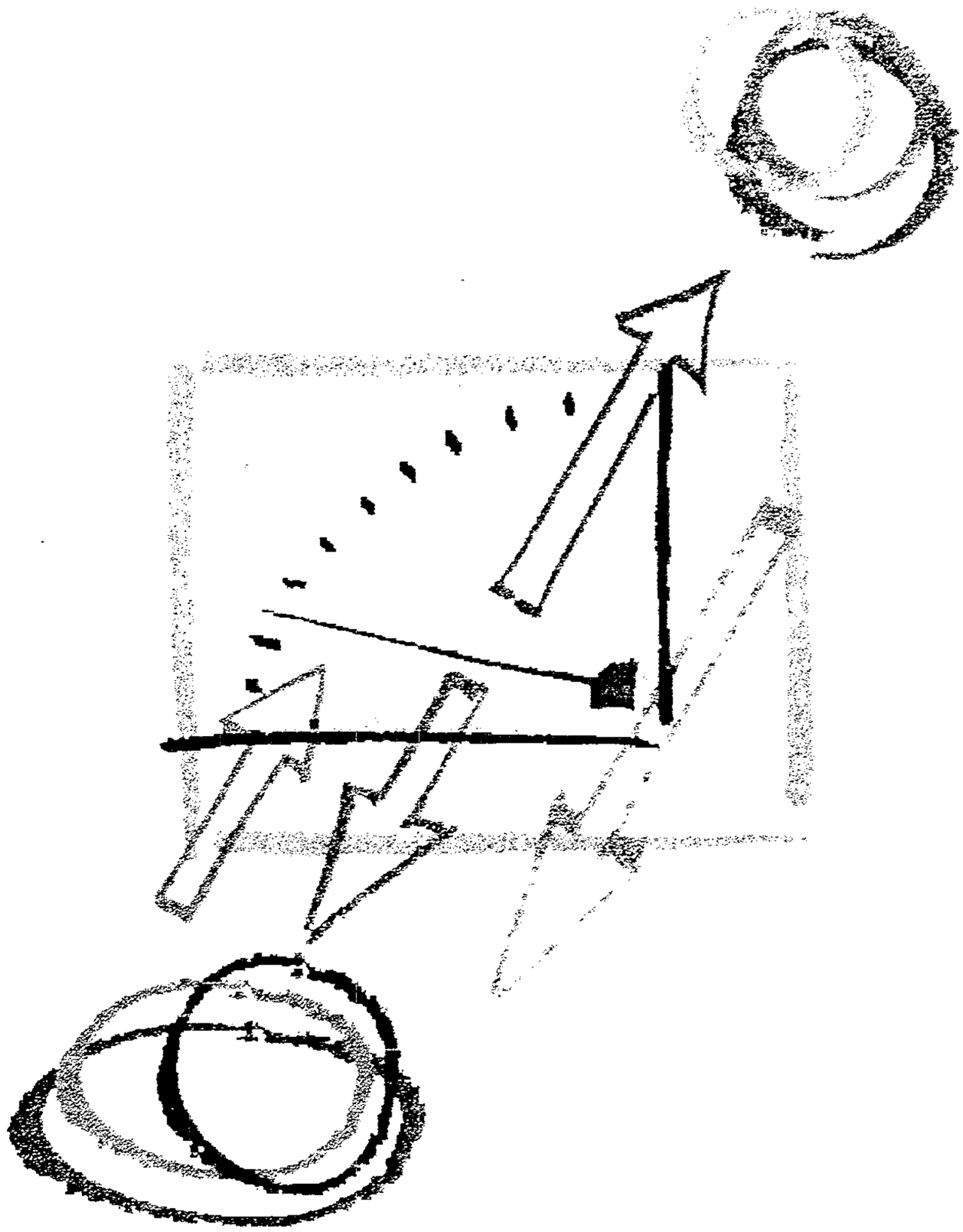
Fenster
Türen
Fassaden
Werkstoffe
Zubehör

ROSENHEIM

# Forschungsvorhaben
# Warm Edge



Abschlußbericht

Juli 1999

# Abschlußbericht

| | |
|---|---|
| **Thema** | Berechnung des linearen Wärmedurchgangs-koeffizienten $\Psi$ für Abstandhalter von Mehrscheiben-Isolierglas |
| **Kurztitel** | Warm Edge |
| **Auftraggeber** | Bundesverband Flachglas<br>Großhandel, Isolierglasherstellung,<br>Veredelung e.V.<br>Mülheimer Straße 1<br>53840 Troisdorf |
| **Forschungsstelle** | i.f.t. Rosenheim<br>Theodor-Gietl-Straße 7-9<br>83026 Rosenheim |
| **Bearbeiter** | Prof. Dr. Franz Feldmeier<br>Dipl.-Ing. (FH) Hans Froelich<br>Dipl.-Ing. (FH) Hans-Jürgen Hartmann<br>Dipl.-Ing. (FH) Konrad Huber |
| **Institutsleitung** | Professor Dipl.-Ing. Josef Schmid |

*Rosenheim, Juli 1999*

# Inhalt

| | | Seite |
|---|---|---|
| **1** | **Problemstellung und Zielsetzung** | **1** |
| 2.1 | Berechnungsgrundlage | 2 |
| 2.2 | Genauigkeit des Verfahrens | 2 |
| 2.2.1 | Grundlage | 2 |
| 2.2.2 | Anforderungen nach DIN EN ISO 10211-1 | 4 |
| 2.2.3 | Berechnung der Kenngröße $\Psi$ | 4 |
| **3** | **Ergebnis** | **6** |
| 3.1 | Wärmeleitfähigkeit des Molekularsiebes | 6 |
| 3.2 | Linearer Wärmedurchgangskoeffizient $\Psi$ | 6 |
| 3.3 | Temperaturfaktor $f_{Rsi}$ | 7 |
| 3.4 | Beurteilung | 8 |

**Anhang 1**
**Anhang 2**
**Anhang 3**

# 1 Problemstellung und Zielsetzung

Seit einigen Jahren werden lineare Wärmedurchgangskoeffizienten ($\Psi$-Werte) für thermisch verbesserte Abstandhaltervarianten experimentell oder rechnerisch ermittelt. Die Berechnungen erfolgten dabei auf Grundlage von E DIN EN ISO 10211 : 1996-01 bzw. nach DIN EN ISO 10077-2 : 1999-02.

Aufgrund von Überarbeitungen der Normen sowie der Weiterentwicklung der Rechenprogramme für das numerische Rechenverfahren sind die über einen Zeitraum von mehreren Jahren ermittelten $\Psi$-Werte nicht mehr direkt vergleichbar.

Es ist deshalb das Ziel der Arbeit, mittels eindeutiger Vorgaben hinsichtlich Randbedingungen, Rahmenprofilen und Glasarten vergleichbare $\Psi$-Werte für verschiedene Abstandhaltertypen zu ermitteln. Das so festgelegte Verfahren soll dann zur Bestimmung von „Kennwerten" dienen und wird der zuständigen Arbeitsgruppe durch das i.f.t. für die Aufnahme in die europäische Normung vorgeschlagen.

# 2 Durchführung der Untersuchung

## 2.1 Berechnungsgrundlage

Die Ψ-Werte werden nach der aktuellen Version von DIN EN ISO 10077-2 berechnet. Zusätzlich wird die niedrigste normierte Oberflächentemperatur ($f_{Rsi}$-Faktor) ermittelt. Für jeden an der Untersuchung beteiligten Abstandhaltertyp und einen üblichen Al-Randverbund werden beide Werte für drei Rahmenprofile und zwei Glastypen nach Tabelle 1 ermittelt. Die Rahmenprofile und das Isolierglas sind im Anhang dargestellt.

**Tabelle 1** Profile und Verglasungen

| Rahmen | Verglasung | |
|---|---|---|
| | 2MIG | 3MIG |
| Aluminium RG 1*) **) | Ψ; $f_{0.20}$ | Ψ; $f_{0.20}$ |
| Holz*) | Ψ; $f_{0.20}$ | Ψ; $f_{0.20}$ |
| Kunststoffhohlprofil (PVC)*) | Ψ; $f_{0.20}$ | Ψ; $f_{0.20}$ |

* Es werden die in prEN 10077-2 dargestellten Profilquerschnitte verwendet.
** modifiziert mit Ziel $U_f$ ca 2,0 W/(m²K)

**Hinweis**
Die hier ermittelten Ψ-Werte sind ***nicht*** direkt mit den in prEN 10077-1 Tabelle E1 angegebenen Werten vergleichbar, da zwischenzeitlich Wärmeschutzverglasungen geringere Wärmedurchgangskoeffizienten aufweisen und verbesserte numerische Verfahren zur Berechnung Verwendung finden.

## 2.2 Genauigkeit des Verfahrens

### 2.2.1 Grundlage

Jedes numerische Verfahren erfordert eine Diskretisierung des betrachteten Objekts und die Lösung der damit verbundenen Gleichungssysteme. In der vorliegenden Untersuchung erfolgte die Berechnung mit dem Programm WINISO 1.4. Das Programm arbeitet mit Rechteckelementen und einem iterativen Lösungsverfahren. Die Anzahl der Elemente ist durch die Größe des Rechenspeichers begrenzt und liegt bei ca. 500 × 500 entsprechend 250000 Temperaturknoten. Bei allen Lösungsverfahren für lineare Gleichungssysteme steigt die Rechenzeit mit der Anzahl der Knoten erheblich, gleichzeitig steigen die Anforderungen an das Konvergenzverhalten.

Die Rechenmethoden beinhalten damit folgende Fehler:

1. Modellierung:
   Nicht rechtwinklige Materialgrenzen müssen durch rechteckige Stufen approximiert werden. Durch eine entsprechend feine Elementierung kann der Fehler beliebig klein gemacht werden. Bei den Randbedingungen sind die Übergangswiderstände entsprechend zu korrigieren.

2. Elementierung:
   Für jedes Element steht ein Temperaturwert zur Verfügung, dazwischen wird linear interpoliert. Auch hier kann der Fehler durch entsprechend feine Elementierung beliebig klein gemacht 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 u. a. die Genauigkeit der Lösung. Trotz der Verwendung von zwei Kriterien kann eine Nebenlösung nicht vollständig ausgeschlossen werden. Die Wahrscheinlichkeit hierfür wird durch die Berechnung mit unterschiedlichen Vorgabentemperaturen (Startvektor) erheblich reduziert.

4. Konvergenzverhalten:
   Bei sehr unterschiedlicher Elementgröße und Materialien mit 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. Allgemein gilt, daß bei einer großen Anzahl von Knoten die Konvergenzgrenzen strenger zu wählen sind und das Konvergenzverhalten besonders kritisch zu beobachten ist.

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

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

Bei iterativen Lösungsverfahren wird als Konvergenzkriterium verlangt, daß die „relative Summe der Wärmequellen und Senken" kleiner 0,001 ist:

$$2\sum Q / \sum |Q| \leq 0{,}001$$

***Anmerkung***
*Dies entspricht der Standardeinstellung von WINISO für diese Konvergenzgrenze. In der vorliegenden Untersuchung wird meist der schärfere Wert von $10^{-4}$ gefordert. WINISO verwendet außerdem als zweites Konvergenzkriterium die Temperaturänderung und reduziert damit das Risiko von Nebenlösungen.*

Das verwendete Programm erfüllt die Anforderungen nach DIN EN ISO 10211-1 : 1995-11. Insbesondere werden beide in der Norm angegebenen zweidimensionalen Prüfreferenzfälle exakt gelöst. Da auch die anderen Kriterien erfüllt werden, ist WINISO nach DIN EN ISO 10211-1 : 1995-11 validiert.

### 2.2.3 Berechnung der Kenngröße Ψ

Nach prEN 10077-2 ergibt sich der Ψ-Wert aus

$$\Psi = L_\Psi{}^{2D} - l_f U_f - l_g U_g \qquad (1)$$

hierbei gilt für die Rahmenkenngröße:

$$l_f U_f = L_f{}^{2D} - l_p U_p \qquad (2)$$

Die Größen $L_\Psi{}^{2D}$ und $L_f^{2D}$ ergeben sich jeweilig aus der zweidimensionalen Berechnung des entsprechenden Querschnitts. Der Fehler dieser Größen ist schwer einzuschätzen, sollte aber – sofern Geometrie, Materialwerte und Randbedingungen identisch sind und die Anforderungen von DIN EN ISO 10211-1 : 1995-11 erfüllt werden – unter 2 % liegen.

Der Zahlenwert von $L^{2D}$ liegt für die betrachteten Rahmenprofile bei ca. 0,50 W/(mK) und damit der absolute Fehler von $L^{2D}$ bei 0,01 W/(mK). Die restlichen Größen $U_g$ und $U_p$ sowie $l_g$ und $l_p$ können als fehlerfrei betrachtet werden.

Damit ergibt sich für den absoluten Fehler des Rahmen-U-Wertes bei einer Rahmenbreite von ca. 0,1 m

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

Dies entspricht bei einem Rahmen-U-Wert von 2 W/(m²K) einem relativen Fehler von 5 %.

Für den absoluten Fehler des Ψ-Wertes ergibt sich:

$$\Delta\Psi = 0{,}02 \text{ W/(mK)}.$$

Dies entspricht bei einem Ψ-Wert von 0,05 W/(mK) einem relativen Fehler von 40 %.

Die vorliegende Untersuchung vermeidet bei der Berechnung des Ψ-Wertes nach Gleichung (3) unabhängige Fehler bei der Ermittlung von Größen $L_\psi^{2D}$ und $L_f^{2D}$, d. h. Elementierung und Konvergenzgrenzen etc. sind in beiden Fällen weitgehend identisch. Somit ist davon auszugehen, daß systematische Fehleranteile weitgehend herausfallen.

$$\Psi = L_\Psi^{\ 2D} - L_f^{\ 2D} + l_p U_p - l_g U_g \qquad (3)$$

Es bleiben Fehleranteile durch Modellierung, Unterteilung und Konvergenz. Die Fehlergrenze wurde durch eine statistische Auswertung der Rechenergebnisse mit unterschiedlichen Bedingungen bestimmt.

Es ergibt sich für den Ψ-Wert ein deutlich geringerer Fehler von ca.

$$\Delta\Psi = 0{,}005 \text{ W/(mK)}$$

Der Fehler in der Bestimmung des Ψ-Wertes liegt in der vorliegenden Untersuchung somit in einem Bereich, welcher eine Differenzierung der unterschiedlichen Abstandhaltersysteme sicher zuläßt.

# 3 Ergebnis

## 3.1 Wärmeleitfähigkeit des Molekularsiebes

Die Wärmeleitfähigkeit eines heute in der Isolierglasfertigung üblichen Molekularsiebes wurde mit dem Zweiplattenverfahren nach DIN 52612-1 bei einer Mitteltemperatur von 10 °C ermittelt.

Molekularsieb Grace Typ 3A Korngröße 0,6 - 1,2 mm
Wärmeleitfähigkeit: 0,10 W/(mK).

## 3.2 Linearer Wärmedurchgangskoeffizient Ψ

In Tabelle 2 sind die Ψ-Werte für die untersuchten Randverbundsysteme zusammengefaßt. Die Hohlprofile wurden sowohl mit Molekularsiebfüllung als auch ungefüllt berechnet. Der Unterschied in den Ψ-Werten ist für die vorliegenden Systeme nicht signifikant und wurde daher nicht berücksichtigt.

**Tabelle 2** Linearer Wärmedurchgangskoeffizient (Ψ-Wert) in W/(mK) (gerundet auf zwei wertanzeigende Ziffern)

| Hersteller | Rahmen-material | Glasaufbau 4/16/4 | Glasaufbau 4/12/4/12/4 |
|---|---|---|---|
| Chemetall (TPS) | Holz | 0,041 | 0,041 |
| | PVC | 0,041 | 0,041 |
| | WGP*) | 0,053 | 0,048 |
| Erbslöh (CHROMATECH) | Holz | 0,050 | 0,051 |
| | PVC | 0,050 | 0,049 |
| | WGP | 0,070 | 0,065 |
| Flachglas (TIS) | Holz | 0,048 | 0,049 |
| | PVC | 0,048 | 0,046 |
| | WGP | 0,068 | 0,062 |
| Henkel-Teroson | Holz | 0,042 | 0,042 |
| | PVC | 0,042 | 0,042 |
| | WGP | 0,054 | 0,049 |
| VEGLA/GOBAIN (Swisspacer) **) | Holz | 0,043 | 0,043 |
| | PVC | 0,043 | 0,041 |
| | WGP | 0,060 | 0,055 |

**Tabelle 2 (Fortsetzung)** Linearer Wärmedurchgangskoeffizient (Ψ-Wert) in W/(mK) (gerundet auf zwei wertanzeigende Ziffern)

| Hersteller | Rahmen-material | Glasaufbau 4/16/4 | Glasaufbau 4/12/4/12/4 |
|---|---|---|---|
| THERMIX (Thermix) | Holz | 0,040 | 0,040 |
| | PVC | 0,040 | 0,039 |
| | WGP | 0,053 | 0,048 |
| konv. Alu-Abstandhalter | Holz | 0,068 | 0,074 |
| | PVC | 0,067 | 0,070 |
| | WGP | 0,108 | 0,111 |

*) Wärmegedämmte Metall-Kunststoff-Verbundprofile
**) Werte für Variante 2 im Anhang

## 3.3 Temperaturfaktor $f_{Rsi}$

In Tabelle 3 sind die nominierten Temperaturfaktoren ($f_{Rsi}$-Werte) für die untersuchten Randverbundsysteme zusammengefaßt. Sie wurden für einen Wärmeübergangswiderstand von 0,20 m²K/W entsprechend prEN 10077-2 ermittelt ($f_{0.20}$-Werte).

**Tabelle 3** Temperaturfaktor $f_{0.20}$ am Glasrand (gerundet auf zwei wertanzeigende Ziffern)

| Hersteller | Rahmen-material | Glasaufbau 4/16/4 | Glasaufbau 4/12/4/12/4 |
|---|---|---|---|
| Chemetall (TPS) | Holz | 0,61 | 0,69 |
| | PVC | 0,64 | 0,72 |
| | WGP*) | 0,66 | 0,74 |
| Erbslöh (CHROMATECH) | Holz | 0,58 | 0,66 |
| | PVC | 0,62 | 0,69 |
| | WGP | 0,63 | 0,72 |
| Flachglas (TIS) | Holz | 0,58 | 0,67 |
| | PVC | 0,62 | 0,70 |
| | WGP | 0,63 | 0,72 |
| Henkel-Teroson | Holz | 0,60 | 0,69 |
| | PVC | 0,64 | 0,71 |
| | WGP | 0,65 | 0,74 |

**Tabelle 3 Fortsetzung** Temperaturfaktor $f_{0.20}$ am Glasrand (gerundet auf zwei wertanzeigende Ziffern)

| Hersteller | Rahmen-material | Glasaufbau 4/16/4 | Glasaufbau 4/12/4/12/4 |
|---|---|---|---|
| VEGLA/GOBAIN (Swisspacer) **) | Holz | 0,60 | 0,69 |
| | PVC | 0,64 | 0,71 |
| | WGP | 0,65 | 0,74 |
| THERMIX (Thermix) | Holz | 0,61 | 0,70 |
| | PVC | 0,65 | 0,72 |
| | WGP | 0,66 | 0,74 |
| konv. Alu-Abstandhalter | Holz | 0,51 | 0,59 |
| | PVC | 0,56 | 0,62 |
| | WGP | 0,55 | 0,65 |

*) Wärmegedämmte Metall-Kunststoff-Verbundprofile
**) Werte für Variante 2 im Anhang

## 3.4 Beurteilung

Thermisch verbesserte Isolierglas-Randverbund-Systeme wirken sich sowohl auf den linearen Wärmedurchgangskoeffizienten $\Psi$, d. h. letztlich auf den Wärmedurchgangskoeffizienten $U_f$ des Fensters, als auch auf die Oberflächentemperatur am Glasrand, beschrieben durch die Kenngröße $f_{Rsi}$, günstig aus.

Das Diagramm in Bild 1 zeigt die berechneten $\Psi$-Werte im Überblick. Die Rahmenmaterialien sind mit H (Holz), K (Kunststoff) und A (Aluminium), die Verglasung mit 2 (Zweischeiben-Isolierglas) bzw. 3 (Dreischeiben-Isolierglas) bezeichnet.

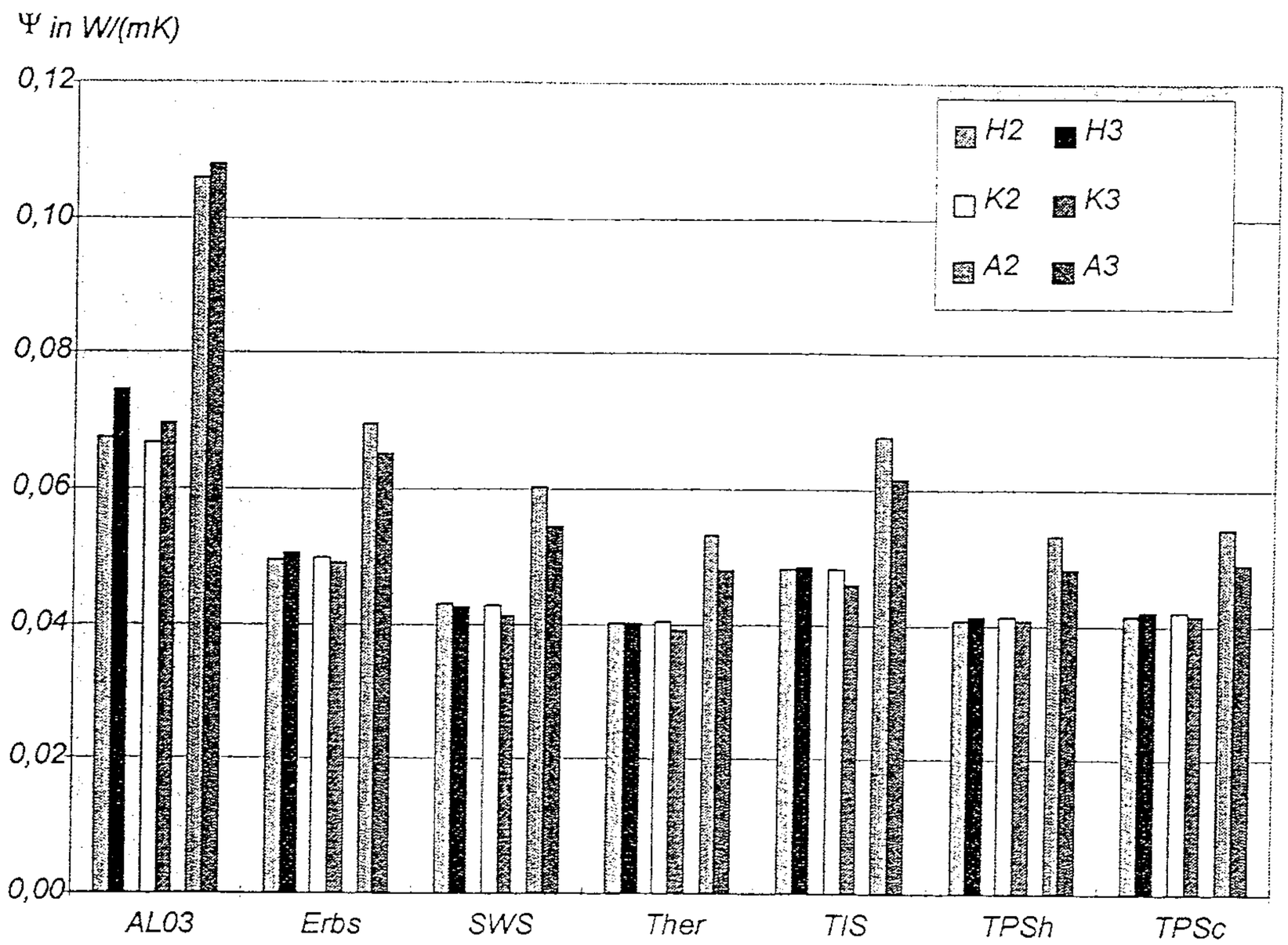



**Bild 1** Linearer Wärmedurchgangskoeffizient für die untersuchten Randverbundsysteme

Es zeigt sich, daß:

1. Der Unterschied zwischen Zwei- und Dreifachverglasung bei Holz und Kunststoff nicht signifikant ist und auch bei Aluminium keine Unterscheidung rechtfertigt.
2. Der Unterschied zwischen Holz und Kunststoff nicht signifikant ist, während der Unterschied zum Aluminium je nach System ca. 0,01 bis 0,02 W/(mK) beträgt.

Damit sind für jedes Abstandhaltersystem zwei Kennwerte ausreichend.

- Ψ-Werte für Profile aus Holz und Kunststoff,
  Profile mit einer Wärmeleitfähigkeit nicht größer 2 W/(mK)

bzw.

- Ψ-Werte für Profile aus thermisch getrennten Aluminiumschalen,
  Profile mit einer Wärmeleitfähigkeit größer 2 W/(mK)

Diese Abgrenzung ergibt sich aus der hohen Wärme(quer-)leitfähigkeit der Metallschalen, so daß eine physikalische Abgrenzung analog DIN EN 6946 möglich ist.

Die Temperaturfaktoren hängen vom Profilmaterial und von der Verglasung ab. Generell sind die Werte bei Dreifachverglasung im Vergleich zu Zweifachverglasung um ca. 0,15 günstiger. Bei einem Vergleich der Materialien ist Aluminium am günstigsten, es folgt Kunststoff und Holz. Hier wirkt sich eine hohe Leitfähigkeit günstig aus.

Der Entwurf zur DIN 4108-2 sieht einen Grenzwert für Tauwasserfreiheit bzw. Freiheit von Schimmelpilzbildung von 0,70 vor. Obwohl es fraglich ist, ob dieser Wert auch für den Glasrand angewandt werden soll, kann er hier zur Orientierung dienen. Die Graphik in Bild 2 zeigt, daß dieser Wert nur von Dreifachverglasungen erreicht werden kann.

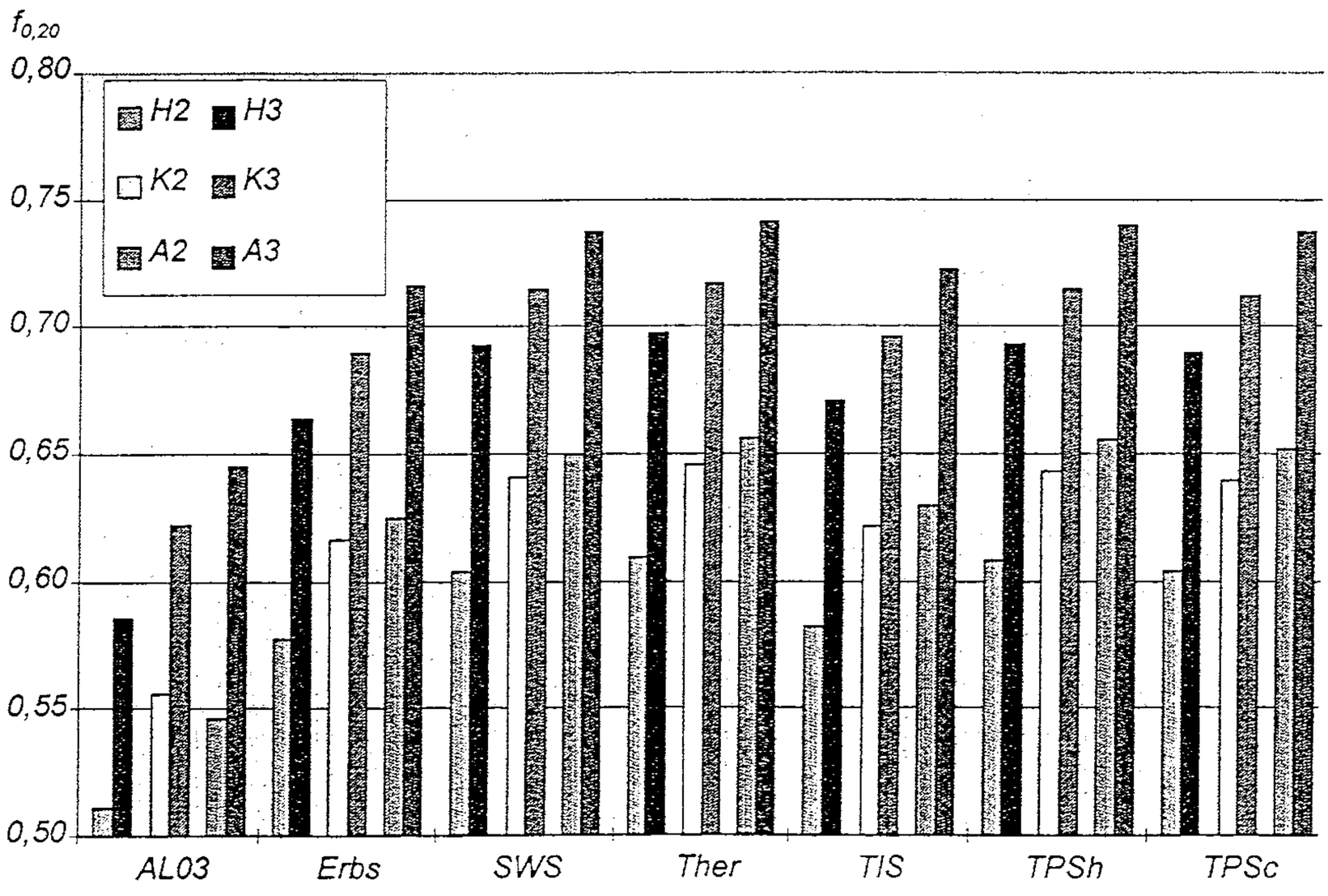



**Bild 2** Temperaturfaktor $f_{0.20}$ für die untersuchten Randverbundsysteme

Die energetische Verbesserung kann auch in Form eines $\Delta\Psi$-Wertes in Bezug auf ein Standard-Randverbund-System mit Aluminium-Abstandhalter angegeben werden. Diese Werte liegen je nach System und Verglasung für Holz und PVC-Rahmen zwischen 0,02 W/(mK) und 0,04 W/(mK). Für Rahmen aus wärmegedämmtem Aluminium ergeben sich höhere Werte zwischen 0,04 W/(mK) und 0,07 W/(mK). Bei einem Fenster mit den Standardabmessungen von

1,23 × 1,48 m² ergibt sich bei einem Glasumfang von ca. 4,5 m eine Verbesserung des $U_w$-Wertes zwischen 0,1 W/(m²)K und 0,3 W/(m²K), Berechnungsmethode siehe Anhang 2.

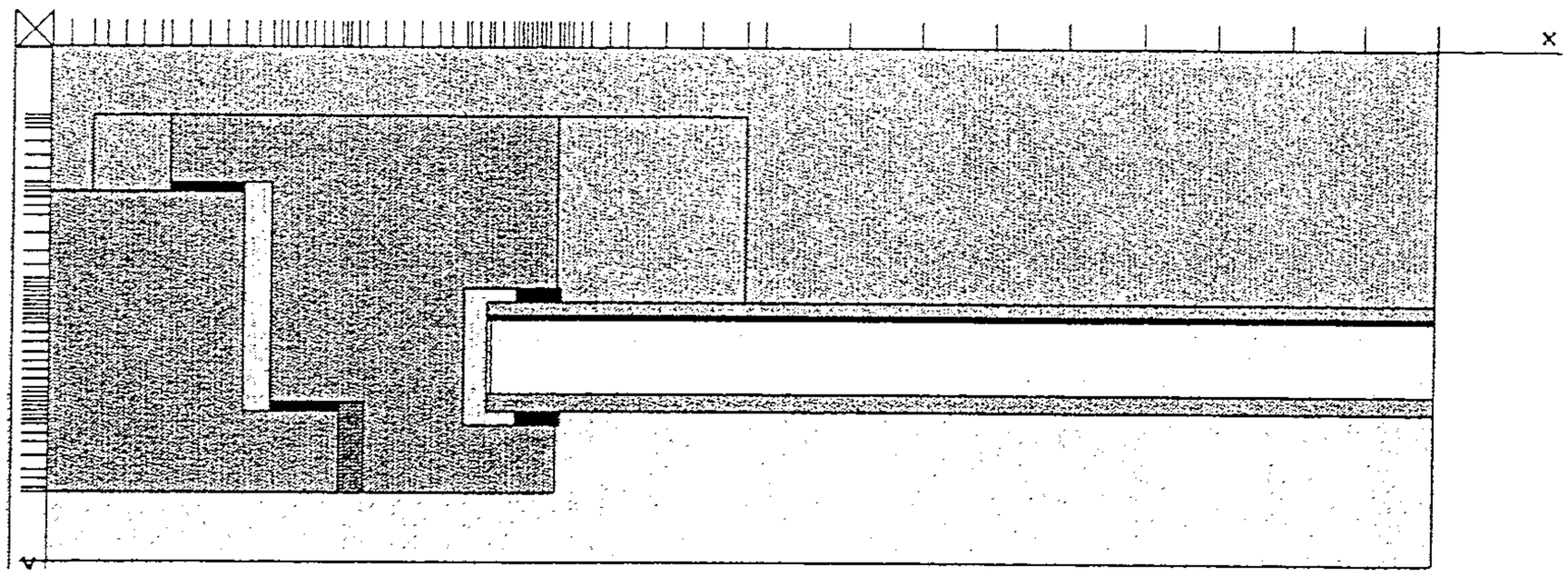
Auch die Erhöhung der Oberflächentemperatur und damit die Verringerung von Tauwasser kann relativ zum Standard-Randverbund-System angegeben werden. Je nach System liegen die $f_{Rsi}$-Werte um 0,06 bis 0,12 höher. Verglasung und Rahmenart haben auf die $\Delta f_{Rsi}$-Werte im Gegensatz zu den $\Delta\Psi$-Werten einen deutlich geringeren Einfluß. Es erscheint daher möglich, bei Verwendung der $\Delta f_{Rsi}$-Werte pro System nur einen Kennwert anzugeben.

## Anhang 1

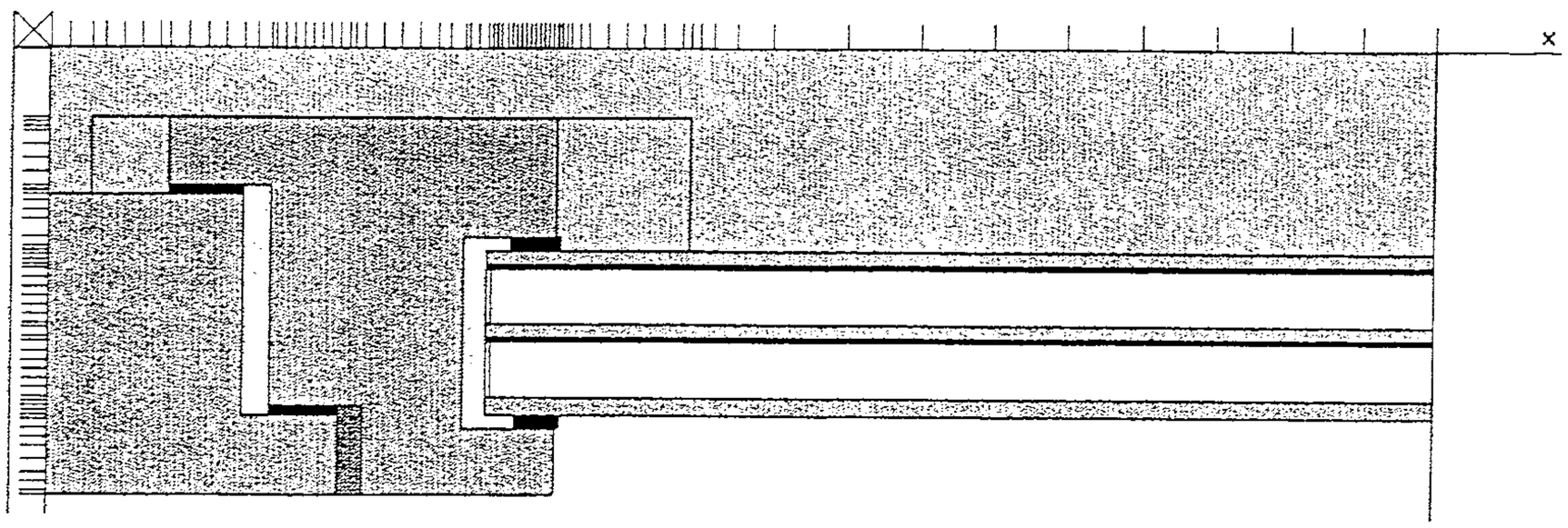
Die zugrundegelegten Rahmen entsprechen prEN 10077-2. Die Rahmen sind mit Glas aber ohne Abstandhalter dargestellt. Die Berechnung der Rahmen-k-Werte $U_f$ wurden mit einem Paneel mit Wärmeleitfähigkeit 0,015 W/(m²K) berechnet.

Der Aluminium-Rahmen wurde modifiziert mit dem Ziel $U_f$ = 2,0 W/(m²K). Hierzu wurde der Schalenabstand im Blendrahmen auf 35 mm und im Flügelrahmen auf 27 mm vergrößert, der Raum zwischen den Isolierstegen mit Dämmstoff 0,030 W/(mK) gefüllt sowie eine größere Dichtung eingesetzt.

Holzrahmen mit Zweifach-Isolierglas
$U_f$ = 1,35 W/(m²K)

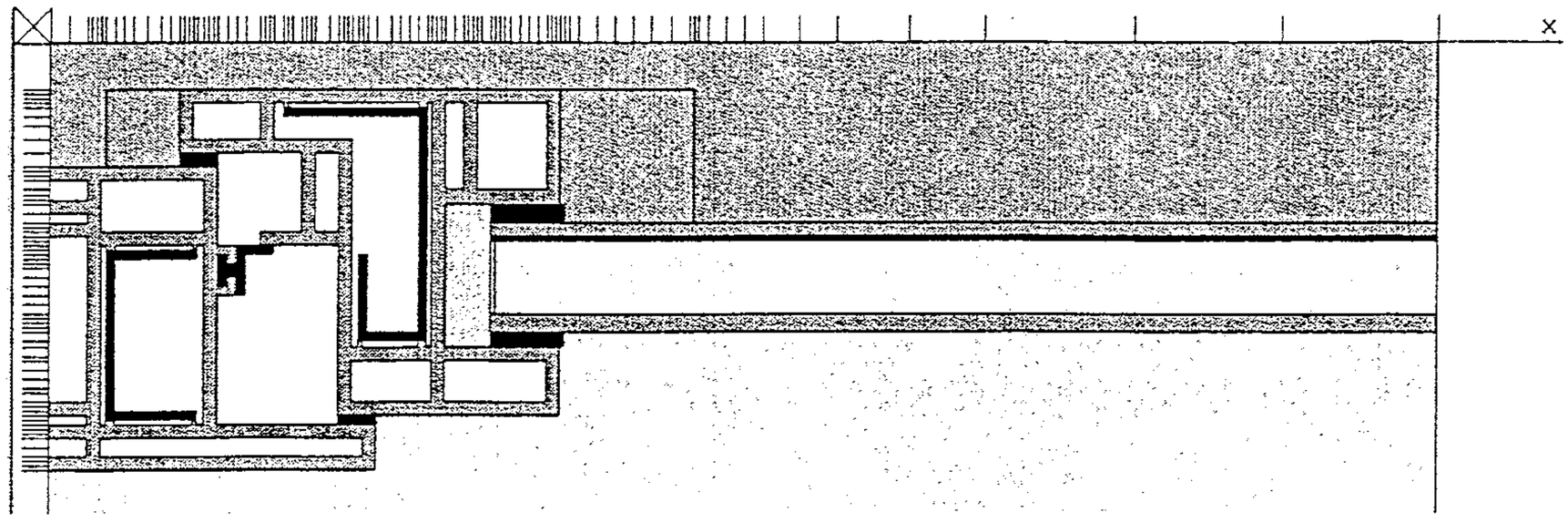



Holzrahmen mit Dreifach-Isolierglas
$U_f$ = 1,30 W/(m²K)

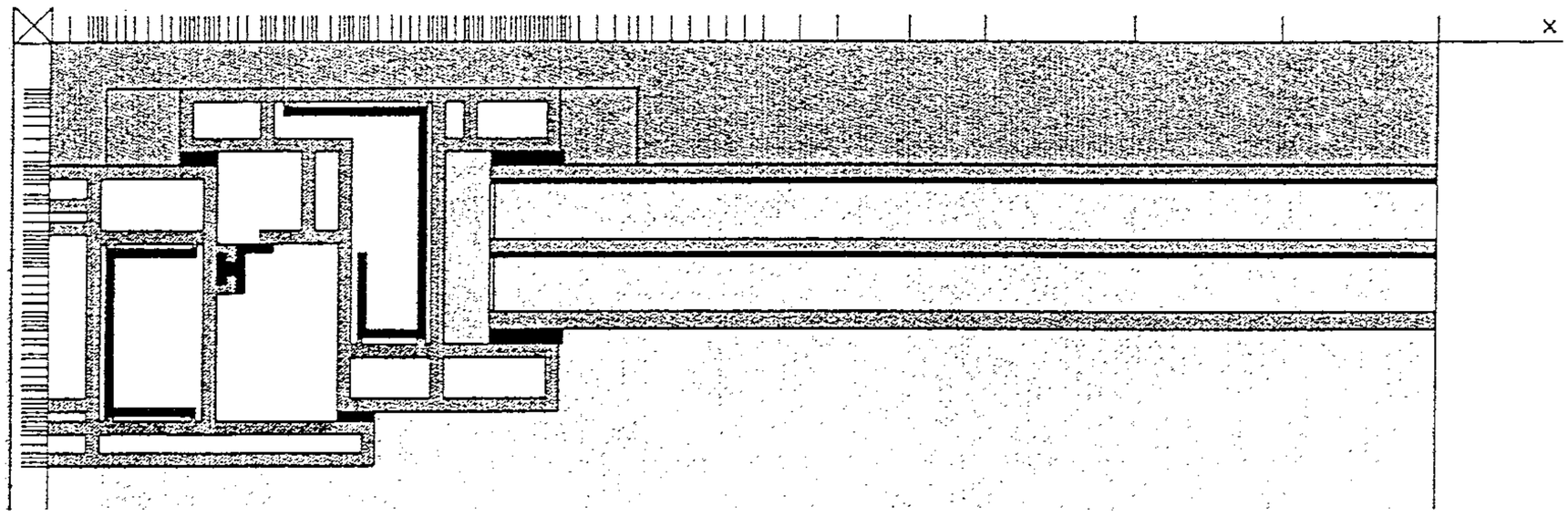


## Anhang 1

Kunststoffrahmen mit Zweifach-Isolierglas
$U_f$ = 1,92 W/(m²K)

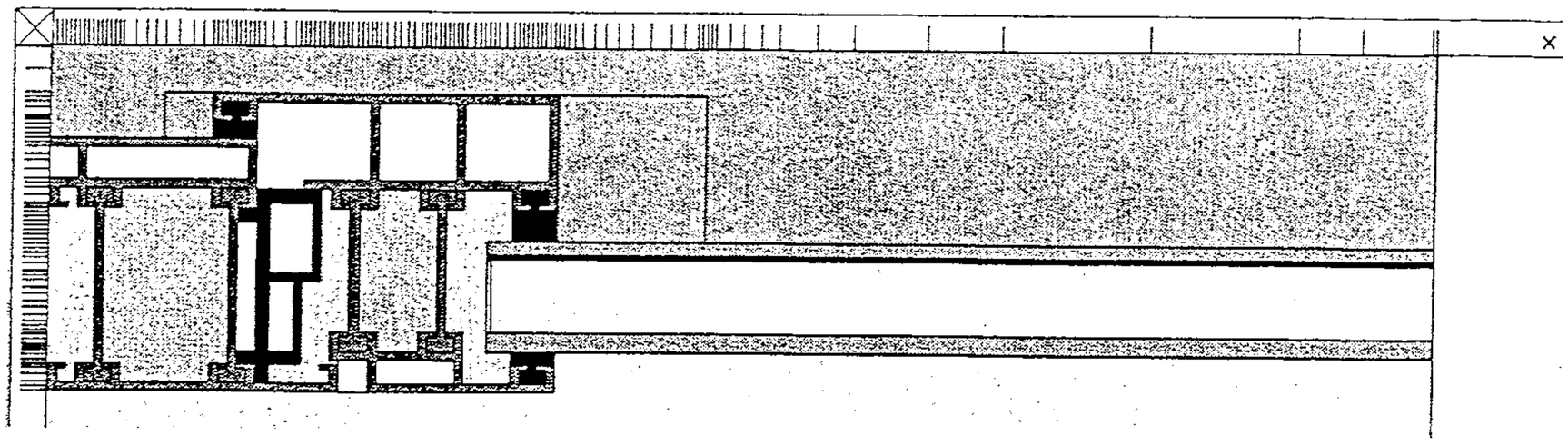



Kunststoffrahmen mit Dreifach-Isolierglas
$U_f$ = 1,90 W/(m²K)

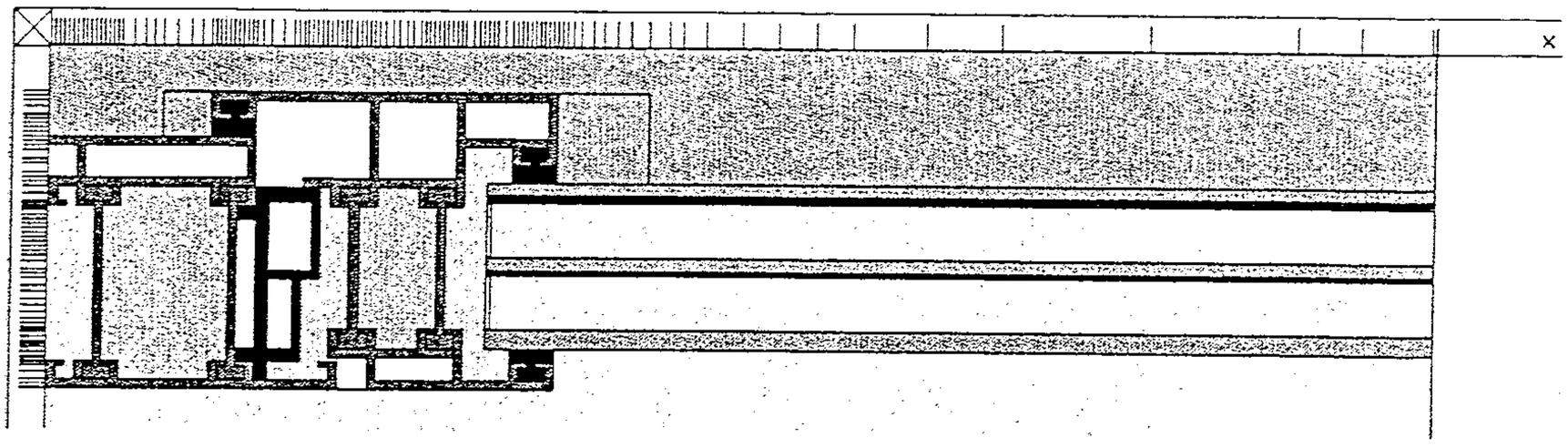


## Anhang 1

Aluminiumrahmen mit Zweifach-Isolierglas
$U_f$ = 2,05 W/(m²K)



Aluminiumrahmen mit Dreifach-Isolierglas
$U_f$ = 2,00 W/(m²K)



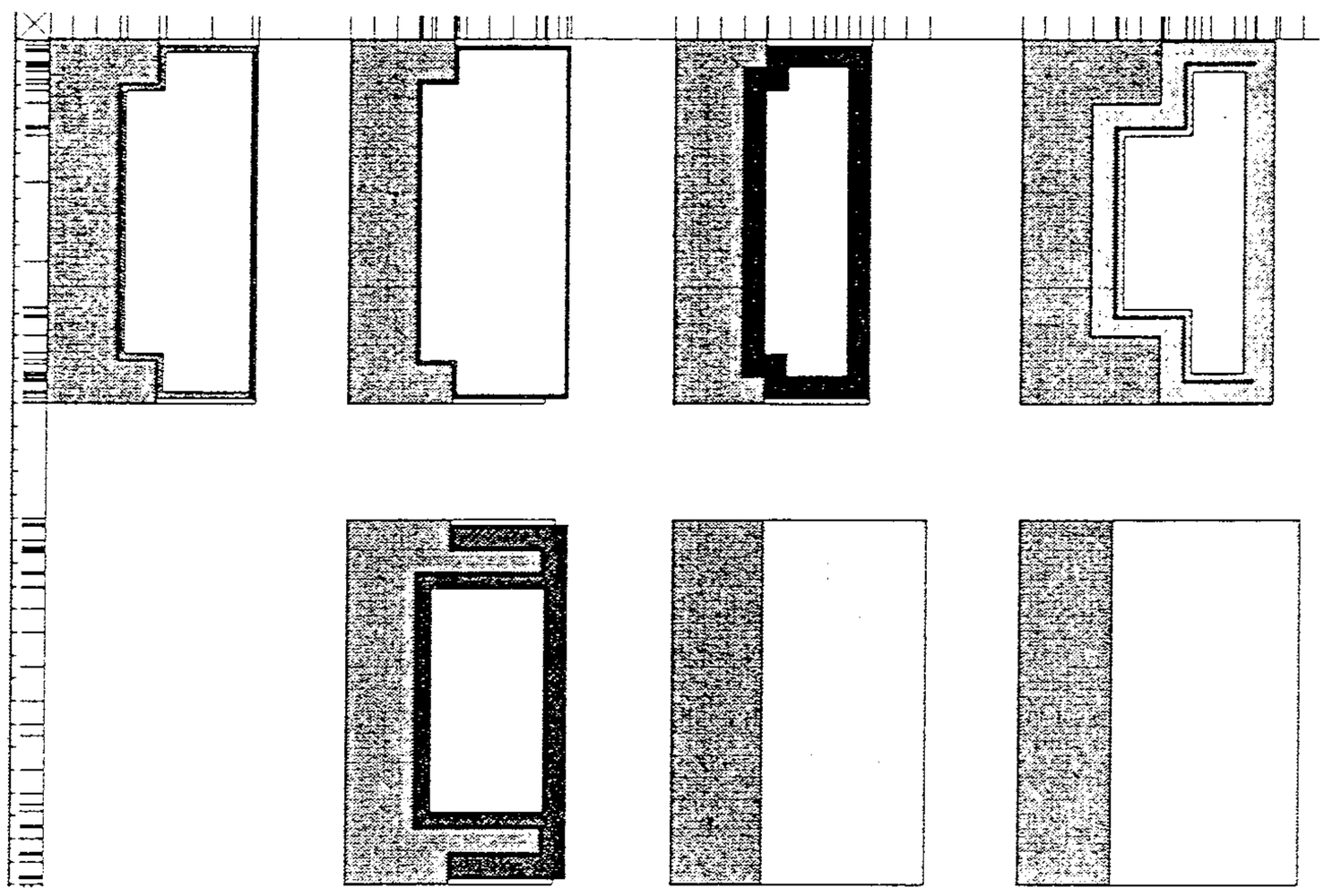
## Anhang 1

### Verglasung

Zweifach-Isolierglas 4/16/4 mit 90 % Argonfüllung, $\varepsilon_n$ = 0,04:
$U_g$ = 1,15 W/(m²K)
Dreifach-Isolierglas: 4/12/4/12/4 mit 90 % Argonfüllung, $\varepsilon_n$ = 0,04/0,04:
$U_g$ = 0,73 W/(m²K)

### Randverbundsysteme

*allgemeine Kennwerte:*
Polysulfid Rückenüberdeckung 3 mm (0,40 W/(mK))
Butyl 0,10 bis 0,25 mm (0,24 W/(mK))
Aluminium (200 W/(mK))
Edelstahl (15 W/(mK))



1. Zeile von links nach rechts
   A) Konventioneller Al-Abstandhalter
   B) Erbslöh — Edelstahl
   C) Swisspacer — Kunststoff 0,19 W/(mK); Al 30 µm
   D) Thermix — Kunststoff 0,19 W/(mK); Edelstahl 0,1 mm
2. Zeile von links nach rechts
   E) TIS — Kunststoff 0,15 W/(mK); Stahl 125 µm (50 W/(mK))
   F) TPS Chemetall — TPS-Butyl (0,28 W/(mK))
   G) TPS Henkel — TPS-Butyl (0,25 W/(mK))

Ergänzung zu Punkt 1.
zu A) Konventioneller Al-Abstandhalter 160 W/mK; 0,5 - 0,6 mm
zu B) Erbslöh Edelstahl 17 W/mK; 0,18 mm

## Anhang 2

Berechnungsverfahren

### Wärmedurchgangskoeffizient von Fenstern $U_W$

Grundlage:
DIN EN 10211-1 (1995-11) „Wärmebrücken"
prEN 10077-2 „**Wärmedurchgangskoeffizient** von Fenstern"

*Beispiel:*

| | |
|---|---|
| *Fenstergröße (Blendrahmenaußenmaß)* | *1,23 x 1,48 m²* |
| *Rahmenbreite* | *110 mm* |
| *sichtbare Glasfläche* | *1,01 x 1,26 m²* |

Der **Wärmedurchgangskoeffizient** (bisher k-Wert, zukünftig europäisch Symbol U) wird berechnet nach

$$U_w = \frac{A_f \cdot U_f + A_g \cdot U_g + l_{fg} \cdot \Psi_{fg}}{A_f + A_g}$$

dabei ist

| | | Beispiel |
|---|---|---|
| $U_W$ | Wärmedurchgangskoeffizient Fenster (Index Window) | |
| $U_g$ | Wärmedurchgangskoeffizient Glas | 1,3 W/(m²K) |
| $U_f$ | Wärmedurchgangskoeffizient Rahmen (Index Frame) | 2,0 W/(m²K) |
| $A_g$ | Fläche Glas | 1,27 m² |
| $A_f$ | Fläche Rahmen | 0,55 m² |
| $\psi_{fg}$ | linearer Wärmedurchgangskoeffizient Rahmen-Glas | 0,10 W/(mK) |
| $l_{fg}$ | Länge des Randes Rahmen-Glas | 4,54 m |

$$U_w = \frac{0{,}55\ m^2 \cdot 2{,}0\ W/(m^2K) + 1{,}27\ m^2 \cdot 1{,}3\ W/(m^2K) + 4{,}54\ m \cdot 0{,}10\ W/(mK)}{0{,}55\ m^2 + 1{,}27\ m^2} =$$

$$= \frac{1{,}65 + 1{,}10 + 0{,}45}{1{,}82} \frac{W}{m^2K} = 1{,}76 \frac{W}{m^2K}$$

zum Vergleich:
die Berechnung ohne Berücksichtigung des Glasrandes liefert:

$$U_w = \frac{0{,}55\ m^2 \cdot 2{,}0\ W/(m^2K) + 1{,}27\ m^2 \cdot 1{,}3\ W/(m^2K)}{0{,}55\ m^2 + 1{,}27\ m^2} =$$

$$= \frac{1{,}65 + 1{,}10}{1{,}82} \frac{W}{m^2K} = 1{,}51 \frac{W}{m^2K}$$

Die genauere Berechnung nach prEN 10077 liefert in diesem Fall einen um ca. 0,2 W/(m²K) höheren k-Wert für das Fenster.

## Anhang 2

### Temperaturfaktor $f_{Rsi}$

Der Temperaturfaktor erlaubt die Berechnung der niedrigsten Oberflächentemperatur des Bauteils bei gegebener Innen- und Außentemperatur und erlaubt damit eine Abschätzung des Tauwasserrisikos.

*Anmerkung*
Der Temperaturfaktor hängt nicht nur vom Bauteil, sondern auch vom angesetzten inneren Wärmeübergangskoeffizienten $R_{si}$ ab. Je größer $R_{si}$ angenommen wird, desto kleiner wird der Temperaturfaktor. In der vorliegenden Untersuchung wurde $R_{si}=0{,}20\ m^2K/W$ verwendet; demzufolge wird der Temperaturfaktor mit $R_{0,20}$ bezeichnet.

*Anwendung*

Es gilt

$$\vartheta_{Oi} = \vartheta_{La} + f_{Rsi} \cdot (\vartheta_{Li} - \vartheta_{La})$$

| | | Beispiel |
|---|---|---|
| $\vartheta_{Oi}$ | Temperatur der inneren Oberfläche in °C | |
| $\vartheta_{Li}$ | Temperatur der Luft im Innenraum in °C | +20 °C |
| $\vartheta_{La}$ | Temperatur der Luft außen in °C | -10 °C |
| $f_{0,20}$ | Temperaturfaktor bei $R_{si}$=0,20 m²K/W | 0,68 |

*Beispiel*

$$\vartheta_{Oi} = -10°C + 0.68 \cdot (+20°C - (-10°C)) = +10{,}4°C$$

## Anhang 3

Während des laufenden Forschungsvorhabens wurde ein modifiziertes System *Swisspacer* nachgeschoben. Dieses besitzt an Stelle der 30 µm Aluminiumfolie eine 25 µm dicke Folie aus Edelstahl.

Die Ergebnisse sind in den Tabellen 4 und 5 zusammengestellt.

**Tabelle 4** Linearer Wärmedurchgangskoeffizient (Ψ-Wert) in W/(mK) (gerundet auf zwei wertanzeigende Ziffern)

| | | | |
|---|---|---|---|
| VEGLA/GOBAIN (Swisspacer) | Holz | 0,032 | 0,031 |
| Variante 2 Edelstahl | PVC | 0,033 | 0,031 |
| | WGP | 0,040 | 0,036 |

**Tabelle 5** Temperaturfaktor $f_{0.20}$ am Glasrand (gerundet auf zwei wertanzeigende Ziffern)

| | | | |
|---|---|---|---|
| VEGLA/GOBAIN (Swisspacer) | Holz | 0,64 | 0,73 |
| Variante 2 Edelstahl | PVC | 0,67 | 0,74 |
| | WGP | 0,69 | 0,76 |

Institut für Fenstertechnik e.V.
Gewerbegebiet Ost I
Theodor-Gietl-Str. 7-9
83026 Rosenheim
Telefon +49 (8031) 261-0
Telefax +49 (8031) 261-290
e-mail: info@ift-rosenheim.de
http://www.ift-rosenheim.de

ROSENHEIM