerte aller dieser Wärmeströme, kleiner als 0,001 ist.

### 2.1.2 DIN EN ISO 10077-1

DIN EN ISO 10077-1 "Wärmetechnisches Verhalten von Fenstern, Türen und Abschlüssen, Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten, Teil 1: Vereinfachtes Verfahren" enthält Regeln zur vereinfachten Festlegung von Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werten) für unterschiedliche Fensterkonstruktionen bis hin zum Kastenfenster. Diese Norm ersetzt DIN 4108 Teil 4 Tabelle 3. Wesentliche Änderungen sind:

- bei Metallprofilen wird der Wärmeübergangswiderstand entsprechend dem Verhältnis von Abwicklung zu Ansichtsfläche reduziert, siehe DIN EN ISO 6946.
- die Wärmebrücke "Isolierglasrand" wird durch einen längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten berücksichtigt.

Der Wärmedurchgangskoeffizienten eines Fensters ergibt sich aus dem Wärmedurchgangskoeffizienten des Rahmens und der Verglasung mit den zugeordneten Flächen und dem längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten des Übergangs Rahmen-Glasrand-Glas (Psi-Wert):

$$U_w = \frac{A_g \cdot U_g + A_f \cdot U_f + l_g \cdot \Psi_g}{A_g + A_f}$$

Für Abstandhalter aus Aluminium und Stahl sind im informativen Anhang E längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizienten für bestimmte Rahmen- und Verglasungsarten angegeben, siehe Tabelle 1.

**Tab 1: Werte des längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten für Abstandhalter aus Aluminium und Stahl (kein nichtrostender) (Tabelle E 1 aus DIN EN ISO 10077-1)**

Rahmenwerkstoff	Zweischeiben- oder Dreischeiben-Isolierverglasung, unbeschichtetes Glas, Luft- oder Gaszwischenraum	Zweischeiben-Isolierverglasung mit niedrigem Emissionsgrad, Dreischeiben-Isolierverglasung mit zwei Beschichtungen mit niedrigem Emissionsgrad
Holz und Kunststoffrahmen	0,04	0,06
Metallrahmen mit wärmetechnischer Trennung	0,06	0,08
Metallrahmen ohne wärmetechnische Trennung	0	0,02

*Anmerkung:*

*Die Tabelle der "Psi-Werte" wurde mit Kenntnisstand von 1998 erstellt. Inzwischen wurden sowohl die Berechnungsmethoden verbessert, als auch die Berechnungsgrundlage präzisiert, siehe Entwurf zu DIN EN ISO 10077-2. Die hier angegebenen Werte sind deshalb an den neuen Stand der Berechnung anzupassen. Dies ist unter anderem Ziel des vorliegenden Forschungsvorhabens.*

### 2.1.3 DIN EN ISO 10077-2

DIN EN ISO 10077-2 „Wärmetechnisches Verhalten von Fenstern, Türen und Abschlüssen, Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten, Teil 2: Numerisches Verfahren für Rahmen“ legt ein Verfahren und Werkstoffkennwerte für die Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten von Rahmenprofilen und den längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten für Randeinflüsse auf Grund der Glas- oder anderer Füllelemente fest. Dieses Verfahren kann zur Bestimmung des Wärmestroms und der Oberflächentemperaturen verwendet werden.

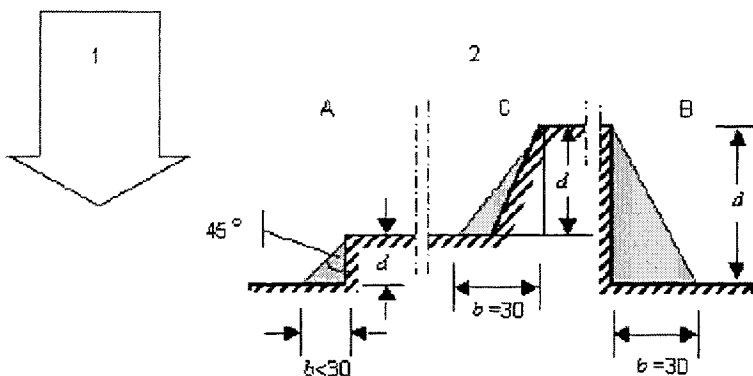
Die Wärmeleitfähigkeit von Werkstoffen ausgewählter Gruppen sind im Anhang A, Tabelle A.1 enthalten. Mit einigen Ausnahmen sind die Werte der EN 12524 entnommen, in der zusätzliche Werkstoffe enthalten sind.

Die Übergangswiderstände werden in einem normativen Anhang festgelegt, siehe Tab. 2 und Bild 3.

**Tab 2: Wärmeübergangswiderstand für horizontalen Wärmestrom (Tabelle B 1 aus E DIN EN 10077-2)**

Einstrahlzahl	Außenseitig $R_{se}$ ( $m^2 \cdot K$ )/W	Raumseitig $R_{si}$ ( $m^2 \cdot K$ )/W
normal (ebene Oberflächen)	0,04 <sup>a</sup>	0,13 <sup>a</sup>
verringerte Strahlung (in den Ecken oder Stoßfugen zwischen zwei Flächen)	0,04	0,20

<sup>a</sup> Diese Werte entsprechen den in EN ISO 6946 angegebenen Werten des Wärmeübergangswiderstandes. Anhang A von EN ISO 6946 enthält weitere Angaben über den Einfluss von Konvektion und Strahlung auf Wärmeübergangswiderstände.



**Bild 3: Schematische Darstellung von Oberflächen mit einem erhöhten Wärmeübergangswiderstand aufgrund verringerter Strahlung**

**Äquivalente Wärmeleitfähigkeit von Hohlräumen**

Ein Hohlraum ist als homogen leitfähiges Material mit einer Wärmeleitfähigkeit von  $\lambda_{cav}$  zu betrachten. Wenn der Wärmedurchlasswiderstand einer Luftschicht oder eines Hohlräume bekannt ist, ergibt sich die Wärmeleitfähigkeit nach:

$$\lambda_{cav} = \frac{d_{cav}}{R_{cav}} \text{ mit } R_{cav} \text{ als Wärmedurchlasswiderstand } R_{cav} = \frac{1}{h_a + h_r}$$

Berücksichtigung des Konvektionsanteils:

mit einer Breite kleiner 5 mm:  $h_a = \frac{C_1}{d}$  mit  $C_1 = 0,025 \frac{W}{mK}$

ansonsten

$$h_a = \max \left\{ C_1 / d; C_2 \cdot \Delta T^{1/3} \right\} \text{ mit } C_1 = 0,025 \frac{W}{mK}; C_2 = 0,73 \frac{W}{m^2 K^{4/3}}$$

und  $\Delta T$  ist die max. Temperaturdifferenz der Oberfläche im Hohlraum.



Falls keine andere Temperatur zur Verfügung steht, muss mit  $\Delta T = 10K$  gerechnet werden:

$$h_a = \max\{C_1/d; C_3\} \text{ mit } C_1 = 0,025 \frac{W}{mK}; C_3 = 1,57 \frac{W}{m^2 K}$$

Anteil der Strahlung am Wärmeübergangskoeffizienten:

$$h_r = 4\sigma \cdot T_m^3 \cdot \left(\frac{1}{E} + \frac{1}{F} - 1\right)^{-1}$$

mit

$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$  ist Stefan-Boltzmann Konstante,

$$E = \left(\frac{1}{E} + \frac{1}{F} - 1\right)^{-1} \text{ und } F = \frac{1}{2} \left(1 + \sqrt{1 + (d/b)^2} - d/b\right)$$

Falls keine anderen Informationen, vorliegen werden folgende Annahmen getroffen:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0,9 \text{ und } T_m = 283K$$

$$h_r = C_4 \cdot \left(1 + \sqrt{1 + (d/b)^2} - d/b\right) \text{ mit } C_4 = 2,11 \frac{W}{m^2 K}$$

Dabei d ist die Abmessung des Hohlraums in Richtung des Wärmestroms, b senkrecht dazu.

Die Berechnung des Wärmedurchlasswiderstandes gilt nur für rechteckige unbelüftete Hohlräume. Für andere Hohlräume werden je nach Größe, Form und Öffnung zur Umgebung folgende Regelungen getroffen:

**Unbelüftet:** Hohlräume sind als unbelüftet anzusehen, wenn sie komplett geschlossen sind oder zur inneren oder äußeren Umgebung eine Öffnung von maximal 2 mm besitzen. Alle anderen Hohlräume gelten als belüftet.

**Gering belüftet:** Nuten und Hohlräume, welche durch schmale Öffnungen von größer 2mm aber höchstens 10 mm mit der Umgebung verbunden sind, werden als leicht belüftet bezeichnet. Die äquivalente Wärmeleitfähigkeit beträgt das Zweifache des unbelüfteten Hohlraums derselben Größe.

**Stark belüftet:** Alle Hohlräume mit Öffnungen größer 10 mm zur Umgebung sind belüftet und es werden die entsprechenden Übergangswiderständen angesetzt.

**Nicht rechteckige Hohlräume:** Hohlräume in T-, L-Form usw. werden unter Beibehaltung des Flächeninhaltes und des Seitenverhältnisses in rechteckige Hohlräume umgeformt. Danach wird die äquivalente Wärmeleitfähigkeit entsprechend rechteckiger Hohlräume ermittelt.

*Anmerkung:*

*Die Berechnung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten ist insbesondere bei nicht rechteckigen Hohlräumen aufwändig. Die gewählte Richtung des Wärmestroms hat einen großen Einfluss und ist nicht immer eindeutig.*

**2.1.4 DIN V 4108-4: 2002-02**

Nach DIN V 4108-4 „Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden, Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte“ ist der Bemessungswert des Wärmedurchgangskoeffizienten  $U_{w,BW}$  aus dem Nennwert  $U_w$  durch Hinzufügen von Korrekturwerten  $\Delta U_w$  zu bestimmen:

$$U_{w,BW} = U_w + \sum \Delta U_w$$

Bei Mehrscheiben-Isolierglas mit wärmetechnisch verbessertem Randverbund ist  $\Delta U_w = -0,1 \text{ W}/(\text{m}^2 \times \text{K})$ , der Nennwert darf reduziert werden.

Als wärmetechnisch verbesserter Randverbund wird ein Randverbund bezeichnet, dessen Abstandhalter das folgende Kriterium erfüllt, siehe Anhang C in DIN V 4108-4:2002-02:

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

*Anmerkung:*

*Dieses Kriterium wurde im Rahmen der vorliegenden Untersuchung überprüft. Es ist zu Unterscheidung bzw. Definition von wärmetechnisch verbesserten Randverbundsystemen sehr gut geeignet und sollte bei der Überarbeitung von DIN EN ISO 10077-1 verwendet werden.*

## 2.2 Berechnungsprogramme

### 2.2.1 WINISO

Die Windows-Applikation WINISO erlaubt die Berechnung zweidimensionaler stationärer Wärmeströme. WINISO enthält die für die Problembeschreibung erforderlichen graphischen Eingabenhilfen sowie eine komfortable Ergebnisdarstellung. WINISO3D erweitert WINISO auf drei Dimensionen.

Die Berechnung des Temperaturfeldes basiert auf der Methode der Finiten Differenzen. Zur rechnergerechten Beschreibung des Problems wird der Querschnitt auf ein orthogonales Gitter abgebildet, und jedem Element (Zelle) das entsprechende Material, d.h. bestimmte wärmetechnische Eigenschaften zugeordnet. Unter Berücksichtigung der Randbedingungen wird das Finite-Differenzen-Problem mit Hilfe einer optimierten Gauß-Seidel-Iteration schrittweise gelöst.

Das Programm erlaubt die Einteilung des Projekts in die kleinst mögliche Elementabmessung von 0.01 mm x 0.01 mm, wobei maximal 500 Spalten und 500 Zeilen möglich sind. Ein Projekt kann maximal in 250.000 Elemente eingeteilt werden, wobei beliebig viele Materialien verwendet werden können.

Die äquivalente Leitfähigkeit von luft- oder gasgefüllten Hohlräumen kann nach verschiedenen Modellen, z.B. DIN EN ISO 10077-2, DIN EN 673 automatisch oder manuell bestimmt werden. Die Emissivität der Oberflächen wird dabei berücksichtigt. Generell erlaubt das Programm anisotrope und temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeiten. Adiabate Elemente und zusätzliche Wärmeströme durch Heizung oder Sonneneinstrahlung sind möglich.

Die Berechnung liefert für den zugrunde gelegten Querschnitt das Temperatur- und Wärmestromfeldes für beliebige Randbedingungen. Beide Felder können punktweise abgefragt oder als Falschfarnebild dargestellt werden. Außerdem kann das Temperaturfeld in Form von Isothermen dargestellt werden. Zusätzliche Werkzeuge erlauben unter anderem die Berechnung des längenbezogenen Gesamtwärmestroms, des lokalen Wärmedurchgangskoeffizienten sowie die einfache Ermittlung des längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten (Psi-Wert).

Die Genauigkeit der Berechnung hängt programmtechnisch von der Feinheit des gewählten Zeilen-Spalten-Rasters und der Schärfe der Konvergenzbedingungen ab. Physikalisch gehen auch Unsicherheiten der wärmetechnischen Kennwerte (z.B. Wärmeleitfähigkeit, Übergangswiderstand, Behandlung der Hohlräume) und die geometrische Abbildung auf das orthogonale Gitter mit ein. WINISO erfüllt die Qualitätskriterien von DIN EN ISO 10211-1 und DIN EN ISO 10077-2.

### 2.2.2 Physibel BISCO 5.0

Das Programm BISCO (Fa. Physibel, Belgien) erlaubt die Berechnung stationärer Wärmeströme in zweidimensionalen Objekten von beliebiger Form. Das Berechnungsgitter wird durch Triangulation (Abbildung mit Hilfe von Dreiecken) aufgebaut. Das System linearer Gleichungen wird numerisch durch iterative Lösung der Energiebilanzen für finite Elemente gelöst. Ersatz-Leitwerte von Hohlräumen können nach DIN EN 10077-2 automatisch berechnet werden. Mit Hilfe des Moduls RADCON können auch reale Hohlräume (Wärmestrahlung, Leitung, Konvektion) berechnet werden. BISCO erfüllt die Anforderungen der DIN EN 10077-1:2000-11.

### 2.2.3 MSC.Nastran

Das MSC.Nastran for Windows Modul "Heat Transfer" behandelt drei Arten der Wärmeübertragung: Wärmeleitung, Konvektion und Strahlung. Die Wärmeübertragung kann stationär oder instationär sein, wobei lineares oder nicht-lineares Verhalten von MSC.Nastran for Windows automatisch berücksichtigt wird.

**Lösungsmöglichkeiten:** stationärer Zustand, linear und/oder nichtlinear; instationärer (zeitveränderlicher) Zustand, linear und/oder nichtlinear; unbegrenzte Anzahl von Knoten.

**Wärmeübertragung durch Leitung:** temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit; temperaturabhängige spezifische Wärme; temperaturabhängige Wärmequellen (Wärmesenken); anisotrope Wärmeleitfähigkeit.

**Freie Konvektion:** temperaturabhängige Wärmeübergangskoeffizienten; zeitabhängige Wärmeübergangskoeffizienten; beliebige Funktionen oder Tabellenwerte z.B. aus EXCEL.

**Erzwungene Konvektion 1D und 2D:** Rohrströmungsbeziehungen  $[H(Re,Pr)]$ ; temperaturabhängige Fluid-Viskosität; Leitfähigkeit und spezifische Wärme; zeitabhängiger Massendurchsatz; temperaturabhängiger Massendurchsatz.

**Strahlung zum Raum:** temperaturabhängiges Emissions- und Absorptionsvermögen; zeitabhängiger Wärmeaustausch.

**Strahlung in geschlossenen Räumen:** temperaturabhängiges Emissionsvermögen; Berechnung von diffusen Sichtfaktoren bei beliebiger Geometrie; Hindernisse mit teilweiser oder ganzer Abschattung; adaptive Sichtfaktorberechnung; Net View Factors; Kontrolle der Strahlungsmatrix; Strahlung in mehreren geschlossenen Räumen.

**Thermische Lasten:** richtungsabhängiger Wärmefluss; Wärmefluss normal zur Oberfläche; Wärmeleistung in Knoten; temperatur- und zeitabhängiger Wärmefluss.

**Thermische Randbedingungen:** vorgeschriebene Temperaturen für stationäre Analysen; vorgeschriebene zeitveränderliche Temperaturen für instationäre Analysen.

**Anfangsbedingungen:** Anfangstemperaturen für nichtlinear stationäre und alle zeitveränderlichen Analysen.

**Ergebnisse:** Temperaturgradienten, Wärmeströme; Knotentemperaturen; Wärmeaustausch an Konvektionsflächen; XY-Plots aller Ergebnisse über der Zeit; Animation aller Ergebnisse.

**Kopplung zwischen Wärme- und Strukturberechnung:** Lösungsdaten der Wärmeberechnung werden als Belastungseingaben für Strukturberechnungen übertragen. Die Belastung infolge der Temperaturverteilung(en) kann allein oder zusammen mit mechanischen Lasten aufgebracht werden.

**Kopplung zwischen Wärme- und Strömungsanalysen:** Wärmeübergangskoeffizienten können durch eine Strömungssimulation ermittelt und für thermische Berechnungen verwendet werden.

Die Verwendung von MSC:Nastran ist nach Anhang A der DIN EN ISO 10211-1:1995-11 als genaues Verfahren validiert.

#### 2.2.4 Finite-Differenzen-Programm STATWL

Das im Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart seit 1981 verwendete und mehrmals weiterentwickelte Finite-Differenzen-Programm STATWL [5] verwendet für die Berechnung der Temperatur- und Wärmestrom-Verhältnisse in Bauteilen eine Vielzahl von Quadern (bei dreidimensionalen Strukturen) oder Rechtecken (bei zweidimensionalen Strukturen). Für jeden Quader bzw. jedes Rechteck wird eine Wärmebilanz aufgestellt. Die Gesamtheit dieser Wärmebilanzgleichungen bildet ein lineares Gleichungssystem, das mit Hilfe der Gauß'schen Eliminationsmethode gelöst wird. Die Modellierung der zu untersuchenden Konstruktion erfolgt nach EN ISO 10211. Hierfür steht das Eingabe- und Ausgabeprogramm STATIN/ PREPOST zur Verfügung. Die Berechnung kann auf einem PC oder auf einem Großrechner (VAX 6000-420 unter VAX/VMS 5.4) erfolgen. Beide Varianten unterscheiden sich in der maximalen Anzahl der erlaubten Elemente (PC:16000, VAX: 27000, vgl. [5]).

Das Programm implementiert ein Verfahren zur Berechnung von Oberflächentemperaturen und Wärmeströmen der Klasse A nach ISO 10211. Das Programmsystem ist vielfach validiert und die erreichten Ergebnisse sind mit Labormesswerten verglichen.

## **2.3 Modellierung**

### **2.3.1 Ausgangsdaten**

Voraussetzung zur Modellierung sind maßstäbliche Zeichnungen mit allen erforderlichen Maßangaben und Angaben zu den verwendeten Materialien. Ist das Material nicht in DIN EN ISO 10077-2 Tabelle A 1 enthalten, ist außerdem die Wärmeleitfähigkeit erforderlich. Die Randbedingungen (Übergangswiderstände und eventuell Umgebungstemperaturen) werden durch DIN EN ISO 10077-2 vorgegeben.

### **2.3.2 Erfassung der Geometrie**

Einige Programme können graphische Austauschformate (z.B. dxf-Dateien) mit Hilfe eines Konverters importieren und weiterverarbeiten. Es ist zu beachten, dass Abmessungen und Einheiten richtig übernommen werden. Genaues Übernehmen des Querschnittes mit Innen- und Außenbedingungen ist erforderlich.

### **2.3.3 Geometrische Modellierung**

Die Abmessungen innerhalb des Modells zur Berechnung des Temperaturfeldes und der Wärmeströme müssen den Angaben der Fertigungszeichnung entsprechen. Dabei wird vorausgesetzt, dass die Zeichnung dem tatsächlichen Endprodukt entspricht.

Das Modell muss den wahren Abmessungen der Materialien und deren relativen Position entsprechen, dies gilt insbesondere bei Materialien mit hoher Wärmeleitfähigkeit (Metalle). Kleine Radien oder Fasen und Abweichungen in den Materialdicken auf Grund von Toleranzen oder Verstärkungen / Befestigungen dürfen vernachlässigt werden.

Verstärkungen oder Funktionsbestandteile, die ein Hauptbestandteil der Fensterkonstruktion ausmachen, müssen in das Modell übernommen werden.

Punktuelle Bauteile können vernachlässigt werden. Ausgenommen sind Schrauben, Dübel oder ähnliches, welche von innen nach außen durchgehen. Diese sind durch geeignete Methoden innerhalb des 2D-Modell zu berücksichtigen. Eventuell sind hierfür dreidimensionale Berechnungen erforderlich.

Werden Elemente des Fensters (z.B. Dichtungen) bei Montage oder Einbau verformt, muss mit dem Einbauzustand gerechnet werden.

Bei geneigte Linien bzw. Flächen muss die vorgegebenen Geometrie möglichst genau übernommen werden. Wenn das eingesetzte Rechenprogramm es nicht erlaubt Schrägen direkt abzubilden, müssen die nachstehenden

Schritte 1 bis 4 eingehalten werden. Ähnliches gilt für Bögen. Die nominale Dicke und die relative Position müssen mit der Fertigungszeichnung übereinstimmen oder annähernd durch vertikale und horizontale Linien ersetzt werden:

1. Die Dicke der dargestellten Fläche entspricht der Dicke des gezeichneten Schnittes +/- den Toleranzen.
2. Alle sich ergebenden Eckpunkte der Polygone oder Rechtecke müssen mindestens alle 5 mm auf einer Repräsentationsgeraden liegen. Der durchschnittliche Abstand der Repräsentationsgeraden und der wahren Linie oder des wahren Bogens darf maximal 2,5 mm betragen.
3. Für an die Umgebung grenzende Bereiche muss die Länge der Repräsentationsgeraden innerhalb einer Toleranz von 5 % zur wahren Länge liegen. Falls diese Vorschrift nicht eingehalten werden kann, muss der Übergangswiderstand für diesen Bereich um den Faktor  $(\cos(\beta) + \sin(\beta))$  reduziert werden. Dabei ist  $\beta$  der Winkel, der von der Schräge oder dem Bogen eingeschlossen wird.
4. Wenn Materialien gekrümmt sind und durch eine Serie von Rechtecken dargestellt werden, muss die Kontaktlänge zwischen den angrenzenden Rechtecken oder Polygonen der durchschnittlichen Stärke +/- Fertigungstoleranzen entsprechen.

Von dem unter 1 bis 4 beschriebenen Vorgehen kann abgewichen werden, wenn durch Vergleichsrechnungen gezeigt werden kann, dass eine vergleichbare Genauigkeit auch durch einfachere Modellierung erreicht wird.

### **2.3.4 Zuordnung der Wärmeleitfähigkeit**

#### **2.3.4.1 Materialien bzw. Feststoffe**

Die Werte der Wärmeleitfähigkeit sind DIN EN ISO 10077–2 bzw. DIN EN 12524 zu entnehmen. Wenn ein Material nicht in diesen Tabellen enthalten ist, kann auf die DIN 4108 oder auf die Zulassung zurückgegriffen werden, falls es sich um ein zugelassenes Material handelt.

Materialien, für die keine Stoffwerte in den oben genannten Quellen enthalten sind, können durch Prüfverfahren nach ISO 8302 oder ISO 8301 ermittelt werden. In jedem Fall ist die Quelle anzugeben; werden Herstellerangaben verwendet, ist auf die Quelle besonders deutlich hinzuweisen.

#### **2.3.4.2 Hohlräume**

Die allgemeine Vorgehensweise zur Bestimmung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit von luftgefüllten Hohlräumen wird in DIN EN ISO 10077-2 beschrieben. Dabei hängt die äquivalenten Wärmeleitfähigkeit von der Temperaturdif-

ferenz und der Oberflächenemissivität im Hohlraum ab. Allerdings erlaubt DIN EN ISO 10077-2 auch eine Ermittlung bei fest vorgegebenen Bedingungen. Zur Vereinfachung des Rechenverfahrens wurde diese Möglichkeit gewählt.

*Anmerkung:*

*Nach DIN EN ISO 10211-1 und DIN EN ISO 10077-2 wird ein Hohlraum durch eine isotrope äquivalente Wärmeleitfähigkeit ersetzt. Bei Ermittlung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit ist die Abmessung des Hohlraums in Wärme-stromrichtung zu verwenden. Damit hängt die äquivalente Wärmeleitfähigkeit, insbesondere bei Hohlräumen, deren Seitenverhältnis stark von 1 abweicht, empfindlich von der gewählten Wärmestromrichtung ab. Diese unerwünschte Empfindlichkeit könnte durch eine anisotrope äquivalente Wärmeleitfähigkeit vermieden werden.*

Der Scheibenzwischenraum von Mehrscheiben-Isolierglas kann luft- oder gasgefüllt sein und besitzt bei Wärmeschutzverglasungen außerdem eine Beschichtung mit niedriger Emissivität. Die Bestimmung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit erfolgt hier nach EN 673 oder ISO 10292.

*Anmerkung:*

*Um einen bestimmten Wärmedurchgangskoeffizienten der Verglasung zu erhalten, kann der Scheibenzwischenraum durch einen Feststoff entsprechender Wärmeleitfähigkeit ersetzt werden.*

### **2.3.5 Zuordnung der Übergangswiderstände**

Die Übergangswiderstände sind in DIN EN ISO 10077-2 festgelegt. Besonders ist auf eine korrekte Anwendung der Regelung für die inneren Übergangswiderstände zu achten.



## 2.4 Berechnung

### 2.4.1 Allgemein

Die Modellierung der Querschnitte in den jeweiligen Berechnungsprogrammen basiert auf DIN EN ISO 10211 und Abschnitt 2.3. Die hier angegebene Vorgehensweise und Erläuterungen treffen auf Berechnungsprogramme mit orthogonalem Gitter zu. Für Programme basierend auf einer Dreieckselementierung sind andere Vorgehensweisen charakteristisch. Die Durchführung der Berechnung ist für alle iterativen Programme gültig.

### 2.4.2 Einsatz von Hilfsebenen

Bei der Berechnung von Fensterkonstruktionen ergibt sich aus den geometrischen Daten der einzelnen Rahmenprofile bzw. der Abstandhalter eine engere Unterteilung als in die in der DIN EN 10211 geforderten 1 mm. In solchen Bereichen muss der Abstand der Hilfsebenen dem Abstand der Konstruktionsebenen angepasst werden, anschließend kann der Abstand der Hilfsebenen stufenweise (exponentiell) auf die in der DIN EN 10211 angegebenen Abstände ansteigen. Die gleiche Situation ergibt sich bei der Umwandlung von Schrägen und Rundungen in das orthogonale Gitter des Programms.

Beim Einsatz von Materialien mit sehr unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit (z.B. Metalle in Fensterkonstruktionen) sollte ebenfalls eine feinere Unterteilung im Übergangsbereich dieser Materialien gewählt werden.

### 2.4.3 Durchführung der Berechnung

**Startbedingung:** Den Zellen mit variabler Temperatur (i.a. Materialien und Hohlräume) wird eine beliebige Start-Temperatur zugewiesen. Zellen mit konstanter Temperatur (i.a. Außen- und Innenluft) wird diese zugewiesen. Das Ergebnis der Berechnung ist bei korrektem Rechnungsvorlauf unabhängig von den Start-Temperaturen.

#### **Konvergenzbedingung**

DIN EN 10211-1, siehe Abschnitt 2.1.1, stellt folgende Konvergenzbedingungen:

$$\frac{\Delta Q}{|Q|} \leq 0,001 = 0,1\%$$

dabei ist

$$\Delta Q = \Sigma \text{Wärmequellen} - \Sigma |\text{Wärmesenken}|$$

$$|Q| = \frac{1}{2} (\Sigma \text{Wärmequellen} + \Sigma |\text{Wärmesenken}|)$$

Aufgrund der feinen Unterteilung bei Fensterkonstruktionen sind im Allgemeinen verschärfte Konvergenzbedingungen notwendig:

$$\frac{\Delta Q}{|Q|} \leq 0,0003 = 0,03\%$$

$$\max |\Delta T|_{\text{Zellen}} \leq 0,03 \cdot 10^{-3} \text{ K}$$

#### **Berechnungsschritte:**

1. Als Startbedingung werden alle Zellen auf die Vorbeleg-Temperatur bzw. auf eine Zufallstemperatur zurückgesetzt. Die Iteration wird bis zum Erreichen der Konvergenzkriterien fortgesetzt. Das Ergebnis wird festgehalten.
2. In einem weiteren Rechengang wird Schritt 1 mit neuen unterschiedlichen Start-Temperaturen wiederholt.
3. Die Ergebnisse aus 1. und 2. werden verglichen. Bei zu großer Abweichung muss die Unterteilung in Hilfsebenen überarbeitet werden, bis sich eine tolerierbare Schwankung im Ergebnis einstellt.

#### **2.4.4 Überprüfung der Unterteilung**

Abschließend wird durch weitere Hilfsebenen die Unterteilung (Elementierung) verfeinert und die Berechnung wiederholt. Ist die Abweichung des neuen Ergebnisses gering, siehe Abschnitt 2.1.1, so wird die Berechnung akzeptiert und kann weiter ausgewertet werden.

## 2.5 Genauigkeit des Rechenverfahrens

### 2.5.1 Grundlage

Jedes numerische Verfahren erfordert eine Diskretisierung des betrachteten Objekts und die Lösung der damit verbundenen Gleichungssysteme. Die folgenden Überlegungen beziehen sich auf das Programm WINISO, können aber auf andere iterative Programme mit orthogonalen Gittern übertragen werden. Das Programm arbeitet mit Rechteckselementen und einem iterativen Lösungsverfahren. Die Anzahl der Elemente ist durch die Größe des RechenSpeichers begrenzt und liegt bei ca. 500 x 500 entsprechend 250.000 Temperaturknoten. Bei allen Lösungsverfahren für lineare Gleichungssysteme steigt die Rechenzeit mit der Anzahl der Knoten erheblich, gleichzeitig steigen die Anforderungen an das Konvergenzverhalten.

Die Rechenmethode beinhaltet damit folgende Fehler:

1. Modellierung:  
Nicht rechtwinklige Materialgrenzen müssen durch rechteckige Stufen approxiiert werden. Durch eine entsprechend feine Unterteilung kann der Fehler beliebig klein gemacht werden. Bei den Randbedingungen sind die Übergangswiderstände entsprechend zu korrigieren.
2. Unterteilung:  
Für jedes Element steht ein Temperaturwert zur Verfügung, dazwischen wird linear interpoliert. Auch hier kann der Fehler durch entsprechend feine Unterteilung beliebig verkleinert werden.
3. Konvergenzgrenze:  
Das Lösungsverfahren von WINISO überprüft pro Iterationsschritt die Kriterien "maximale Temperaturänderung" und "Summe der Wärmequellen/Senken". Beide müssen vorgegebene Grenzen unterschreiten, diese bestimmen wesentlich die Genauigkeit der Lösung. Trotz der Verwendung von zwei Kriterien kann eine Nebenlösung nicht vollständig ausgeschlossen werden. Die Wahrscheinlichkeit hierfür wird durch unterschiedliche Start-Temperaturen (Startvektor) erheblich reduziert.
4. Konvergenzverhalten:  
Bei sehr unterschiedlichen Elementgrößen und Materialien sehr unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit ergeben sich extreme Unterschiede in den Wärmeleitwiderständen einzelner Zellen (steife Elementmatrix). Das Konvergenzverhalten wird dadurch erheblich verschlechtert. Eine große Anzahl von Iterationen wird notwendig. Ebenso steigt die Anzahl der Iterationen sehr stark mit der Anzahl der Zellen.

#### 5. Numerik:

Bei der Addition sehr vieler sehr kleiner Zahlen (z.B. Temperaturänderung) zu einer großen Zahl (Endtemperatur) kann es zu numerischen Instabilitäten durch Ausbreitung von Rundungsfehlern (auch bei Verwendung von Zahlen doppelter Genauigkeit) kommen. Das Lösungsverfahren führt auch bei langer Rechendauer nicht zu einer stabilen Lösung.

Es ist offensichtlich, dass die Folgerungen aus 1 und 2 den Folgerungen aus 3 bis 5 widersprechen. Es ist deshalb in jedem Fall ein sinnvoller Kompromiss zu finden. Bei einer großen Anzahl von Knoten sind die Konvergenzgrenzen strenger zu wählen und das Konvergenzverhalten ist besonders kritisch zu beobachten.

### 2.5.2 Anforderungen nach DIN EN ISO 10211-1

Die zur Berechnung eingesetzten Programme müssen die Anforderungen nach DIN EN ISO 10211-1 (11-95) erfüllen. Insbesondere sollen beide in der Norm angegebenen zweidimensionalen Prüferferenzfälle exakt gelöst werden. Sobald diese und auch alle anderen Kriterien erfüllt werden, ist das Programm zur Berechnung der Wärmebrücken nach DIN EN 10211-1 (11-95) validiert.

Bei iterativen Lösungsverfahren wird als Konvergenzkriterium verlangt, dass die "relative Summe der Wärmequellen/Senken" kleiner 0,001 ist. Dies entspricht der Standardeinstellung von WINISO für diese Konvergenzgrenze.

Die Elementierung muss so gewählt werden, dass bei einer Verdopplung der Unterteilung das Ergebnis der Wärmeströme um nicht mehr als 2% abweicht.

### 2.5.3 Berechnung

Nach DIN EN ISO 10077-2 ergibt sich der längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizient ( $\psi$ -Wert) aus

$$\Psi = L_{\psi}^{2D} - l_f U_f - l_g U_g$$

hierbei gilt für die Rahmenkenngröße:

$$l_f U_f = L_f^{2D} - l_p U_p$$

Die Größe  $L^{2D}$  ergibt sich jeweilig aus der zweidimensionalen Berechnung des entsprechenden Querschnitts. Die Unsicherheit dieser Größe liegt unter 2%, sofern Geometrie, Materialwerte und Randbedingungen identisch sind und die Anforderungen von DIN EN ISO 10211-1 erfüllt werden, siehe hierzu Anhang D von E DIN EN ISO 10077-2.

Der Zahlenwert von  $L^{2D}$  liegt für die betrachteten Rahmenprofile bei ca.  $0,50 \text{ W}/(\text{m}\times\text{K})$  und damit die absolute Unsicherheit von  $L^{2D}$  bei maximal  $0,01 \text{ W}/(\text{m}\times\text{K})$ . Die restlichen Größen können im Rahmen der Rechnung als fehlerfrei betrachtet werden.

Damit ergibt sich für die absolute Unsicherheit des Rahmen-U-Wertes bei einer Rahmenbreite von ca.  $0,1 \text{ m}$

$$\Delta U_f = 0,1 \text{ W}/(\text{m}^2\times\text{K})$$

und für den absoluten Fehler des  $\psi$ -Wertes:

$$\Delta \psi = 0,02 \text{ W}/(\text{m}\times\text{K})$$

Eine Berechnung des  $\psi$ -Wertes nach untenstehender Formel vermeidet unabhängige Fehler in der Berechnung von  $L^{2D}$ , so dass systematische Fehleranteile weitgehend herausfallen

$$\Psi = L_{\psi}^{2D} - L_f^{2D} + l_p U_p - l_g U_g$$

Es bleiben Fehleranteile durch Modellierung, Unterteilung und mangelnde Konvergenz. Die Unsicherheit wurde durch eine statistische Auswertung der Rechenergebnisse mit unterschiedlichen Bedingungen bestimmt. Es ergibt sich eine deutlich geringere absolute Unsicherheit von ca.

$$\Delta \psi = 0,002 \text{ W}/(\text{m}\times\text{K})$$

#### 2.5.4 Angabe von gültigen Stellen

Im vorliegenden Bericht werden Wärmedurchgangskoeffizienten auf  $0,001 \text{ W}/(\text{m}^2\times\text{K})$  und längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizienten auf  $0,001 \text{ W}/(\text{m}\times\text{K})$  angegeben. Dies geschieht nur, um Rundungen zu vermeiden und Tendenzen zu erkennen. Die oben angegebene Genauigkeit ist immer zu beachten.

### 3 Sensitivitätsanalyse

#### 3.1 Vorbemerkungen

Der längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizient wird jeweils an einem konkreten System bestehend aus Rahmenprofil, Glasrandverbund und Isolierglas bestimmt. In der Praxis werden aber unterschiedliche Profilsysteme und Verglasungen verwendet. Ebenso sind Fertigungs- und Einbautoleranzen unvermeidbar. Es ist deshalb erforderlich, die Sensitivität der Kenngröße "längenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient" auf die Variation der wichtigsten Eingangsgrößen zu kennen. Folgende Einflüsse werden untersucht:

- Rahmenprofilsystem, Material und Bauart
- Verglasung mit unterschiedlichen Wärmedurchgangskoeffizienten
- Fertigungstoleranzen:
  - Glaseinstand im Rahmen
  - Rückenüberdeckung des Isolierglasrandverbundes
  - Butyldicke des Isolierglasrandverbundes
  - Wärmeleitfähigkeit der Dichtung zwischen Glas und Rahmen
- Modellierung des Abstandhalter
- Auswirkung der Beschlag-Schubstange im Flügelrahmen

#### 3.2 Rahmenprofilsystem

Im Folgenden werden verschiedene Rahmenprofile, siehe Anhang A, mit einem Standard-Abstandhalter (SAH) und einem thermisch verbesserten Abstandhalter (TVA) untersucht. Alle anderen Parameter sind unverändert:

- |  |                           |
|--|---------------------------|
| • Glaseinstand im Rahmen                         | 15 mm                     |
| • Rückenüberdeckung des Isolierglasrandverbundes | 3 mm                      |
| • Butyldicke des Isolierglasrandverbundes        | 0,2 mm                    |
| • Dicke der Dichtung zwischen Glas und Rahmen    | 3 mm                      |
| • Wärmedurchgangskoeffizienten der Verglasung    | 1,1 W/(m <sup>2</sup> ×K) |

Die Rahmenprofile und deren Bezeichnung ist in Abschnitt 4 und in Anhang A detailliert beschrieben. Die Ergebnisse sind in folgenden Tabellen 3 bis 5 zusammengestellt.

**Tab.3: Rahmenprofile aus Aluminium**  
**Längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizienten bei SAH und TVA und**  
**Wärmedurchgangskoeffizienten des Rahmens**

- A** DIN EN ISO 10077-2  
**B** DIN EN ISO 10077-2 modifiziert  $U_f = 2,0 \text{ W/m}^2 \times \text{K}$   
**C** Typ M1  
**D** Wicline 70

<i>Aluminium</i>	A	B	C	D	
SAH	0,109	0,124	0,101	0,100	$\text{W}/(\text{m} \times \text{K})$
TVA	0,043	0,053	0,049	0,047	$\text{W}/(\text{m} \times \text{K})$
Uf	3,227	2,054	1,968	2,237	$\text{W}/(\text{m}^2 \times \text{K})$

**Tab.4: Rahmenprofile aus Kunststoff**  
**Längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizienten bei SAH und TVA und**  
**Wärmedurchgangskoeffizienten des Rahmens**

- A** DIN EN ISO 10077-2  
**B** vereinfachte Darstellung ohne Stahleinlage  
**C** vereinfachte Darstellung mit Stahleinlage  
**D** Typ M2 ohne Stahleinlage  
**E** Typ M2 mit Stahleinlage

<i>PVC</i>	A	B	C	D	E	
SAH	0,075	0,081	0,083	0,065	0,072	$\text{W}/(\text{m} \times \text{K})$
TVA	0,040	0,043	0,043	0,039	0,039	$\text{W}/(\text{m} \times \text{K})$
Uf	2,126	1,660	1,364	1,630	1,363	$\text{W}/(\text{m}^2 \times \text{K})$

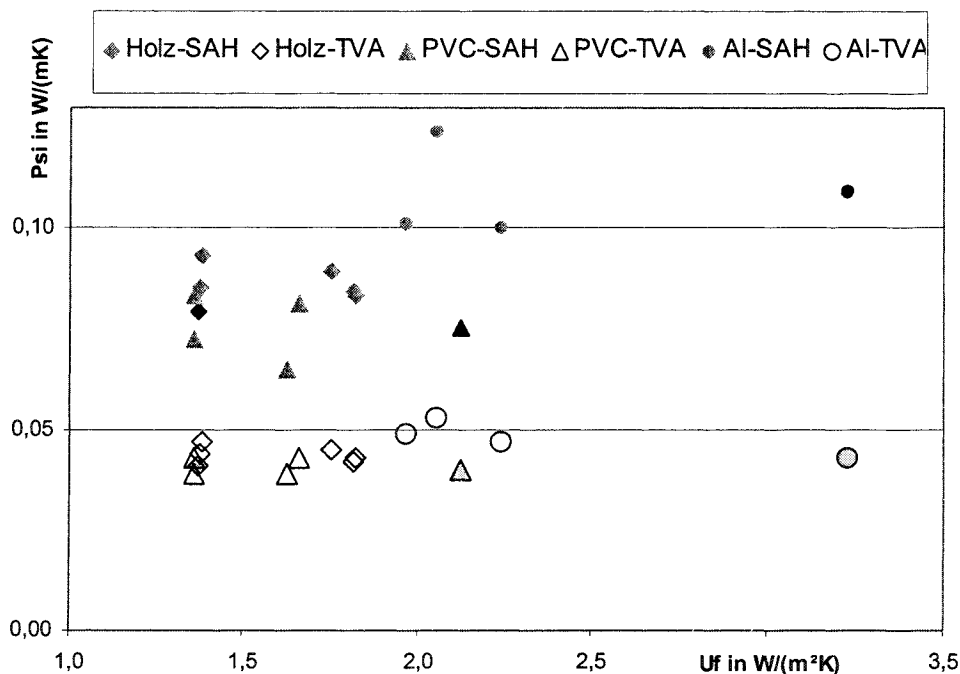
**Tab 5: Rahmenprofile aus Holz**  
**Längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizienten bei SAH und TVA und**  
**Wärmedurchgangskoeffizienten des Rahmens verschiedener Rahmen-**  
**profile aus**

- A** DIN EN ISO 10077-2  
**B** DIN EN ISO 10077-2 mit Wärmeleitfähigkeit  $0,2 \text{ W}/(\text{m} \times \text{K})$   
**C** DIN 68121 IV68 Querschnitt oben  
**D** DIN 68121 IV68 Querschnitt unten  
**E** Querschnitt oben Typ M3  
**F** Querschnitt unten Typ M4

<i>Holz</i>	A	B	C	D	E	F	
SAH	0,079	0,084	0,085	0,083	0,093	0,089	$\text{W}/(\text{m} \times \text{K})$
TVA	0,041	0,042	0,044	0,043	0,047	0,045	$\text{W}/(\text{m} \times \text{K})$
Uf	1,377	1,82	1,381	1,823	1,385	1,757	$\text{W}/(\text{m}^2 \times \text{K})$

Obwohl sich die Profile innerhalb einer Materialgruppe in Geometrie und Wärmedurchgangskoeffizient deutlich unterscheiden, variieren die längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten bei beiden Abstandhaltertypen nur um ca. 10%. Ebenso stimmen die längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten beider Abstandhaltertypen zwischen Holz- und PVC-Rahmenprofil gut überein., d.h. bei Holz- und PVC-Rahmenprofilen gilt  $\Delta\Psi_{SAH} = 0,006 \text{ W}/(\text{m}\times\text{K})$  und  $\Delta\Psi_{TVA} = 0,002 \text{ W}/(\text{m}\times\text{K})$ . Die Werte bei Aluminium-Profilen variieren um  $\Delta\Psi_{SAH} = 0,010 \text{ W}/(\text{m}\times\text{K})$  bzw.  $\Delta\Psi_{TVA} = 0,005 \text{ W}/(\text{m}\times\text{K})$ .

Es ist deshalb gerechtfertigt, für Abstandhalter in Holz- und Kunststoffrahmen nur einen gemeinsamen längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten zu verwenden. Es genügt den längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten jeweils mit Rahmenprofilen nach DIN EN ISO 10077-2 zu ermitteln.



**Bild 4: Längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizienten bei verschiedenen Abstandhaltern und Rahmen abhängig vom Wärmedurchgangskoeffizienten des Rahmens**



### 3.3 Verglasung

Die Variation des Wärmedurchgangskoeffizienten des Glases ( $U_g$ -Wert) und der Glasdicke wird an den Profilen aus DIN EN ISO 10077-2 und jeweils an einem Standard-Abstandhalter und einem thermisch verbesserten Abstandhalter untersucht.

Die Variation des Wärmedurchgangskoeffizienten der Isolierverglasung wird einheitlich mit dem Aufbau 4/16/4 durchgeführt. Hierzu wird im Scheibenzwischenraum ein Material geeigneter Wärmeleitfähigkeit eingefügt. Die weiteren Parameter entsprechen Abschnitt 3.2. In Tabelle 6 und graphisch in Bild 5 sind die Ergebnisse zusammengefasst.

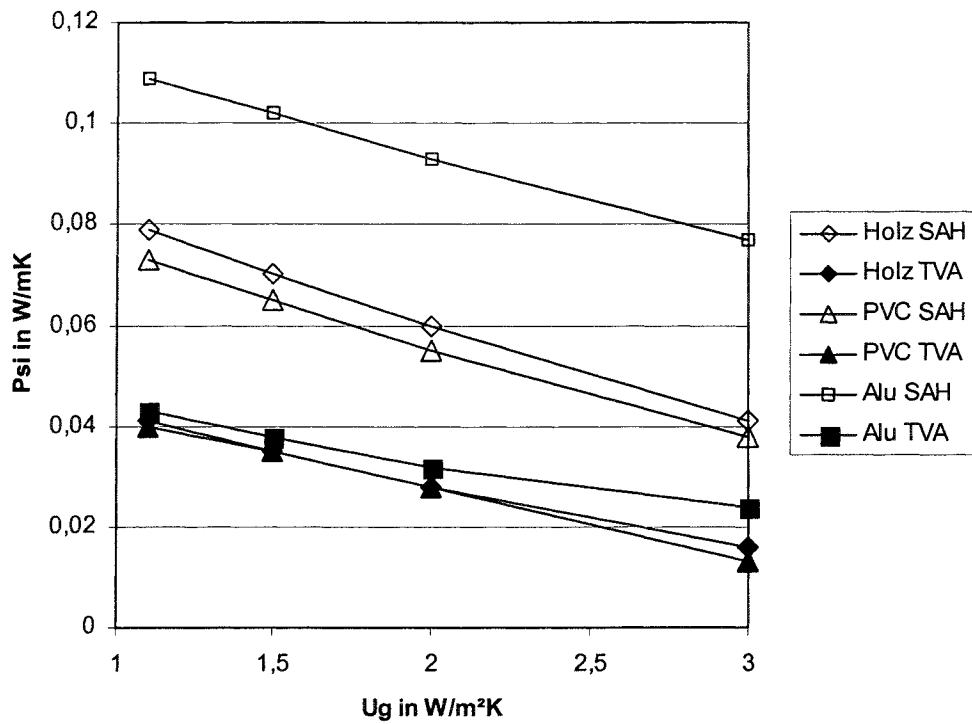
Wie zu erwarten steigt der längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizient mit der thermischen Qualität des Glases, d.h. mit abnehmendem Wärmedurchgangskoeffizienten des Glases ( $U_g$ -Wert), an. Dies entspricht dem Prinzip, dass sich thermische Schwachstellen bei verbesserter Wärmedämmung der umgebenden Bauteile stärker auswirken.

**Tab.6: Längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizienten bei verschiedenen Abstandhaltern und Rahmen nach DIN EN ISO 10077-2 abhängig vom Wärmedurchgangskoeffizienten des Glases**

Rahmen		Wärmedurchgangskoeffizient Glas				W/(m <sup>2</sup> ×K)
		1,1	1,5	2,0	3,0	
Holz	SAH	0,079	0,070	0,060	0,041	W/(m×K)
	TVA	0,041	0,035	0,028	0,016	W/(m×K)
PVC	SAH	0,073	0,065	0,055	0,038	W/(m×K)
	TVA	0,040	0,035	0,028	0,013	W/(m×K)
Aluminium	SAH	0,109	0,102	0,093	0,077	W/(m×K)
	TVA	0,043	0,038	0,032	0,024	W/(m×K)

Zur Untersuchung des Einflusses der Glasdicke der Isolierverglasung werden die Scheibenaufbauten 4/16/4; 5/16/5 und 6/16/6 berechnet. Die unterschiedliche Gesamtdicke der Verglasung wird durch entsprechend angepasste Glashalteleisten ausgeglichen, der Wärmedurchgangskoeffizient der Verglasung beträgt einheitlich 1,1 W/(m<sup>2</sup>×K). Die weiteren Parameter entsprechen Abschnitt 3.2. Der geringfügige Einfluss der Gesamtdicke auf den Wärmedurchgangskoeffizienten des Rahmens wurde berücksichtigt.

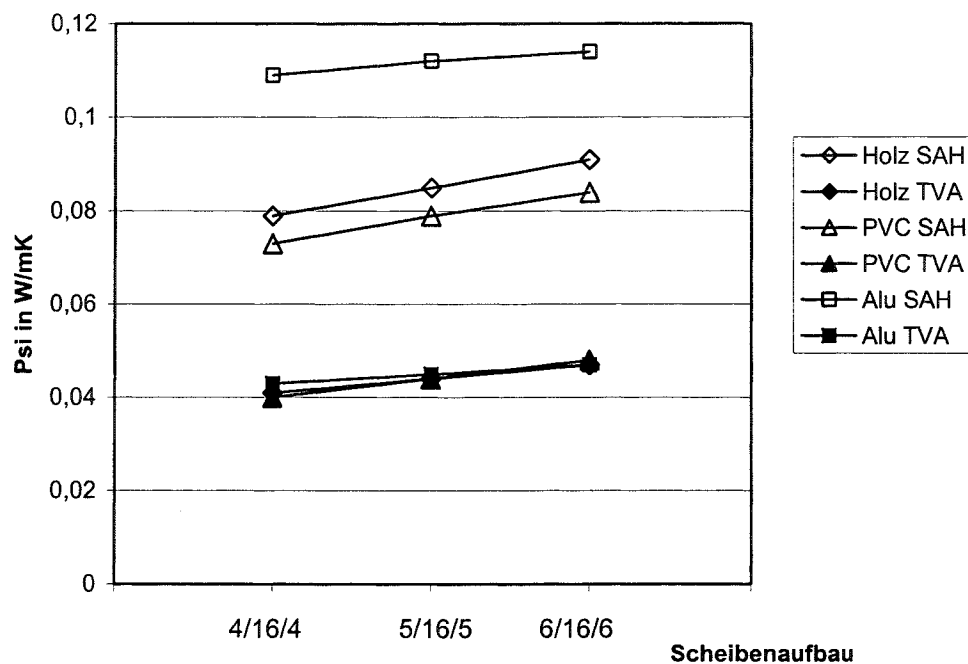
Die Ergebnisse sind in Tabelle 7 und Bild 6 dargestellt. Wie erwartet steigt der längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizient mit der Glasdicke an. Bei Standardabstandhaltern etwa 0,005 W/(m×K) pro mm Glasdicke, bei thermisch verbesserten Abstandhaltern etwa 0,003 W/(m×K) pro mm Glasdicke.



**Bild 5:** Längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizienten bei verschiedenen Abstandhaltern und Rahmen nach DIN EN ISO 10077-2 abhängig vom Wärmedurchgangskoeffizienten des Glases

**Tab.7:** Längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizienten bei verschiedenen Abstandhaltern und Rahmen nach DIN EN ISO 10077-2 abhängig vom der Dicke der Glasscheiben bei Ug=1,1 W/(m²×K)

Rahmen		Scheibenaufbau			mm
		4/16/4	5/16/5	6/16/6	
Holz	SAH	0,079	0,085	0,091	W/(m×K)
	TVA	0,041	0,044	0,047	W/(m×K)
PVC	SAH	0,073	0,079	0,084	W/(m×K)
	TVA	0,040	0,044	0,048	W/(m×K)
Aluminium	SAH	0,109	0,112	0,114	W/(m×K)
	TVA	0,043	0,045	0,047	W/(m×K)



**Bild 6: Längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizienten bei verschiedenen Abstandhaltern und Rahmen nach DIN EN ISO 10077-2 abhängig vom der Dicke der Glasscheiben bei  $U_g=1,1 \text{ W}/(\text{m}^2 \times \text{K})$**

Für die Charakterisierung eines Abstandhalters durch den längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten (Psi-Wert) ist es somit erforderlich, den Wärmedurchgangskoeffizienten der Verglasung und die Glasdicke in engen Grenzen festzulegen.

Zum Beispiel eine Verglasung mit dem am meisten verwendeten Aufbau 4/16/4 und einem Wärmedurchgangskoeffizienten von  $1,1 \text{ W}/(\text{m}^2 \times \text{K})$ .

### 3.4 Fertigungstoleranzen

Der Einfluss von Fertigungstoleranzen auf den längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten wird an den Rahmenprofilen aus DIN EN ISO 10077-2 jeweils mit Standardabstandhalter und thermisch verbessertem Abstandhalter untersucht. Tab. 8 zeigt die verschiedenen Berechnungsvariationen.

**Tab.8 Fertigungstoleranzen**

	Art	min	Standard	max.	
A	Glaseinstand im Rahmen	13	15	17	mm
B	Rückenüberdeckung des Randverbundes	2	3	4	mm
C	Butyldicke des Randverbundes	0,1	0,2	0,3	mm
D	Wärmeleitfähigkeit der Dichtung zwischen Glas und Rahmen	0,2	0,25	0,3	W/(m×K)

Die Ergebnisse für Rahmen aus Aluminium, Kunststoff und Holz sind in den Tabellen 9 bis 11 zusammengestellt.

**Tab.9: Rahmenprofil aus Aluminium**  
Längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizienten bei SAH und TVA und verschiedenen Fertigungstoleranzen

Al	SAH			TVA			
A	0,117	0,109	0,102	0,047	0,043	0,039	W/(m×K)
B	0,103	0,109	0,113	0,039	0,043	0,046	W/(m×K)
C	0,111	0,109	0,106	0,043	0,043	0,043	W/(m×K)
D	0,109	0,109	0,108	0,043	0,043	0,044	W/(m×K)

**Tab.10: Rahmenprofil aus Kunststoff**  
Längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizienten bei SAH und TVA und verschiedenen Fertigungstoleranzen

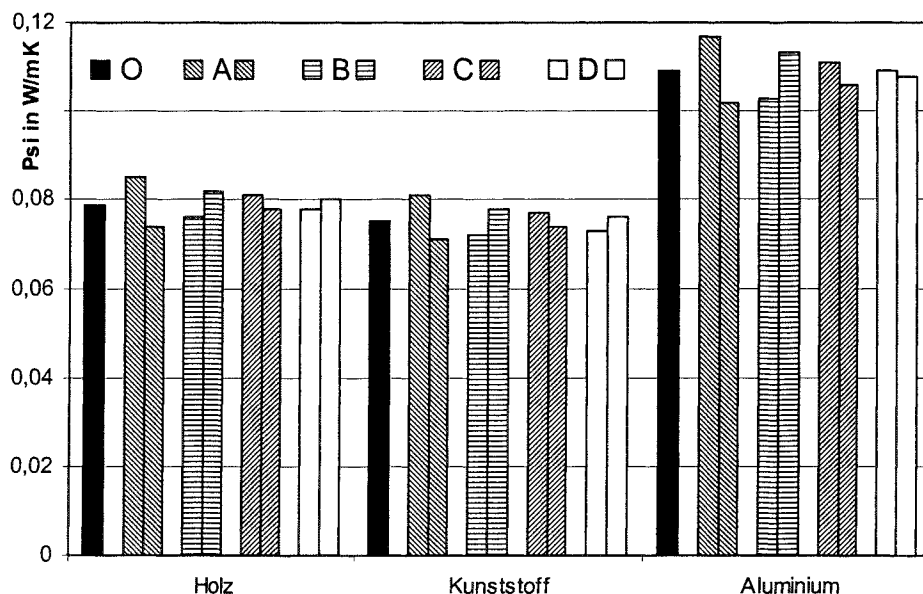
PVC	SAH			TVA			
A	0,081	0,075	0,071	0,043	0,040	0,037	W/(m×K)
B	0,072	0,075	0,078	0,038	0,040	0,043	W/(m×K)
C	0,077	0,075	0,074	0,040	0,040	0,040	W/(m×K)
D	0,073	0,075	0,076	0,039	0,040	0,041	W/(m×K)

**Tab.11: Rahmenprofil aus Holz**  
**Längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizienten bei SAH und TVA und verschiedenen Fertigungstoleranzen**

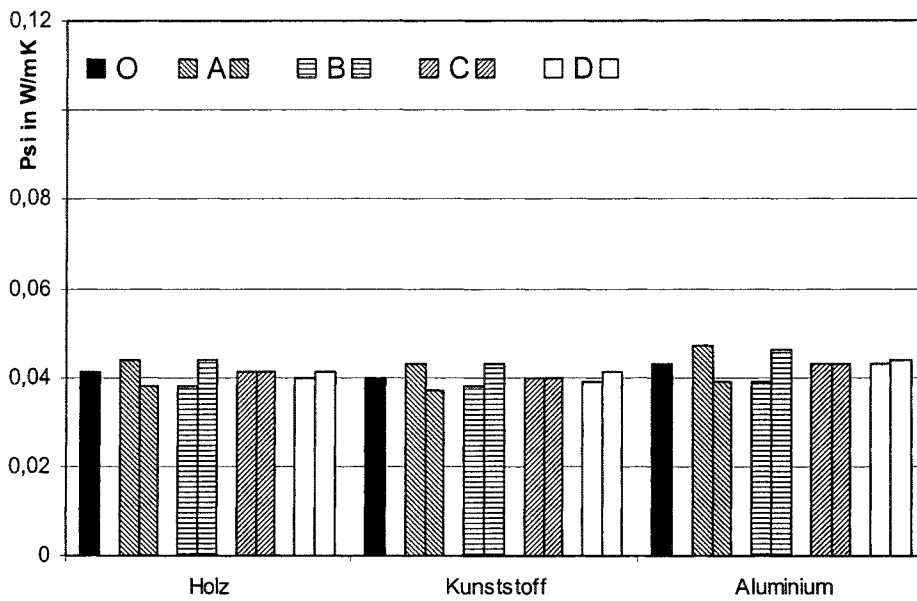
Holz	SAH			TVA			
A	0,085	0,079	0,074	0,044	0,041	0,038	W/(m×K)
B	0,076	0,079	0,082	0,038	0,041	0,044	W/(m×K)
C	0,081	0,079	0,078	0,041	0,041	0,041	W/(m×K)
D	0,078	0,079	0,080	0,040	0,041	0,041	W/(m×K)

Die untersuchten Einflüsse wirken sich auf den längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten verschieden stark aus. Den deutlichsten Einfluss haben mit 5% bis 10% der Glaseinstand und die Rückenüberdeckung des Abstandhalters. Die Butyldicke des Isolierglasrandverbundes und Wärmeleitfähigkeit der Dichtung zwischen Glas und Rahmen haben dagegen einen geringeren Einfluss von 2% bis 5%. Die Unterschiede sind in Bild 7 und Bild 8 graphisch dargestellt.

Insgesamt ergibt sich aus Fertigungstoleranzen eine Unsicherheit für den Standardabstandhalter von ca.  $\pm 0,01$  W/(m×K), für einen thermisch verbesserten Abstandhalter  $\pm 0,005$  W/(m×K).



**Bild 7: Längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizienten des Standard-Abstandhalters und Rahmen nach DIN EN ISO 10077-2 abhängig von den Fertigungstoleranzen A bis D; O entspricht den Standardabmessungen.**



**Bild 8:** Längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizienten des thermisch verbesserten Abstandhalters und Rahmen nach DIN EN ISO 10077-2 abhängig von den Fertigungstoleranzen A bis D; O entspricht dem Ausgangswert.

### 3.5 Schubstange des Beschlages

Der Einfluss der Schubstange des Beschlages auf den längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten wurde an einem Kunststoff-Rahmenprofil (Typ M2) untersucht.

**Tab.12:** Längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizienten verschiedener Abstandhalter in einem Kunststoff-Rahmenprofil mit bzw. ohne Berücksichtigung der Schubstange des Beschlags.

PVC	ohne Schubstange	mit Schubstange	
SAH	0,070	0,069	W/(m×K)
TVA	0,042	0,041	W/(m×K)
U <sub>f</sub>	1,62	1,64	W/(m <sup>2</sup> ×K)

Die Berücksichtigung der Schubstange des Beschlags führt zu einem geringfügig höheren Wärmedurchgangskoeffizienten des Profils. Der Einfluss auf den längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizient ist zu vernachlässigen.

## 3.6 Isolierglas Abstandhalter

### 3.6.1 Modellierung des Abstandhalters

Bei der Berechnung des längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten sind alle Feinheiten des Abstandhalters von Bedeutung, die Modellierung muss daher sorgfältig durchdacht werden. Eine unnötig detaillierte Abstufung von Schrägen und Rundungen und eine unnötig feine Unterteilung erhöht aber die Rechenzeit und führt eventuell zu Konvergenzproblemen ohne die Genauigkeit zu verbessern. Dies gilt mit Einschränkungen auch für Programme mit Dreieckselementen.

Es wurden deshalb zwei Standard-Abstandhalter unterschiedlicher Geometrie und ein thermisch verbesserter Abstandhalter untersucht. Variiert wurde die geometrische Modellierung, d.h. die Abbildung von Schrägen und Rundungen auf ein orthogonales Gitter, in den Stufen grob, mittel und fein und eine weitere Unterteilung durch Hilfsebenen in den Stufen grob und fein. Die Ergebnisse zeigt Tabelle 13. Durch eine feine Unterteilung erhöht sich der längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizient unwesentlich. Eine grobe bzw. vereinfachte Darstellung des Abstandhalters führt ebenfalls zu ausreichend genauen Resultaten.

### 3.6.2 Geometrie und Material des Standard-Abstandhalters

Der Einfluss der Geometrie und des Materials des Standard-Abstandhalters wird an den drei praxisnahen Rahmen untersucht.

Der vereinfachte Abstandhalter SAH2 in Aluminium und Stahl unterscheidet sich von dem als Standard SAH1 festgelegten durch die Vereinfachung zu einem Rechteck-Hohlprofil mit den Maßen 15,6 mm x 6,5 mm und einer Materialstärke von 0,4 mm. Alle weiteren Parameter wie Rückenüberdeckung, Einstand und Butyldicke und Verglasung siehe 3.2.1.

In Tabelle 14 sind die Ergebnisse zusammengefasst. Es ergibt sich die erwartete Änderung zu einem minimal größeren Psi-Wert bei dem vereinfachten Rechteckprofil aus Aluminium und eine Abnahme bei Einsatz des Stahl-Abstandhalters.

Zur Angabe eines Produktkennwertes von Standardabstandhaltern genügt daher ein einfaches Rechteckprofil, z.B. SAH2 Al, zu berechnen.

*Anmerkung: Das in E DIN EN ISO 10077-2 in Beispiel D.10 angegebene Rechteckprofil mit den Abmessungen 17 mm x 10 mm und einer Wandstärke von 0,5 mm ist nicht üblich. Könnte aber ebenfalls verwendet werden.*

**Tab.13: Längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizienten verschiedener Abstandhalter im Holz-Rahmenprofil nach DIN EN ISO 10077-2 abhängig von geometrischer Modellierung und Unterteilung**

	geometrische Modellierung	Unterteilung		
		grob	fein	
SAH1	fein	---	0,11328	W/(m×K)
	mittel	0,11264	0,11317	W/(m×K)
	grob	0,11256	0,11309	W/(m×K)
SAH2	fein	---	0,11207	W/(m×K)
	mittel	0,11172	0,11209	W/(m×K)
	grob	0,11171	0,11216	W/(m×K)
TVA	fein	---	0,06088	W/(m×K)
	mittel	0,06141	0,06154	W/(m×K)
	grob	0,06197	0,06211	W/(m×K)

\*Um kleine numerische Unterschiede noch zu zeigen, wurden die Werte ausnahmsweise auf fünf Stellen angegeben.

Legende:

SAH1: Profil mit Schrägen; SAH2: Rechteckprofil

TVA: thermisch verbesserter Abstandhalter

Unterteilung fein: Abstand der Hilfslinien im Bereich des Abstandhalters 0,2 mm

Unterteilung grob: Abstand 1 mm

Wärmedurchgangskoeffizient des Glases  $U_g = 1,105 \text{ W}/(\text{m}^2 \times \text{K})$

**Tab 14: Längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizienten verschiedener Standard-Abstandhalter in praxisnahen Rahmenprofilen**

**A** Rahmenprofil Aluminium Typ M1

**B** Rahmenprofil PVC Typ M2

**C** Rahmenprofil Holz Typ M3

**D** Rahmenprofil Holz Typ M4

	A	B	C	D	
$U_f$	1,972	1,618	1,372	1,746	W/(m <sup>2</sup> ×K)
SAH1 Al	0,101	0,070	0,087	0,080	W/(m×K)
SAH2 Al	0,103	0,072	0,088	0,083	W/(m×K)
SAH2 Stahl	0,101	0,068	0,083	0,078	W/(m×K)
10077-2 D.10	0,105	0,072	0,098	0,095	W/(m×K)



### 3.7 Ergebnis der Sensitivitätsanalyse

Wie erwartet hängt der längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizient von den Eigenschaften des Rahmenprofils, der Verglasung und von der Ausbildung Isolierglasrandverbund einschließlich der Art des Abstandhalters ab. Eine Ermittlung in jedem Einzelfall ist aber in der Praxis nicht möglich. Möchte man für Rahmensysteme nur einen längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten verwenden, so kann dieser mit ausreichender Genauigkeit an Fensterprofilen nach DIN EN ISO 10077-2 ermittelt werden.

Für die Abstandhalter in Holz- und Kunststoffrahmen kann auf Grund geringer Abweichungen ein gemeinsamer längenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient verwendet werden; für Aluminiumrahmen sollte separat ein längenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient ermittelt werden. Als Standardabstandhalter kann ein einfaches Rechteckprofil aus Aluminium dienen.

Einen wesentlichen Einfluss hat der Wärmedurchgangskoeffizient der Verglasung und die Dicke der Glasscheiben. Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten muss dieser Wert in engen Grenzen festgelegt werden. In der vorliegenden Untersuchung wurde ein Isolierglas 4/16/4 mit Wärmedurchgangskoeffizient  $1,1 \text{ W/m}^2 \times \text{K}$  verwendet.

Die Einflüsse von Fertigungs- und Einbautoleranzen verursachen insgesamt eine relative Unsicherheit des längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten von  $\Delta\Psi/\Psi \approx 10\%$ , d.h. bei Standard-Abstandhaltern eine Unsicherheit von ca.  $\pm 0,010 \text{ W}/(\text{m} \times \text{K})$ , bei thermisch verbesserten Abstandhaltersystemen ca.  $\pm 0,005 \text{ W}/(\text{m} \times \text{K})$ .

Die geometrische Modellierung und Feinheit der Unterteilung für die Berechnung haben bei sachgerechter Anwendung nur geringen bzw. vernachlässigbaren Einfluss. Das gleiche gilt für weitere Details des Rahmenprofils, wie z.B. die Schubstange des Beschlages.

*Anmerkung:*

*Der Einfluss von Zweifach- und Dreifach-Isolierverglasung auf den längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten wurde bereits untersucht [7]. Es zeigt sich, dass eine Unterscheidung der längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten nicht erforderlich ist. Die mit Zweifach-Isolierglas ermittelten Werte können auch für Dreifach-Isolierglas verwendet werden.*

## 4 Vergleichsrechnung

### 4.1 Ziel

Ziel der Vergleichsrechnungen ist, die Ergebnisse verschiedener Programmsysteme und Rechenstellen zu vergleichen, um hieraus Informationen über eventuelle Lücken in der Beschreibung der Vorgehensweise und über die verbleibende Unsicherheit in der Bestimmung des längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizient zu erhalten.

Hierzu wurde der vollständige Rechengang exemplarisch an realistischen Rahmenprofile durchgeführt:

- Umsetzung und Modellierung der Profile im Programm
- Unterteilung und Wahl der Konvergenzbedingungen
- Bestimmung des längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten
- Auswertung und Dokumentation

Allen beteiligten Rechenstellen wurden identische Daten zur Verfügung gestellt.

### 4.2 Durchführung der Berechnungen

Die Vergleichsrechnung wurden mit den Rahmenprofile aus Aluminium, PVC und Holz durchgeführt welche auch bei der Messung verwendet wurden, siehe Abschnitt 5. Die Rahmenprofile sind in Anhang A beschrieben.

Der längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizient wurde jeweils für zwei Abstandhalter, einem Standardabstandhalter aus Aluminium (SAH) und einem thermisch verbesserter Abstandhalter (TVA) ermittelt. Die Abstandhalter sind in Anhang B beschrieben.

Die Querschnitte wurden an sechs unterschiedlichen Stellen unabhängig berechnet. Dabei wurden vier FEM- bzw. FDM-Programme, siehe Abschnitt 2.2, eingesetzt.

### 4.3 Ergebnisse der Vergleichsrechnung

Die folgende Tabelle stellt die Berechnungsergebnisse der beteiligten Rechenstellen zusammen. Die Berechnungen wurden mit den Randbedingungen nach Tab.15 durchgeführt. Bei allen Berechnungen wurde für die Hohlräume nach DIN EN ISO 10077-2 der Wärmestrom senkrecht zur Ebene der Verglasung angenommen. Die Ergebnisse sind in Tab.16 und graphisch in Bild 9 zusammengestellt.

**Tab.15: Randbedingungen**

Wärmedurchgangskoeffizient Glas	1,1	W/(m <sup>2</sup> ×K)
Glasaufbau	4/16/4	mm
Glaseinstand	15	mm
Rücken-Überdeckung	3	mm
Butyl-Dicke	0,2	mm
Rahmen Glas- Dichtung	0,25	W/(m×K)

**Tab.16: Ergebnisse der Vergleichsberechnung**

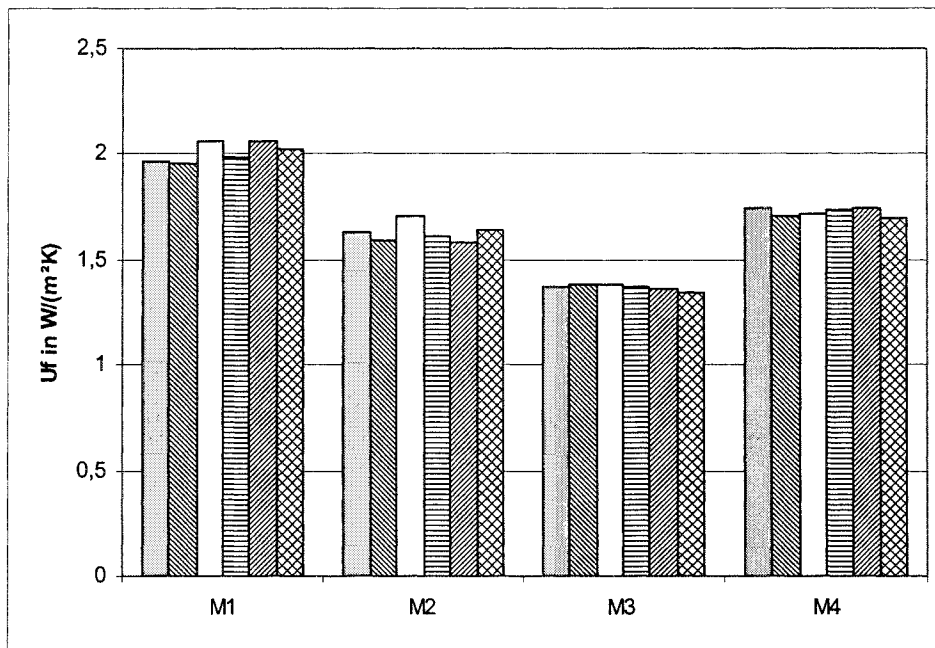
**Wärmedurchgangskoeffizient der Rahmenprofile M1 bis M4 und zugeordnete längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizienten bei SAH und TVA**

**A bis F: Einzelergebnisse der Rechenstellen**

**X: Mittelwert**

**Y: Standardabweichung**

Typ		A	B	C	D	E	F	X	Y	Einheit
M1	Uf	1,97	1,96	2,06	1,98	2,06	2,02	<b>2,01</b>	<b>0,045</b>	W/(m <sup>2</sup> ×K)
	SAH	0,101	0,096	0,099	0,105	0,098	0,099	<b>0,100</b>	<b>0,003</b>	W/(m×K)
	TVA	0,049	0,046	0,044	0,055	0,050	0,050	<b>0,049</b>	<b>0,004</b>	W/(m×K)
M2	Uf	1,62	1,59	1,71	1,61	1,58	1,64	<b>1,63</b>	<b>0,047</b>	W/(m <sup>2</sup> ×K)
	SAH	0,070	0,074	0,069	0,061	0,069	0,077	<b>0,070</b>	<b>0,005</b>	W/(m×K)
	TVA	0,042	0,042	0,040	0,033	0,040	0,039	<b>0,039</b>	<b>0,003</b>	W/(m×K)
M3	Uf	1,37	1,38	1,38	1,37	1,36	1,35	<b>1,37</b>	<b>0,012</b>	W/(m <sup>2</sup> ×K)
	SAH	0,087	0,089	0,078	0,090	0,081	0,081	<b>0,084</b>	<b>0,005</b>	W/(m×K)
	TVA	0,046	0,045	0,041	0,048	0,044	0,044	<b>0,045</b>	<b>0,002</b>	W/(m×K)
M4	Uf	1,75	1,71	1,72	1,74	1,75	1,70	<b>1,73</b>	<b>0,021</b>	W/(m <sup>2</sup> ×K)
	SAH	0,080	0,088	0,081	0,088	0,084	0,083	<b>0,084</b>	<b>0,003</b>	W/(m×K)
	TVA	0,045	0,044	0,046	0,046	0,045	0,045	<b>0,045</b>	<b>0,001</b>	W/(m×K)



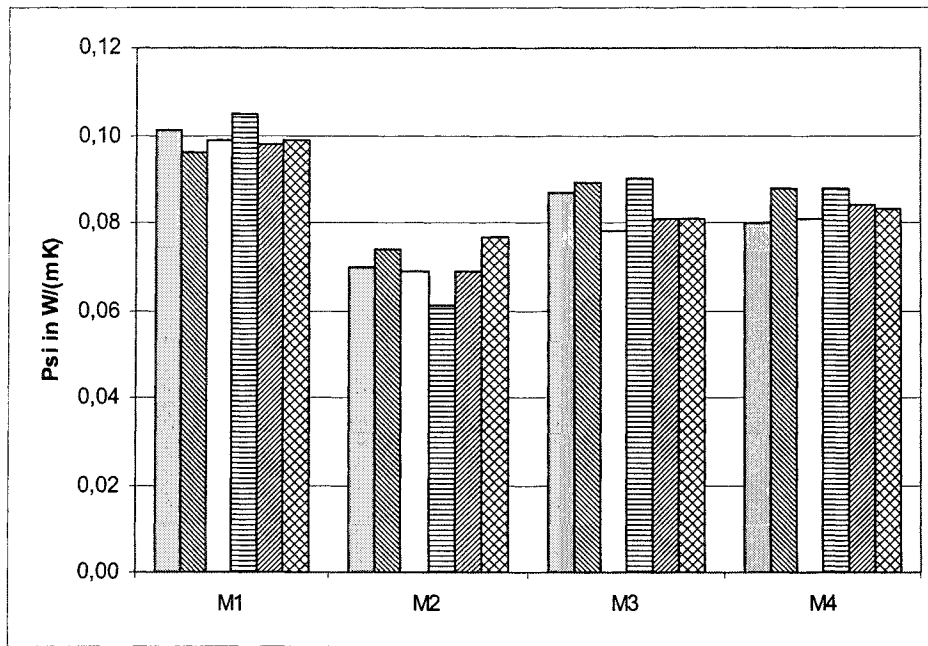
**Bild 9: Wärmedurchgangskoeffizient der Rahmenprofile M1 bis M4 berechnet bei sechs verschiedenen Rechenstellen.**

Die Abweichung der Berechnung der Wärmedurchgangskoeffizienten der Fensterprofile an verschiedenen Rechenstellen liegt bei maximal 3%, für die Holzprofile bei nur 1%. Diese Abweichung ist geringer als die einer internationalen Ringrechnung, siehe DIN EN ISO 10077-2.

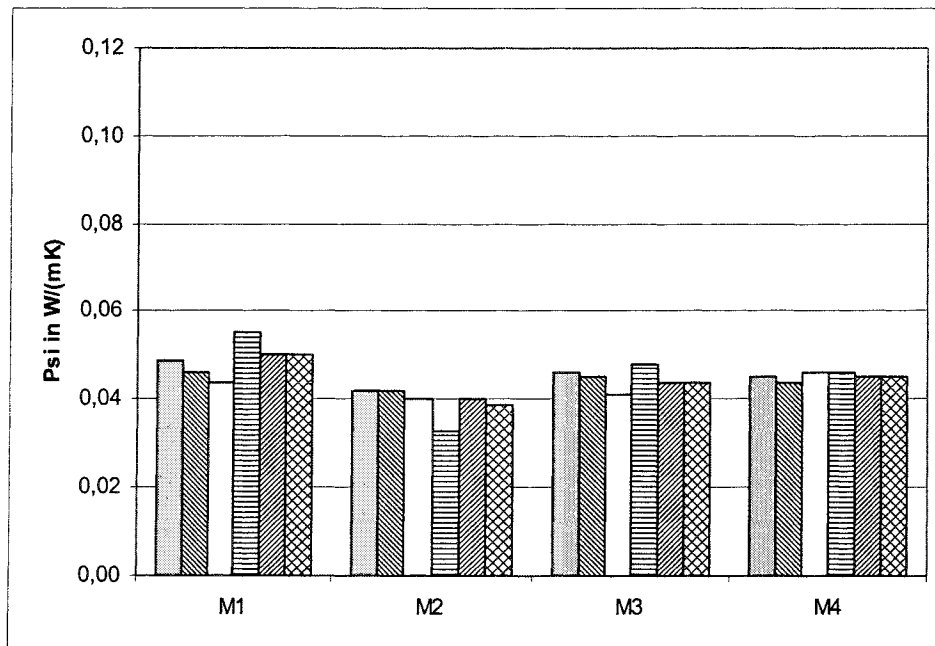
Die Berechnung des längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten zeigt eine mittlere Abweichung von 5%. Besonders gering ist die Abweichung bei Rahmenprofilen aus Holz. Die Ergebnisse sind in Bild 10 und Bild 11 dargestellt.

Damit wurde gezeigt, dass alle Programme bei genauer Definition der Ausgangssituation zur Berechnung geeignet sind. Besondere Aufmerksamkeit ist auf den Glaseinstand, die Rückenüberdeckung und die äquivalente Wärmeleitfähigkeit der Hohlräume zu legen.

Als wesentliche Einflussgröße ist der Wärmedurchgangskoeffizient der Verglasung mit  $1,1 \text{ W/m}^2 \times \text{K}$  und die Glasdicke mit 4 mm festzulegen. Bei Standard-Abstandhaltern ist ein signifikanter Unterschied zwischen Kunststoff- und Holzrahmen einerseits und Rahmen aus Aluminium andererseits vorhanden. Dieser Unterschied verringert sich bei thermisch verbesserten Abstandhaltern. Es erscheint daher möglich, den längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten von thermisch verbesserten Randverbundsystemen an einem einfachen Holzrahmen zu ermitteln und diesen Wert für alle Rahmensysteme zu verwenden.



**Bild 10: Längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizienten des Standard-Abstandhalters in Rahmenprofilen M1 bis M4. Ergebnisse sechs verschiedener Rechenstellen.**



**Bild 11: Längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizienten des thermisch verbesserten Abstandhalters in Rahmenprofilen M1 bis M4. Ergebnisse sechs verschiedener Rechenstellen.**

## 5 Messungen

### 5.1 Ziel

Ziel der Untersuchung ist, den längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizienten direkt durch Messung zu ermitteln und mit den entsprechenden theoretisch durch Berechnung nach DIN EN ISO 10077-2 ermittelten Werten zu vergleichen.

Außerdem werden die praktisch bedeutsamen Einflüsse und Unsicherheiten der Bestimmung längenbezogener Wärmedurchgangskoeffizienten ermittelt.

### 5.2 Durchführung

Zur Ermittlung des längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten sind insgesamt 3 Messungen notwendig:

- Messung des Fensters mit Isolierglas und Randverbund mit Standardabstandhalter  
Messwert:  $U_{w1}$
- Messung des Fensters mit Isolierglas und Randverbund mit thermisch verbessertem Abstandhalter  
Messwert  $U_{w2}$
- Messung des Fenster mit Dämmstoffpaneel  
Messwert:  $U_f$

Die Messung des Wärmedurchgangskoeffizienten an den kompletten Fenstern wird durchgeführt nach dem Prüfverfahren: DIN EN ISO 12567-1: 2001-02 Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten mittels des Heizkastenverfahrens, Teil 1: Komplette Fenster und Türen unter Berücksichtigung von CEN/TC89N 795 E.

In die Trennwand zwischen einem Warm- und einem Kaltraum wird der Probekörper so eingesetzt, dass seine Innenseite der Kammer mit der höheren Temperatur zugekehrt ist. Die Temperaturdifferenz der Luft zu beiden Seiten der Trennwand beträgt ca. 20 K. Auf der dem Warmraum zugewandten Seite des Probekörpers wird ein Heizkasten aufgesetzt und mittels einer elektrischen Heizung auf der gleichen Lufttemperatur wie der Warmraum gehalten. Die dem Heizkasten zugeführte Wärmeenergie fließt beim Versuch durch den Probekörper. Der Wärmedurchgangskoeffizient wird über die Umgebungstemperaturdifferenz und die Wärmestromdichte bestimmt.

Alle drei Messungen werden direkt hintereinander ausgeführt, ohne dass das Fenster ausgebaut wird. Lediglich die Füllung (Paneel, Verglasung) wird gewechselt. Hierdurch wird sichergestellt, dass keine Fehler infolge des Einbaus des Fensters in den Ergebnissen enthalten sind.

Die Auswertung hinsichtlich der im Aufbau vorhandenen  $\Psi$ -Werte erfolgt nach:

$$\Psi = \frac{U_w \cdot A_w - U_g \cdot A_g - U_f \cdot A_f}{l}$$

Die Werte der Wärmedurchgangskoeffizienten  $U_w$  und  $U_f$  folgen direkt aus den obigen Messungen.

Hauptproblem ist die Ermittlung der exakten Wärmeverluste durch die Verglasung ( $U_g$ ). Da die Effekte hinsichtlich der Bestimmung des Einflusses des Randverbundes klein sind (für die Messung) ist es erforderlich, den Wärmeverlust über die Verglasung mit einer möglichst hohen Genauigkeit zu bestimmen.

Folgende Vorgehensweisen sind denkbar:

1. Ermittlung des  $U_g$ -Wertes mittels Wärmeflussmesser während der Messung von  $U_w$
2. Ermittlung des  $U_g$ -Wertes durch Berechnung nach DIN EN 673  
Hierzu müssen bekannt sein:
  - Gasfüllgrad
  - Emissionsvermögen der Beschichtung
  - Scheibenzwischenraum während der Messung von  $U_w$  (Beachtung der Durchbiegung)
  - Temperaturdifferenz über die Scheibe während der Messung von  $U_w$
  - Wärmeübergangswiderstände während der Messung von  $U_w$
3. Verwendung einer Glasfüllung, bei welcher der SZR der Verglasung mit Dämmstoff gefüllt ist. Die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffes kann mittels Plattenapparatur erfolgen.

Die Entscheidung, welche Vorgehensweise durchgeführt wurde, wurde von der entsprechenden messenden Stelle getroffen. Unter Umständen kann Vorgehensweise 1 und 2 kombiniert werden und hierdurch noch weitere Erkenntnisse gesammelt werden.

Die Messungen wurden an folgenden anerkannten Prüfstellen durchgeführt. Die Außenabmessungen der Prüffenster betragen 1,23 m x 1,48 m. Die Querschnitte der Rahmenprofile sind in Anhang A dargestellt.

Typ	Rahmenmaterial	Prüfstelle
M1	Aluminium	FIW, München
M2	PVC	ift, Rosenheim
M3	Holz	IBP, Stuttgart

### 5.3 Messung M1 (Al)

#### 5.3.1 Durchführung

Die Messungen an einem Fenster mit Rahmen aus Aluminium wurden am Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. (FIW), München, durchgeführt.

Als Füllung wurden verwendet:

- Dämmstoff mit bekannter Wärmeleitfähigkeit (Messung mittels Plattenapparatur)
- Verglasung 4/16/4 mit Argonfüllung und low e Beschichtung auf Ebene 3 (nach Angabe des Herstellers); Randverbund mit Standardabstandhalter
- Verglasung 4/16/4 mit Argonfüllung und low e Beschichtung auf Ebene 3 (nach Angabe des Herstellers); Randverbund mit thermisch verbessertem Abstandhalter

#### 5.3.2 Ergebnisse

##### Messung Fenster mit Dämmstoff

Für das Fenster mit Dämmstoff wurde ein  $U_w$  von 1,31 W/(m<sup>2</sup>K) ermittelt. Aus diesem Wert ergibt sich unter Berücksichtigung der über den Dämmstoff geflossenen Wärmemenge ein Wärmedurchgangskoeffizient des Rahmens von

$$U_f = 1,97 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

##### Messung Fenster mit Verglasung und Standardabstandhalter sowie thermisch verbessertem Abstandhalter

$$U_w = 1,65 \text{ W/(m}^2\text{K)} \quad \text{Standardabstandhalter}$$

$$U_w = 1,74 \text{ W/(m}^2\text{K)} \quad \text{thermisch verbesserter Abstandhalter}$$

Der U-Wert der Verglasung wurde während beider Messungen mittels einer kalibrierten Wärmeflussmessplatte ermittelt.

$$U_g = 1,20 \pm 0,014 \text{ W/(m}^2\text{K)} \quad \text{Standardabstandhalter}$$

$$U_g = 1,50 \pm 0,018 \text{ W/(m}^2\text{K)} \quad \text{thermisch verbesserter Abstandhalter}$$

Die Beschaffenheit beider Verglasungen muss aufgrund der gefundenen  $U_f$ -Werte sehr unterschiedlich gewesen sein.

##### Längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizienten $\Psi$ :

$$\Psi = 0,097 \text{ W/(m}\times\text{K)} \quad \text{Standardabstandhalter}$$

$$\Psi = 0,045 \text{ W/(m}\times\text{K)} \quad \text{thermisch verbesserter Abstandhalter}$$



### 5.3.3 Messunsicherheit

Da prinzipiell keine völlig exakten Messungen möglich sind, ist es für die Beurteilung eines Messwertes wichtig, diesen mit einem Messbereich (Unsicherheitsbereich) anzugeben, in dem der gemessene Wert mit hoher Wahrscheinlichkeit liegt. Die Messunsicherheit ist in Übereinstimmung mit DIN V ENV 13005 „Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen“ (GUM) [6] bestimmt worden.

Die Ausgangsgleichung zur Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten  $\Psi_{\text{edge}}$  lautet:

$$\Psi_{\text{edge}} = \Psi_{\text{edge}}(U_w, U_g, U_f, A_g, A_f, l_g) = \frac{U_w \cdot A_w - U_g \cdot A_g - U_f \cdot A_f}{l_g}$$

Zur Berechnung der kombinierten Standardunsicherheit  $u_c(\Psi_{\text{edge}})$  gemäß

$$u_c^2(\Psi_{\text{edge}}) = \sum_{i=1}^6 \left( \frac{\partial \Psi}{\partial X_i} u(X_i) \right)^2 + 2 \cdot \sum_{i=1}^5 \sum_{j=i+1}^6 \frac{\partial \Psi}{\partial X_i} \frac{\partial \Psi}{\partial X_j} \cdot u(X_i) \cdot u(X_j) \cdot \rho(X_i, X_j)$$

werden die Standardunsicherheiten  $u(X_i)$ , die Korrelationskoeffizienten  $\rho$  sowie die partiellen Ableitungen nach den einfließenden Größen benötigt.

Letztere lauten

$$\frac{\partial \Psi}{\partial U_w} = \frac{A_g + A_f}{l_g}, \quad \frac{\partial \Psi}{\partial U_g} = -\frac{A_g}{l_g}, \quad \frac{\partial \Psi}{\partial U_f} = -\frac{A_f}{l_g}, \quad \frac{\partial \Psi}{\partial A_g} = \frac{U_w - U_g}{l_g}$$

$$\frac{\partial \Psi}{\partial A_f} = \frac{U_w - U_f}{l_g}, \quad \frac{\partial \Psi}{\partial l_g} = -\frac{\Psi}{l_g}$$

Wegen  $l_g = 2(h_g + b_g)$ ,  $A_g = h_g \cdot b_g$  und  $A_f = h_f \cdot b_f - h_g \cdot b_g$ , wobei die h's und b's die Höhe und Breite der Glas- bzw. Rahmenfläche bezeichnen, ergeben sich folgende (empirisch ermittelte) Korrelationskoeffizienten:

$$\rho(A_g, l_g) = 1, \quad \rho(A_f, l_g) = -0,5, \quad \rho(A_g, A_f) = -0,5$$

und Null sonst.

Die Standardunsicherheiten  $u$  für  $U_w$ ,  $U_g$  und  $U_f$  wurden in vorangehenden Untersuchungen ermittelt und liegen als Prozentwerte vor.

Zur Bestimmung der Unsicherheiten  $u(A_g)$ ,  $u(A_f)$  und  $u(l_g)$  wurden jeweils 10 Messungen der einfließenden Größen  $h_g$ ,  $b_g$ ,  $h_f$  und  $b_f$  durchgeführt.

Aus den beobachteten Varianzen dieser Größen (Methode A) und unter Berücksichtigung der endlichen Skalenaufösung des Maßbandes (Methode B, rechteckige Dichtefunktion) ergeben sich analog zu der oben beschriebenen Vorgehensweise die Unsicherheiten wie in den folgenden Tabellen angegeben:

**Tab.17: Berechnung der kombinierten Messunsicherheit von  $\Psi_{edge}$  für Fenster mit Standardabstandhalter**

Bez.	Wert	Einheit	Un-sich. in %	Un-sich. u(x)	c=df/dx	c u(x)	Korrelationskoeffizienten					
U <sub>w</sub>	1,65	W/(m <sup>2</sup> ×K)	1,1	0,0182	0,3914	0,0071	1					
U <sub>g</sub>	1,20	W/(m <sup>2</sup> ×K)	1,5	0,0180	-0,2882	-0,0052		1				
U <sub>f</sub>	1,97	W/(m <sup>2</sup> ×K)	1,3	0,0256	-0,1032	-0,0026			1			
A <sub>g</sub>	1,34	m <sup>2</sup>	-	0,0024	0,0968	0,0002				1	-0,5	1
A <sub>f</sub>	0,48	m <sup>2</sup>	-	0,0034	-0,0688	-0,0002				-0,5	1	-0,5
I <sub>g</sub>	4,65	m	-	0,0036	-0,0208	-0,0001				1	-0,5	1
$\Psi_{edge}$	<b>0,0966</b>	W/(m×K)	<b>9,5</b>	<b>0,0092</b>								

**Tab.18: Berechnung der kombinierten Messunsicherheit von  $\Psi_{edge}$  für Fenster mit thermisch verbessertem Abstandhalter**

Bez.	Wert	Einheit	Un-sich. in %	Un-sich. u(x)	c=df/dx	c u(x)	Korrelationskoeffizienten					
U <sub>w</sub>	1,74	W/(m <sup>2</sup> ×K)	1,1	0,0191	0,3914	0,0075	1					
U <sub>g</sub>	1,50	W/(m <sup>2</sup> ×K)	1,5	0,0225	-0,2882	-0,0065		1				
U <sub>f</sub>	1,97	W/(m <sup>2</sup> ×K)	1,3	0,0256	-0,1032	-0,0026			1			
A <sub>g</sub>	1,34	m <sup>2</sup>	-	0,0024	0,0516	0,0001				1	-0,5	1
A <sub>f</sub>	0,48	m <sup>2</sup>	-	0,0034	-0,0495	-0,0002				-0,5	1	-0,5
I <sub>g</sub>	4,65	m	-	0,0036	-0,0098	-0,0000				1	-0,5	1
$\Psi_{edge}$	<b>0,0454</b>	W/(m×K)	<b>22,6</b>	<b>0,0103</b>								

Für eine Normalverteilung, die hier näherungsweise vorliegt, ergibt ein Erweiterungsfaktor von **k = 2** eine etwa 95-prozentige Überdeckungswahrscheinlichkeit.

Die erweiterte Messunsicherheit  $U = k \cdot u$  beträgt:

$$U_{SAH} = 0,017 \text{ W/(m} \times \text{K)}$$

$$U_{TVA} = 0,019 \text{ W/(m} \times \text{K)}$$

Damit lautet das Messergebnis:

$$\Psi_{edge} = 0,097 \pm 0,017 \text{ W/(m} \times \text{K)} \text{ (Standardabstandhalter)}$$

$$\Psi_{edge} = 0,045 \pm 0,019 \text{ W/(m} \times \text{K)} \text{ (thermisch verbesserter Abstandhalter)}$$

## 5.4 Messung M2 (PVC)

### 5.4.1 Durchführung

Die Messungen an einem Fenster mit Rahmen aus PVC wurden am Institut für Fenstertechnik (ift), Rosenheim, durchgeführt.

Als Füllung wurden verwendet:

- Dämmstoff mit bekannter Wärmeleitfähigkeit (Messung mittels Plattenapparatur)
- Verglasung 4/16/4 mit Argonfüllung (96%) und low e-Beschichtung auf Ebene 3 ( $\varepsilon_n = 0,04$ ), Randverbund mit Standardabstandhalter
- Verglasung 4/16/4 mit Argonfüllung (91%) und low e-Beschichtung auf Ebene 3 ( $\varepsilon_n = 0,04$ ), Randverbund mit thermisch verbessertem Abstandhalter

Der Unterschied in der Gasfüllung führt nach DIN EN 673 bei der während der Messung vorhandenen Temperaturdifferenz von 16,3 K zu einem  $\Delta U_g = 0,02 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ .

### 5.4.2 Ergebnisse

#### Messung Fenster mit Dämmstoff

Für das Fenster mit Dämmstoffe wurde ein  $U_w$  von  $0,95 \text{ W/m}^2\text{K}$  ermittelt. Aus diesem Wert ergibt sich unter Berücksichtigung der über den Dämmstoff geflossenen Wärmemenge ein Wärmedurchgangskoeffizient des Rahmens von

$$U_f = 1,36 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

#### Messung Fenster mit Verglasung und Standard Abstandhalter sowie thermisch verbessertem Abstandhalter

$$U_w = 1,43 \text{ W/(m}^2\text{K)} \quad \text{Standardabstandhalter}$$

$$U_w = 1,40 \text{ W/(m}^2\text{K)} \quad \text{thermisch verbesserter Abstandhalter}$$

Der U-Wert der Verglasung wurde während beiden Messungen mittels einer kalibrierten Wärmeflussmessplatte ermittelt. Um die Genauigkeit der Wärmeflussmessplatte zu überprüfen, wurde während der Messung des Wärmedurchgangskoeffizienten des Fensters mit Dämmstoff (siehe oben) zusätzlich der Wärmedurchlasswiderstand und somit die Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffes mittels dieses Wärmeflussmessers ermittelt. Somit konnte eine Abschätzung des Fehlers bei der Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten der Verglasung erfolgen.

$$U_g = 1,255 \pm 0,02 \text{ W/(m}^2\text{K)} \quad \text{Standardabstandhalter}$$

$$U_g = 1,263 \pm 0,02 \text{ W/(m}^2\text{K)} \quad \text{thermisch verbesserter Abstandhalter}$$

**Längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizienten  $\Psi$ :**

$$\Psi = 0,058 \text{ W}/(\text{m}\times\text{K}) \quad \text{Standardabstandhalter}$$

$$\Psi = 0,043 \text{ W}/(\text{m}\times\text{K}) \quad \text{thermisch verbesserter Abstandhalter}$$

**5.4.3 Fehlerbetrachtung**

Für den längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizient  $\Psi$  gilt

$$\Psi = \frac{U_w \cdot A_w - U_g \cdot A_g - U_f \cdot A_f}{l}$$

Die Größen  $A_w$ ,  $A_g$ ,  $A_f$  und  $l$  ergeben sich aus

$$A_w = l_1 \cdot l_2, \quad A_g = (l_1 - 2 \cdot l_f) \cdot (l_2 - 2 \cdot l_f),$$

$$A_f = A_w - A_g, \quad l = 2 \cdot ((l_1 - 2 \cdot l_f) + (l_2 - 2 \cdot l_f))$$

Entsprechend dem Fehlerfortpflanzungsgesetz ergibt sich der Fehler  $\Delta\Psi$  zu

$$\Delta\Psi^2 = \sum_i \left( \frac{\partial\Psi}{\partial X_i} \right)^2 \cdot \Delta X_i^2$$

wobei  $X_i$  die fehlerbehafteten Größen sind. Alle oben aufgeführten Messgrößen sind im Prinzip fehlerbehaftet. Tab.19 stellt die Ermittlung des Fehlers bei der Ermittlung des  $\Psi$ -Wertes erforderlichen Größen mit deren Einzelfehler dar.

**Tab.19:** Darstellung der Eingangskenngrößen sowie die zugehörigen Messunsicherheiten für die Ermittlung des Fehlers bei der Messung des  $\Psi$ -Wertes

Größe	Messwert (SAH)	Messunsicherheit (SAH)	Messwert (TVA)	Messunsicherheit (TVA)
$U_w$	1,43	0,03	1,40	0,03
$U_g$	1,25	0,02	1,26	0,02
$U_f$	1,36	0,04	1,36	0,04
$l_1$	1,23	0,001	1,23	0,001
$l_2$	1,48	0,001	1,48	0,001
$l_f$	0,118	0,001	0,118	0,001

Die Berechnung des Standardfehlers für  $\Psi$  wurde nach ISO GUM [6] mit Hilfe des Programms GUM Workbench durchgeführt und führte zu

$$\Delta\Psi = 0,014 \text{ W}/(\text{m}^2\times\text{K}) \quad (\text{einfache Unsicherheit})$$

Für die ermittelten  $\Psi$ -Werte ergibt somit folgende Darstellung:

$$\Psi = 0,058 \pm 0,014 \text{ W}/(\text{m}\times\text{K}) \quad \text{Standardabstandhalter}$$

$$\Psi = 0,043 \pm 0,014 \text{ W}/(\text{m}\times\text{K}) \quad \text{thermisch verbesserter Abstandhalter}$$

## 5.5 Messung M3 (Holz)

### 5.5.1 Durchführung

Die Messungen wurden am Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP), Stuttgart, an einem Fenster mit Rahmen aus Massivholz (Meranti) durchgeführt.

Als Füllung wurden verwendet:

- Verglasung 4/16/4,  $U_g = 1,1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  (Herstellerangabe), Argonfüllung 89 Vol-% (gemessen) und low e -Beschichtung, Randverbund mit Standardabstandhalter
- Verglasung 4/16/4,  $U_g = 1,55 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  (gemessen), Argonfüllung 0 Vol-% (gemessen) und low e Beschichtung, Randverbund mit thermisch verbessertem Abstandhalter
- Dämmpaneel PS, Dicke 22 mm, Wärmeleitfähigkeit im Plattengerät ermittelt

### 5.5.2 Ergebnisse

#### Messung Fenster mit Dämmpaneel

Durch die Messung des Fensters mit einem PS-Dämmpaneel mit bekannter Wärmeleitfähigkeit wurde der Wärmedurchgangskoeffizient des Rahmens  $U_f$  bestimmt:

$$U_f = 1,38 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$$

#### Messung Fenster mit Standardabstandhalter

$$U_w = 1,32 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$$

#### Messung Fenster mit thermisch verbessertem Abstandhalter

Für das Fenster mit o. g. Verglasung und thermisch verbessertem Abstandhalter wurde aufgrund des fehlenden Argons der Wärmedurchgangskoeffizient der Verglasung punktuell mit zwei Miniaturwärmestrommessern zu  $U_G = 1,55 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  bestimmt.

$$U_w = 1,61 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$$

#### Längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizienten $\Psi$ :

$$\Psi = 0,052 \text{ W}/(\text{m K}) \quad \text{Standardabstandhalter}$$

$$\Psi = 0,048 \text{ W}/(\text{m K}) \quad \text{thermisch verbesserter Abstandhalter}$$

### 5.5.3 Messunsicherheit

Für die Ermittlung der Messunsicherheit der ermittelten längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten  $\Psi$  wurde das Programm GUM Workbench 1.2 der Fa. Metrodata GmbH verwendet. Das Programm basiert auf „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)“ [6]. Der Messunsicherheitsberechnung wurde folgende Modellgleichung zugrunde gelegt:

$$\Psi = \frac{U_w \cdot (A_g + A_f) - (U_g \cdot A_g) - (U_f \cdot A_f)}{l}$$

In der folgenden Tab.17 ist das Messunsicherheits-Budget für die  $\Psi$ -Wert-Ermittlung mit Standardabstandhalter und thermisch verbessertem Abstandhalter zusammengestellt:

**Tab.20: Messunsicherheits-Budget zur Ermittlung der Messunsicherheit der  $\Psi$ -Werte**

Größe	Einheit	Messwert (SAH)	Unsicherheit (SAH)	Messwert (TVA)	Unsicherheit (TVA)
$U_w$	W/(m <sup>2</sup> ×K)	1,32	0,03	1,61	0,03
$A_g$	m <sup>2</sup>	1,21	0,001	1,21	0,001
$A_f$	m <sup>2</sup>	0,61	0,006	0,61	0,006
$U_g$	W/(m <sup>2</sup> ×K)	1,10	0,02	1,55	0,12 <sup>1</sup>
$U_f$	W/(m <sup>2</sup> ×K)	1,38	0,03	1,38	0,03
$l_g$	m	4,42	0,004	4,42	0,004
$\Psi$	W/(m×K)	0,052	0,013	0,048	0,035

<sup>1</sup> Die hohe Messunsicherheit basiert auf einer Messunsicherheit der verwendeten Wärmestrommesser von  $\pm 7,5\%$ .

Für die Messunsicherheit der ermittelten  $\Psi$ -Werte ergibt sich nach GUM eine

- einfache Messunsicherheit mit  $k = 1$
- erweiterte Messunsicherheit mit  $k = 2,2$  für eine 95 %- Überdeckungswahrscheinlichkeit

#### Standardabstandhalter:

$$\Psi = 0,052 \pm 0,013 \text{ W/(m K)} \quad (\text{einfache Messunsicherheit})$$

$$\Psi = 0,052 \pm 0,029 \text{ W/(m K)} \quad (\text{erweiterte Messunsicherheit})$$

#### thermisch verbesserter Abstandhalter:

$$\Psi = 0,048 \pm 0,035 \text{ W/(m K)} \quad (\text{einfache Messunsicherheit})$$

$$\Psi = 0,048 \pm 0,076 \text{ W/(m K)} \quad (\text{erweiterte Messunsicherheit})$$

## 5.6 Vergleich Rechnung – Messung

In Tabelle 21 sind die Ergebnisse der Messungen und der Berechnung zusammengestellt. Neben dem Wert ist die einfache Messunsicherheit bzw. die einfache Standardabweichung der Berechnung angegeben. Um Abweichungen durch unterschiedliche Randbedingungen zu vermeiden wurden bei der Berechnung der längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten die tatsächlichen Randbedingungen zugrundegelegt. Dabei zeigte sich, dass nur der bei M2 mit 17 mm größere Glaseinstand zu beachten war.

**Tab. 21: Vergleich der Ergebnisse aus Messung und Berechnung**

Rahmen- typ		Messung	Berechnung <sup>2</sup>	Einheit
M1	$U_f$	1,97	2,01 ±0,043	W/(m <sup>2</sup> ×K)
	$\Psi_{SAH}$	0,097 ±0,017	0,100 ±0,006	W/(m×K)
	$\Psi_{TVA}$	0,045 ±0,019	0,049 ±0,003	W/(m×K)
M2	$U_f$	1,36	1,63 ±0,005	W/(m <sup>2</sup> ×K)
	$\Psi_{SAH}$	0,058 ±0,014	0,060 ±0,004	W/(m×K)
	$\Psi_{TVA}$	0,043 ±0,014	0,036 ±0,002	W/(m×K)
M3 <sup>1</sup>	$U_f$	1,38	1,46 ±0,014	W/(m <sup>2</sup> ×K)
	$\Psi_{SAH}$	0,052 ±0,013	0,085 ±0,004	W/(m×K)
	$\Psi_{TVA}$	0,048 ±0,035 <sup>3</sup>	0,045 ±0,002	W/(m×K)

<sup>1</sup> Berechnung mit Meranti  $\rho = 400 \text{ kg/m}^3$ ,  $\lambda = 0,13 \text{ W/(m×K)}$

1:3 gewichtetes Mittel aus den Werten Rahmen unten und oben/seite

<sup>2</sup> Mittelwert und Standardabweichung aus der Vergleichsrechnung;

Die Berechnungen wurden mit dem tatsächlichen Glaseinstand durchgeführt.

<sup>3</sup> siehe Erläuterung zu Tab 18

Die Wärmedurchgangskoeffizienten der Rahmenprofile stimmen mit Ausnahme des Kunststoff-Fensters gut überein. Die Abweichungen sind bekannt, eine Analyse der möglichen Ursachen ist aber nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchung.

Der Vergleich der längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizient ergibt eine gute Übereinstimmung. Die Abweichungen liegen mit einer Ausnahme innerhalb der einfachen Unsicherheit.

## 6 Vorschlag zur Umsetzung

### 6.1 Berechnung

Bei Beachtung der Hinweise in Abschnitt 2 ist eine qualifizierte Berechnung längenbezogener Wärmedurchgangskoeffizienten möglich. Problematisch bleibt die nach DIN EN ISO 10211-1 und DIN EN ISO 10077-2 vorgegebene Modellierung von Hohlräumen durch eine isotrope äquivalente Wärmeleitfähigkeit. Hohlräume, deren Seitenverhältnis stark von 1 abweicht, hängen in diesem Modell empfindlich von der gewählten Wärmestromrichtung ab. Diese unerwünschte Empfindlichkeit könnte durch eine anisotrope äquivalente Wärmeleitfähigkeit verringert werden.

Es wird deshalb empfohlen, DIN EN ISO 10077-2 entsprechend zu überarbeiten mit dem Ziel die Behandlung von Hohlräumen zu präzisieren und anisotrope äquivalente Wärmeleitfähigkeit zu verwenden.

### 6.2 Angabe von Kennwerten

Zur Ermittlung von längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizient als Produktkennwert von Isolierglasrandverbundsystemen sollten eindeutige Randbedingungen festgelegt werden. Zusätzlich zu den in DIN EN ISO 10077-2 getroffenen Festlegungen werden noch folgende Festlegungen vorgeschlagen:

- Ermittlung eines Kennwert für Holz/Kunststoffrahmen mit Hilfe des Muster-Rahmens nach DIN EN ISO 10077-2 Beispiel D.4 (Holz)
- Ermittlung eines Kennwert für Aluminiumrahmen mit Hilfe des Muster-Rahmens aus Aluminium nach DIN EN ISO 10077-2 Beispiel D.1 (Al)
- Glasaufbau 4/16/4 mit Wärmedurchgangskoeffizient ( $U_g$ ):  $1,1 \text{ W/m}^2 \times \text{K}$
- Standardabstandhalter nach DIN EN ISO 10077-2 Beispiel D.10

In DIN EN ISO 10077-2 wird der Glaseinstand auf maximal 15 mm begrenzt. Für Sonderprofile, welche einen deutlich größeren Glaseinstand vorsehen, sollte eine sachgerechtere Bewertung gefunden werden.

Die Unsicherheit der längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten beträgt relativ ca. 10%, bzw. absolut bei thermisch verbesserten Randverbundsystemen ca.  $0,005 \text{ W/(m} \times \text{K)}$ . Für die Angabe von Kennwerten sind möglich:

- Multiplikation des berechneten Wertes mit dem Faktor 1,1 als Sicherheitsbeiwert, zur Berücksichtigung unterschiedlicher Rahmengenometrien und Glasaufbauten, kaufmännische Rundung und Angabe auf  $0,001 \text{ W/(m} \times \text{K)}$ ;  
*Beispiel:*  $0,042 \times 1,1 = 0,0462 \rightarrow 0,046 \text{ W/(m} \times \text{K)}$   
 $0,060 \times 1,1 = 0,0660 \rightarrow 0,066 \text{ W/(m} \times \text{K)}$



- Aufrundung des berechneten Wertes auf 0,005 W/(m×K)

*Beispiel:* 0,042 → 0,045 W/(m×K)

0,060 → 0,060 W/(m×K)

Eine Auswahl der Vorgehensweise sollte mit der Einteilung in Klassen und der Auswahl der Sicherheitsbeiwerten für die anderen Bauprodukte und Kennwerte, wie Rahmenprofile, Verglasung, Rollladenkasten, erfolgen. Damit würde eine Ungleichbehandlung und Überbewertung einzelner Einflüsse vermieden.

## 7 Zusammenfassung

### 7.1 Berechnung

Alle eingesetzten Programme zur Berechnung des längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten des Übergangs Rahmen-Glasrand-Glas erfüllen die Anforderungen der aktuellen Normen.

Die Verwendung verschiedener Programme an den unterschiedlichen Rechenstellen führte zu einer Unsicherheit (einfache Standardabweichung) bei :

- den Wärmedurchgangskoeffizienten der Rahmen ( $U_f$ ) von kleiner 3%
- den längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten (Psi-Wert) von im Mittel 5% maximal 10%.

Die Sensitivitätsanalyse weist den Einfluss auf den längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten aus. Besonders die Wahl des Glases hinsichtlich Glasdicke und Wärmedurchgangskoeffizient, sowie die Fertigungstoleranzen Rückenüberdeckung und Glaseinstand beeinflussen das Ergebnis:

- eine Verringerung/Erhöhung des Wärmedurchgangskoeffizienten des Glases um  $0,1 \text{ W/m}^2 \times \text{K}$  erhöht/verringert den längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten (Psi-Wert) um  $0,001$  bis  $0,002 \text{ W/(m} \times \text{K)}$
- Eine Erhöhung der Glasdicke um  $1 \text{ mm}$  erhöht den längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten (Psi-Wert) um  $0,002$  bis  $0,005 \text{ W/(m} \times \text{K)}$
- $\pm 2 \text{ mm}$  Glaseinstand in den Rahmen verändert das Ergebnis um  $0,003$  bis  $0,008 \text{ W/(m} \times \text{K)}$
- $\pm 1 \text{ mm}$  Rückenüberdeckung des Abstandhalters verändert das Ergebnis um  $0,002$  bis  $0,005 \text{ W/(m} \times \text{K)}$ .

Die Unsicherheit in der rechnerischen Bestimmung längenbezogener Wärmedurchgangskoeffizienten durch unterschiedliche Rechenprogramme und Rechenstellen liegt in der gleichen Größenordnung wie der unvermeidbare Einfluss von Fertigungstoleranzen.

Die absolute Unsicherheit liegt bei  $0,005 \text{ W/(m} \times \text{K)}$ . Es wird deshalb empfohlen, längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizienten auf  $0,001 \text{ W/(m} \times \text{K)}$  zu ermitteln und anschließend auf  $0,005 \text{ W/(m} \times \text{K)}$  aufzurunden.

*Beispiel:*

$0,041$  bis  $0,045 \rightarrow \underline{0,045} \text{ W/(m} \times \text{K)}$  und  $0,046$  bis  $0,050 \rightarrow \underline{0,050} \text{ W/(m} \times \text{K)}$

## 7.2 Vergleich mit Messung

Die Messungen der Wärmedurchgangskoeffizienten an den drei Fenstern aus Aluminium, Kunststoff und Holz liegen im Vergleich zur Berechnung nach DIN EN ISO 10077-2 mit Ausnahme des Kunststoff-Fensters innerhalb der einfachen Unsicherheit. Diese Abweichung bei Kunststoff-Fenstern ist bekannt, eine genauere Analyse ist aber nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchung.

Die Analyse der Messunsicherheit des längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten (nach GUM) bei den verschiedenen Messstellen mit den unterschiedlichen Rahmenvariationen beträgt einheitlich ca. 25% (einfache Unsicherheit) oder bei thermisch verbesserten Randverbundsystemen absolut 0,01 W/(m<sup>2</sup>·K). Eine Verminderung der Messunsicherheit würde eine größere Anzahl an Messungen erfordern. Eine direkte experimentelle Ermittlung ist wegen des hohen Aufwandes vorwiegend für wissenschaftliche Untersuchungen geeignet und sollte bei der Überarbeitung der Normen nicht als gleichwertige Alternative zur rechnerischen Bestimmung genannt werden.

Im Rahmen der vorhandenen Messunsicherheit stimmen die experimentell ermittelten längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten ausgezeichnet mit den nach DIN EN ISO 10077-2 berechneten Werte überein. Voraussetzung waren gute Kenntnisse und ausreichende Erfahrung bei Ermittlung der Kennwerte durch Messung und Berechnung. Eine wirklichkeitsnahe Bestimmung des längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten durch Berechnung ist daher gegeben und sollte im baurechtlichen Nachweisverfahren zur Festlegung von Kennwerten im Rahmen der EnEV verwendet werden.

## Literaturverzeichnis

- [1] Wolfseher, U.: Verfahren zur Berechnung zwei- oder dreidimensionaler Temperatur- und Wärmestromfelder in Bauteilen. Bauphysik 2 (1980) Heft 3, S. 83-87
- [2] Feldmeier, F.; u.a.: Beurteilung der Tauwassergefahr bei Bauanschlüssen; BBauBl 36 (1987) Heft 5, S.298-303
- [3] Institut für Fenstertechnik e.V., Rosenheim, nicht veröffentlichte Forschungsergebnisse (2001)
- [4] Lude, G., Schnieders, J., Dörnfeld, C., Großlos, H., Kaiser, R., König, N., Sack, N.: Wärmebrücken-Ringrechnung. Bauphysik 2 (2002) Heft 4, S. 228ff
- [5] Tanaka, T., Tanaka, K.: STATWL, Rechenprogrammsystem zur Bestimmung des stationären, dreidimensionalen Wärmetransports mit Hilfe der Finiten-Differenzen-Methode. Programmbeschreibung GS-01, Version 1.03, 1997, Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart
- [6] GUM, Guide to the expression of the uncertainty in measurement, ISO im Namen von BIPM/IEC/IIFCC/ISO/OIML/IUPAC/IUPAC, ISBN 92 67 10188 9, 1993 / 1995
- [7] Abschlussbericht „Warm Edge“ – Berechnung des linearen Wärmedurchgangskoeffizienten  $\psi$  für Abstandhalter von Mehrscheiben-Isolierglas, Institut für Fenstertechnik e.V., Rosenheim, Juli 1999

## Verzeichnis der Normen

**DIN EN 673:2001-01**

Glas im Bauwesen - Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) - Berechnungsverfahren

**DIN V 4108-4:2002-02**

Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte

**DIN EN ISO 6946:1996-11**

Bauteile - Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient - Berechnungsverfahren

**ISO 8301:1991-08**

Wärmeschutz; Bestimmung des stationären Wärmedurchlasswiderstandes und verwandter Eigenschaften; Verfahren mit dem Wärmestrommessplatten-Gerät

**ISO 8302:1991-08**

Wärmeschutz; Bestimmung des stationären Wärmedurchlasswiderstandes und verwandter Eigenschaften; Verfahren mit dem Plattengerät

**DIN EN ISO 10077-1:2000-11**

Wärmetechnisches Verhalten von Fenstern, Türen und Abschlüssen - Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten - Teil 1: Vereinfachtes Verfahren

**E DIN EN ISO 10077-2:1999-02**

Wärmetechnisches Verhalten von Fenstern, Türen und Abschlüssen - Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten - Teil 2: Numerisches Verfahren für Rahmen

**DIN EN ISO 10211-1:1995-08**

Wärmebrücken im Hochbau - Wärmeströme und Oberflächentemperaturen - Teil 1: Allgemeine Berechnungsverfahren (ISO 10211-1:1995); Deutsche Fassung EN ISO 10211-1:1995

**DIN EN ISO 10211-1:1995-11**

Wärmebrücken im Hochbau - Wärmeströme und Oberflächentemperaturen - Teil 1: Allgemeine Berechnungsverfahren (ISO 10211-1:1995); Deutsche Fassung EN ISO 10211-1:1995

**DIN EN ISO 10211-2:2001-06**

Wärmebrücken im Hochbau - Berechnung der Wärmeströme und Oberflächentemperaturen - Teil 2: Linienförmige Wärmebrücken

**DIN EN 12524:2000-07**

Baustoffe und -produkte - Wärme- und feuchteschutztechnische Eigenschaften - Tabellierte Bemessungswerte

**DIN EN ISO 12567-1: 2001-02**

Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten mittels des Heizkastenverfahrens, Teil 1: Komplett Fenster und Türen unter Berücksichtigung von CEN/TC89N 795 E

**(Norm-Entwurf) ISO/DIS 15099:2000-03**

Wärmetechnisches Verhalten von Fenstern, Türen und Verschattungseinrichtungen - Detaillierte Berechnungen

**(Vornorm) DIN V ENV 13005:1999-06**

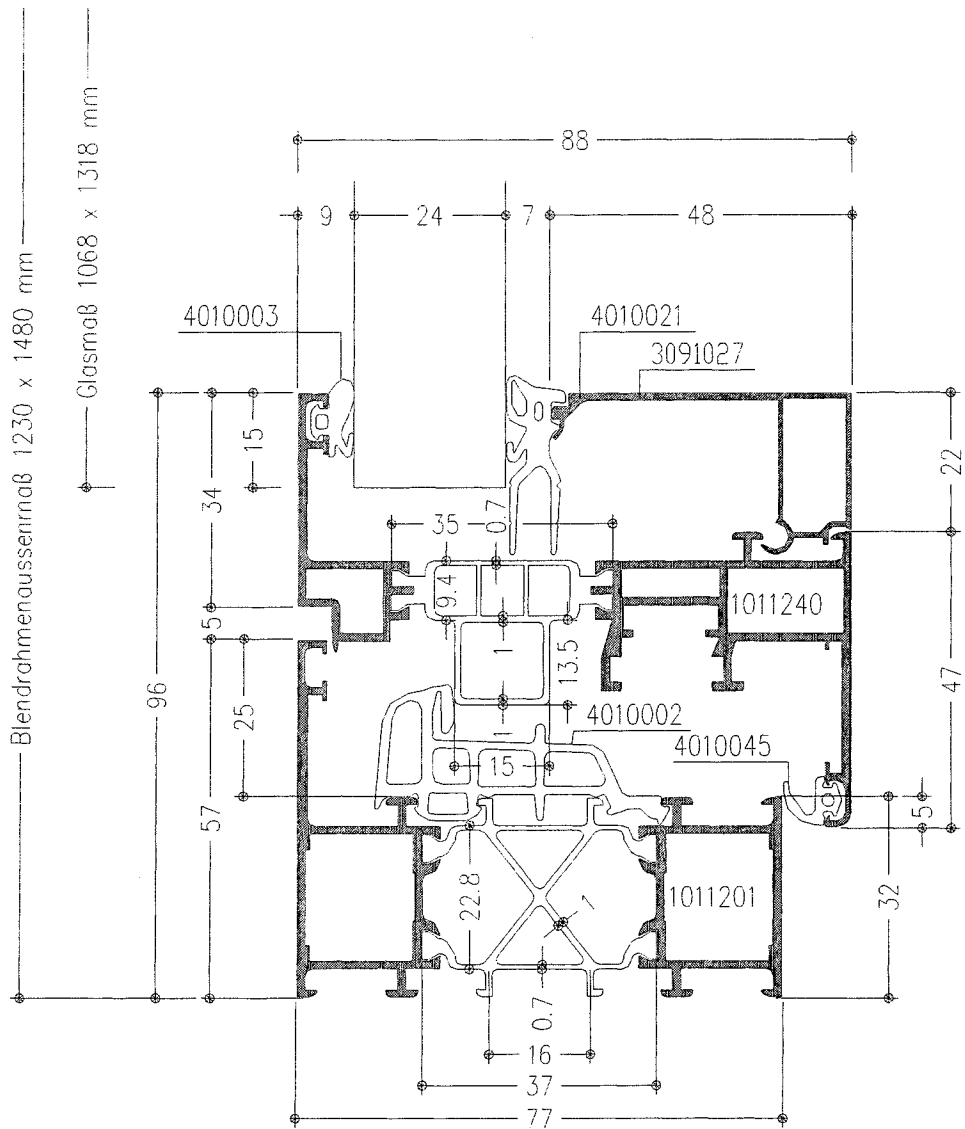
Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen



## Anhang A

### Querschnitte der Rahmenprofile

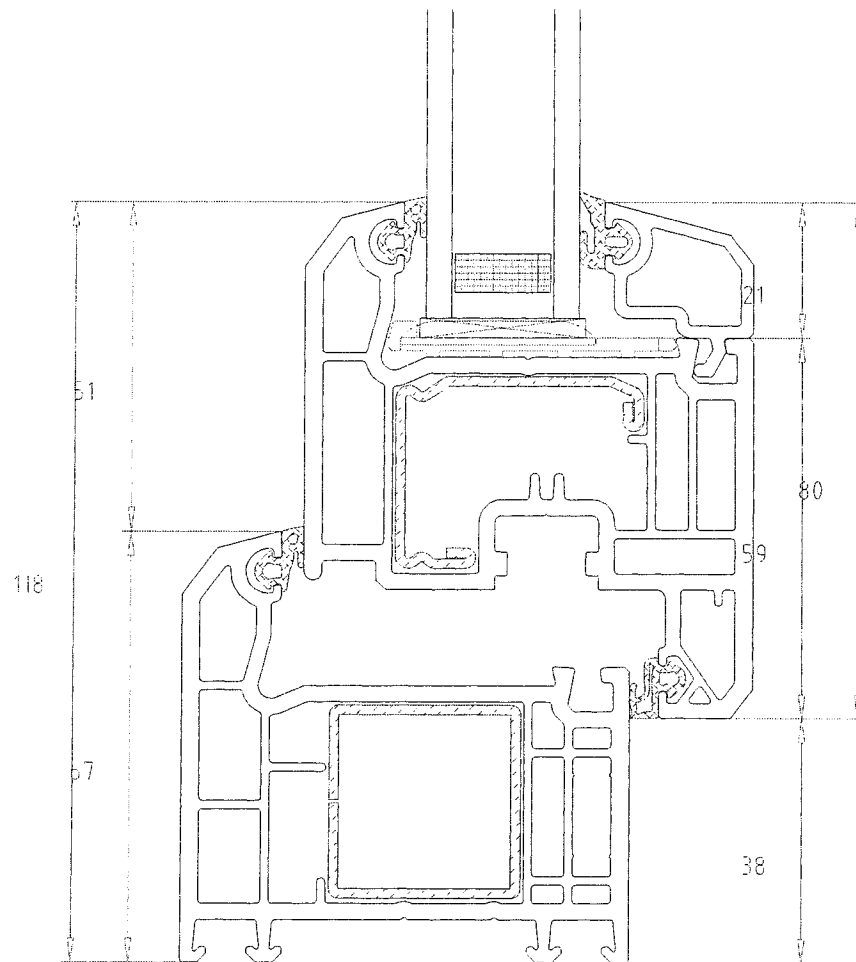
Bild 1: Rahmenprofil Aluminium Typ M1 .....	2
Bild 2: Rahmenprofil PVC Typ M2.....	3
Bild 3: Rahmenprofil Holz Querschnitt oben Typ M3, Querschnitt unten Typ M4 .....	4



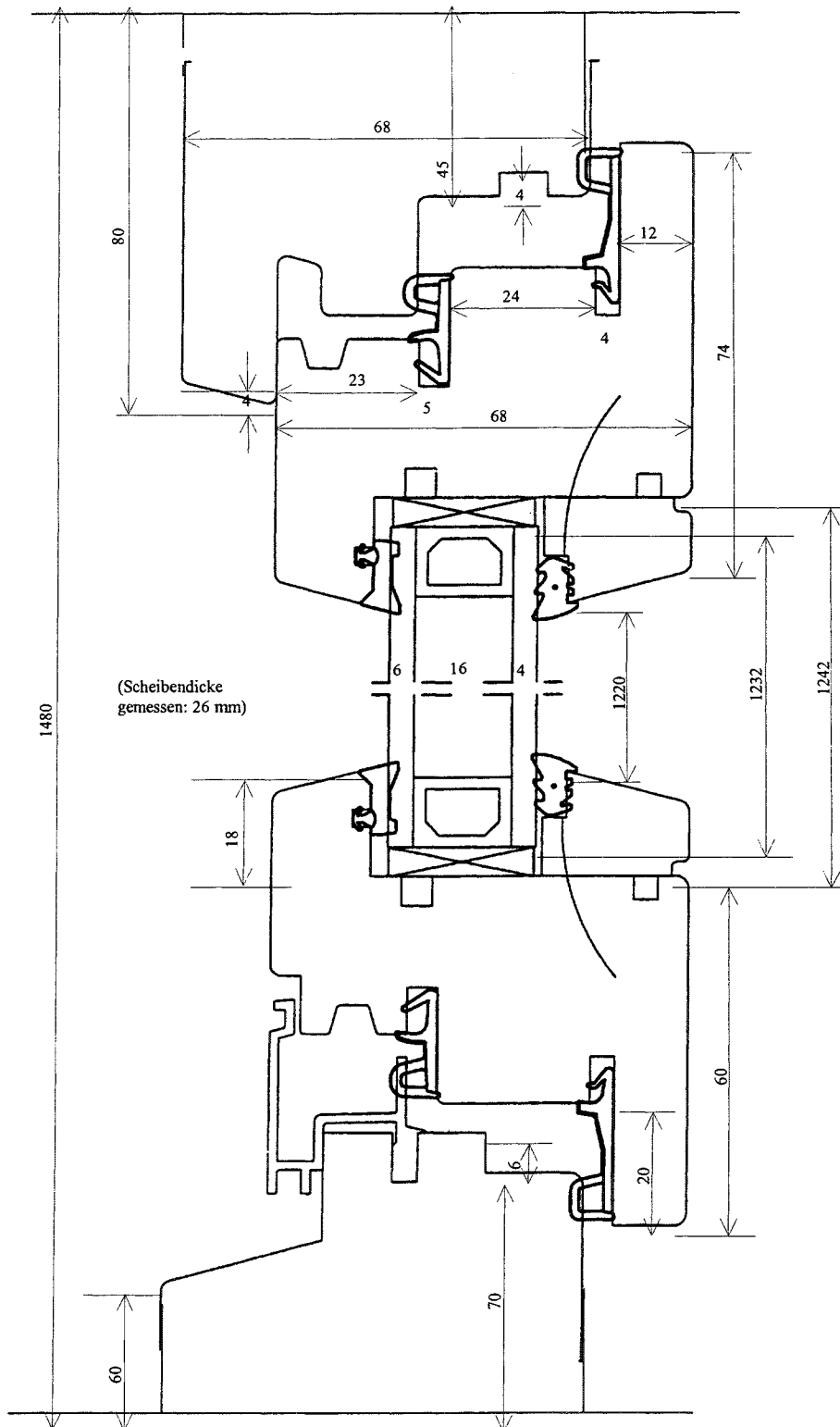
**Bild 1: Rahmenprofil Aluminium Typ M1**

(Angaben in mm)





**Bild 2: Rahmenprofil PVC Typ M2**  
(Angaben in mm)



**Bild 3: Rahmenprofil Holz Querschnitt oben Typ M3, Querschnitt unten Typ M4**  
(Angaben in mm)

## Anhang B

### Abstandhalter

Thermisch verbesserter Abstandhalter TVA .....	2
Kurzbeschreibung.....	2
Zeichnung des Abstandhalters mit genauen Angaben .....	2
Modellierung.....	3
Standardabstandhalter aus Aluminium SAH .....	4
Kurzbeschreibung.....	4
Zeichnung des Abstandhalters mit genauen Angaben .....	4
Modellierung.....	5

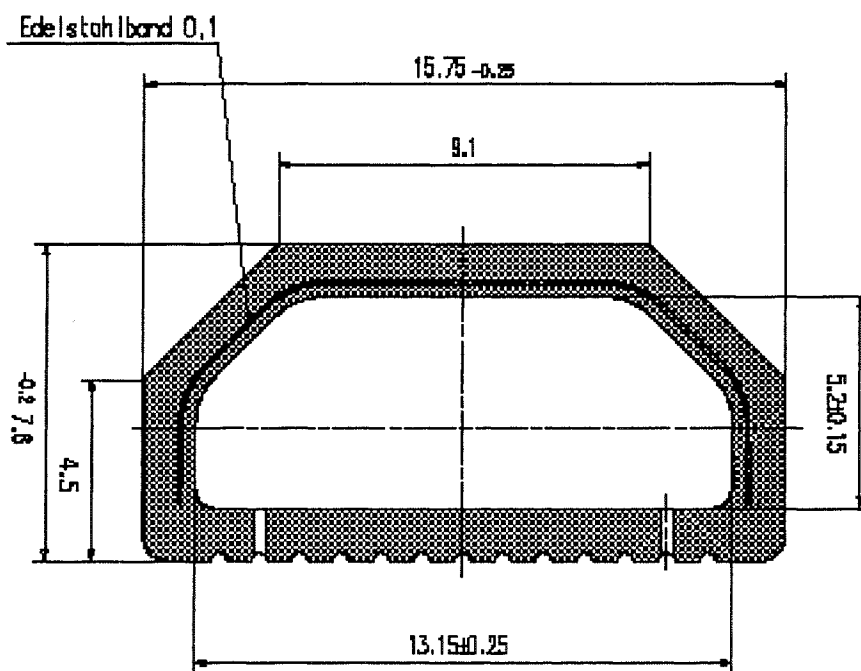
## Thermisch verbesserter Abstandhalter TVA

### **Kurzbeschreibung**

für einen Scheibenzwischenraum von 16mm,  
Wärmeleitfähigkeit Kunststoff (modifiziertes Polycarbonat) = 0,19 W/(mK)  
Wärmeleitfähigkeit Edelstahl (Dicke 0,1mm) = 15 W/(mK)

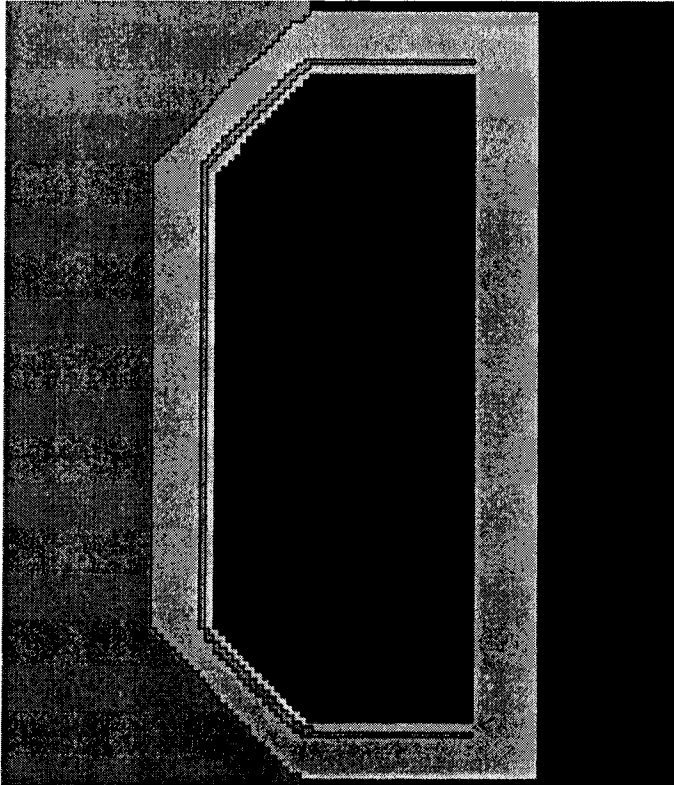
Bei der Profilversion Thermix LX Abstandhalter wird das Edelstahlband durch ein Stahlband ersetzt, Wärmeleitfähigkeit Stahl = 50 W/(mK). Kunststoffmaterial ist unverändert.

### **Zeichnung des Abstandhalters mit genauen Angaben**



**Bild 1: Zeichnung des thermisch verbesserten Abstandhalters**

### **Modellierung**



**Bild 2: im Berechnungsprogramm modellierte Version des TVA**

#### Materialzuordnung mit Kennwerten

- Butyl;  $L=0.240 \text{ W/(mK)}$
- Mineralfaser 0274;  $L=0.027 \text{ W/(mK)}$
- Silicagel;  $L=0.130 \text{ W/(mK)}$
- Thermix 0.19;  $L=0.190 \text{ W/(mK)}$
- Thermix Edelstahl;  $L=15.000 \text{ W/(mK)}$
- Polysulfid;  $L=0.400 \text{ W/(mK)}$

## Standardabstandhalter aus Aluminium SAH

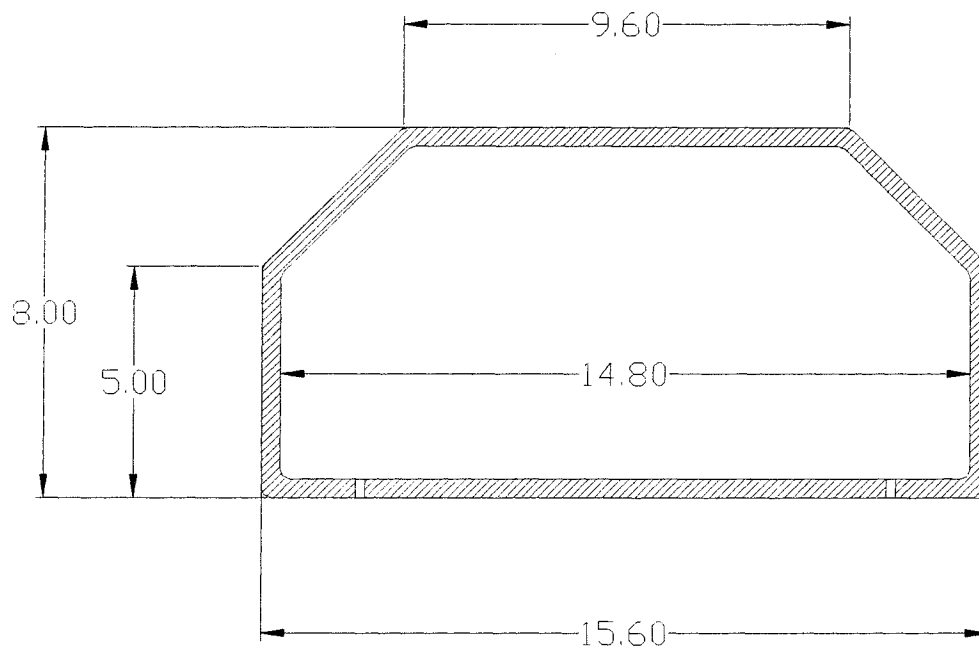
### *Kurzbeschreibung*

für einen Scheibenzwischenraum von 16mm;

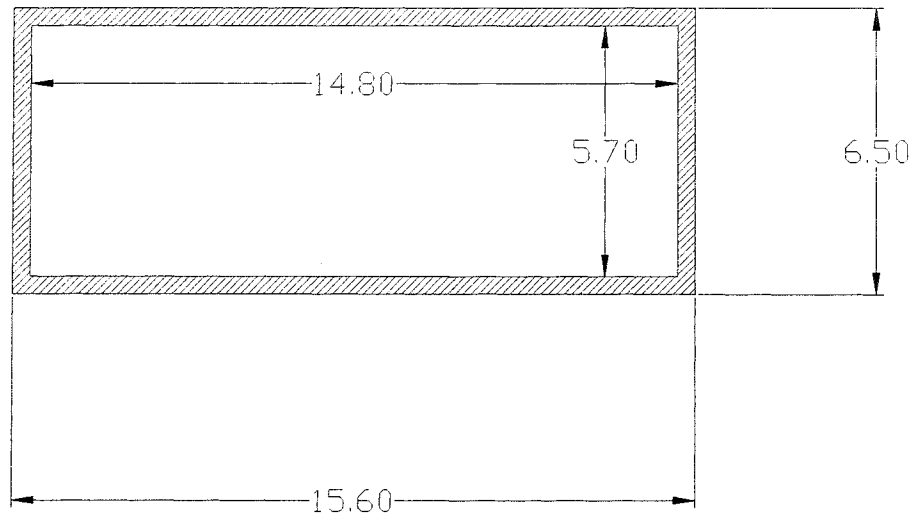
Wärmeleitzahl Aluminium = 160 W/(mK)

Materialstärke: 0,4 mm  
Höhe: 15,6 mm  
Breite: 8,0 mm

### *Zeichnung des Abstandhalters mit genauen Angaben*

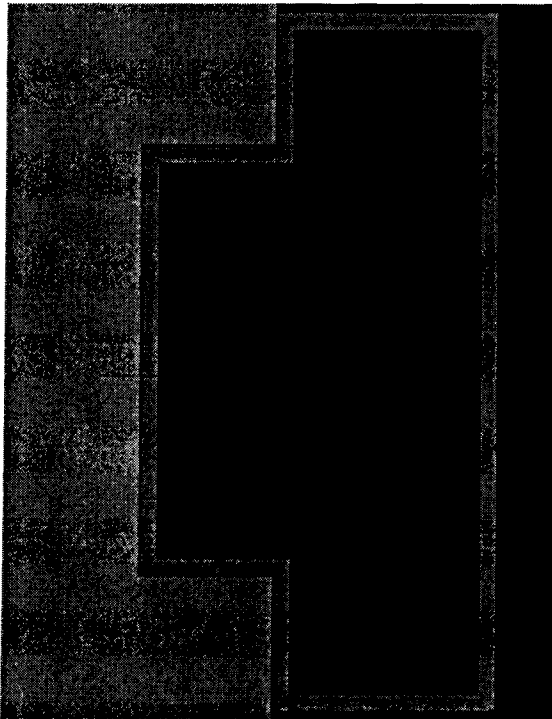


**Bild 3: Zeichnung des Standardabstandhalters**



**Bild 4: Zeichnung des vereinfachten Standardabstandhalters**

### **Modellierung**



**Bild 5: im Berechnungsprogramm modellierte Version des SAH**

- Butyl;  $L=0.240 \text{ W/(mK)}$
- Mineralfaser 0274;  $L=0.027 \text{ W/(mK)}$
- Silicagel;  $L=0.130 \text{ W/(mK)}$
- Polysulfid;  $L=0.400 \text{ W/(mK)}$
- Aluminium (Si-Legierung);  $L=160.000 \text{ W/(mK)}$

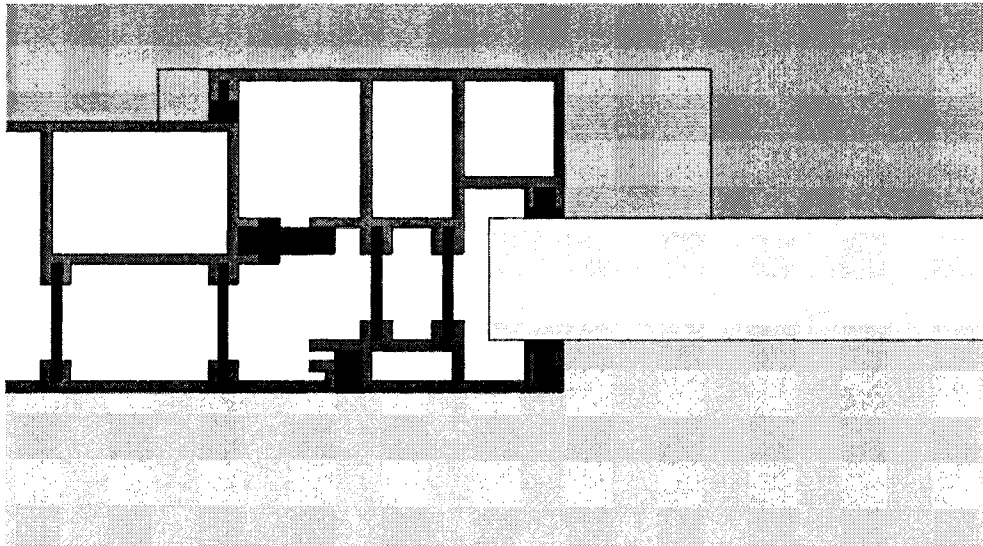




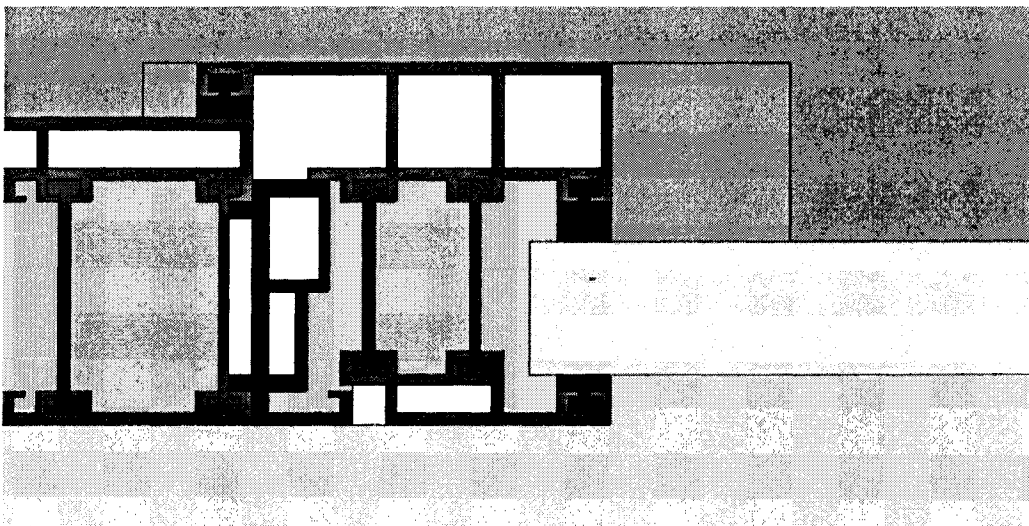
## Anhang C

Querschnitt modelliert auf Orthogonalgitter

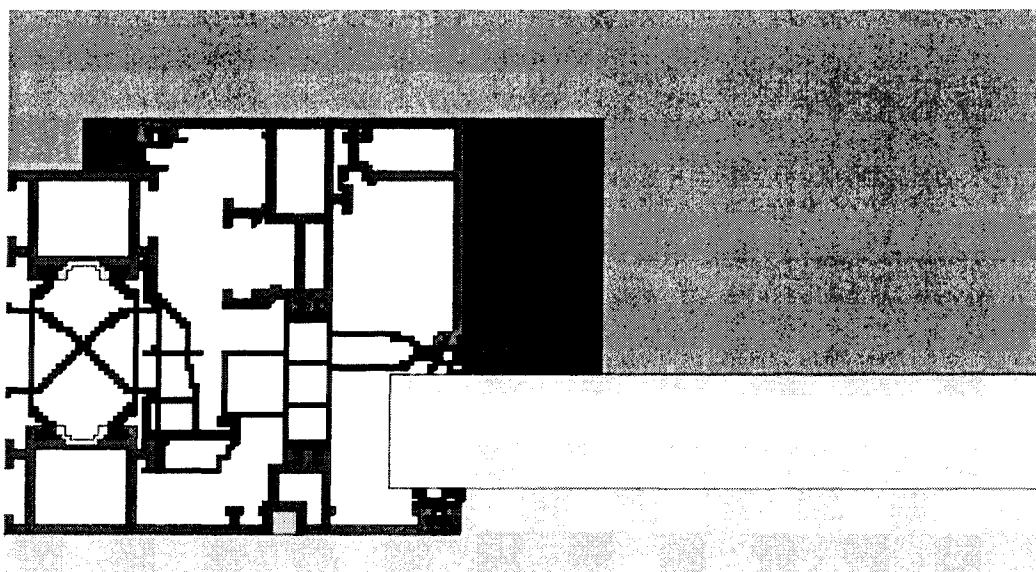
Bild 1: Rahmenprofil Aluminium DIN EN ISO 10077-2.....	2
Bild 2: Rahmenprofil Aluminium DIN EN ISO 10077-2 modifiziert mit Uf=2,0 W/(m <sup>2</sup> K).....	2
Bild 3: Rahmenprofil Aluminium Typ M1 .....	2
Bild 4: Rahmenprofil Aluminium Wicline 70.....	3
Bild 5: Rahmenprofil PVC DIN EN ISO 10077-2 .....	3
Bild 6: Rahmenprofil PVC Typ M2.....	3
Bild 7: Rahmenprofil PVC - vereinfachte Darstellung.....	4
Bild 8: Rahmenprofil Holz DIN EN 10077.....	4
Bild 9: Rahmenprofil Holz DIN 68121 IV68 Querschnitt oben .....	4
Bild 10: Rahmenprofil Holz DIN 68121 IV68 Querschnitt unten .....	5
Bild 11: Rahmenprofil Holz Querschnitt oben Typ M3.....	5
Bild 12: Rahmenprofil Holz Querschnitt unten Typ M4.....	5



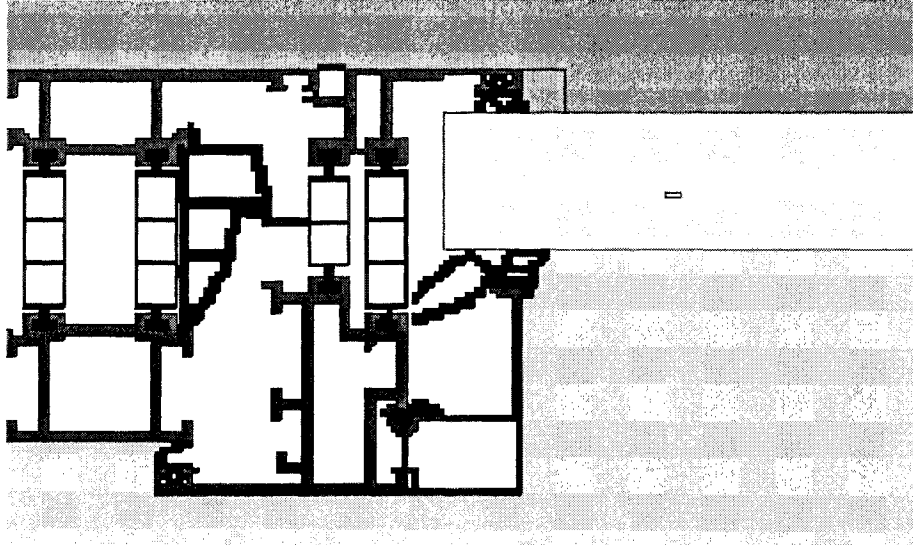
**Bild 1: Rahmenprofil Aluminium DIN EN ISO 10077-2**



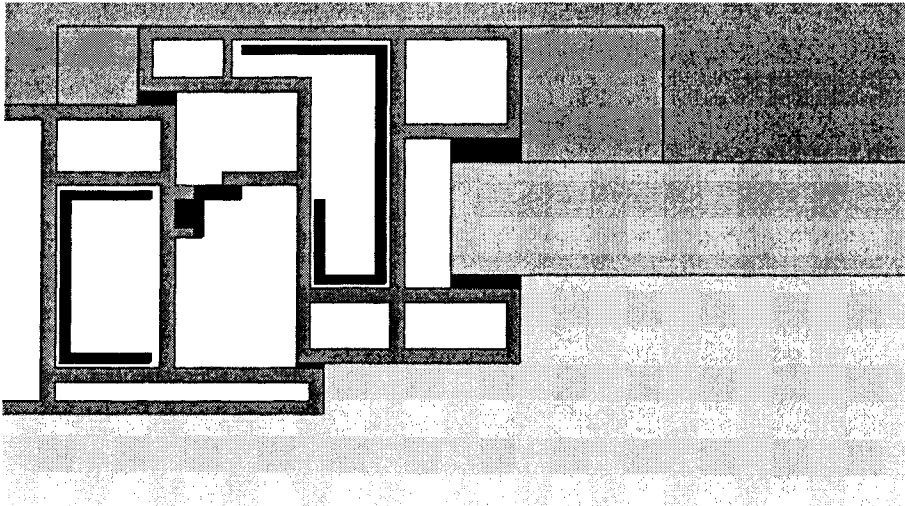
**Bild 2: Rahmenprofil Aluminium DIN EN ISO 10077-2 modifiziert mit  $U_f=2,0$   $W/(m^2K)$**



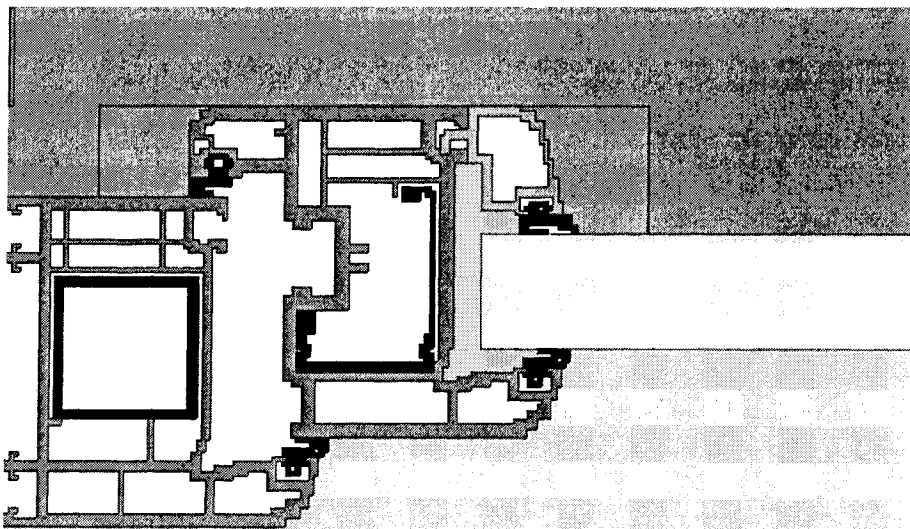
**Bild 3: Rahmenprofil Aluminium Typ M1**



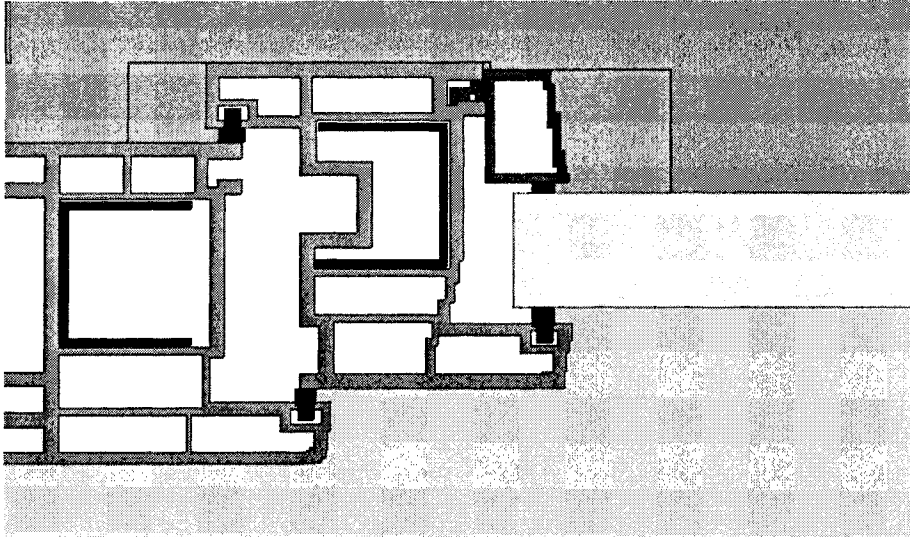
**Bild 4: Rahmenprofil Aluminium Wicline 70**



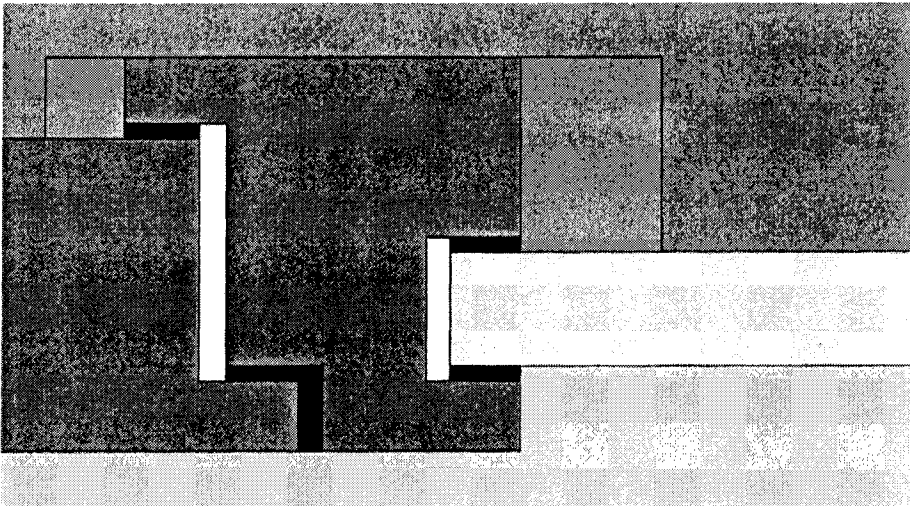
**Bild 5: Rahmenprofil PVC DIN EN ISO 10077-2**



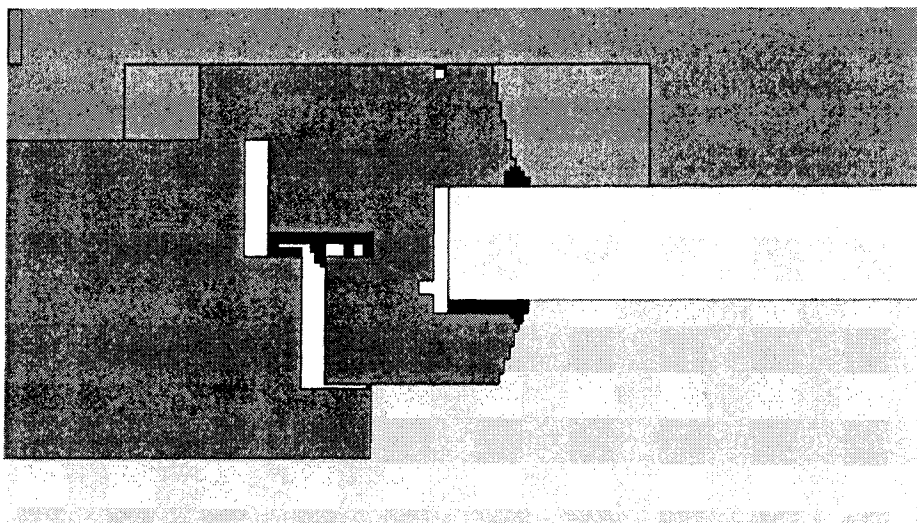
**Bild 6: Rahmenprofil PVC Typ M2**



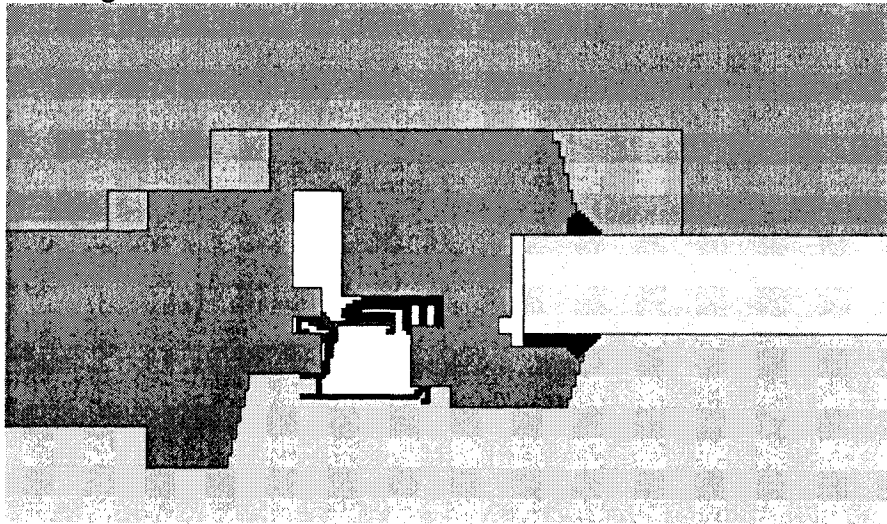
**Bild 7: Rahmenprofil PVC - vereinfachte Darstellung**



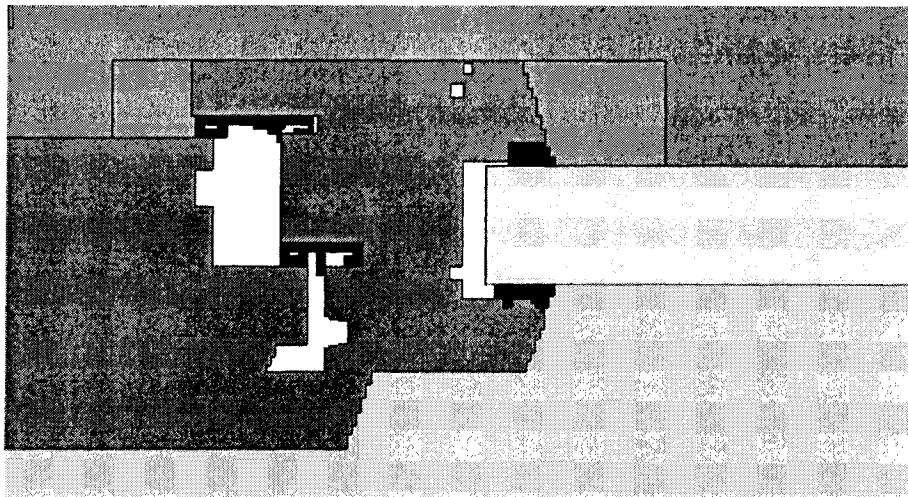
**Bild 8: Rahmenprofil Holz DIN EN 10077**



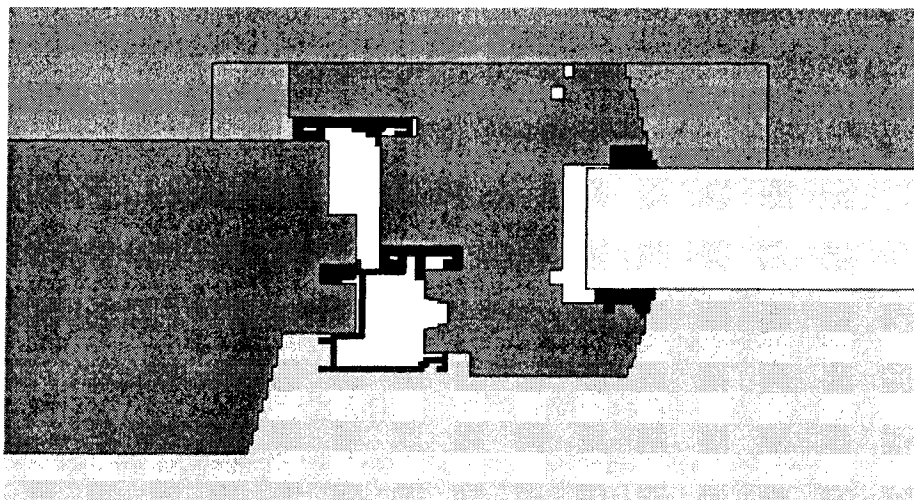
**Bild 9: Rahmenprofil Holz DIN 68121 IV68 Querschnitt oben**



**Bild 10: Rahmenprofil Holz DIN 68121 IV68 Querschnitt unten**



**Bild 11: Rahmenprofil Holz Querschnitt oben Typ M3**



**Bild 12: Rahmenprofil Holz Querschnitt unten Typ M4**



## **Anhang D**

### Musterdokumentation

Berechnung eines Aluminiumprofils mit Alu- und Kunststoffabstandhalter 2  
Berechnung eines Kunststoffprofils mit Alu- und Kunststoffabstandhalter . 8  
Berechnung zweier Holzprofile mit Alu- und Kunststoffabstandhalter ..... 14

## Zusammenstellung der Berechnungsergebnisse des FIW [D]

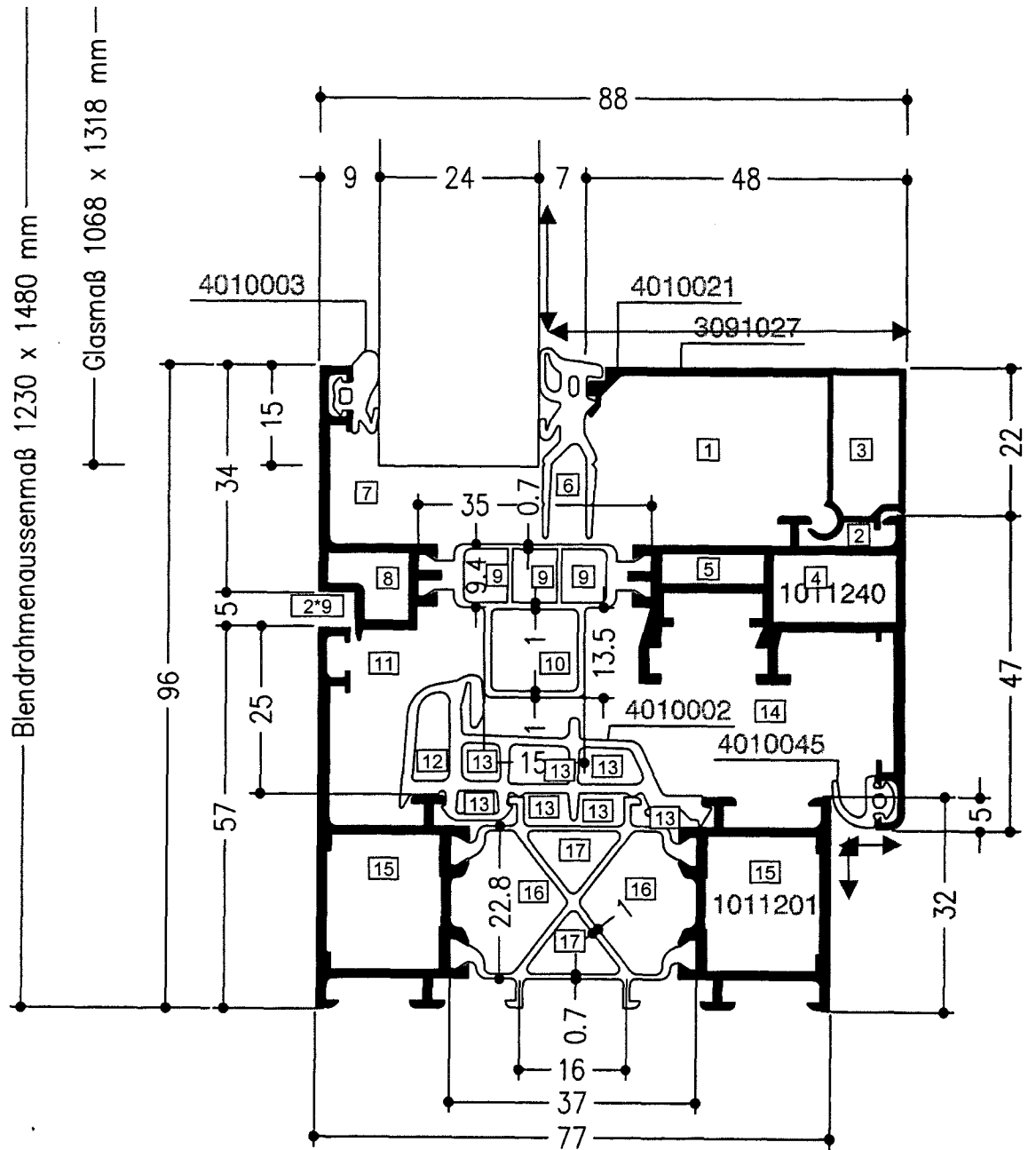
### Berechnung eines Aluminiumprofils mit Alu- und Kunststoffabstandhalter

#### Allgemeine Angaben

Bauteil:	Flügel-Blendrahmen Profilkombination
Hersteller:	WICONA
Produktbezeichnung:	WICLINE 77
Material:	Aluminium-Verbundprofil, wärmegeklämmt
Oberflächen:	lackiert
Dichtungen:	EPDM
Bautiefe:	Flügelprofil: 88 mm Blendrahmenprofil: 77 mm
Abstand der gegenüber liegenden Schalen:	Rahmenprofil: 31 mm Flügelprofil: 29 mm
Dämmzone:	durchgehend
Dämmleisten:	PA 6.6 GF 25
Oberflächenbehandlung der Metallflächen zwischen den Stegen:	pressblank
Blendrahmennummer:	1011201 Querschnitt (B x D) 57 x 77
Flügelrahmennummer:	1011240 Querschnitt (B x D) 69 x 88
Stegbreiten:	0,7 und 1,0 mm
Stege:	Flügelrahmen: 1 Spezialhohldämmleiste mit Mitteldichtungsanschlag Blendrahmen: 1 Kreuzdämmleiste
Höhe der Dämmzonen:	Flügelrahmen 35 mm Blendrahmen 37 mm
Ansichtsbreite der Kombination:	96 mm
Dämmzonenbreite der Kombination $b_t$ :	Blendrahmen: 22,8 mm Flügelrahmen: 9,4 mm
Verhältnis $b_t/B$ der Profilkombination:	0,335
Dicke des Dämmpaneels und der Verglasung:	24 mm
Einstand des Dämm- paneels in den Rahmen:	15 mm



Schnittzeichnung des berechneten Rahmens:

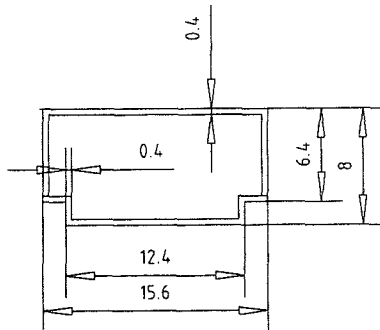


⑤ Nummer des Hohlraums für Tabelle der äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten

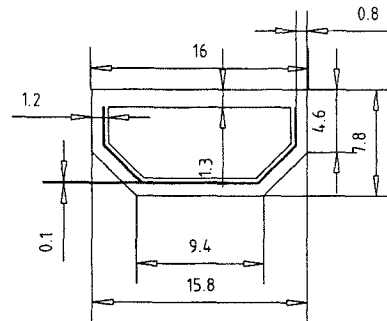
↔ Bereiche erhöhter Übergangswiderstände

Abstandhalter:

Aluminium



Kunststoff

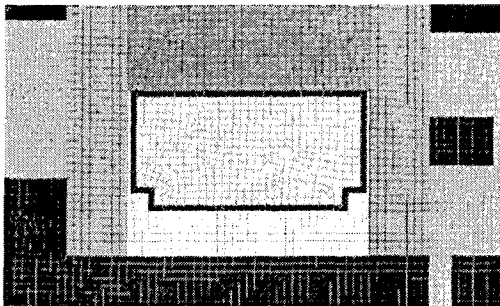


Verwendete Wärmeleitfähigkeitswerte in  $W/(m \cdot K)$ :

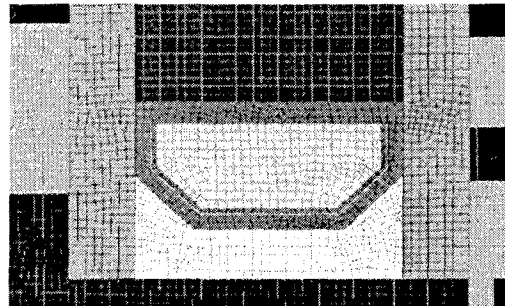
Aluminium:	160
Polysulfid:	0,40
Silikagel:	0,13
Kunststoff:	0,19
Edelstahl:	17

Elementierung im Bereich des Randverbunds:

Aluminium



Kunststoff



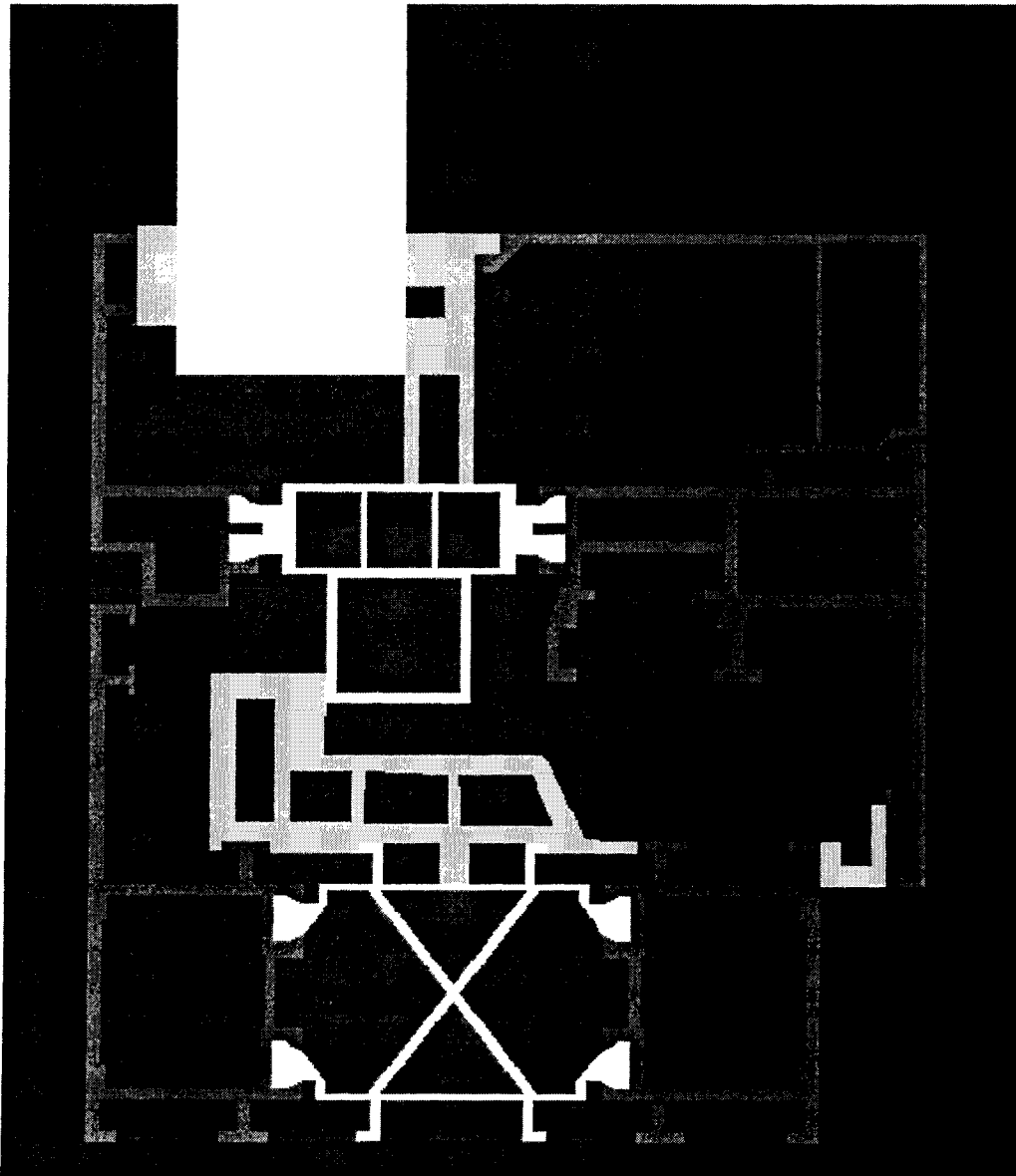
Äquivalente Wärmeleitfähigkeiten der Lochkammern:

Loch- bezeichnung	Richtung des Koordinatensystems	Dicke in Wärmestromrichtung	Breite senkrecht zu Q	Lambda äquivalent
Nr.	x,y,z	mm	mm	W/mK
1	x	35	25	0,1222
	y	25	35	0,1046
2	x	15	3	0,0597
	y	3	15	0,0365
3	x	10	20	0,0272
	y	20	10	0,0283
4	x	18	10	0,0281
	y	10	18	0,0271
5	x	15	4	0,0273
	y	4	15	0,0260
6	x	5	12	0,0425
	y	12	5	0,0553
7	x	28	15	0,0987
	y	15	28	0,0754
8	x	10	10	0,0269
	y	10	10	0,0269
9	x	7	8	0,0464
	y	8	7	0,0481
10	x	13	12	0,0630
	y	12	13	0,0613
11	x	18	29	0,0839
	y	29	18	0,1034
12	x	5	12	0,0425
	y	12	5	0,0553
13	x	7	6	0,0452
	y	6	7	0,0434
14	x	35	30	0,1258
	y	30	35	0,1171
15	x	16	20	0,0282
	y	20	16	0,0287
16	x	11	16	0,0293
	y	16	11	0,0303
17	x	10	7	0,0527
	y	7	10	0,0474
kleine	x	4	4	0,0369
	y	3	3	0,0339
Abschluss	x	18	4	0,0670
	y	4	18	0,0402

Berechnungsbedingungen:

Die Berechnung erfolgte mit den Randbedingungen aus prEN 10077-2:2002-07 am im folgenden Bild dargestellten Modell.

Verwendet wurde das Programm MSC Nastran for Windows 2001 (Lizenzierte Version von FEMAP 8.0b). Eine Beschreibung des Programms findet man unter Punkt 2.2 Berechnungsprogramme.



Auswertung:

1. Ermittlung von  $U_f$

$$L^{2D}: 0,4122 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$$

Panel: Länge in der Ansichtsfläche  $l_p: 190 \text{ mm}$   $U_p:$   
1,1686 W/(m<sup>2</sup>·K)

Rahmen: Länge in der Ansichtsfläche  $l_f: 96 \text{ mm}$   $U_f: 1,981$   
W/(m<sup>2</sup>·K)

2. Ermittlung von  $\psi$  mit Al-AH

$$L^{2D}: 0,5232 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$$

Glas: Länge in der Ansichtsfläche  $l_g: 190 \text{ mm}$   $U_g: 1,2$   
W/(m<sup>2</sup>·K)

Rahmen: Länge in der Ansichtsfläche  $l_f: 96 \text{ mm}$   $U_f: 1,981$   
W/(m<sup>2</sup>·K)

$$\psi: 0,105 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$$

Ergebnis	$U_f$ in W/(m <sup>2</sup> ·K)	$\psi$ in W/(m·K)
<i>FIW_Alu mit Al-AH</i>	1,981	0,105

3. Ermittlung von  $\psi$  mit KS-AH

$$L^{2D}: 0,4690 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$$

Glas: Länge in der Ansichtsfläche  $l_g: 190 \text{ mm}$   $U_g: 1,2$   
W/(m<sup>2</sup>·K)

Rahmen: Länge in der Ansichtsfläche  $l_f: 96 \text{ mm}$   $U_f: 1,981$   
W/(m<sup>2</sup>·K)

$$\psi: 0,051 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$$

Ergebnis	$U_f$ in W/(m <sup>2</sup> ·K)	$\psi$ in W/(m·K)
<i>FIW_Alu mit KS-AH</i>	1,981	0,055

Zusätzliche Erklärungen zu den Ergebnissen:

Alle Ergebnisse wurden mit Glaseinstand 15 mm berechnet.

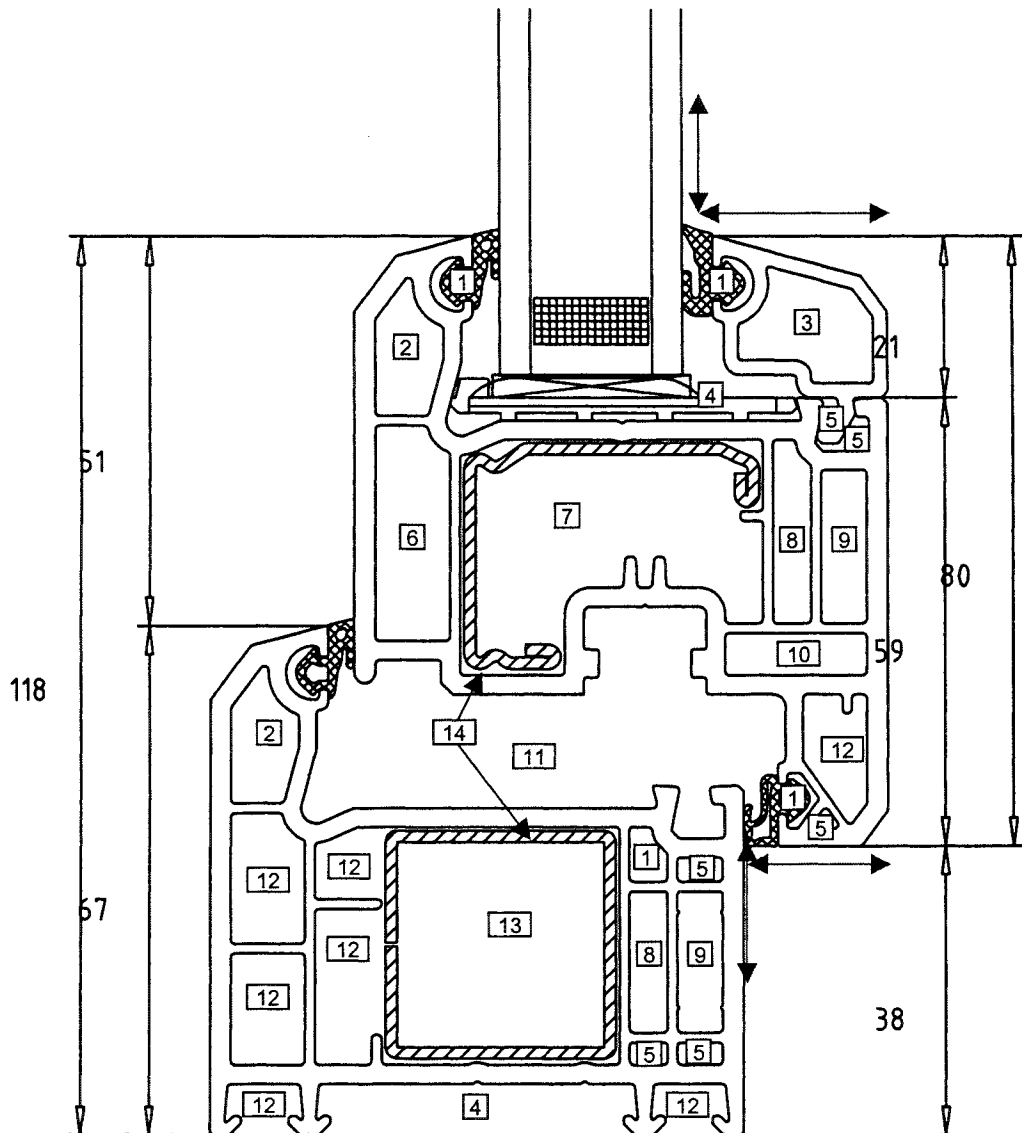
Alle Hohlräume haben unterschiedliches  $\psi$  in x- und y-Richtung.

### **Berechnung eines Kunststoffprofils mit Alu- und Kunststoffabstandhalter**

#### Allgemeine Angaben

Bauteil:	Flügel-Blendrahmen Profilkombination
Hersteller:	VEKA AG
Produktbezeichnung:	TOPLINE AD
Material:	Kunststoff (PVC)
Dichtungen:	EPDM
Bautiefe:	Flügelprofil: 70 mm Blendrahmenprofil: 70 mm
Bauhöhe:	Flügelprofil: 80 mm Blendrahmenprofil: 67 mm
Ansichtsbreite der Kombination:	118 mm
Dicke des Dämmpaneels und der Verglasung:	24 mm
Einstand des Dämm- paneels in den Rahmen:	15 mm

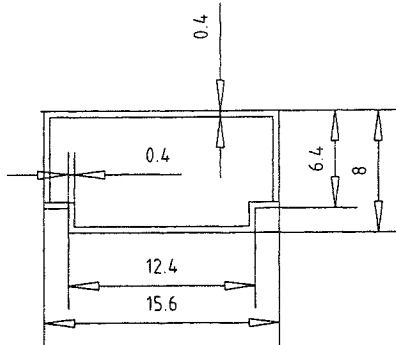
Schnittzeichnung des berechneten Rahmens  
(Falzgrund für Berechnung leer angesetzt)



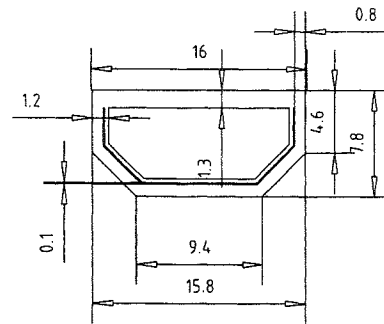
- 5 Nummer des Hohraums für Tabelle der äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten  
 ←→ Bereiche erhöhter Übergangswiderstände

Abstandhalter:

Aluminium



Kunststoff

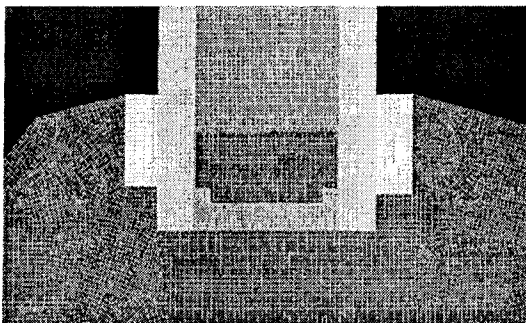


Verwendete Wärmeleitfähigkeitswerte in  $W/(m \cdot K)$ :

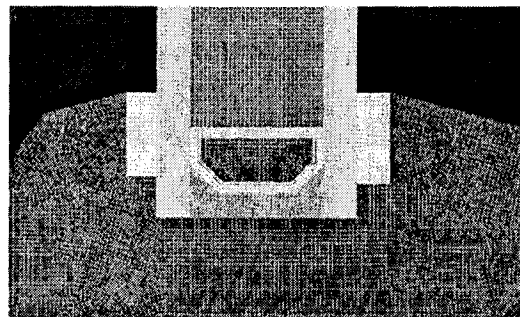
Aluminium:	160
Polysulfid:	0,40
Silikagel:	0,13
Kunststoff:	0,19
Edelstahl:	17

Elementierung im Bereich des Randverbunds:

Aluminium



Kunststoff





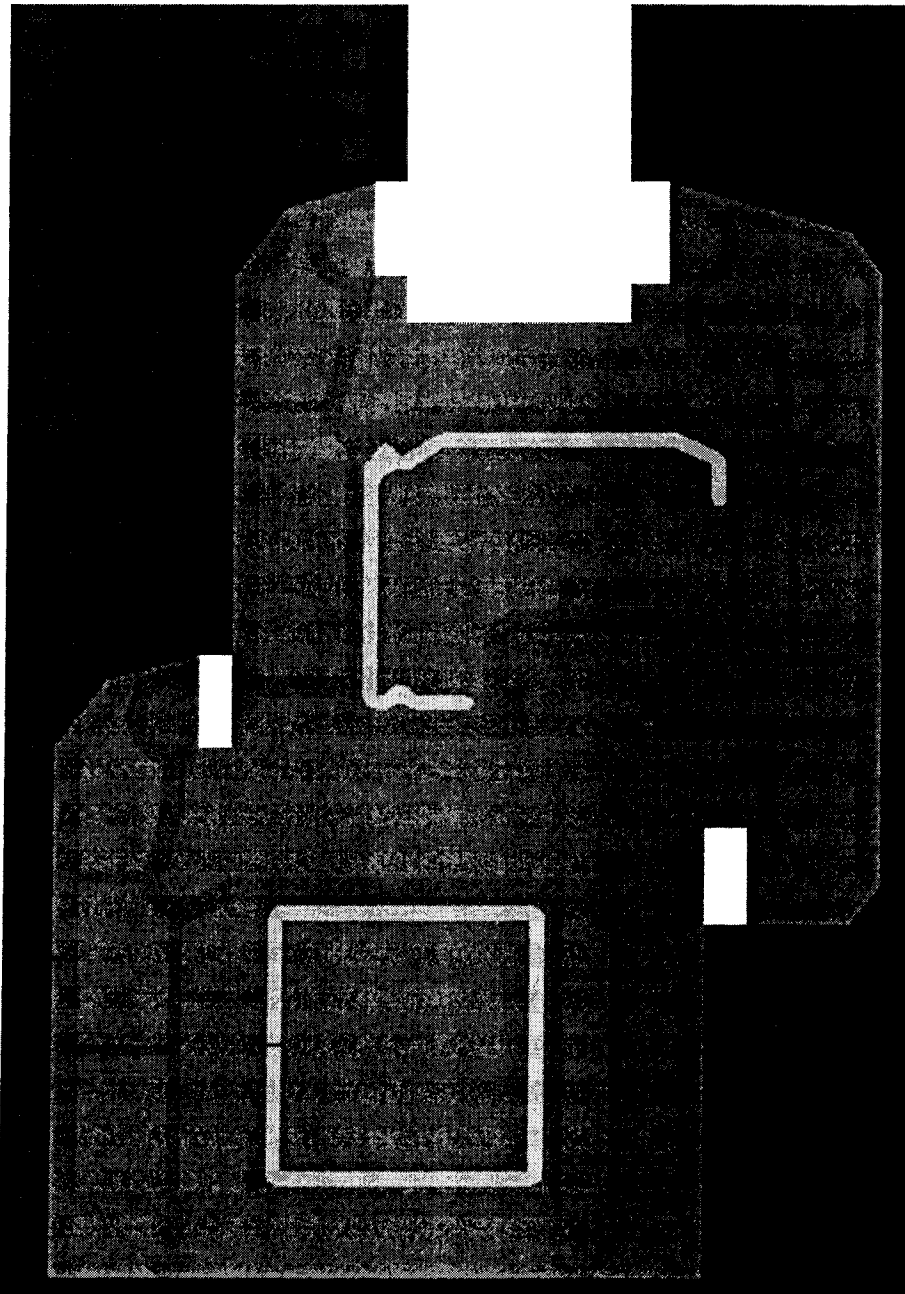
Äquivalente Wärmeleitfähigkeiten der Lochkammern:

Loch- bezeichnung	Richtung des Koordinatensystems	Dicke in Wärmestromrichtung	Breite senkrecht zu Q	Lambda äquivalent
Nr.	x,y,z	mm	mm	W/mK
1	x	5	5	0,0399
	y	5	5	0,0399
2	x	8	13	0,0512
	y	13	8	0,0601
3	x	15	12	0,0676
	y	12	15	0,0624
4	x	35	12	0,1408
	y	12	35	0,0683
5	x	4	4	0,0369
	y	3	3	0,0339
6	x	9	27	0,0576
	y	27	9	0,1084
7	x	35	20	0,1481
	y	20	35	0,0979
8	x	5	24	0,0441
	y	24	5	0,0934
9	x	6	20	0,0470
	y	20	6	0,0796
10	x	18	5	0,0713
	y	5	18	0,0435
11	x	56	20	0,2261
	y	20	56	0,1031
12	x	9	17	0,0553
	y	17	9	0,0713
13	x	26	26	0,1181
	y	26	26	0,1181
14	x	1	1	0,0280
	y	2	2	0,0309

Berechnungsbedingungen:

Die Berechnung erfolgte mit den Randbedingungen aus prEN 10077-2:2002-07 am im folgenden Bild dargestellten Modell.

Verwendet wurde das Programm MSC Nastran for Windows 2001 (Lizensierte Version von FEMAP 8.0b). Eine Beschreibung des Programms findet man unter Punkt 2.2 Berechnungsprogramme.



Auswertung:

1. Ermittlung von  $U_f$

$$L^{2D}: 0,41148 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$$

Paneel: Länge in der Ansichtsfläche  $l_p: 190 \text{ mm}$   $U_p:$   
1,1686 W/(m<sup>2</sup>·K)

Rahmen: Länge in der Ansichtsfläche  $l_f: 118 \text{ mm}$   $U_f: 1,606$   
W/(m<sup>2</sup>·K)

2. Ermittlung von  $\psi$  mit Al-AH

$$L^{2D}: 0,47834 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$$

Glas: Länge in der Ansichtsfläche  $l_g: 190 \text{ mm}$   $U_g: 1,2$   
W/(m<sup>2</sup>·K)

Rahmen: Länge in der Ansichtsfläche  $l_f: 118 \text{ mm}$   $U_f: 1,606$   
W/(m<sup>2</sup>·K)

$$\psi: 0,061 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$$

Ergebnis	$U_f$ in W/(m <sup>2</sup> ·K)	$\psi$ in W/(m·K)
<i>FIW_PVC mit Al-AH</i>	1,606	0,061

3. Ermittlung von  $\psi$  mit KS-AH

$$L^{2D}: 0,45012 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$$

Glas: Länge in der Ansichtsfläche  $l_g: 190 \text{ mm}$   $U_g: 1,2$   
W/(m<sup>2</sup>·K)

Rahmen: Länge in der Ansichtsfläche  $l_f: 118 \text{ mm}$   $U_f: 1,606$   
W/(m<sup>2</sup>·K)

$$\psi: 0,033 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$$

Ergebnis	$U_f$ in W/(m <sup>2</sup> ·K)	$\psi$ in W/(m·K)
<i>FIW_PVC mit KS-AH</i>	1,606	0,033

Zusätzliche Erklärungen zu den Ergebnissen:

Alle Ergebnisse wurden mit Glaseinstand 15 mm berechnet.

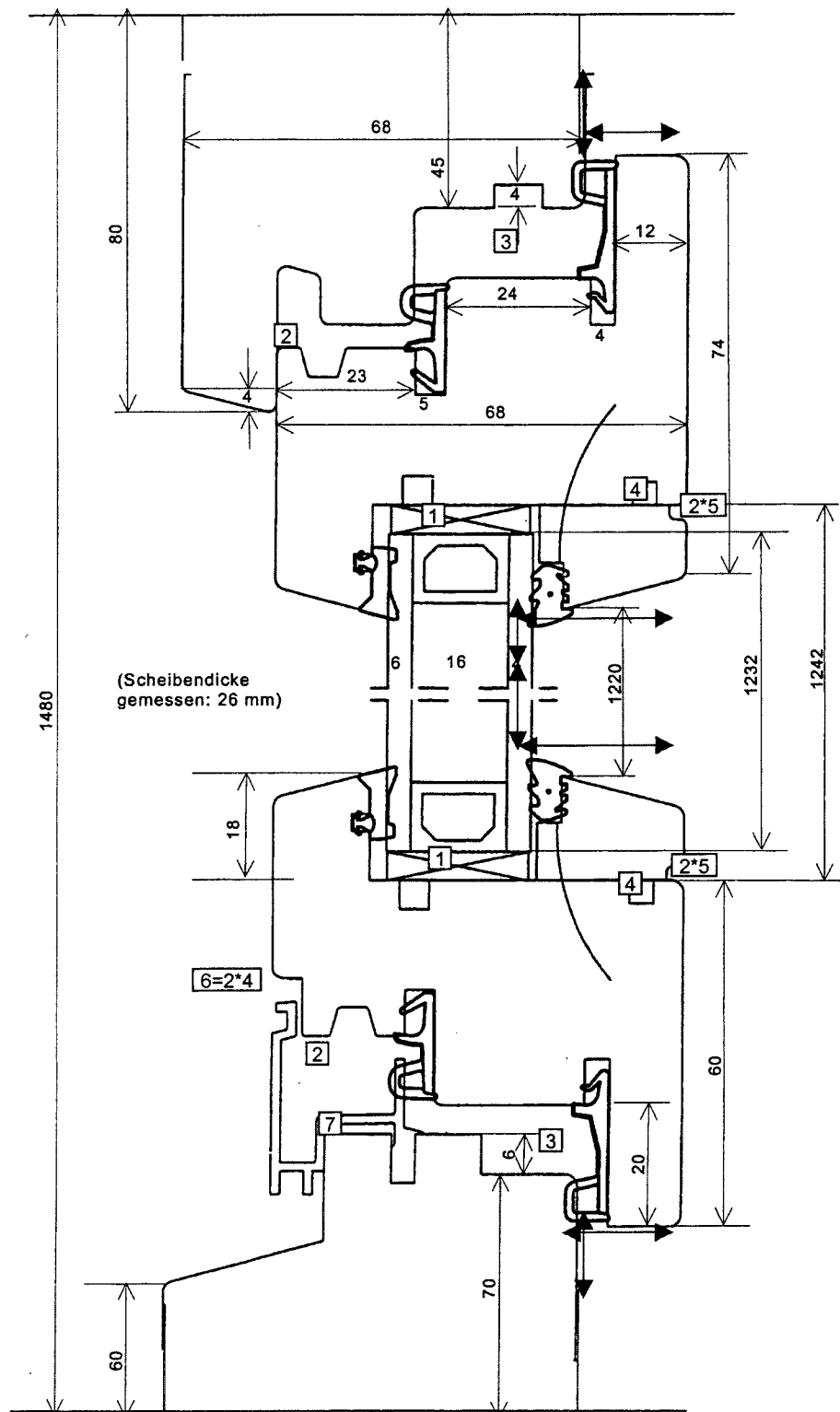
Alle Hohlräume haben unterschiedliches  $\psi$  in x- und y-Richtung.

### Berechnung zweier Holzprofile mit Alu- und Kunststoffabstandhalter

#### Allgemeine Angaben

Bauteile:	zwei Flügel-Blendrahmen Profilkombinationen (oben und seitlich sowie unten mit Alu-Regenschiene)	
Material:	Meranti	
Dichtungen:	EPDM	
Bautiefe:	oben und seitlich:	Flügelprofil: 68 mm Blendrahmenprofil: 68 mm
	unten:	Flügelprofil: 68 mm Blendrahmenprofil: 68 mm
Bauhöhe:	oben und seitlich:	Flügelprofil: 78 mm Blendrahmenprofil: 80 mm
	unten:	Flügelprofil: 78 mm Blendrahmenprofil: 100 mm
Ansichtsbreite der Kombination:	oben und seitlich:	114 mm
	unten:	139 mm
Dicke des Dämmpaneels und der Verglasung:		24 mm
Einstand des Dämmpaneels in den Rahmen:		15 mm

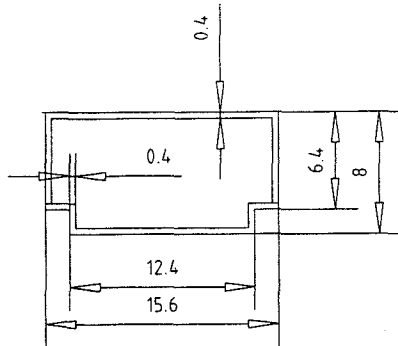
Schnittzeichnung der berechneten Rahmen:



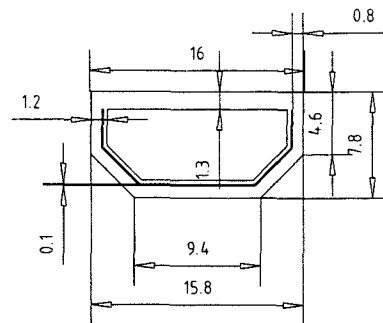
- 5 Nummer des Hohlraums für Tabelle der äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten  
 ↔ Bereiche erhöhter Übergangswiderstände

Abstandhalter:

Aluminium



Kunststoff

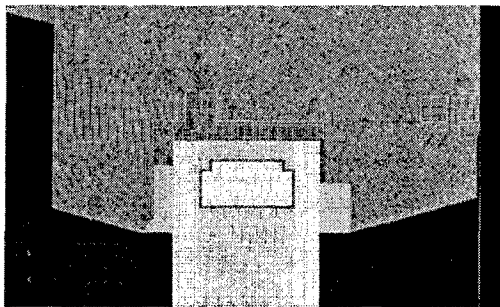


Verwendete Wärmeleitfähigkeitswerte in  $W/(m \cdot K)$ :

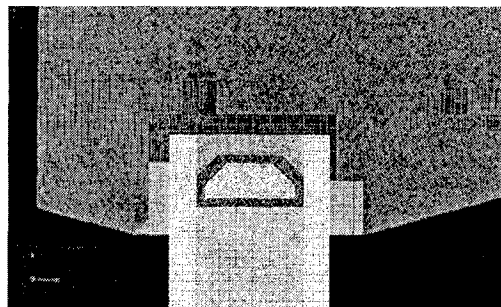
Aluminium:	160
Polysulfid:	0,40
Silikagel:	0,13
Kunststoff:	0,19
Edelstahl:	17

Elementierung im Bereich des Randverbunds:

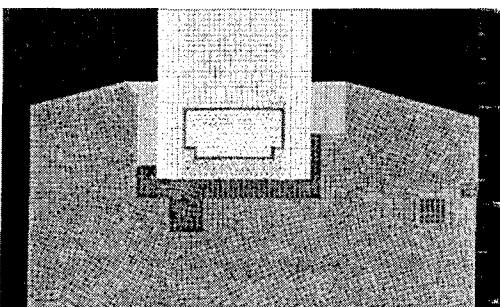
Holz oben Aluminium



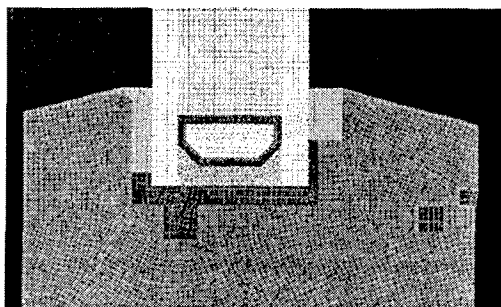
Holz oben Kunststoff



Holz unten Aluminium



Holz unten

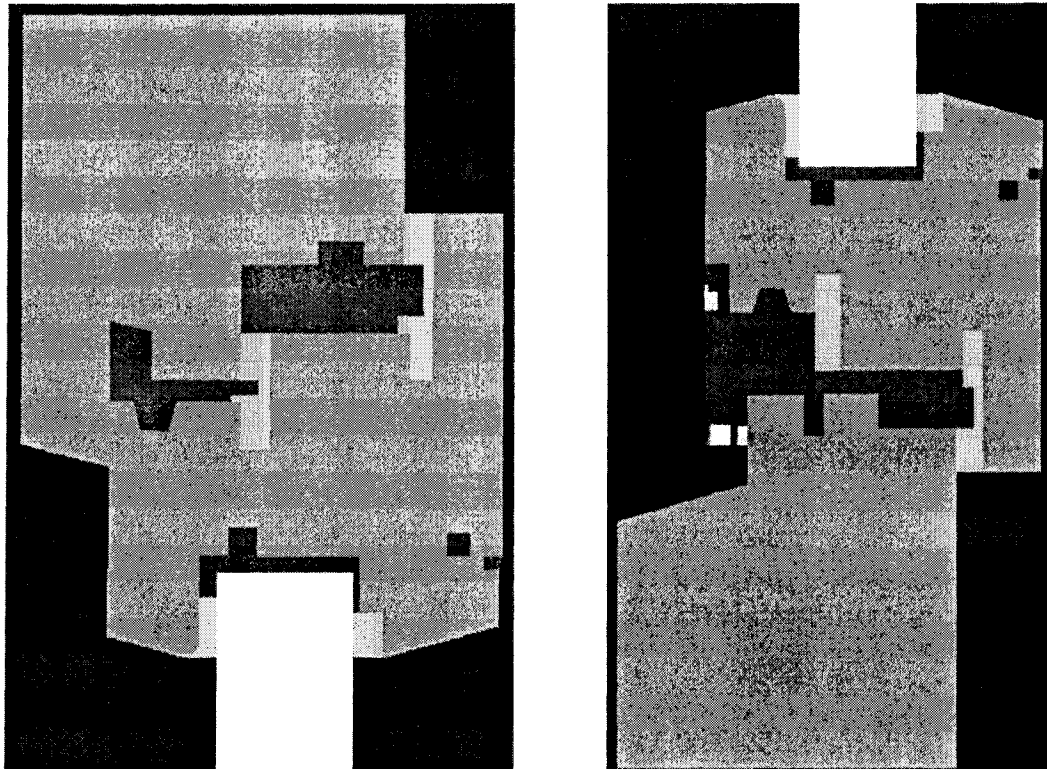


Kunststoff

Berechnungsbedingungen:

Die Berechnung erfolgte mit den Randbedingungen aus prEN 10077-2:2002-07 am im folgenden Bild dargestellten Modell.

Verwendet wurde das Programm MSC Nastran for Windows 2001 (Lizenzierte Version von FEMAP 8.0b). Eine Beschreibung des Programms findet man unter Punkt 2.2 Berechnungsprogramme.



Äquivalente Wärmeleitfähigkeiten der Lochkammern:

Loch- bezeichnung	Richtung des Koordinatensystems	Dicke in Wärmestromrichtung	Breite senkrecht zu Q	Lambda äquivalent
Nr.	x,y,z	mm	mm	W/mK
1	x	15	7	0,0635
	y	7	15	0,0491
2	x	19	15	0,0788
	y	15	19	0,0718
3	x	25	15	0,0921
	y	15	25	0,0744
4	x	4	4	0,0369
	y			
5	x	3	3	0,0339
	y			
7	x	12	2	0,0523
	y	2	12	0,0328

Auswertung Holzrahmen oben und seitlich:

1. Ermittlung von  $U_f$

$L^{2D}$ : 0,378298 W/(m·K)

Paneel: Länge in der Ansichtsfläche  $l_p$ : 190 mm  $U_p$ :  
1,1686 W/(m<sup>2</sup>·K)

Rahmen: Länge in der Ansichtsfläche  $l_f$ : 114 mm  $U_f$ : 1,371  
W/(m<sup>2</sup>·K)

2. Ermittlung von  $\psi$  mit Al-AH

$L^{2D}$ : 0,47465 W/(m·K)

Glas: Länge in der Ansichtsfläche  $l_g$ : 190 mm  $U_g$ : 1,2  
W/(m<sup>2</sup>·K)

Rahmen: Länge in der Ansichtsfläche  $l_f$ : 114 mm  $U_f$ : 1,371  
W/(m<sup>2</sup>·K)

$\psi$ : 0,090 W/(m·K)

Ergebnis	$U_f$ in W/(m <sup>2</sup> ·K)	$\psi$ in W/(m·K)
<i>FIW_Holz oben mit Al-AH</i>	1,371	0,090

3. Ermittlung von  $\psi$  mit KS-AH

$L^{2D}$ : 0,43250 W/(m·K)

Glas: Länge in der Ansichtsfläche  $l_g$ : 190 mm  $U_g$ : 1,2  
W/(m<sup>2</sup>·K)

Rahmen: Länge in der Ansichtsfläche  $l_f$ : 114 mm  $U_f$ : 1,371  
W/(m<sup>2</sup>·K)

$\psi$ : 0,048 W/(m·K)

Ergebnis	$U_f$ in W/(m <sup>2</sup> ·K)	$\psi$ in W/(m·K)
<i>FIW_Holz oben mit KS-AH</i>	1,371	0,048

Zusätzliche Erklärungen zu den Ergebnissen:

Alle Ergebnisse wurden mit Glaseinstand 15 mm berechnet.

Alle Hohlräume haben unterschiedliches  $\psi$  in x- und y-Richtung.

---



---



Auswertung Holzrahmen unten:

1. Ermittlung von  $U_f$

$$L^{2D}: 0,46347 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$$

Paneel: Länge in der Ansichtsfläche  $l_p: 190 \text{ mm}$   $U_p:$   
1,1686 W/(m<sup>2</sup>·K)

Rahmen: Länge in der Ansichtsfläche  $l_f: 139 \text{ mm}$   $U_f: 1,737$   
W/(m<sup>2</sup>·K)

2. Ermittlung von  $\psi$  mit Al-AH

$$L^{2D}: 0,55770 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$$

Glas: Länge in der Ansichtsfläche  $l_g: 190 \text{ mm}$   $U_g: 1,2$   
W/(m<sup>2</sup>·K)

Rahmen: Länge in der Ansichtsfläche  $l_f: 139 \text{ mm}$   $U_f: 1,737$   
W/(m<sup>2</sup>·K)

$$\psi: 0,088 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$$

Ergebnis	$U_f$ in W/(m <sup>2</sup> ·K)	$\psi$ in W/(m·K)
<i>FIW_Holz unten mit Al-AH</i>	1,737	0,088

3. Ermittlung von  $\psi$  mit KS-AH

$$L^{2D}: 0,51564 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$$

Glas: Länge in der Ansichtsfläche  $l_g: 190 \text{ mm}$   $U_g: 1,2$   
W/(m<sup>2</sup>·K)

Rahmen: Länge in der Ansichtsfläche  $l_f: 139 \text{ mm}$   $U_f: 1,737$   
W/(m<sup>2</sup>·K)

$$\psi: 0,046 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$$

Ergebnis	$U_f$ in W/(m <sup>2</sup> ·K)	$\psi$ in W/(m·K)
<i>FIW_Holz unten mit KS-AH</i>	1,737	0,046

Zusätzliche Erklärungen zu den Ergebnissen:

Alle Ergebnisse wurden mit Glaseinstand 15 mm berechnet.

Alle Hohlräume haben unterschiedliches  $\psi$  in x- und y-Richtung.

Gräfelfing, 03/05/23

Dipl.-Ing. Christoph Sprengard  
FIW München



## **Anhang E**

Formblatt für Berechnungsdokumentation

Formblatt.....	2
Musterbeispiel.....	4

**Formblatt**

**Berechnungen eines Abstandhalter** Name, Hersteller , mit Bezeichnung -

Allgemeine Angaben:

Liste der zur Verfügung gestellten Unterlagen zum :

- Beschreibung des Fensterelementes
- Zeichnung des Fensterelementes

Die Kopien der Unterlagen sind in Anlage beigefügt.

Modellierung:

Zeichnung des Fensters mit Zuordnung des Materials, den Umgebungsbedingungen und Auflistung der äquivalenten Leitfähigkeit der Hohlräumen:

- Darstellung des Fensterauschnitts mit Beschriftung des Materials und den Übergangswiderständen
- Darstellung des Abstandhalters mit Beschriftung der Materialien
- Zuweisung der Hohlräume mit den entsprechenden äquivalenten Leitfähigkeiten

Darstellung von Ausschnitten des Fensterprofils mit:

- Wesentliche Abmessungen an Stellen des erhöhten Wärmeübergangs
- Elementierungsabstand im Bereich Fensterrahmen und Verglasung

Die Ausführungen stehen in Anlage.

Berechnungsbedingungen

Verwendetes Programm:

Auswertung

1. Ermittlung von  $U_f$

L2D: W/mK

Panel Breite  $b_p$ : mm  $U_p$ : W/m<sup>2</sup>K

Rahmen: Breite  $b_f$ : mm  $U_f$ : W/m<sup>2</sup>K

2. Ermittlung von Psi

L2D: W/mK

Glas Breite  $b_g$ : mm  $U_g$ : W/m<sup>2</sup>K

Rahmen: Breite  $b_f$ : mm  $U_f$ : W/m<sup>2</sup>K

Psi: W/mK

Ergebnis

	$U_f$ in W/(m <sup>2</sup> K)	PSi in W/(mK)
<i>Bezeichnung</i>		auf 0,005 oder 0,010 runden

Zusätzliche Erklärungen zu den Ergebnissen:

---



---



---

Sachbearbeiter Name/Datum



### Musterbeispiel

#### Berechnungen eines PVC-Fensters Topline AD, Hersteller Veka AG, mit Aluminium und thermisch verbessertem - Abstandhalter

Allgemeine Angaben:

Liste der zur Verfügung gestellten Unterlagen zum Holzfenster:

- Beschreibung des Fensterelementes
- Zeichnung des Fensterelementes

Die Kopien der Unterlagen sind in Anlage A beigelegt.

Modellierung:

Zeichnung des Fensters mit Zuordnung des Materials, den Umgebungsbedingungen und Auflistung der äquivalenten Leitfähigkeit der Hohlräume:

- Darstellung des Fensterauschnitts mit Beschriftung des Materials und den Übergangswiderständen
- Darstellung des Abstandhalters mit Beschriftung der Materialien
- Zuweisung der Hohlräume mit den entsprechenden äquivalenten Leitfähigkeiten

Darstellung von Ausschnitten des Fensterprofils mit:

- Wesentliche Abmessungen an Stellen des erhöhten Wärmeübergangs
- Elementierungsabstand im Bereich Fensterrahmen und Verglasung

Die Ausführungen stehen in Anlage B.

Berechnungsbedingungen

Verwendetes Programm: WinIso 2.4.8, Sommer Informatik

Auswertung

#### 1. Ermittlung von $U_f$

L2D: 0,428 W/mK

Paneel Breite  $b_p$ : 200 mm       $U_p$ : 1,169 W/m<sup>2</sup>K

Rahmen: Breite  $b_r$ : 120 mm       $U_f$ : 1,624 W/m<sup>2</sup>K

#### 2. Ermittlung von Psi

L2D: 0,486 W/mK

Glas Breite  $b_g$ : 200 mm       $U_g$ : 1,10 W/m<sup>2</sup>K

Rahmen: Breite  $b_r$ : 120 mm       $U_f$ : 1,624 W/m<sup>2</sup>K

Psi: 0,07026 W/mK

Ergebnis

	$U_f$ in W/(m <sup>2</sup> K)	PSi in W/(mK)
<i>PVC mit SAH</i>	1,624	0,070

3. Ermittlung von Psi

L2D: 0,460 W/mK

Glas Breite  $b_g$ : 200 mm

Rahmen: Breite  $b_r$ : 120 mm

$U_g$ : 1,10 W/m<sup>2</sup>K

$U_f$ : 1,624 W/m<sup>2</sup>K

Psi: 0,04201 W/mK

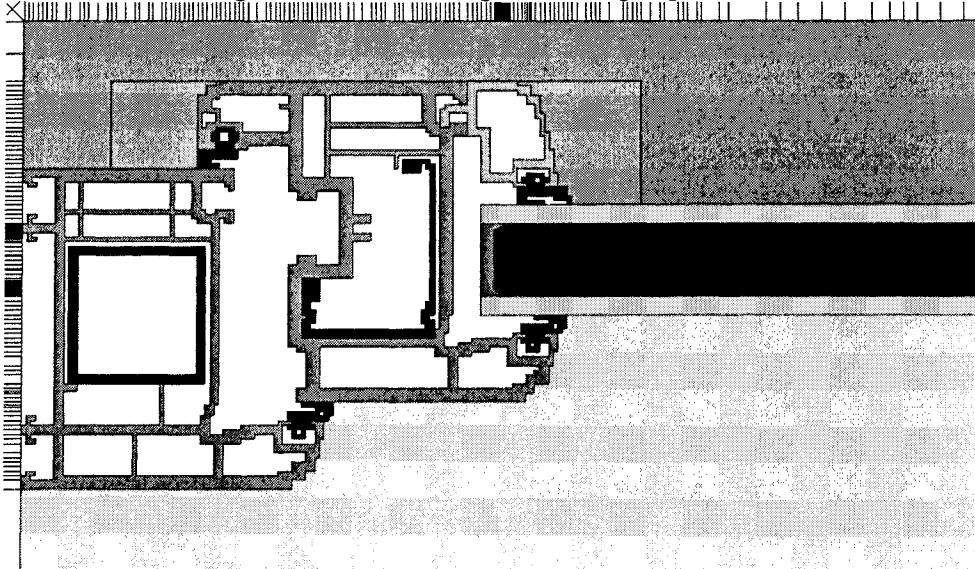
Ergebnis

	$U_f$ in W/(m <sup>2</sup> K)	PSi in W/(mK)
<i>PVC mit TVA</i>	1,624	0,045

Zusätzliche Erklärungen zu den Ergebnissen:

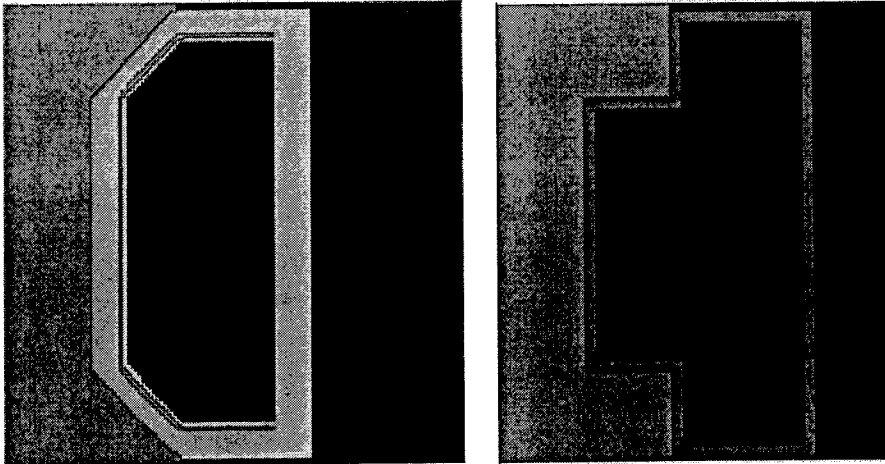
Sachbearbeiter Name/Datum

Materialzuweisung und Beschreibung der Übergangswiderstände PVC-Fenster



- Luft 10077-2 (Y); 0.000
- Luft innen 0,13 (m<sup>2</sup>K)/ W;
- Luft innen 0,20 (m<sup>2</sup>K)/ W;
- Luft außen 0,04 (m<sup>2</sup>K)/ W;
- Feststoff 080; L=0.080 W/(mK)
- EPDM; L=0.250 W/(mK)
- Butyl; L=0.240 W/(mK)
- Baustahl; L=50.000 W/(mK)
- Hart PVC; L=0.170 W/(mK)
- Glasleiste PVC; L=0.170 W/(mK)
- Float 10077; L=1.000 W/(mK)
- Mineralfaser 022; L=0.022 W/(mK)
- Silicagel; L=0.130 W/(mK)
- Polysulfid; L=0.400 W/(mK)
- Aluminium (Si-Legierung); L=160.000 W/(mK)

Abstandhalter



- Butyl;  $L=0.240 \text{ W/(mK)}$
- Mineralfaser 0274;  $L=0.027 \text{ W/(mK)}$
- Silicagel;  $L=0.130 \text{ W/(mK)}$
- Aluminium (Si-Legierung);  $L=160.000 \text{ W/(mK)}$
- Polysulfid;  $L=0.400 \text{ W/(mK)}$
- Thermix 0.19;  $L=0.190 \text{ W/(mK)}$
- Thermix Edelstahl;  $L=15.000 \text{ W/(mK)}$



## **Anhang F**

**Randverbundkriterium nach DIN V 4108-4: 2002-2, Anhang C**

DIN V 4108-4: 2002-2, Anhang C:  
Wärmetechnisch verbesserter Randverbund bei Isolierglas

Als wärmetechnisch verbesserter Randverbund wird ein Randverbund bezeichnet, dessen Abstandhalter das Kriterium nach folgender Gleichung erfüllt:  $\Sigma (d \cdot \lambda) < 0,007 \text{ W/K}$

Tab. 1: Randverbundkriterium

	d <sub>1</sub>	λ <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	λ <sub>2</sub>	Σ(d*λ)	ψ Holz	ψ PVC	ψ Al*	ψ Al
	mm	W/(mxK)	m	W/(mxK)	W/K	W/(mxK)	W/(mxK)	W/(mxK)	W/(mxK)
A1	0,4	160			0,1280	0,074	0,070	0,115	0,099
A2	0,4	14,3			0,0400	0,070	0,067	0,107	0,093
B1	0,18	14,3			0,0051	0,053	0,052	0,072	0,060
B2	0,15	0,19			0,0043	0,052	0,051	0,070	0,059
C1	1	0,19	0,030	160	0,0052	0,044	0,043	0,060	0,049
C2	1	0,19	0,025	15	0,0008	0,033	0,034	0,041	0,033
D1	1,25	0,19	0,1	15	0,0020	0,042	0,042	0,054	0,044
D2	1,25	0,19	0,1	50	0,0055	0,049	0,048	0,065	0,056
E	1,45	0,22	0,125	50	0,0066	0,051	0,050	0,069	0,057
F1	7	0,28			0,0020	0,042	0,042	0,054	0,044
F2	8	0,25			0,0020	0,043	0,043	0,055	0,045
G	0,15	16,3			0,0049	0,052	0,051	0,071	0,059

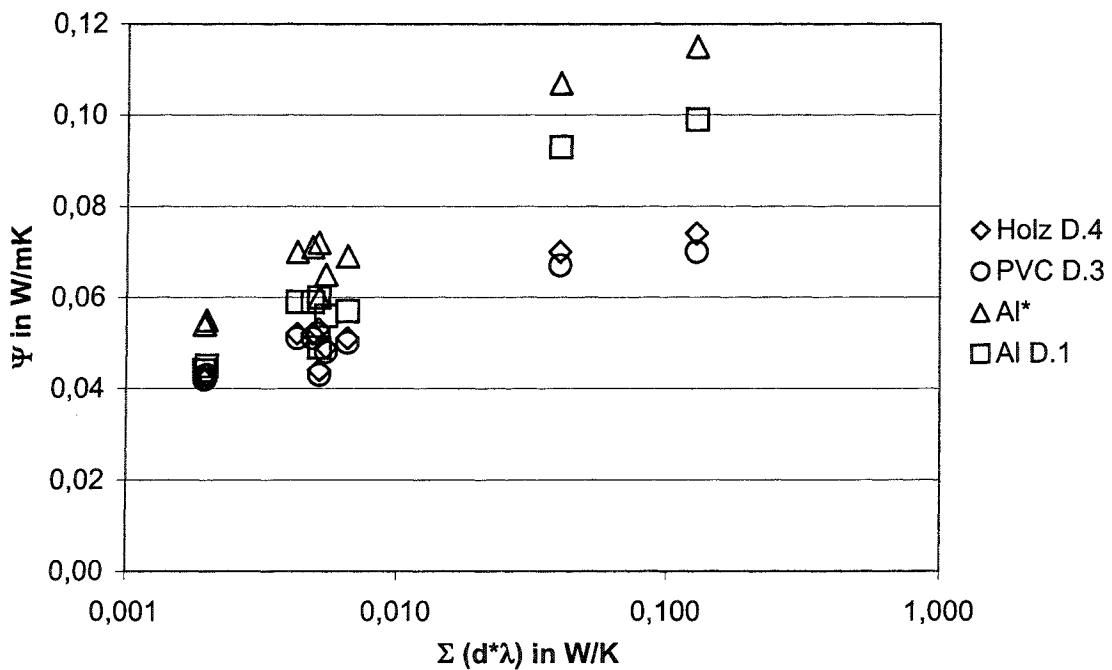



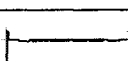


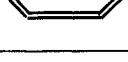
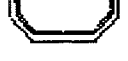


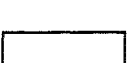
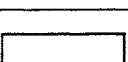


Bild 1: Zusammenhang  $\Sigma (d \cdot \lambda)$  und  $\Psi$ -Wert für verschiedene Abstandhalter

Tab. 2:  $\psi$ -Werte in W/(mxK)

Typ	Material	Skizze	Holz D.4	PVC D.3	Al* D.1*	Al D.1
A1	Al 160 W/mK, 0,4 mm 6,5mm x 15,6mm		0,074 (0,068)	0,070 (0,067)	0,115 (0,108)	0,099
A2	Stahl 50 W/mK, 0,4 mm 6,5mm x 15,6mm		0,070	0,067	0,107	0,093
B1	Edelstahl 14,3 W/mK*, 0,18 mm		0,053 (0,050)	0,052 (0,050)	0,072 (0,070)	0,060
B2	Edelstahl 14,3 W/mK*, 0,15 mm		0,052	0,051	0,070	0,059
C1	Kunststoff 0,19 W/mK, Al 160 W/mK, 30 $\mu$ m		0,044 (0,043)	0,043 (0,043)	0,060 (0,060)	0,049
C2	Kunststoff 0,19 W/mK, Edelstahl 15 W/mK*, 25 $\mu$ m		0,033 (0,032)	0,034 (0,033)	0,041 (0,040)	0,033
D1	Kunststoff 0,19 W/mK, Edelstahl 15 W/mK*, 0,1mm		0,042 (0,040)	0,042 (0,040)	0,054 (0,053)	0,044
D2	Kunststoff 0,19 W/mK, Stahl 50 W/mK, 0,1 mm		0,049	0,048	0,065	0,056
E	Kunststoff PP 0,22 W/mK, Stahl 50 W/mK, 125 $\mu$ m		0,051 (0,048)	0,050 (0,048)	0,069 (0,068)	0,057
F1	TPS-Butyl 0,28 W/mK, 7mm x 16mm		0,042 (0,041)	0,042 (0,041)	0,054 (0,053)	0,044
F2	TPS-Butyl 0,25 W/mK, 8mm x 16mm		0,043 (0,042)	0,043 (0,042)	0,055 (0,054)	0,045
G	Edelstahl 16,3 W/mK*, 0,15 mm		0,052	0,051	0,071	0,059

\*Herstellerangabe

um Rundungen zu vermeiden Angabe auf der Werte auf 0,001 W/(mxK)

Rückenüberdeckung 3mm, TPS-Systeme 4mm

Berechnung mit Wärmedurchgangskoeffizient Glas 1,10 W/(m<sup>2</sup>xK)

Rahmen nach DIN EN ISO 10077-2: 2003-01 Beispiel D.4(Holz), D.3(PVC) und D.1(Al)

D.2\* Al modifiziert U<sub>f</sub> = 2,0 W/(m<sup>2</sup>xK) [7](Anmerkung: Werte „Warm Edge“ 1999 [7] in Klammern: U<sub>g</sub>=1,15 W/m<sup>2</sup>K)



# Bauforschung für die Praxis

- Brandschutzkosten im Wohnungsbau**  
Karl Deters  
Band 59, 2001, 245 S., Abb., Tab., kart.,  
ISBN 3-8167-4258-0  
€ 50,- | sFr 86,-
- Gemeinschaftliches Wohnen im Alter**  
R. Weeber, G. Wölfle, V. Rösner  
Band 58, 2001, 175 S., Abb., Tab., kart.,  
ISBN 3-8167-4257-2  
€ 46,- | sFr 79,-
- Entwicklung eines Bewertungssystems für ökonomisches und ökologisches Bauen und gesundes Wohnen**  
C.J. Diederichs, P. Getto, S. Streck  
Band 57, 2002, 230 S., mit CD-ROM, Abb., Tab., kart., ISBN 3-8167-4256-4  
€ 50,- | sFr 86,-
- Vergabeverfahren und Baukosten**  
Hannes Weeber, Simone Bosch  
Band 56, 2001, 192 S., Abb., Tab., kart.,  
ISBN 3-8167-4255-6  
€ 50,- | sFr 86,-
- Konzepte für die praxisorientierte Instandhaltungsplanung im Wohnungsbau**  
Ralf Spilker, Rainer Oswald  
Band 55, 2000, 71 S., 5 Abb., zahlr. Tab., kart., ISBN 3-8167-4254-8  
€ 22,- | sFr 39,50
- Bewährung innen wärmedämmter Fachwerkbauten**  
Problemstellung und daraus abgeleitete Konstruktionsempfehlungen  
Reinhard Lamers, Daniel Rosenzweig, Ruth Abel  
Band 54, 2000, 173 S., 123 Abb., kart.,  
ISBN 3-8167-4253-X  
€ 25,- | sFr 44,-
- Überprüfbarkeit und Nachbesserbarkeit von Bauteilen - untersucht am Beispiel der genutzten Flachdächer**  
Rainer Oswald, Ralf Spilker, Klaus Wilmes  
Band 53, 1999, 133 S., 49 Abb., 4 Tab., kart.,  
ISBN 3-8167-4252-1  
€ 37,- | sFr 63,-
- Bauschadensfibel für den privaten Bauherrn und Hauskäufer**  
Rainer Oswald, Ruth Abel, Volker Schnapauff  
Band 52, 1999, 140 S., 19 Abb., 3 Tab., fester Einband, ISBN 3-8167-4251-3  
€ 25,- | sFr 44,-
- Balkone, kostengünstig und funktionsgerecht**  
Hannes Weeber, Margit Lindner  
Band 51, 1999, 146 S., 102 Abb., 26 Tab., kart., ISBN 3-8167-4250-5  
€ 38,- | sFr 65,-
- Kostenfaktor Erschließungsanlagen**  
Hannes Weeber, Michael Rees  
Band 50, 1999, 226 S., 107 Abb., 15 Tab., kart., ISBN 3-8167-4249-1  
€ 50,- | sFr 86,-
- Eigenleistung beim Bauen**  
Wie Eigentümer und Mieter sich am Bau ihrer Wohnung beteiligen können  
R. Weeber, H. Weeber, S. Kleebaur, H. Gerth, W. Pohrt  
Band 49, 1999, 154 S., 25 Abb., 12 Tab.,  
ISBN 3-8167-4248-3  
€ 22,- | sFr 39,50
- Kosteneinsparung durch Bauzeitverkürzung**  
Barbara Bredenbals, Heinz Hullmann  
Band 48, 1999, 174 S., 38 Abb., 36 Tab.,  
ISBN 3-8167-4247-5  
€ 37,- | sFr 64,-
- Das wärme- und feuchteschutztechnische Verhalten von stählernen Fassadendurchdringungen**  
Lutz Franke, Gernod Deckelmann  
Band 47, 1998, 74 S., 38 Abb., 13 Tab., kart.,  
ISBN 3-8167-4246-7  
€ 15,- | sFr 26,-
- Kostengünstige bauliche Maßnahmen zur Reduzierung des Energieverbrauchs im Wohnungsbestand**  
R. Oswald, R. Lamers, V. Schnapauff, R. Spilker, K. Wilmes  
Band 46, 1998, 100 S., 57 Abb., kart.,  
ISBN 3-8167-4245-9  
€ 17,- | sFr 30,50
- Sicherung des baulichen Holzschutzes**  
Horst Schulze  
Band 45, 1998, 168 S., 136 Abb., 10 Tab., kart., ISBN 3-8167-4244-0  
€ 22,- | sFr 39,50
- Luftdichtigkeit von industriell errichteten Wohngebäuden in den neuen Bundesländern**  
Wolfgang Richter, Dirk Reichel  
Band 44, 1998, 88 S., 34 Abb., 15 Tab., kart.,  
ISBN 3-8167-4243-2  
€ 15,- | sFr 26,-
- Leitfaden Kostendämpfung im Geschoßwohnungsbau**  
Karl Deters, Joachim Arlt  
Band 43, 1998, 162 S., 135 Abb., 34 Tab., kart., ISBN 3-8167-4242-4  
€ 22,- | sFr 39,50
- Langzeitbewährung und Entwicklungstendenzen von Kunststoff-Bauprodukten im Wohnungsbau**  
Dieter Arlt, Rainer Weltring  
Band 42, 1998, 137 S., 90 Abb., 7 Graph., kart., ISBN 3-8167-4241-6  
€ 20,- | sFr 35,-
- Ausschreibungshilfen für recyclinggerechte Wohnbauten**  
Barbara Bredenbals, Wolfgang Willkomm  
Band 41, 1998, 172 S., 28 Abb., kart.,  
ISBN 3-8167-4240-8  
€ 22,- | sFr 39,50
- Gebrauchsanweisung für Häuser**  
Volker Schnapauff, Silke Richter-Engel  
Band 40, 1997, 116 S., 4 Abb., 7 Tab., kart.,  
ISBN 3-8167-4239-4  
€ 19,- | sFr 34,-
- Ergänzender Neubau in bestehenden Wohnsiedlungen**  
H. Weeber, R. Weeber, M. Lindner, u. a.  
Band 39, 1997, 194 S., 230 Abb., kart.,  
ISBN 3-8167-4238-6  
€ 25,- | sFr 44,-
- Lüftung in industriell errichteten Wohnhäusern**  
Wilfried Jank  
Band 37, 1997, 66 S., 17 Abb., 12 Tab., 13 Tafeln, kart., ISBN 3-8167-4236-X  
€ 15,- | sFr 26,-
- Auswirkungen der neuen Wärmeschutzverordnung auf den Schallschutz von Gebäuden**  
Siegfried Koch, Werner Scholl  
Band 36, 1997, 72 S., 33 Abb., 2 Tab., kart.,  
ISBN 3-8167-4235-1  
€ 15,- | sFr 26,-
- Baukostensenkung durch gesicherte Schadensbeurteilung an aufwerksporigen Leichtbetonelementen der industriell errichteten Wohnbauten der ehemaligen DDR**  
Mirko Neumann, Mathias Reuschel  
Band 35, 1997, 320 S., 227 Abb., 105 Tab., kart., ISBN 3-8167-4234-3  
€ 41,- | sFr 70,-
- Verhinderung von Emissionen aus Baustoffen durch Beschichtungen**  
Lutz Franke, Martin Wesselmann  
Band 34, 1997, 68 S., 11 Abb., 9 Tab., kart.,  
ISBN 3-8167-4233-5  
€ 15,- | sFr 26,-
- Wärmedämmverbundsysteme (WDVS) im Wohnungsbau**  
Institut für Bauforschung e.V., Hannover  
Band 32, 1997, 250 S., 128 Abb., 20 Tab., kart., ISBN 3-8167-4231-9  
€ 30,- | sFr 51,50

## BESTELLSCHEIN

■ Titel ankreuzen und im Umschlag oder  
■ per Fax (07 11) 970 - 25 08 oder -25 07  
■ senden an:

### Fraunhofer IRB Verlag

■ Fraunhofer-Informationszentrum  
■ Raum und Bau IRB  
■ Postfach 80 04 69, D-70504 Stuttgart  
■ Telefon (07 11) 970 - 25 00  
■ E-Mail: [info@irb.fhg.de](mailto:info@irb.fhg.de)  
■ URL: <http://www.IRBbuch.de>

■ Absender .....

■ .....

■ .....

■ .....

■ Straße/PF .....

■ .....

■ PLZ/Ort .....

■ .....

■ Datum .....

■ .....

■ Unterschrift .....

- Niedrigenergiehäuser unter Verwendung des Dämmstoffes Styropor**  
Teil 1, Konstruktionsempfehlungen und optimierte Anschlußsituationen (Details)  
W.-H. Pohl, S. Horschler, R. Pohl  
Teil 2, Quantitative Darstellung der Wirkung von Wärmebrücken  
Gerd Hauser, Horst Stiegel  
Band 31, 1997, 294 S., 169 Abb., kart., ISBN 3-8167-4230-0  
€ 14,- | sFr 25,-
- Fenster - Sanierung und Modernisierung**  
Hans-Rudolf Neumann  
Band 30, 1997, 134 S., 90 Abb., 11 Tab., kart., ISBN 3-8167-4229-7  
€ 20,- | sFr 35,-
- Schäden an nicht industriell hergestellten Wohnbauten der neuen Bundesländer**  
R. Oswald, R. Spilker, V. Schnapauß, u. a.  
Band 29, 1996, 116 S., 66 Abb., 30 Tab., kart., ISBN 3-8167-4228-9  
€ 17,- | sFr 30,50
- Parkierungsanlagen im verdichteten Wohnungsbau**  
Hannes Weeber, Rotraut Weeber  
Band 28, 1997, 156 S., 60 Abb., 28 Tab., kart., ISBN 3-8167-4227-0  
€ 22,- | sFr 39,50
- Möglichkeiten der Einsparung von Wohnkosten durch Mieterbeteiligung**  
M. Elff, K. Goldt, B. Harms, u. a.  
Band 27, 1997, 157 S., 3 Abb., 8 Tab., kart., ISBN 3-8167-4226-2  
€ 22,- | sFr 39,50
- Die Berechnung von Flachdecken über Zustands- und Einflußflächen**  
Max Baerschneider  
Band 26, 1996, 380 S., 196 Tab., kart., zweibändig, ISBN 3-8167-4225-4  
€ 49,- | sFr 83,50
- Feuchttransportvorgänge in Stein und Mauerwerk - Messung und Berechnung**  
M. Krus, H.-M. Künzel, K. Kießl  
Band 25, 1996, 75 S., 31 Abb., 2 Tab., kart., ISBN 3-8167-4224-6  
€ 15,- | sFr 26,-
- Wohngebäudesanierung und Privatisierung**  
Hannes Weeber, Michael Rees  
Band 24, 1996, 107 S., 51 Abb., 17 Tab., kart., ISBN 3-8167-4223-8  
€ 20,- | sFr 35,-
- Der Feuchtehaushalt von Holz-Fachwerkwänden**  
Helmut Künzel  
Band 23, 1996, 85 S., 32 Abb., 10 Tab., kart., ISBN 3-8167-4222-X  
€ 15,- | sFr 26,-
- Neue Konstruktionsalternativen für recyclingfähige Wohngebäude**  
Barbara Bredenbals, Wolfgang Willkomm  
Band 22, 1996, 110 S., 26 Abb., 3 Tab., kart., ISBN 3-8167-4221-1  
€ 17,- | sFr 30,50
- Standisicherheit der Wohnbauten in Fertigteilbauweise in den neuen Bundesländern**  
E. Cziesielski, N. Fouad, F.-U. Vogdt  
Band 21, 1996, 226 S., 71 Abb., kart., ISBN 3-8167-4220-3  
€ 30,- | sFr 51,50
- Sicherheit von Glasfassaden**  
X. Shen, H. Techen, J. D. Wörner  
Band 20, 1996, 38 S., 26 Abb., 4 Tab., kart., ISBN 3-8167-4219-X  
€ 12,- | sFr 21,50
- Kostengünstige Umnutzung aufgegebener militärischer Einrichtungen für Wohnzwecke, Wohnergängungseinrichtungen und andere Nutzungen**  
B. Jacobs, J. Kirchhoff, J. Mezler  
Band 19, 1996, 204 S., zahlreiche Abb., kart., ISBN 3-8167-4218-1  
€ 28,- | sFr 47,50
- Holztafelbauweise im mehrgeschossigen Wohnungsbau**  
Barbara Bredenbals, Heinz Hullmann  
Band 18, 1996, 237 S., 116 Abb., 23 Tab., kart., ISBN 3-8167-4217-3  
€ 30,- | sFr 51,50
- Gefährdungspotentiale asbesthaltiger Massenbaustoffe in den neuen Bundesländern**  
Klaus Bergner, unter Mitarbeit von Franka Stodollik und Hans-Otto Eckler  
Band 17, 1996, 75 S., 26 Abb., 9 Tab., kart., ISBN 3-8167-4216-5  
€ 15,- | sFr 26,-
- Transparent gedämmte Altbauten**  
G. H. Bondzio, K. Brandstetter, P. Sulzer, S. Al Bosta, u. a.  
Band 15, 1996, 130 S., 44 Abb., 7 Tab., kart., ISBN 3-8167-4214-9  
€ 22,- | sFr 39,50
- Kosten und Techniken für das "Überwintern" erhaltenswerter Bausubstanz**  
Michael Rees, Hannes Weeber  
Band 14, 1995, 190 S., zahlreiche Abb., kart., ISBN 3-8167-4213-0  
€ 25,- | sFr 44,-
- Menschengerechte Raumklimatisierung durch Quelllüftung und Flächenkühlung**  
Erhard Mayer (Hrsg.)  
Band 13, 1995, 190 S., zahlreiche Abb., kart., ISBN 3-8167-4212-2  
€ 25,- | sFr 44,-
- Zusätzliche Wärmedämmsysteme bei Fertigteilbauten**  
Typenserie P2  
P. Bauer, B. Loeser, H. Schwarzgig, T. Spengler  
Band 12, 1995, 118 S., zahlreiche Abb., kart., ISBN 3-8167-4211-4  
€ 20,- | sFr 35,-
- Körperschalldämmung von Sanitärräumen**  
Karl Gösele, Volker Engel  
Band 11, 1995, 76 S., zahlreiche Abb., kart., ISBN 3-8167-4210-6  
€ 15,- | sFr 26,-
- Bauschäden an Holzbalkendecken in Feuchtraumbereichen**  
Gertraud Hofmeister  
Band 9, 1995, 210 S., zahlreiche Abb., kart., ISBN 3-8167-4208-4  
€ 25,- | sFr 44,-
- Ökologische Auswirkungen von Hochhäusern**  
Band 8, 1995, 418 S., 114 Abb., kart., ISBN 3-8167-4207-6  
€ 50,- | sFr 86,-
- Wohnhochhäuser heute**  
H. Weeber, R. Weeber, M. Hasenmaier, u. a.  
Band 7, 1995, 165 S., zahlreiche Abb., kart., ISBN 3-8167-4206-8  
€ 25,- | sFr 44,-
- Abfallvermeidung in der Bauproduktion**  
Barbara Bredenbals, Wolfgang Willkomm  
Band 6, 1994, 198 S., 75 Abb., 16 Tab., kart., ISBN 3-8167-4205-X  
€ 25,- | sFr 44,-
- Barrierefreie Erschließungssysteme von Wohngebäuden**  
R. Weeber, M. Rees, H. Weeber  
Band 5, 1994, 64 S., 52 Abb., 6 Tab., kart., ISBN 3-8167-4204-1  
€ 12,- | sFr 21,50
- Die Ausführung des Umkehrdaches bei erhöhten Anforderungen an den Wärmeschutz**  
Lutz Franke, Gernod Deckelmann  
Band 4, 1994, 80 S., zahlreiche Abb. und Tab., kart., ISBN 3-8167-4203-3  
€ 20,- | sFr 35,-
- Niveaugleiche Türschwellen bei Feuchträumen und Dachterrassen**  
R. Oswald, A. Klein, K. Wilmes  
Band 3, 1994, 56 S., 48 Abb., kart., ISBN 3-8167-4202-5  
€ 12,- | sFr 21,50
- Wohnbauten in Fertigteilbauweise in den neuen Bundesländern**  
R. Oswald, V. Schnapauß, R. Lamers, u. a.  
Band 2, 1995, 333 S., 515 Abb., kart., ISBN 3-8167-4201-7  
€ 40,- | sFr 69,50
- Heizung und Lüftung im Niedrigenergiehaus**  
Gerhard Hausladen, Peter Springl  
Band 1, 1994, 214 S., 74 Abb., 17 Tab., kart., ISBN 3-8167-4200-9  
€ 25,- | sFr 44,-
- Informieren Sie mich bitte laufend über neue **Fachbücher**

## BESTELLSCHEIN

■ **Titel ankreuzen und im Umschlag oder per Fax (07 11) 970 - 2508 oder -2507 senden an:**

■ **Fraunhofer IRB Verlag**

■ Fraunhofer-Informationszentrum  
■ Raum und Bau IRB

■ **Postfach 80 04 69, D-70504 Stuttgart**

■ **Telefon (07 11) 970 - 2500**

■ **E-Mail: info@irb.fhg.de**

■ **URL: <http://www.IRBbuch.de>**

■ Absender .....

■ .....

■ .....

■ Straße/PF .....

■ PLZ/Ort .....

■ Datum .....

■ Unterschrift .....

# Schadenfreies Bauen

Herausgegeben von Professor Günter Zimmermann

- Schadenfreies Bauen**  
**Gesamtausgabe Bände 1 – 26**  
2002, alle Bände mit festem Einband  
ISBN 3-8167-5796-0  
€ 1037,- | sFr 1744,-  
Bei Abnahme der Gesamtausgabe sparen Sie € 115,-
- Schäden an polymeren Beschichtungen**  
Robert Engelfried  
Band 26: 2001, 146 S., 94 Abb., 14 Tab.,  
ISBN 3-8167-5795-2  
€ 40,- | sFr 68,50
- Schäden an Belägen und Bekleidungen mit Keramik- und Werksteinplatten**  
Günter Zimmermann  
Band 25: 2001, 200 S., 175 Abb., 16 Tab.,  
ISBN 3-8167-5791-X  
€ 48,- | sFr 82,50
- Schäden an Installationsanlagen**  
Heizungs- und Raumluftechnische Anlagen,  
Trinkwasser-, Abwasser- und Gasinstallationsanlagen  
Heinz Wirth, Stefan Wirth  
Band 24: 2001, 270 S., 114 Abb., 33 Tab.,  
ISBN 3-8167-5790-1  
€ 57,- | sFr 96,-
- Schäden an Türen und Toren**  
Ralf Schumacher  
Band 23: 2001, 372 S., 291 Abb., 32 Tab.,  
ISBN 3-8167-4169-X  
€ 71,- | sFr 118,-
- Schäden an elastischen und textilen Bodenbelägen**  
Hans-Joachim Scheewe  
Band 22: 2001, 232 S., 80 überw. farb. Abb.,  
50 Tab.,  
ISBN 3-8167-4168-1  
€ 50,- | sFr 86,-
- Schäden an Glasfassaden und -dächern**  
Peter Küffner, Oliver Lummertzheim  
Band 21: 2000, 132 S., 106 z.T. farb. Abb.,  
6 Tab.,  
ISBN 3-8167-4165-7  
€ 40,- | sFr 68,50
- Schäden an Wärmedämm-Verbundsystemen**  
Erich Cziesielski, Frank Ulrich Vogdt  
Band 20: 2000, 202 S., 75 Konstruktionsskizzen,  
28 Tab. u. Diagramme, 98 Fotos,  
ISBN 3-8167-4164-9  
€ 50,- | sFr 86,-
- Schäden an Außenwänden aus Mehrschicht-Betonplatten**  
Ralf Ruhnau, Nabil Fouad  
Band 19: 1998, 104 S., 61 Abb., 7 Tab.,  
ISBN 3-8167-4160-6  
€ 35,- | sFr 60,50
- Schäden an Deckenbekleidungen und abgehängten Decken**  
Hubert Satzger  
Band 18: 1998, 78 S., 59 Abb., 5 Tab.,  
ISBN 3-8167-4159-2  
€ 23,- | sFr 40,50
- Schäden an Dränanlagen**  
Wilfried Muth  
Band 17: 1997, 114 S., 128 Abb., 10 Tab.,  
ISBN 3-8167-4154-1  
€ 35,- | sFr 60,50
- Tauwasserschäden**  
Richard Jenisch  
Band 16: 2. überarb. Aufl., 2001, 129 S.,  
66 Abb., 6 Tab., ISBN 3-8167-5792-8  
€ 37,- | sFr 62,50
- Schäden an Estrichen**  
Klaus G. Aurnhammer  
Band 15: 2., erg. Aufl., 1999, 216 S., 44 Abb.;  
17 Tab.,  
ISBN 3-8167-4162-2  
€ 46,- | sFr 78,-
- Schäden an Tragwerken aus Stahlbeton**  
Bernhard Brand, Gerhard Glatz  
Band 14: 1996, 217 S., 129 Abb., 24 Tab.,  
ISBN 3-8167-4153-3  
€ 46,- | sFr 78,-
- Schäden an Außenwänden aus Ziegel- und Kalksandstein-Verblendmauerwerk**  
Helmut Klaas, Erich Schulz  
Band 13: 1995, 224 S., 162 Abb., 13 Tab.,  
ISBN 3-8167-4152-5  
€ 46,- | sFr 78,-
- Schäden an Metallfassaden und -dachdeckungen**  
Franz Lubinski, Fritz Röbber, Uwe Nagel, u. a.  
Band 12: 2. erw. Aufl., 2001, 415 S., 303  
Abb., 22 Tab.,  
ISBN 3-8167-4166-5  
€ 76,- | sFr 127,-
- Schäden an Außenmauerwerk aus Naturstein**  
Martin Sauder, Renate Schloenbach  
Band 11: 1995, 274 S., 95 Abb., 31 Tab.,  
ISBN 3-8167-4150-9  
€ 50,- | sFr 86,-
- Schäden an Außenwänden mit Asbestzement-, Faserzement- und Schieferplatten**  
Klaus W. Liersch  
Band 10: 1995, 146 S., 86 Abb., 20 Tab.,  
ISBN 3-8167-4149-5  
€ 38,- | sFr 65,-
- Schäden an Fassadenputzen**  
Helmut Künzel  
Band 9: 2. erw. Aufl., 2000, 142 S., mit zahlr.  
Abb. und Tab.,  
ISBN 3-8167-4167-3  
€ 38,- | sFr 65,-
- Schäden an Abdichtungen in Innenräumen**  
Erich Cziesielski, Michael Bonk  
Band 8: 1994, 112 S., 55 Abb., 4 Tab.,  
ISBN 3-8167-4147-9  
€ 33,- | sFr 57,-
- Rissschäden an Mauerwerk**  
Ursachen erkennen - Rißschäden vermeiden.  
Werner Pfefferkorn  
Band 7: 3. überarb. Aufl., 2002, 292 S.,  
290 Abb., 18 Tab.,  
ISBN 3-8167-5793-6  
€ 53,- | sFr 89,-
- Schäden an Fenstern**  
Wolfgang Klein  
Band 6: 1994, 154 S., 92 Abb., 2 Tab.,  
ISBN 3-8167-4145-2  
€ 37,- | sFr 64,-
- Schäden an Wänden und Decken in Holzbauart**  
Horst Schulze  
Band 5: 1993, 158 S., 140 Abb.,  
ISBN 3-8167-4144-4  
€ 37,- | sFr 64,-
- Schäden an Industrieböden**  
Erich Cziesielski, Thomas Schrepfer  
Band 4: 2., erw. Aufl., 1999, 169 S., 69 Abb.,  
33 Tab.,  
ISBN 3-8167-4163-0  
€ 46,- | sFr 78,-
- Schäden an Sichtbetonflächen**  
Heinz Klopfer  
Band 3: 1993, 123 S., 77 Abb., 9 Tab.,  
ISBN 3-8167-4142-8  
€ 35,- | sFr 60,50
- Schäden an Flachdächern und Wannenaus wasserundurchlässigem Beton**  
Gottfried C.O. Lohmeyer  
Band 2: 3. neu bearb. Aufl., 2001, 272 S.,  
171 Abb., 28 Tab.,  
ISBN 3-8167-5794-4  
€ 50,- | sFr 86,-
- Schäden an Außenwandfugen im Beton- und Mauerwerksbau**  
Ralf Ruhnau  
Band 1: 1992, 132 S., 87 Abb.,  
ISBN 3-8167-4140-1  
€ 35,- | sFr 60,50

## BESTELLSCHEIN

**Titel ankreuzen und im Umschlag oder per Fax (07 11) 970 - 25 08 oder -25 07 senden an:**  
 **Fraunhofer IRB Verlag**  
 Fraunhofer-Informationszentrum  
 Raum und Bau IRB  
 **Postfach 80 04 69, D-70504 Stuttgart**  
 **Telefon (07 11) 970 - 25 00**  
 **E-Mail: info@irb.fhg.de**  
 **URL: http://www.IRBbuch.de**

**Absender** .....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....  
 **Straße/PF** .....  
 .....  
 **PLZ/Ort** .....  
 .....  
 **Datum** .....  
 .....  
 **Unterschrift** .....

02/2002 [sFBalle Titel-AnzeigeA4.qxd

# Die »Bauschäden-Sammlung« in 13 Bänden

Herausgegeben von Professor Günter Zimmermann



In der Fachwelt hat diese Zusammenstellung von typischen Bauschadensfällen als wichtiger Beitrag zur Verbesserung der Bau- und Planungsleistungen großes Ansehen erlangt.

Die 13 Bände mit dem Untertitel »Sachverhalt - Ursachen - Sanierung« enthalten Schadensberichte aus allen baukonstruktiven Bereichen und sind durch Themen- und Sachregister erschlossen.

Der Nutzer kann so auf Anhieb feststellen,

- ob ein gleicher oder ähnlicher Schaden bereits dokumentiert ist,
- welche Schäden für ein bestimmtes Bauteil typisch sind,
- wie diese Schäden vermieden werden können oder welche Maßnahmen zu ihrer Behebung in Frage kommen.

Seit 3 Jahrzehnten ist die »Bauschäden-Sammlung« eine ständige Rubrik des »Deutschen Architektenblattes«.

## Bauschäden-Sammlung, Band 13 Sachverhalt - Ursachen - Sanierung

2001, 184 Seiten,  
zahlreiche, überwiegend farbige  
Abbildungen, fester Einband,  
ISBN 3-8167-4185-1  
€ 27,- | sFr 44,-

Der Herausgeber

Professor Günter Zimmermann, ein bekannter Bausachverständiger mit langjähriger Erfahrung, betreut seit 3 Jahrzehnten die »Bauschäden-Sammlung« im »Deutschen Architektenblatt« und ist auch für die Herausgabe der Buchausgabe verantwortlich.

## BESTELLSCHEIN

- Band 1: 168 Seiten  
€ 27,- | sFr 44,-
- Band 2: 168 Seiten  
€ 27,- | sFr 44,-
- Band 3: 168 Seiten  
€ 27,- | sFr 44,-
- Band 4: 168 Seiten  
€ 27,- | sFr 44,-
- Band 5: 168 Seiten  
€ 27,- | sFr 44,-
- Band 6: 168 Seiten  
€ 27,- | sFr 44,-
- Band 7: 168 Seiten  
€ 27,- | sFr 44,-
- Band 8: 168 Seiten  
€ 27,- | sFr 44,-
- Band 9: 184 Seiten  
€ 27,- | sFr 44,-
- Band 10: 184 Seiten  
€ 27,- | sFr 44,-
- Band 11: 184 Seiten  
€ 27,- | sFr 44,-
- Band 12: 184 Seiten  
€ 27,- | sFr 44,-
- Band 13: 184 Seiten  
€ 27,- | sFr 44,-

### Sie sparen € 36,- bei Abnahme der

- Bände 1-13 komplett:  
€ 315,- | sFr 476,-

Alle Bände im Format A 5 quer, mit zahlreichen, zum Teil farbigen Abbildungen, festem Einband und Fadenheftung

Titel ankreuzen und im Umschlag oder per Fax (07 11) 970 - 25 08 oder -25 07 senden an:

### Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum  
Raum und Bau IRB

Postfach 80 04 69, D-70504 Stuttgart  
Telefon (07 11) 9 70 - 25 00  
E-Mail: [info@irb.fhg.de](mailto:info@irb.fhg.de)  
URL: <http://www.IRBbuch.de>

Absender .....

Straße/PF .....

PLZ/Ort .....

Datum .....

Unterschrift .....

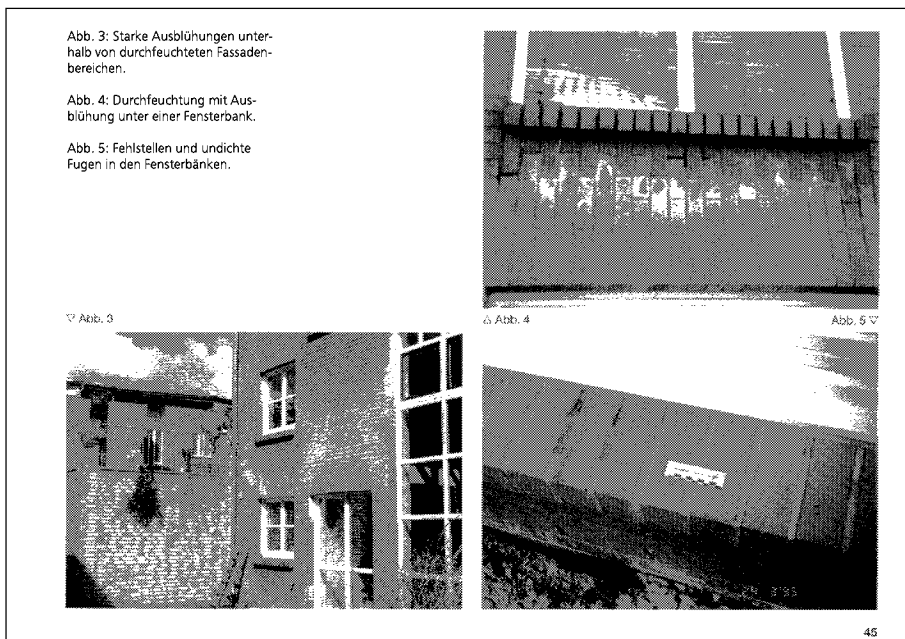


Abb. 3: Starke Ausblühungen unterhalb von durchfeuchteten Fassadenbereichen.

Abb. 4: Durchfeuchtung mit Ausblühung unter einer Fensterbank.

Abb. 5: Fehlstellen und undichte Fugen in den Fensterbänken.

Abb. 3

Abb. 4

Abb. 5