



Bericht MAO3-WJP-0904-E05

Berechnung der optischen und thermischen Eigenschaften eines Fassadenpaneels „GAP Solarpaneel“

für:

gap-solution GmbH, Leonding,
Österreich

bearbeitet von:

Dr. Werner Platzer

8. April 2009

Anschrift:

Fraunhofer-Institut
für Solare Energiesysteme ISE
Abteilung Materialforschung und Angewandte Optik
Heidenhofstr. 2
D-79110 Freiburg

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-----|---|---|
| 1 | Beschreibung der Aufgabe..... | 3 |
| 2 | Beschreibung der Vorgehensweise..... | 4 |
| 2.1 | Wärmewiderstand..... | 4 |
| 2.2 | Gesamtenergiedurchlassgrad | 4 |
| 3 | Ergebnisse | 5 |
| 3.1 | Wärmedurchgangskoeffizient U | 5 |
| 3.2 | Gesamtenergiedurchlassgrad g | 6 |
| 4 | Zusammenfassung..... | 8 |
| 5 | Berechnung der solaren Energiegewinne nach DIN 18599 und Richtlinie des Fachverbandes TWD e.V..... | 9 |

Dieser Bericht umfasst 12 Seiten. Eine Veröffentlichung der Ergebnisse darf nicht unvollständig oder im sinnentstellenden Zusammenhang erfolgen.

Freiburg, den 8. April 2009

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme
- Abt. Materialforschung und Angewandte Optik -

Bearbeiter



Dr. W. Platzer

1 Beschreibung der Aufgabe

Für eine modifizierte Version eines von unserem Institut geprüften Fassadenpaneels (s. Prüfbericht MAO3-WJP-0509-E05) sollen die thermischen und optischen Kennwerte berechnet werden.

Bei der Prüfung wurden von der Firma gap solar GmbH, Perg, Österreich jeweils zwei Proben eines absorbierenden, nicht lichtdurchlässigen verglasten Fassadenpaneels („Produktname Solarpaneel“) der Größe 800mm x 800mm folgenden Aufbaus zur Verfügung gestellt.

Probenaufbau SOLARPANEEL (von außen nach innen):

| Dicke [mm] | Schicht |
|------------|-------------------------------------|
| 6 | Float ESG |
| 31 | SZR |
| 50 | Solarwabe „schwarz“ bzw. „hellgrau“ |
| 4 | MDF-Platte |
| 30 | Mineralwolle 040 |

Der neu zu berechnende Aufbau unterscheidet sich durch den Wegfall der innenseitigen Dämmung und die Dicke der Solarwabe:

Probenaufbau GAPMOD (von außen nach innen):

| Dicke [mm] | Schicht |
|------------|-------------------------------------|
| 6 | Float ESG |
| 29 | SZR |
| 30 | Solarwabe „schwarz“ bzw. „hellgrau“ |
| 19 | MDF-Platte |

Für diesen Aufbau sollen Wärmewiderstand R_B und die Gesamtenergiedurchlassgrade für senkrechten und hemisphärischen Strahlungseinfall $g_{n,B}$ und $g_{h,B}$ berechnet werden. Dies ist insbesondere für den g-Wert nur näherungsweise möglich.

2 Beschreibung der Vorgehensweise

2.1 Wärmewiderstand

Für den Wärmewiderstand wird eine schichtweise Berechnung nach DIN EN ISO 6946:1996 durchgeführt. Es werden Nennwerte bzw. Messwerte der Wärmeleitfähigkeit verwendet. Das Bauteil wird als belüftetes Bauteil berechnet, was den ungünstigsten Fall für den Wärmeschutz darstellt. Die Vermessung im Messbericht MAO3-WJP-0509-E05 ergibt einen besseren Wert, da die Belüftung durch das Lüftungsgitter behindert ist und sich daher sowohl bei der Messung als auch in der Realität sich ein höherer Wärmewiderstand einstellen kann.

2.2 Gesamtenergiedurchlassgrad

Bei dem Gesamtenergiedurchlassgrad wird davon ausgegangen, dass bei den eingefärbten Wabenstrukturen die solare Absorption innerhalb der ersten wenigen cm des Materials stattfindet. Die Umrechnung des durch die rückwärtige Dämmung modifizierten sekundären Wärmegevinns nach innen erfolgt auf Grund der unterschiedlichen Wärmewiderstände durch die geänderten Schichten bei nahezu gleicher Absorption (die unterschiedlichen Dicken des Floatglases. werden berücksichtigt). Um dieses Modell zu validieren, wird der Aufbau des vermessenen Solarpaneels ebenfalls auf diese Art berechnet, so dass die Eingabedaten (Absorptionsort und Absorptionsgrad) der Solarwabe damit kalibriert werden können. Erst nach erfolgter Kalibrierung wird der neue Aufbau berechnet.

3 Ergebnisse

3.1 Wärmedurchgangskoeffizient U

Im Messbericht MAO3-WJP-0509-E05 wurden für das Solarpaneel (Index SP) von 121mm Dicke die folgenden Werte bei 10°C ermittelt (schwache Belüftung!):

| | |
|--|---------------------------|
| Wärmedurchgangskoeffizient U_{SP} (10°C) | 0.55 W/(m ² K) |
| Wärmedurchlasswiderstand R_{SP} (10°C) | 1.65 (m ² K)/W |

Mit dem folgenden Aufbau konnte (für nicht belüfteten Luftzwischenraum LZR) der Messwert reproduziert werden:

| | | | |
|---------------|----|-------|-------|
| 1Glas | 6 | 0.9 | 0.007 |
| 2LZR | 31 | | 0.180 |
| 3Wabe | 50 | 0.080 | 0.625 |
| 4MDF-Platte | 4 | 0.090 | 0.044 |
| 5Mineralwolle | 30 | 0.040 | 0.750 |

Die folgenden Ergebnisse konnten damit innerhalb der Fehlergrenzen das Experiment reproduzieren:

Rechenwert des Wärmewiderstands für nicht belüfteten LZR:

$$R_{SP, \text{ nicht belüftet}} (10^\circ\text{C}) = 1.61 \text{ (m}^2\text{K)/W}$$

Der U-Wert für nicht belüfteten LZR ist damit:

$$U_{SP, \text{ nicht belüftet}} (10^\circ\text{C}) = 0.56 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

Eine starke Belüftung des Luftzwischenraums ergibt einen geringfügig größeren U-Wert:

$$U_{SP, \text{ belüftet}} (10^\circ\text{C}) = 0.60 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

Für den modifizierten Aufbau GAPMOD (Index GM) ergibt sich analog:

| | | | |
|-------------|----|------|-------|
| 1Glas | 6 | 0.9 | 0.007 |
| 2SZR | 29 | | 0.180 |
| 3Wabe | 30 | 0.08 | 0.375 |
| 4MDF-Platte | 19 | 0.09 | 0.211 |

Die folgenden Ergebnisse wurden damit erhalten:

Rechenwert des Wärmewiderstands für nicht belüfteten LZR:

$$R_{GM, \text{ nicht belüftet}} (10^{\circ}\text{C}) \quad 0.77 \text{ (m}^2\text{K)/W}$$

Der U-Wert für nicht belüfteten LZR ist damit:

$$U_{GM, \text{ nicht belüftet}} (10^{\circ}\text{C}) \quad 1.06 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

Eine starke Belüftung des Luftzwischenraums ergibt einen geringfügig größeren U-Wert:

$$U_{GM, \text{ belüftet}} (10^{\circ}\text{C}) \quad 1.18 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

3.2 Gesamtenergiedurchlassgrad g

Für die Berechnung des Gesamtenergiedurchlassgrades wurden die obigen wärmetechnischen Werte weiter benutzt. Darüber hinaus muss die solare Absorption in den einzelnen Schichten bestimmt werden. Dazu wurden folgende Werte für eine Standardfloatglas-Abdeckung benutzt, um die Messwerte zu reproduzieren:

| Glas | Einstrahlung | Transmission | Reflexion | Absorption |
|---------------|--------------|--------------|-----------|------------|
| Floatglas 6mm | normal | 0.84 | 0.07 | 0.08 |
| | diffus | 0.76 | 0.15 | 0.09 |

Bei der Solarwabe muss berücksichtigt werden, dass bei diffus-hemisphärischer Einstrahlung die Strahlung nicht so weit in die Wabe eindringt wie bei nahezu senkrechter direkter Einstrahlung. Deswegen wurde die Wabe in Schichten von 10mm Dicke aufgeteilt. Was nicht in einer äußeren Schicht absorbiert wird, wird entsprechend in die nächste Schicht weiter transmittiert. Es wird angenommen, dass die Absorption jeweils in der Mitte der Schicht erfolgt. In

Analogie zu der Berechnung des sekundären Wärmegewinns in DIN EN 410 wird der Wärmestromanteil auf Grund der Schichtabsorption berechnet, der auf Grund der Wärmewiderstände nach innen und nach außen geleitet wird. Die Summe über alle Schichten des nach innen fließenden Wärmestromanteils ergibt den sekundären Wärmegewinn. Es zeigt sich bei der Anpassung der optischen Parameter an das Experiment, dass Absorption vor allem in den äußeren 10-20mm stattfindet.

Es ergeben sich für „hellgrau“ und „schwarz“ jeweils für den Fall direkter (in der Messung Mittelwert über den Raumwinkel mit ca. 10° Öffnungshalbwinkel) und diffuser Einstrahlung verschiedene Schichttransmissions- und Schichtabsorptionsgrade, die das Messergebnis reproduzieren. Das Modell SOLARPANEEL wird so kalibriert.

Diese Werte werden in das Modell für GAPMOD eingesetzt, die resultierenden g-Wert sind wie folgt:

| Fall | Einstrahlung | schwarz | hellgrau |
|-------------|--------------|---------|----------|
| SOLARPANEEL | normal | 0.13 | 0.11 |
| | diffus | 0.08 | 0.06 |
| GAPMOD | normal | 0.23 | 0.20 |
| | diffus | 0.15 | 0.13 |

Diese Ergebnisse gelten für den belüfteten Fall eines vertikal hängenden Paneels, so wie die kalorimetrische Messung des g-Wertes auch experimentell durchgeführt wurden (Äußerer Wind simuliert mit Walzenventilator, s. MAO3-WJP-0509-E05)

NB: Die berechneten g-Werte sind insbesondere für senkrechten Einfall mit hoher Unsicherheit versehen, da hier die genaue Messanordnung entscheidend ist und welcher Anteil des direkt einfallenden Lichtes durch die Waben durchtritt (30mm Wabe hat größeren Akzeptanzbereich als die 50mm Wabe). Ebenso hat die MDF-Platte als raumseitige Dämmschicht im Vergleich zum Solarpaneel einen geringen Wärmewiderstand; daher sind größere Abweichungen von der Realität bei der Modellrechnung zu erwarten).

4 Zusammenfassung

Mit Hilfe eines einfachen Widerstandmodells können experimentelle Ergebnisse auf den Fall eines modifizierten Paneels umgerechnet werden. Die berechneten g-Werte sind als geschätzte Richtwerte zu verstehen, die mit einer Messung genauer bestimmt werden können. Im Folgenden werden die Ergebnisse mit stark belüftetem Luftspalt angegeben:

Es ergeben sich folgende Bauteilkennwerte und Festlegungen:

| | |
|------------------|---|
| Bauteil: | GAP modifiziert schwarz |
| Dicke: | 84 mm |
| Bauteilkennwerte | $g_{n,B} = 0.23$ |
| | $g_{h,B} = 0.15$ |
| | $U_B = 1.18 \text{ W/m}^2\text{K}$ (belüftet) |
| | $R_B = 0.77 \text{ m}^2\text{K/W}$ (nicht belüftet) |

Damit ergeben sich folgende Bauteilkennwerte und Festlegungen:

| | |
|------------------|---|
| Bauteil: | GAP modifiziert hellgrau |
| Dicke: | 84 mm |
| Bauteilkennwerte | $g_{n,B} = 0.20$ |
| | $g_{h,B} = 0.13$ |
| | $U_B = 1.18 \text{ W/m}^2\text{K}$ (belüftet) |
| | $R_B = 0.77 \text{ m}^2\text{K/W}$ (nicht belüftet) |

NB: Der U_B -Wert enthält der Wärmeübergangswiderstand nach innen und ebenso den nach außen für einen belüfteten Luftspalt nach DIN EN ISO 6946.

Der Wärmewiderstand R_B (von Bauteil Innenoberfläche bis zur Außenoberfläche) macht streng genommen nur Sinn für den nicht belüfteten Luftspalt.

5 Berechnung der solaren Energiegewinne nach DIN 18599 und Richtlinie des Fachverbandes TWD e.V.

Mit den oben ermittelten Bauteilkennwerten wird das Excel-Tool fvtwd-enev-fenster-v2.xls des Fachverbandes TWD ausgefüllt. Es wird der Fall 2 gerechnet (Absorber im Bauteil integriert).

Als Wandaufbau hinter dem GAP Fassadenpaneel wird folgende Schichtfolge beispielhaft angenommen:

- 15mm MDF-Platte
- 120 mm Wärmedämmung 040
- 19 mm OSB-Platte
- 60 mm Wärmedämmung mit Vertikalpfosten Holz 13.3%
- 30mm Ausgleichsdämmung 040
- 300mm Hochlochziegel 1600 kg/m³
- 15mm Innenputz

Die Rahmen des Gap-Paneeles und die daraus resultierenden Wärmebrücken werden in dieser Darstellung nicht gerechnet.

Damit ergibt sich für den U-Wert des Gesamtaufbaus im Zentralbereich 0.15 W/(m²K). Der Wärmewiderstand der Wandbauteile hinter dem Fassadenpaneel liegt bei 5.94 m²K/W.

Damit ergeben sich Gesamtenergiedurchlassgrade für den gesamten Wandaufbau $g_{S,op,TI}$ von 0.026 (senkrechter Strahlungseinfall) sowie 0.017 (diffus-hemisphärischer Strahlungseinfall) aus der Formel (schwarze Wabe):

$$g_{S,op,TI} = R_e \cdot U \cdot g_{TI} \cdot \alpha$$

mit g_{TI} gleich $g_{n,B}$ bzw. $g_{h,B}$.

nach DIN V 18599 Teil 2:

$$Q_{S,op,TI} = R_e U A F_F F_S F_w g_{TI} \alpha I_S t \quad (113)$$

Dabei ist

R_e der äußere Wärmedurchlasswiderstand des Bauteils (gerechnet von der absorbierenden Schicht nach außen; Wärmedurchlasswiderstand der transparenten Wärmedämmung einschließlich des äußeren Übergangswiderstandes);

U der gesamte Wärmedurchgangskoeffizient des Bauteils;

A die Gesamtfläche des Bauteils mit transparenter Dämmung mit einer Orientierung;

F_S der Abminderungsfaktor für bauliche Verschattung nach 6.4.1;

F_F der Rahmenanteil des Bauteils;

F_w der Abminderungsfaktor infolge nicht senkrechten Strahlungseinfalls, F_w = 0,9 (falls der nicht senkrechte Einfall der Strahlung in g_{TI} bereits berücksichtigt ist, ist hier F_w = 1 zu setzen);

g_{TI} der Gesamtenergiedurchlassgrad der transparenten Wärmedämmung nach Prüfzeugnis.

α der Absorptionskoeffizient der transparenten Wärmedämmung (falls die Absorption im g_{TI}-Wert berücksichtigt ist, ist hier α = 1 zu setzen);

I_S die globale Sonneneinstrahlung der Orientierung nach DIN V 18599-10;

t die Dauer des Berechnungszeitraums (t = 24 h).

ANMERKUNG Zur genaueren Ermittlung der monatlichen Solarwärmeeinträge von transparenten Wärmedämmsystemen, siehe [3]. Bei speziellen

transparenten Wärmedämmsystemen (z. B. mit integrierten Verschattungseinrichtungen) können monatliche g_{Tl} -Werte über die Vermessungen des winkelabhängigen g -Wertes und einer Ermittlung der effektiven Monatswerte über stündliche Simulationen analog zu 6.4.1 bestimmt werden.

In der folgenden Rechnung wurde gesetzt:

$$\alpha = 1$$

$$F_w = 1$$

$$F_s = 1$$

$$F_F = 0.92$$

$$U = 0.145 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

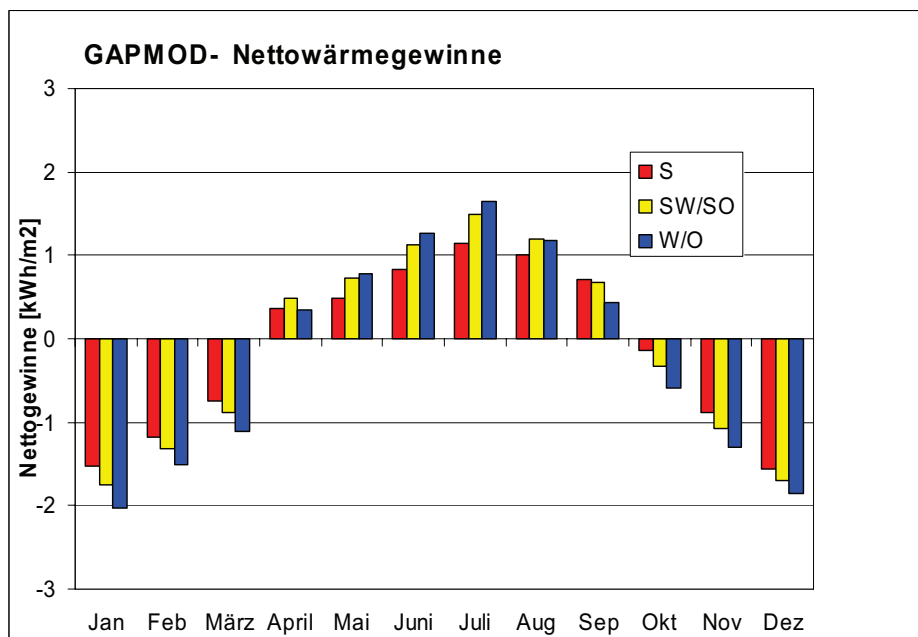
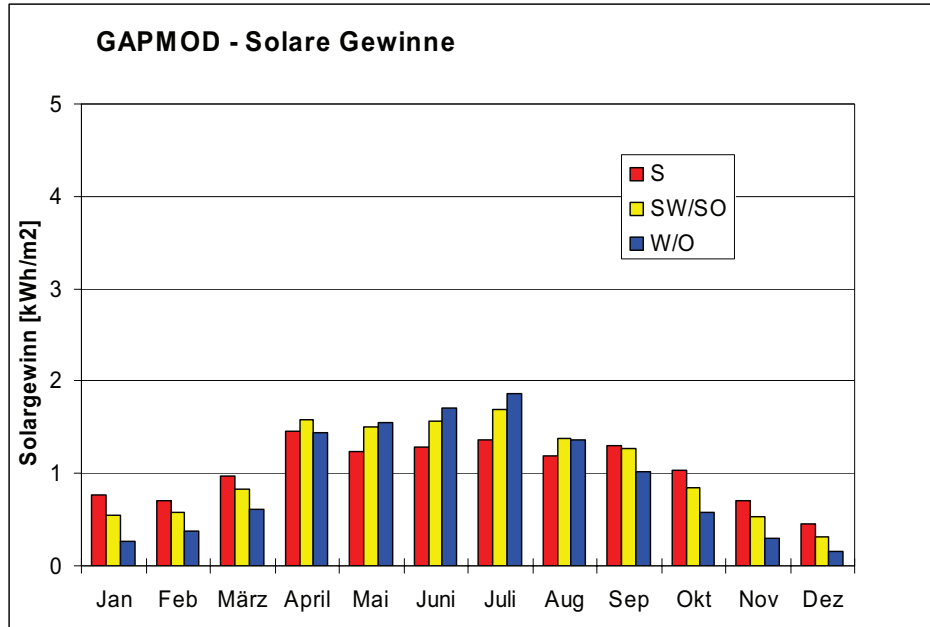
$$R_e = 0.72 \text{ m}^2\text{K/W (= 0.59 m}^2\text{K/W + 0.13 m}^2\text{K/W, belüfteter Fall)}$$

Will man monatliche solare Energiegewinne ermitteln, so kann man die resultierenden äquivalenten g -Werte als konstant wie bei einem Fenster annehmen. Dann wird der äquivalente diffus-hemisphärische g -Wert durch $F_w=0.9$ geteilt (da in der Berechnungsnorm wieder mit $F_w=0.9$ multipliziert).

$$g_{S,op,Tl} = g_{h,B} / 0.9 = 0.019$$

Als zweite, genauere Möglichkeit lassen sich nach der Richtlinie des Fachverbandes TWD e.V. von 2000 ¹ die monatlichen effektiven g -Werte $g_{S,op,Tl}$ ermitteln. Die Ergebnisse für mittleres deutsche Klima sowie die Nettogewinne (nach Abzug der Wärmeverluste) sind in den folgenden Grafiken zu erkennen:

¹ Bestimmung des solaren Energiegewinns durch Massivwände mit transparenter Wärmedämmung, Richtlinie des Fachverbandes Transparente Wärmedämmung e. V., Gundelfingen i. Br. (2000)



BEILAGEN



Fraunhofer Institut
Solare Energiesysteme

Bericht MAO3-WJP-0509-E05

Bestimmung der optischen und thermischen Eigenschaften von zwei Fassadenpaneels „Solarpaneel“

für:

gap-solar GmbH, Perg,
Österreich

bearbeitet von:

Dr. Werner Platzer

30. September 2005

Anschrift:

Fraunhofer-Institut
für Solare Energiesysteme ISE
Abteilung Materialforschung und Angewandte Optik
Heidenhofstr. 2
D-79110 Freiburg

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-----|--|----|
| 1 | Beschreibung der Proben | 3 |
| 2 | Beschreibung der Messungen | 3 |
| 2.1 | Messung des Wärmedurchlasswiderstandes | 3 |
| 2.2 | Messung des Gesamtenergiedurchlassgrades | 4 |
| 3 | Ergebnisse | 8 |
| 3.1 | Wärmedurchgangskoeffizient U | 8 |
| 3.2 | Gesamtenergiedurchlassgrad g | 9 |
| 4 | Berechnung der Bauteilkennwerte | 14 |
| 5 | Zusammenfassung | 16 |

Dieser Bericht umfasst 16 Seiten. Eine Veröffentlichung der Ergebnisse darf nicht unvollständig oder im sinnentstellenden Zusammenhang erfolgen.

Freiburg, den 30. September 2005

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme
- Abt. Materialforschung und Angewandte Optik -

Bearbeiter

Abteilungsleiter

Dr. W. Platzer

Dr. A. Gombert

1 Beschreibung der Proben

Für die Prüfung wurden von der Firma gap solar GmbH, Perg, Österreich jeweils zwei Stück identischer Proben eines absorbierenden, nicht lichtdurchlässigen verglasten Fassadenpaneels („Produktname Solarpaneel“) der Größe 800mm x 800mm zur Verfügung gestellt.

Proben

| ISE Kennung | Dicke [mm] |
|-------------|------------|
| WA158003 | 121 |

Probenaufbau (von außen nach innen):

| Dicke [mm] | Schicht |
|------------|---------------------|
| 6 | Float ESG |
| 31 | SZR |
| 50 | Solarwabe „schwarz“ |
| 34 | Ausgleichsdämmung |

| ISE Kennung | Dicke [mm] |
|-------------|------------|
| WA158004 | 121 |

Probenaufbau (von außen nach innen):

| Dicke [mm] | Schicht |
|------------|----------------------|
| 6 | Float ESG |
| 31 | SZR |
| 50 | Solarwabe „hellgrau“ |
| 34 | Ausgleichsdämmung |

2 Beschreibung der Messungen

2.1 Messung des Wärmedurchlasswiderstandes

Der Wärmedurchlasskoeffizient $\Lambda=R^{-1}$ (inverser Wärmewiderstand) wurde bei den Mitteltemperaturen T_M gleich 10 °C, 20 °C und 30 mit einer Platten-Apparatur nach ISO 8301 und DIN 52612 bestimmt. Dazu werden

normalerweise zwei identische Proben benötigt, die in symmetrischer Anordnung zwischen elektrischer Heizplatte und den zwei Kühlplatten eingebracht werden. Die Messung in dieser Anordnung konnte nicht durchgeführt werden, da die maximale Probenstärke hierfür 100mm ist. Eine asymmetrische Anordnung mit demselben Gerät und bekannter Referenzprobe wurde stattdessen durchgeführt. Der Wärmedurchlasswiderstand $R=1/\Lambda_V$ wird durch Extrapolation auf 10°C ermittelt. Der Wärmedurchgangskoeffizient oder U-Wert U wird aus Λ entsprechend DIN 4108 Teil 4 Tabelle 5 berechnet, wobei der innere Wärmeübergangswiderstand $1/\alpha_i=0.13 \text{ m}^2\text{K/W}$ und der äußere Wärmeübergangswiderstand $1/\alpha_a=0.04 \text{ m}^2\text{K/W}$ addiert werden.

2.2 Messung des Gesamtenergiedurchlassgrades

Der winkelabhängige Gesamtenergiedurchlassgrad g wurde in Abhängigkeit vom Einfallswinkel der Strahlung mit dem Solarkalorimeter des Fraunhofer ISE GKAL3 (Version 3) mit Sonnensimulator gemessen. Die Vermessung erfolgte nur für senkrechten Strahlungseinfall, eine Bestimmung des winkelabhängigen Gesamtenergiedurchlasses wurde nicht durchgeführt. Das Versuchselement wurde in einen den Absorber bedeckenden Dämmrahmen aus Polystyrol dicht eingebaut.

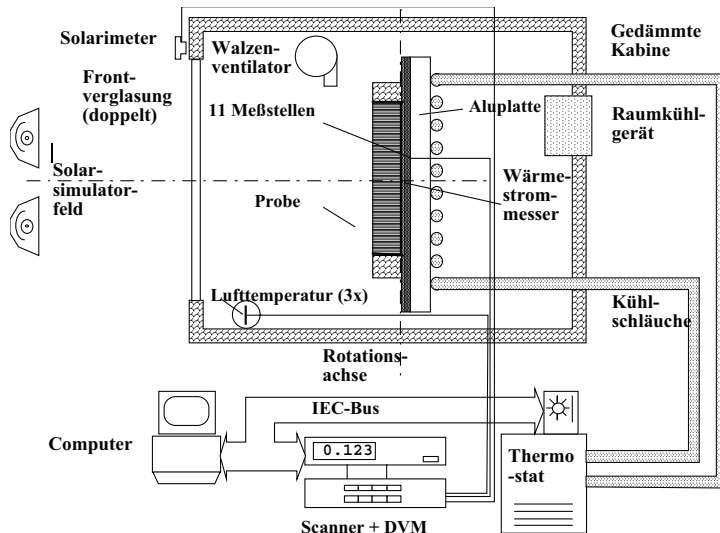


Abbildung 1: Schematischer Aufbau des Solarkalorimeters - Version GCAL3

Die Probe wurde mit einem Dämmrahmen (Styrodur) versehen, seitlich luftdicht mit aluminisiertem Klebeband abgeklebt, und vor die Absorberplatte des Solarkalorimeters (Absorptionsgrad 98%) gestellt. Die Probe wurde ohne Distanzabstand vor den Absorber gestellt. Der innere Wärmeübergangswiderstand von der innenseitigen Oberfläche zur Oberfläche der Wärmestrommessung ist daher vernachlässigbar klein.

Mit einem Querstromlüfter wurden äußere Windbedingungen simuliert, indem dieser Aufbau mit einer Luftgeschwindigkeit von 3-4 m/s angeströmt wurde. Dies entspricht einem äußeren Wärmeübergangskoeffizienten von $\alpha_a = 23 \pm 3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Die Bestrahlungsstärke auf der Probenoberfläche beträgt in der Mitte der Probe während der Messung rund $290\text{-}560 \text{ W}/\text{m}^2$, je nach Einfallswinkel. Dies wird durch eine Bestrahlung mit 4 quadratisch angeordneten Simulatoreinheiten der Brenner erreicht. Die Lufttemperatur der Messkabine und die Oberflächentemperatur des Absorbers lag während der Messung bei einer Mitteltemperatur von etwa $27\text{-}28^\circ\text{C}$.

Die Bestimmung des experimentellen Gesamtenergiedurchlassgrades g_{exp} erfolgt mit Hilfe der folgenden Gleichung:

$$q_{net} = U_{exp} \cdot (T_o - T_u) - g_{exp} \cdot E \quad (1)$$

| | | |
|------------------|---|---|
| E | = | mittlere Bestrahlungsstärke für die Probe [W/m ²] |
| T _o | = | Oberflächentemperatur der Kalorimeterplatte [°C] |
| T _u | = | Umgebungstemperatur [°C] |
| U _{exp} | = | Wärmedurchgangskoeffizient [W/(m ² K)] |

Mit Hilfe dieser Gleichung, den gemessenen Größen T_o, T_u, E und q_{net} lässt sich bei bekanntem U_{exp} der Gesamtenergiedurchlassgrad g_{exp} ermitteln. Die Auswertung dieser Größen erfolgt im stationären Zustand (Auswertung nach Erreichen der Stationarität über minütliche Werte innerhalb einer Stunde).

Der Wärmedurchgangskoeffizient U_{exp} für die Probe, der zur Bestimmung des g_{exp}-Wertes aus obiger Gleichung benötigt wird, wird ebenfalls mit dem Kalorimeter, allerdings ohne Bestrahlung gemessen (Dunkelwert). Dazu werden die Lufttemperatur der Messkabine und die Plattentemperatur des Kalorimeters so geregelt, dass die Mitteltemperatur der Dunkelmessung in etwa beim Temperaturwert der Messung unter Bestrahlung liegt. Die Differenz zwischen Kalorimeteroberfläche und Umgebungstemperatur beträgt dabei 20K.

Die konvektiven äußeren Wärmeübergangskoeffizienten sind in einem Versuch ohne Probe an der Kalorimeteroberfläche messtechnisch ermittelt worden. Der Ventilatorabstand von Kalorimeteroberfläche bzw. Probenoberfläche wird durch Verstellen des Ventilators konstant gehalten. Die gemessenen konvektiven Übergangskoeffizienten können daher für die Vermessung der Probe verwendet werden.

Der gesamte Wärmestrom innerhalb der Probe unter Bestrahlung setzt sich aus dem transmittierten Anteil der einfallenden Bestrahlung und einem Wärmestrom auf Grund des durch die solare Absorption induzierten Temperaturgradienten zusammen. Da diese Proben nicht lichtdurchlässig sind, liegt bei diesen Proben der transmittierte Anteil bei Null.

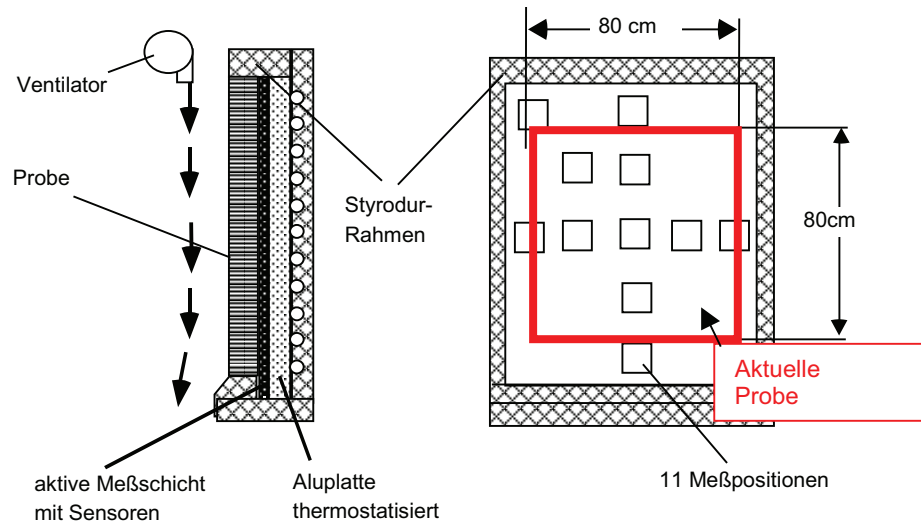
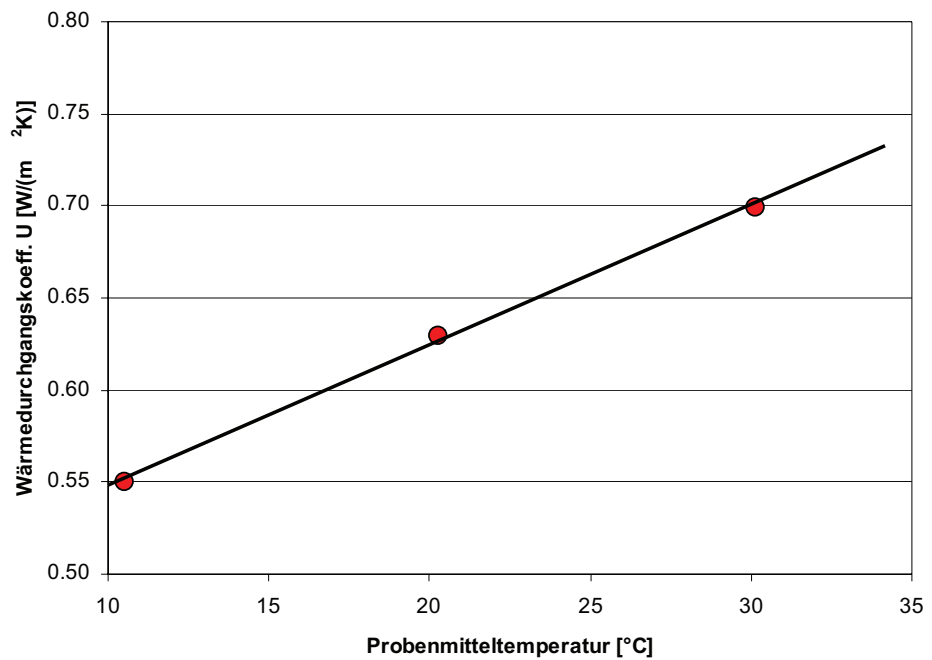


Abbildung 2: Prinzip-Anordnung von Proben vor der Sensorebene und der Sensoren in der Fläche (Auswertung mehrere Positionen)

3 Ergebnisse

3.1 Wärmedurchgangskoeffizient U

Abbildung 3
Temperaturabhängiger U-Wert



Die temperaturabhängige Messung der Wärmeleitfähigkeit des luftgefüllten Absorberpaneels mit dem Plattengerät nach DIN 52612, ISO 8302 bzw. DIN EN 674 ergab folgendes Ergebnis:

| Nr | Wärmestrom Q [W] | T_warm [°C] | T_kalt [°C] | ΔT [K] | T_mittel [°C] | Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)] |
|----|------------------|-------------|-------------|----------------|---------------|---------------------------------------|
| 1 | 1.58 | 15.70 | 5.28 | 10.42 | 10.49 | 0.074 |
| 2 | 1.81 | 25.38 | 15.10 | 10.28 | 20.24 | 0.086 |
| 3 | 2.00 | 35.17 | 25.08 | 10.09 | 30.13 | 0.097 |

Damit wurden die folgenden Werte bei 10°C ermittelt (Bezugsdicke der Probe 122 mm):

| | |
|---|---------------------------|
| Wärmeleitfähigkeit (eff. Mittel) λ (10°C) | 0.074 W/(mK) |
| Wärmedurchgangskoeffizient U_g (10°C) | 0.55 W/(m ² K) |
| Wärmedurchlasswiderstand R (10°C) | 1.65 (m ² K)/W |

3.2 Gesamtenergiedurchlassgrad g

Die Auswertung der stationären und über 60 Minuten gemittelten direkten Messgrößen ergab folgende Messwerte:

Tabelle 1

Messwerte bei der g-Wert Messung für die Probe WA158003

| Einfallswinkel | q_{net} [W/m ²] | E [W/m ²] | T_e [°C] | T_i [°C] |
|----------------|---|--------------------------|---------------|---------------|
| 0 | 74.0 | 564.4 | 28.5 | 27.6 |
| 30 | 40.3 | 487.6 | 27.7 | 26.8 |
| 45 | 30.4 | 399.8 | 27.9 | 27.0 |
| 60 | 24.2 | 287.4 | 27.8 | 26.9 |

Diese Messwerte ergeben eine erste Abschätzung der Energietransmission, jedoch müssen Korrekturen zur Ermittlung des auf die Referenzbedingungen bezogenen g-Wertes berücksichtigt werden. Dies geschieht im Prinzip anhand des im Projekt ALTSET definierten Verfahrens. Auf Grund der speziellen Eigenschaften der Proben (lichtundurchlässig) ist die Korrektur hier trivial.

Als erstes wurde der Wärmedurchlasswiderstand R_{exp} der Probe unter experimentell auftretenden Randbedingungen (Probenmitteltemperatur

$T_m = (T_e + T_i)/2$) aus den Ergebnissen der Wärmedurchlasswiderstandsmessung errechnet. Der Widerstand lag bei Mitteltemperatur 28°C bei 1.27 m²K/W.

Es erfolgt in weiteren Schritten die Auswertung der Messung unter Bestrahlung. Dabei wird berücksichtigt, dass die Strahlung des Solarsimulatorfeldes mit dem Abstand vom Simulator abnimmt. Die genannte Bestrahlungsstärke bezieht sich auf die Oberfläche der Kartonwabe. Die sog. Referenzbestrahlungsstärke ist abhängig vom Probenotyp.

Bei einer Probe mit gerichteter Transmission ist die Referenzbestrahlung an der Oberfläche des Absorbers zu bestimmen, bei einer Probe mit lichtstreuenden Schichten an der lichtstreuenden Oberfläche. Wir haben es hier mit einer Probe mit Klarglas vor einer Wabenstruktur zu tun, wo die Absorption in der Mitte stattfindet. Die Bestrahlungsstärke an den Wabenöffnungen ist entscheidend für die Absorption. Daher wird die Referenzbestrahlung E_{ref} als der Wert der Bestrahlungsstärke auf der Wabenoberfläche festgelegt.

Tabelle 2

Messwerte bei der g-Wert Messung für die Probe WA158004

| Einfallswinkel | q_{net} [W/m ²] | E [W/m ²] | T_e [°C] | T_i [°C] |
|----------------|----------------------------------|--------------------------|---------------|---------------|
| 0 | 63.0 | 564.4 | 28.2 | 27.4 |
| 30 | 31.1 | 487.6 | 28.8 | 27.9 |
| 45 | 21.2 | 399.8 | 26.6 | 25.7 |
| 60 | 16.8 | 287.4 | 27.5 | 26.6 |

Tabelle 3

Referenzbedingungen für die Bestimmung des g-Wertes von Verglasungen (ALTSET)

| Eigenschaft | Referenzwert | Bemerkung |
|---------------------------------------|--|---|
| α_{abs} | 1 | idealer Absorber |
| E | 783 W/m ² | Bestrahlungsstärke in der Ebene senkrecht zur Einfallrichtung |
| $I_{\lambda\text{sim}}$ | I_{λ} (ISO 9845-1) | Referenzspektrum Globalstrahlung AM1.5 [ISO9845-1] |
| $T_{\text{s}} = T_{\text{a}}$ | | Luft- und Strahlungstemperaturen identisch |
| h_{i} [W/(m ² K)] | $h_{\text{e.c}} = 3.6$ $h_{\text{e.r}} = 4.4 \cdot \varepsilon_{\text{g}}/0.837$ | Innerer Normwärmeübergang (siehe EN 673; $h_{\text{i}} = 8$ W/(m ² K) für unbeschichtete Innenseite einer Verglasung) |
| h_{e} [W/(m ² K)] | $h_{\text{e.c}} = 18.6$ $h_{\text{e.r}} = 4.4 \cdot \varepsilon_{\text{g}}/0.837$ | Äußerer Normwärmeübergang (siehe EN 673) $h_{\text{e}} = 23$ W/(m ² K) für unbeschichtete Außenseite einer Verglasung) |
| T_{i} [°C] | 24 | Raumtemperatur |
| T_{e} [°C] | 24 | Außentemperatur |

Ebenso muss bei manchen Proben die Divergenz des Solarsimulatorfeldes insofern berücksichtigt werden, als dass jeweils bei einem bestimmten Einfallswinkel θ die Strahlungsintensität aus den Winkelbereichen $\theta \pm 10^\circ$ in der Mitte der Probe (Messposition) auftritt. Wir haben unsere Simulatoranordnung so gewählt, dass alle drei Strahler auf einer Linie liegen, und damit den Effekt minimiert.

In den Korrekturen sind folgende Eigenschaften mit einbezogen:

- Absorptionsgrad des Kalorimeters (hier nicht relevant)

- Empfindungstemperatur innen
- Empfindungstemperatur außen
- Wärmeübergang radiativ und konvektiv innen
- Wärmeübergang radiativ und konvektiv außen

Eine Korrektur auf Grund der spektralen Intensitätsverteilung des Solarsimulators und der spektralen Transmission der Verglasung wurde nicht durchgeführt, da der Simulator sehr gut das Normspektrum Global AM1.5 nach ISO 9845 abbildet, und aus bereits durchgeführte Untersuchungen bekannt ist, dass eine Korrektur bei einer Wärmeschutzverglasung (Basisprodukt) vernachlässigt werden kann.

Das Endergebnis ist der gewichtete mittlere g-Wert des Zentralbereichs der Verglasung.

Tabelle 4

g-Wert für die Probe WA158003 Solarpaneel „schwarz“

| Einfallswinkel [Grad] | E_{ref} [W/m ²] | g_{exp} [-] | g_B [-] | Δg_B [-] |
|--------------------------|----------------------------------|------------------|--------------|---------------------|
| 0 | 564 | 0.130 | 0.13 | 0.010 |
| 30 | 488 | 0.081 | 0.08 | 0.008 |
| 45 | 400 | 0.075 | 0.08 | 0.007 |
| 60 | 287 | 0.082 | 0.08 | 0.007 |

Tabelle 5 g-Wert für die Probe WA158004 Solarpaneel „hellgrau“

| Einfallswinkel [Grad] | E_{ref} [W/m ²] | g_{exp} [-] | g_{B} [-] | Δg_{B} [-] |
|--------------------------|---|-------------------------|-----------------------|------------------------------|
| 0 | 564 | 0.111 | 0.11 | 0.010 |
| 30 | 488 | 0.063 | 0.06 | 0.007 |
| 45 | 400 | 0.051 | 0.05 | 0.005 |
| 60 | 287 | 0.056 | 0.06 | 0.005 |

4 Berechnung der Bauteilkennwerte

Als Bauteilkennwerte des Gesamtenergiedurchlassgrades werden $g_{n,B}$ und $g_{h,B}$ aus den Meßwerten berechnet. Der Wert für streifenden Einfall (90°) wird auf Null festgesetzt. Ferner muß die winkelabhängige Funktion an den Stützstellen 15° und 75° linear interpoliert werden. Mit den zugehörigen Wichtungsfaktoren w_j für die Berechnung des hemisphärischen Kennwertes ergibt sich folgende Tabellen:

Tabelle 6: WA158003 schwarz

| Winkel j [Grad] | $g_{B,j}$ [-] | w_j [-] |
|-----------------|---------------|-----------|
| 0 | 0.13 | 0.0170 |
| 15 | 0.11 | 0.1294 |
| 30 | 0.08 | 0.2241 |
| 45 | 0.07 | 0.2588 |
| 60 | 0.08 | 0.2241 |
| 75 | 0.04 | 0.1294 |
| 90 | 0.00 | 0.0170 |

Tabelle 7: WA158004 hellgrau

| Winkel j [Grad] | $g_{B,j}$ [-] | w_j [-] |
|-----------------|---------------|-----------|
| 0 | 0.11 | 0.0170 |
| 15 | 0.09 | 0.1294 |
| 30 | 0.06 | 0.2241 |
| 45 | 0.05 | 0.2588 |
| 60 | 0.06 | 0.2241 |
| 75 | 0.03 | 0.1294 |
| 90 | 0.00 | 0.0170 |

Der hemisphärische Kennwert ergibt sich durch die gewichtete Summierung der winkelabhängige Werte $g_{\text{exp},j}$:

$$g_{h,B} = \sum_j w_j \cdot g_{B,j} \quad (2)$$

Damit ergeben sich folgende Bauteilkennwerte und Festlegungen:

| | |
|------------------|------------------------------------|
| Bauteil: | Solarpaneel schwarz |
| Dicke: | 121 mm |
| Bauteilkennwerte | $g_{n,B} = 0.13$ |
| | $g_{h,B} = 0.08$ |
| | $R_B = 1.65 \text{ m}^2\text{K/W}$ |

Damit ergeben sich folgende Bauteilkennwerte und Festlegungen:

| | |
|------------------|------------------------------------|
| Bauteil: | Solarpaneel hellgrau |
| Dicke: | 121 mm |
| Bauteilkennwerte | $g_{n,B} = 0.11$ |
| | $g_{h,B} = 0.06$ |
| | $R_B = 1.65 \text{ m}^2\text{K/W}$ |

5 Zusammenfassung

Die reine solare oder visuelle Transmission ist bei den Solarpaneelen nicht vorhanden. Die Strahlung wird in der Wabenstruktur absorbiert und trägt zu einem sekundären Wärmeabgabegrad q_i der Probe bei. Dieser ist der einzige Anteil des Gesamtenergiedurchlassgrades.

Wegen der Wabengeometrie ist der Gesamtenergiedurchlassgrad bei senkrechtem Einfall deutlich größer als bei schrägem Einfall (Eindringtiefe in die Probe). Der Wert für 0° ist beim Gesamtenergiedurchlassgrad ein Mittelwert über den Winkelbereich 0° - 15° .

Das schwarze und das hellgraue Solarpaneel unterscheiden sich signifikant, jedoch absolut sind die Unterschiede klein. Die Farbe hat also auf die Funktion des Solarpaneels einen untergeordneten Einfluss.

Herrn
Johann Aschauer
Gap-solar GmbH
Technologiepark 17

A-4320 Perg
Österreich

Dr. Werner Platzer
Durchwahl +49 (0) 7 61/45 88-5131
Fax +49 (0) 7 61/45 88-9000
e-mail: platzer@ise.fhg.de

Stellungnahme Berechnung g-Wert

Freiburg,
02. November 2005

Sehr geehrter Herr Aschauer,

Sie bitten um eine Stellungnahme zu der Berechnung des effektiven Gesamtenergiedurchlassgrades für eine wandkonstruktion mit einem Fassadenpaneel Ihrer Firma.

In unserem Prüfbericht MAO3-WJP-0509-E05 Bestimmung der optischen und thermischen Eigenschaften von zwei Fassadenpaneels „Solarpaneel“ führen wir die gemessenen Wärmewiderstandswerte und Gesamtenergiedurchlassgrade für die folgende Konstruktion auf:

| Dicke [mm] | Schicht |
|------------|---|
| 4 | Float ESG |
| 34 | SZR belüftet |
| 50 | Solarwabe „schwarz“ bzw. „grau“ |
| 34 | Ausgleichsdämmung (MDF + 30mm Steinwolle 040) |

Der gemessene Wärmewiderstand von $R_B=1.65 \text{ m}^2\text{KW}$ ist sehr gut, vermutlich weil die Belüftung in der Messanordnung (Plattenapparat) teilweise unterbunden war. Eine Berechnung des Wärmewiderstands mit der bereits früher bestimmten Wärmeleitfähigkeit der Wabe von 0.08 W/(mK) nach EN ISO 6946 ergibt sich als Bemessungswert der Widerstand zwischen Paneelinnenseite und Außenluft (bei Hinterlüftung) ein Wert von $R_{\text{Solarpaneel}}=R_B+R_{se}=1.55 \text{ m}^2\text{KW}$.

Die gemessenen g-Werte für die beiden Farben „schwarz“ und „hellgrau“ lauten:

| | | schwarz | grau |
|-----------------------------------|-----------|---------|------|
| Senkrechter Strahlungseinfall | $g_{n,B}$ | 0.13 | 0.11 |
| Diffusisotroper Strahlungseinfall | $g_{h,B}$ | 0.08 | 0.06 |

Befinden sich nun hinter dem Solarpaneel im Wandaufbau weitere Schichten, so reduziert sich der g-Wert des Solarpaneels entsprechend der Formel

$$g_{gesamt} = g_{Solarpaneel} \cdot (R_{Solarpaneel} + R_{se}) \cdot U_{gesamt} = g_{Solarpaneel} \cdot \frac{U_{gesamt}}{U_{Solarpaneel}^*}$$

wobei $U_{Solarpaneel}^*$ der Wärmeübergangskoeffizient von der Rückseite des Paneels an die Außenluft sei.

Der zusätzliche Wärmewiderstand zum Standardaufbau des Solarpaneels (wie vermessen) ist entsprechend den zusätzlichen Schichten (wie in der Bauteilberechnung des OIB angegeben):

| Dicke [mm] | Schicht |
|------------|-----------------------------|
| 10 | Steinwolle 040 |
| 15 | MDF |
| 160 | Holzriegel mit Mineralwolle |
| 18 | OSB-Platte |
| 30 | Vorsatzschale gedämmt |

$R_{Wand,innen} = 4.268 \text{ m}^2\text{K/W}$ (die Details der Materialangaben wurden nicht geprüft)

Mit $R_{si}=0.13 \text{ m}^2\text{K/W}$ ergibt sich somit ein Gesamtwert von $R_{ges}=R_{si} + R_{Wand,innen} + R_{Solarpaneel} = 0.13 + 4.27 + 1.55 = 5.98 \text{ m}^2\text{K/W}$. Dies entspricht einem U-Wert von $0.168 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Damit errechnet sich der Korrekturfaktor für die oben angegebenen g-Werte zu $f_{kor} = 0.168 \cdot 1.55 = 0.2604$. Dies beruht auf der gedanklichen Trennung des vorgegebenen Wandaufbaus in den Teil des Fassadenpaneels (s. Aufbau Messung) und dem restlichen Teil. Dass diese Trennung durch eine Schicht von 40mm Steinwolle durchgelegt ist, spielt keine Rolle.

Die Ergebnisse für die g-Werte des Wandaufbaus – die dann wie g-Werte einer gedanklichen „Verglasung“ in einem Fenster verwendet werden können, sind:

Gesamter Wandaufbau nach OIB:

| | | schwarz | grau |
|-----------------------------------|----------------|---------|-------|
| Senkrechter Strahlungseinfall | $g_{n,gesamt}$ | 0.034 | 0.029 |
| Diffusisotroper Strahlungseinfall | $g_{h,gesamt}$ | 0.021 | 0.016 |

Der Behandlung der Hinterlüftung der Glasscheibe mit einem Wärmeübergang von der Wabenoberfläche an die Außenluft von $R_{se}=0.13 \text{ m}^2\text{K/W}$ ist eine vorsichtige Annahme. Bei schwächerer Hinterlüftung bzw. gar keiner Hinterlüftung würde der Wärmewiderstand $R_{solarpaneel}$ größer werden, im Falle ohne Hinterlüftung $R_B=1.65 \text{ m}^2\text{K/W}$ ergäbe sich der andere Extremfall $f_{korr}=0.161*1.78=0.287$.

Ich hoffe, dass ich Ihnen mit diesen Ausführungen helfen konnte.

Mit freundlichen Grüßen

Dr. Werner Platzer
GL Lichttechnik und Solare Konzentration