

Jahresbericht 2003

Messung und Simulation von transparenten Bauteilen mit Sonnenschutz

Autor	Hans Simmler
beauftragte Institution	EMPA Bauphysik
Adresse	Ueberlandstr. 129, CH-8600 Dübendorf
E-mail, Internetadresse	hans.simmler@empa.ch
BFE Vertrags-Nummer	37'227
Dauer des Projekts (von – bis)	1. April 2000 bis 30. September 2004

ZUSAMMENFASSUNG

Die EMPA entwickelt im Rahmen von IEA Solar Task 27 Rechenmodelle für den Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert) von Glasfassadenbauteilen mit Sonnenschutz, die durch Messungen im Aussenklima verifiziert werden. Für Gebäudesimulationsprogramme werden geeignete Schnittstellen zur Verfügung gestellt, damit Gebäude anhand winkelabhängiger g-Werte bezüglich Kühllasten und thermischer Behaglichkeit ausgelegt werden können. Daneben wird das reale Verhalten von solaren Wandheizsystemen mit transparenter Wärmedämmung untersucht.

Im Berichtsjahr wurden Referenzmessungen an aussen liegenden Lamellenbeschattungen mit einer Isolierverglasung im Aussenklima durchgeführt. Für dieselben Systeme liegen Ergebnisse von Modellrechnungen und g-Wert-Messungen im Labor vor, die eine gute Übereinstimmung ergeben. Berechnungen und Messungen im Aussenklima an einer mehrschichtigen, belüfteten Glasfassade mit Sonnenschutz durchgeführt, zeigen eine gute Übereinstimmung des dynamischen Verhaltens. Vereinfachte Modelle zur Berechnung des Gesamtenergiedurchlassgrads können zu recht grossen Abweichungen führen, falls die effektiven Strömungsverhältnisse komplexer sind als für die Berechnung angenommen wird.

Thermische Eigenschaften transparenter Wärmedämmung wurden weiter untersucht. CFD-Berechnungen zeigen, dass der Gesamtenergiegewinn und der Wärmedurchlasswiderstand durch interne Konvektion deutlich vermindert werden kann.

Projektziele

Fassadenbauteile mit transparenten Flächenanteilen haben einen grossen Einfluss auf den Kühl-/Heizenergiebedarf, den thermischen Komfort und die Tageslichtnutzung in Gebäuden. Bei mehrschichtigen Glasfassaden und Sonnenschutzsystemen geht es primär um die Vermeidung von Überhitzungsproblemen, bei solaren Wandheizungen steht der nutzbare Solargewinn im Vordergrund. Mit den heute üblichen Rechenverfahren können die Eigenschaften solcher Systeme nicht genau berücksichtigt werden. In IEA Solar Task 27 "Performance assessment of solar building components" wirken rund 15 Institute aus 10 Ländern an der Bearbeitung folgender Ziele mit:

- Bestimmen der thermischen Eigenschaften und Verbesserung von Modellen solarer Komponenten unter Einbezug der Integration in eine Fassade.
- Erarbeiten von Empfehlungen für standardisierte Mess- und Rechenverfahren zur integralen thermischen / visuellen Charakterisierung solarer Fassadenbauteile einschliesslich Sonnenschutz.

Die EMPA entwickelt Rechenmodelle von Glasfassadenbauteilen mit Sonnenschutz, die durch Messungen im Aussenklima getestet werden (Fig. 1), und stellt vereinfachte Modelle bzw. Datensätze für Gebäudesimulationsprogramme zur Verfügung, damit Gebäude bezüglich Kühllasten und thermischer Behaglichkeit beurteilt und in der Planungsphase optimiert werden können. Daneben wird das reale Verhalten von solaren Wandheizsystemen mit transparenter Wärmedämmung (TWD) untersucht.

Im Berichtsjahr sind Berechnungen, Aussenklima- und Labormessungen des Gesamtenergiedurchlassgrads (g-Wert) eines Isolierglases mit Lamellenbeschattungen geplant. Messungen und CFD-Modellierung einer Doppelfassade mit integriertem Sonnenschutz werden für den Fall natürlicher Belüftung von aussen durchgeführt. Anhand von CFD-Berechnungen eines TWD-Systems wird untersucht, wie sich interne Konvektion auf den Gesamtenergiegewinn und der Wärmedurchlasswiderstand auswirkt.



Fig. 1: Solarprüfstand der EMPA für die Untersuchung von solaren und thermischen Eigenschaften transparenter Fassadenbauteile. Zwischen den Testflächen ist die Messtechnik für die Klimadatenerfassung mit einem elektronisch nachgeführten Direktstrahlungssensor platziert.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

BESCHATTUNGSSYSTEME

Zusammen mit Partnern in IEA Solar Task 27 wurde eine Vergleichsstudie von Mess- und Rechenverfahren zur Bestimmung des g-Wertes einer Isolierverglasung mit aussen liegender Lamellenbeschattung gestartet (Fig. 2). Eine identische Verglasung mit U-Wert = $1.2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, g-Wert = 47% und 3 Typen von geometrisch gleichen, 90 mm breiten Lamellen in den Ausführungen weiss ($\rho_e = 69\%$), weiss perforiert (Lochflächenanteil 5%) und braun ($\rho_e = 7\%$) wurden spektral ausgemessen, numerisch berechnet, in einem Labor-Kalorimeter und im Aussenprüfstand der EMPA [1] gemessen. Die dynamische Auswertung der Messungen im Aussenklima zwischen März und April ergab die folgenden mittleren g-Werte [2]:

Lamellenwinkel (°)	g-Wert (-) für Lamellentyp		
	Weiss	weiss perforiert	braun
0	0.009	0.040	0.035
45	0.067	0.071	0.039
90	0.155	0.125	0.100

Tab. 1: Mittlere g-Werte der Isolierverglasung mit Aussenbeschattung

Erwartungsgemäss hängt der g-Wert stark von den Lamellenwinkeln und -oberflächen ab. Die weisse Lamelle ergibt die grösste Dynamik. Geschlossen ist der Solargewinn praktisch null, in horizontaler Position gelangt vergleichsweise viel Strahlung in den Raum. Mit Perforierung ist der g-Wert im geschlossenen Zustand deutlich höher. Bei teiloffenen Positionen ist der g-Wert jedoch tiefer, da der Reflexionsgrad der perforierten Fläche für diffuse Strahlung kleiner ist. Auch mit braunen Lamellen resultiert ein nicht vernachlässigbarer Solargewinn in geschlossener Position, bedingt durch die Wärmeabgabe der erhitzten Lamelle. Bei geöffneter Stellung sind die g-Werte vergleichsweise tief, da die braune Oberfläche nur wenig Strahlung in den Raum reflektiert.

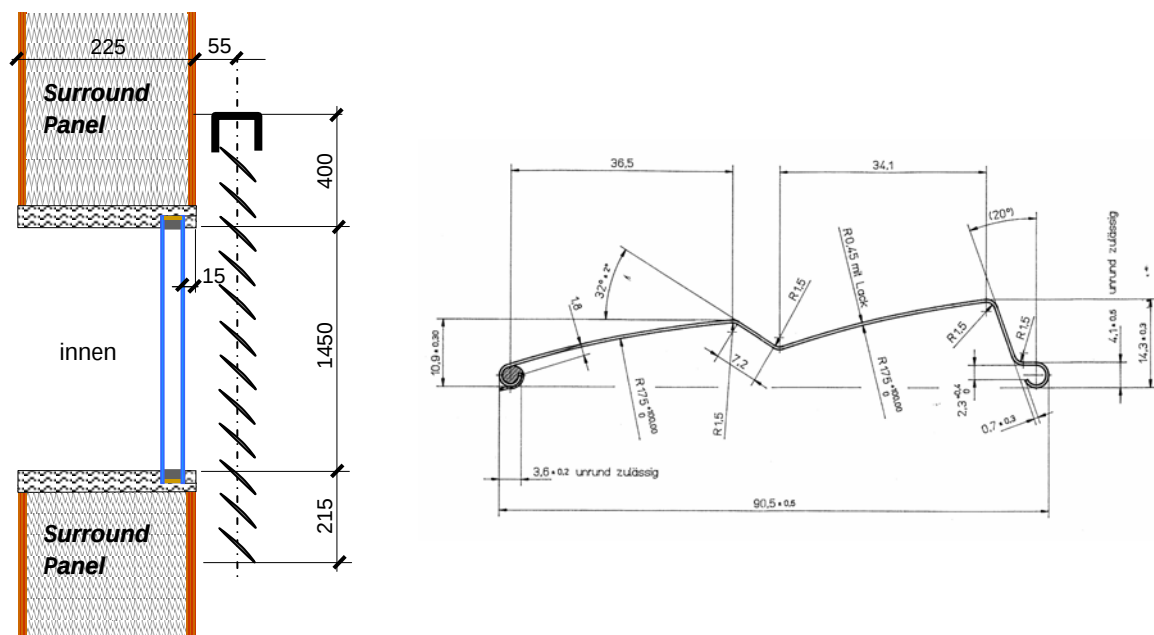


Fig. 2: Skizze der eingebauten Verglasung mit Sonnenschutz (links), Profil der 90-mm-Aussenlamelle (rechts).

Um saisonale Einflüsse abzuschätzen wurde die Messung mit weisser Lamelle in horizontaler Stellung im Juni wiederholt. Der mittlere g -Wert reduzierte sich relativ um 13%. Gründe für den eher geringen Effekt sind: a) die massgebliche projizierte Sonnenhöhe beginnt zu allen Jahreszeiten bei 90° und variiert zur Tageszeit mit der stärksten Einstrahlung zwischen etwa 40° und 60° , d.h. der Winkelleffekt ist nur zum Teil wirksam; b) der Jahreszeiteffekt wird weiter reduziert durch diffuse und reflektierte Strahlungsanteile, deren Winkelverteilung nur schwach von der Sonnenposition abhängt.

Für einen genaueren Vergleich von Modell-, Labor- und Aussenmessdaten wurde die Auswertung verfeinert. Dazu wurde der Solargewinn vereinfacht durch die stückweise lineare, vom projizierten Höhenwinkel φ abhängige Funktion

$$g_{\text{direkt}} = \begin{cases} g_1(1 - \varphi / \varphi_0) + g_2 & (\text{für } 0 \leq \varphi \leq \varphi_0) \\ g_2 \frac{1 - 2\varphi / \pi}{1 - 2\varphi_0 / \pi} & (\text{für } \varphi > \varphi_0) \end{cases} \quad (1)$$

parametrisiert und die beiden Grössen g_1 und g_2 aus den zeitabhängigen Messdaten identifiziert. Qualitativ wird diese Abhängigkeit durch die Geometrie und auch durch Modellberechnungen der EMPA [3] motiviert (Fig. 3).

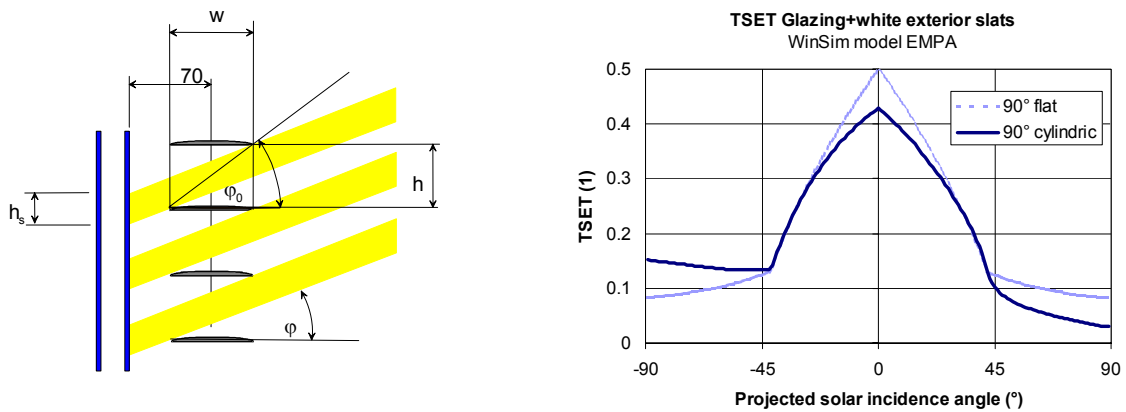


Fig. 3: Geometrische Situation des Strahlungseinfalls (links) und mit WinSim berechnete Winkelabhängigkeit des g -Werts (rechts).

Das Ergebnis ist $g_1 = 0.363$, $g_2 = 0.078$. Für den Einfallswinkel $\varphi = 0$ sind in Tab. 2 die Resultate verschiedener Mess- und Rechenmethoden zusammengestellt. Vom Standpunkt der Dimensionierung ist die Übereinstimmung für dieses Beispiel sicherlich befriedigend. Daten von weiteren Konfigurationen werden zurzeit noch ausgewertet.

Quelle	Bemerkungen	$g_{\text{direkt}}(\varphi = 0)$
Aussenmessung EMPA	Identifikation (siehe Text)	0.441
Numerisches Modell EMPA	Formfaktormethode, zylindrische Lamelle, Solarband-Berechnung [3]	0.428
Messung Labor ISE	Kalorimetrische Breitbandmessung [4]	0.432
Numerisches Modell ISE	Formfaktormethode, zylindrische Lamelle, spektrale Integration [4]	0.421

Tab. 2: Ergebnisse verschiedener Rechen- und Messmethoden für den g -Wert einer Isolierverglasung mit aussenliegendem Sonnenschutz (weiss, Lamellen horizontal).

MEHRSCICHTIGE GLASSFASSADEN MIT SONNENSCHUTZ

Die Strömungsverhältnisse und deren Einfluss auf das Temperatur- und Energiedurchlassverhalten wurde an einer mehrschichtigen, mechanisch belüfteten Glasfassade (Doppelfassade) ohne Rahmenkonstruktion untersucht [5]. Der Schichtaufbau (Fig. 4) besteht aus einer äusseren Isolierverglasung mit Sonnenschutzglas und einem inneren Einfachglas mit Belüftungsöffnungen. Im dazwischen liegenden Luftspalt befindet sich ein textiler Sonnenschutz mit metallisierter Aussenoberfläche.

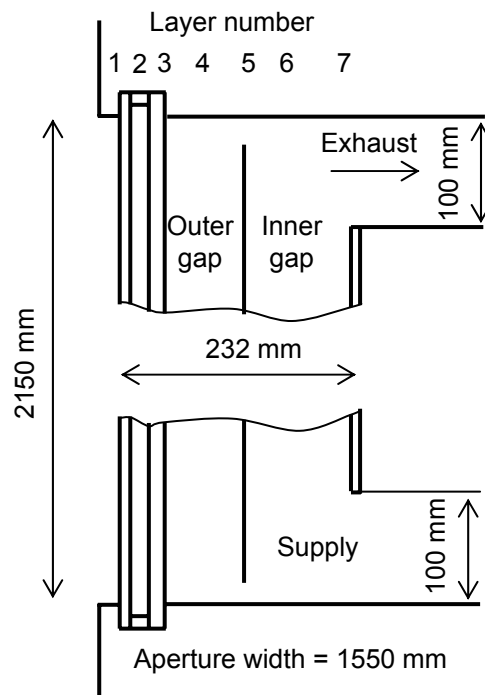


Fig. 4: Vertikalschnitt durch die Doppelfassade mit dazwischen liegendem Sonnenschutz. Der Sonnenschutz wurde oben und unten mit je 20 mm Belüftungsöffnung eingebaut. Das Innenglas hat unten und oben Zu-/Abluftöffnungen von 100 mm Höhe auf der ganzen Breite.

Die strömungsmechanisch und thermisch instationäre Berechnung der Doppelfassade mit dem Softwaretool FLOVENT 3.2 wurde durch Messungen im Solarprüfstand der EMPA verifiziert. Eine Energiebilanz des Systems mit nach oben und nach unten gerichteter Fassadenbelüftung zeigt Fig. 5. 3 % der eingestrahnten Globalstrahlung wird direkt in den Raum transmittiert. Bei nach oben gerichteter Belüftung gelangt zusätzlich 4 % als sekundärer Wärmestrom in den Testraum, der g-Wert ist also rund 7 %. Damit sind keine Überhitzungs- und auch keine Komfortprobleme zu erwarten, da die Oberflächentemperatur innen immer weniger als 5 K über der Lufttemperatur lag. Bei nach unten gerichtetem Luftstrom steigt der sekundäre Wärmestrom den Raum auf 12 %. Es resultiert dann ein g-Wert von rund 15 %, während ein vereinfachtes Strömungsmodell (Basis ISO 15099) einen sekundären Wärmestrom um 8 % (g-Wert ca. 11 %) ergibt. Die Wärmebelastung des Raums kann bei solchen Fassaden also erheblich unterschätzt werden.

Seit dem Spätsommer dieses Jahres sind Messungen mit natürlich belüftetem Einfachglas aussen, dazwischen liegendem Sonnenschutz und innen liegender Isolierverglasung durchgeführt worden. Auswertungen und Berechnungen sind zurzeit im Gang.

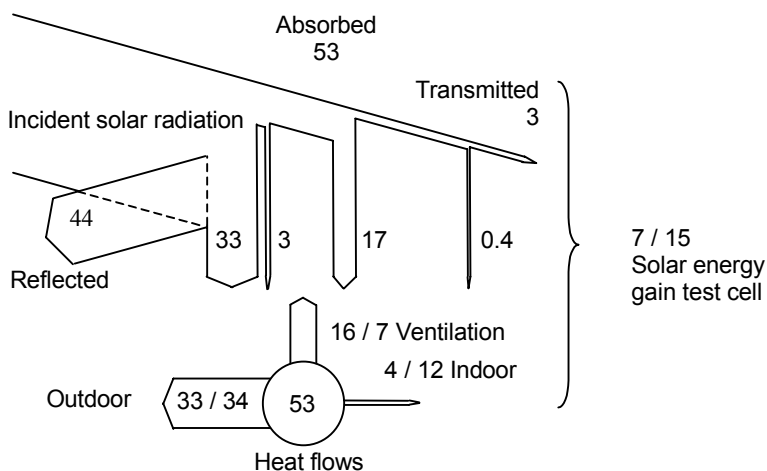


Fig. 5: Energiebilanz des Raumes mit Glas-Doppelfassade mit aufwärts / abwärts gerichteter mechanischer Belüftung des Luftzwischenraums.

TRANSPARENTE WÄRMEDÄMMUNG (TWD)

Messungen an einem TWD-Fassadenmodul, einer Aluminium-Rahmenkonstruktion mit 14 cm *Okalux*-TWD und integriertem Absorber [6], ergaben einen ca. 10 % tieferen g-Wert als eine Schichtberechnung, die auf Europäischen Normen für Verglasungen basiert (siehe Jahresbericht 2001 und 2002). Als mögliche Verlustbeiträge wurden Wärmeverluste und Strahlungsabsorption im Rahmenbereich genauer untersucht [2].

Der Verlust durch Wärmeableitung über Wärmebrücken wurde durch eine 2-dimensionale Berechnung eines Randleitwertes L^{2D} auf unter 2 % abgeschätzt. Wärmebrückeneffekte sind für die g-Wert-Reduktion also von untergeordneter Bedeutung. Verluste durch interne Konvektion wurden durch Strömungsberechnungen abgeschätzt. Das Modul hat einen beabsichtigten 6-mm-Luftspalt aussen zwischen Glasabdeckung und Röhrchenschicht. Während ein zusätzlicher Luftspalt oben - z.B. durch Setzung der Röhrchenschicht - praktisch keine Auswirkungen hat, nimmt die Wärmeübertragung mit einem zusätzlichen Luftspalt von 2 mm zwischen Röhrchenschicht und Absorber um rund 50 % zu. Da die reale Geometrie bei wechselnden Temperatur- und Strahlungsbedingungen nicht genau bekannt ist, kann kein direkter quantitativer Vergleich gemacht werden. Klar ist aber, dass ein beidseitig undichter Abschluss der Röhrchenschicht eine erhebliche Leistungsverminderung bezüglich U-Wert und g-Wert zur Folge hat.

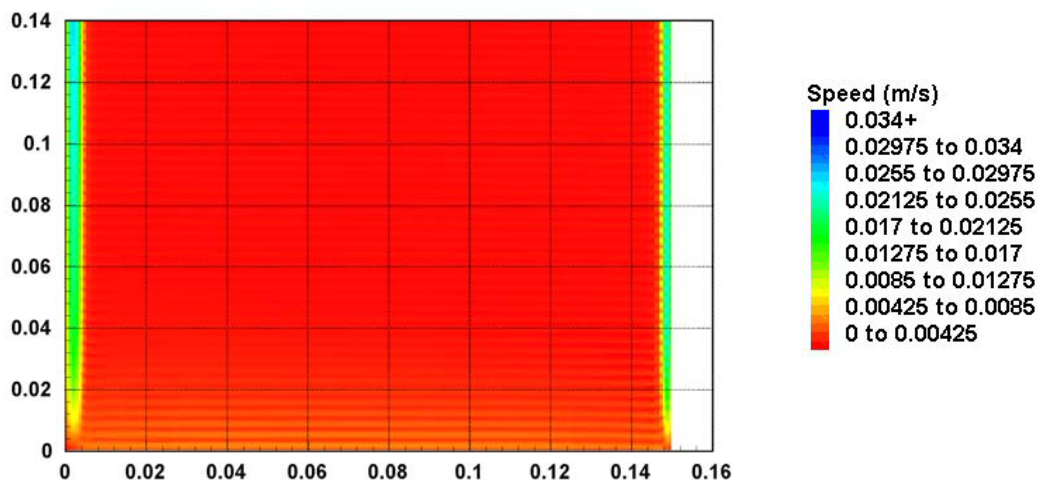


Fig. 6: Strömungsfeld im TWD-Modul (Vertikalschnitt, unterer Randbereich) mit Zusatzluftspalt zwischen Röhrchen und Absorber (rechte Seite).

Strahlungsabsorption im Rahmenbereich hat sich als ernstzunehmende Ursache von Verlusten herausgestellt, da der „Transmissionskegel“, der durch Reflexionen an der strahlparallelen Okalux-Röhrchenstruktur entsteht, am Rand geschluckt wird (Fig. 6).

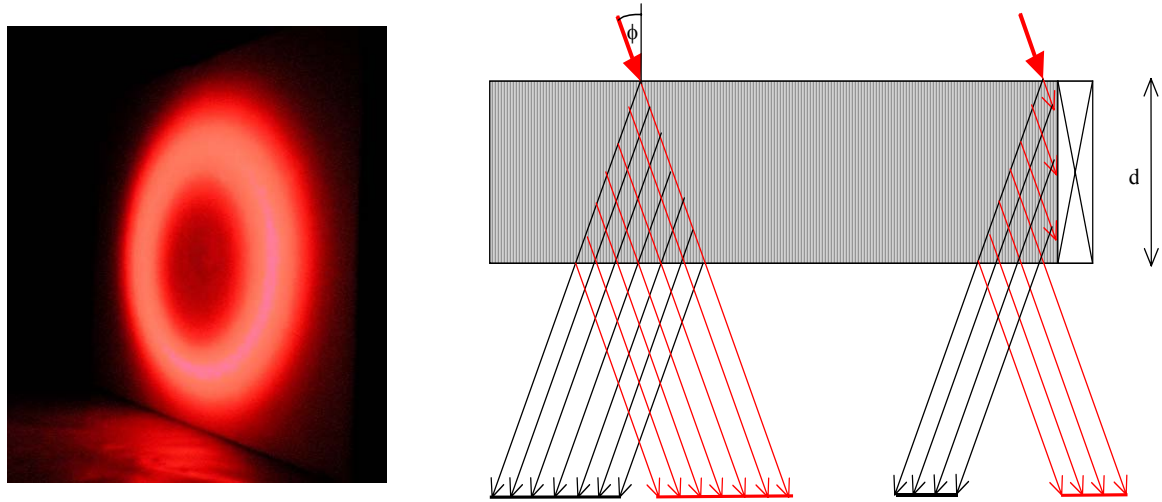


Fig. 6: Bild eines Laserstrahls nach dem Durchgang durch eine TWD-Struktur (links) und schematische Darstellung der Entstehung des Kegels durch Mehrfach-Reflexion/Transmission (rechts).

Abhängig vom Einfallswinkel und dem solaren Reflexionsgrad des Rahmens wurde der relative Transmissionsgrad $r = \tau_{\text{Rand}} / \tau_h$ bezogen auf den ungestörten hemisphärischen Transmissionsgrad durch ein 2-dimensionales optisches Modell berechnet. Die gemittelten Werte in der Randzone $d \tan(\Phi)$ liegen typischerweise im Bereich 0.7 – 0.8.

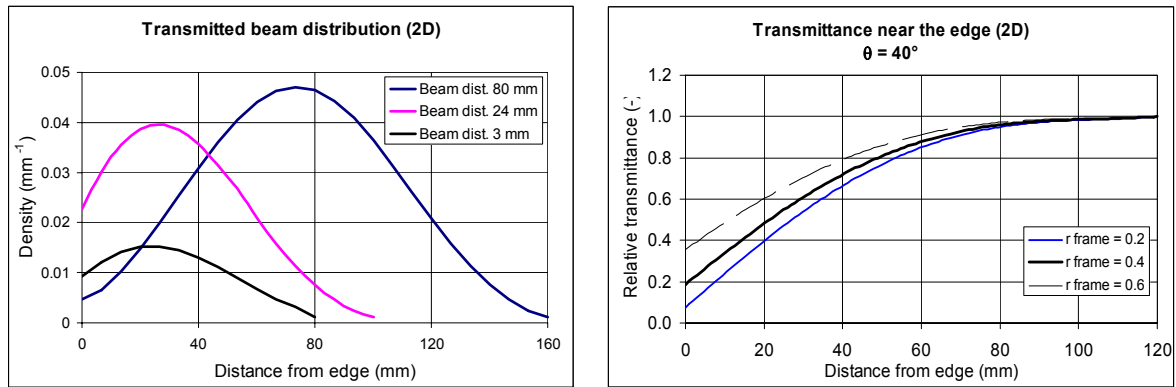


Fig. 7: Intensitätsverteilung der transmittierten Strahlung im Randbereich bei unterschiedlichen Abständen des auftreffenden Direktstrahls (links), resultierender relativer Transmissionsgrad im Randbereich für verschiedene Reflexionsgrade der Rahmenoberfläche (rechts).

Der effektive Transmissionsgrad eines TWD-Moduls mit Fläche A , Dicke d und Rahmenlänge ℓ ist dann durch

$$\tau_{\text{eff}} = \tau_h \left(1 - \frac{\ell}{A} d \tan(\Phi) (1 - r) \right) \quad (2)$$

bestimmt. Für einen geschätzten mittleren Einfallswinkel $\Phi \cong 40^\circ$ für die EMPA-Messungen ergibt sich eine Reduktion des Transmissionsgrads von 9 %. Damit ist klar, dass der Transmissionsgrad eines relativ kleinen, "dicken" TWD-Moduls durch Randabsorption merklich reduziert werden kann.

Nationale Zusammenarbeit

Die Zusammenarbeit mit der Industrie wurde weiter geführt. Für weitere Messungen an Kombinationen von Verglasung und Sonnenschutz wurden verschiedene Komponenten an Projektpartner in IEA Solar Task 27 geliefert.

Internationale Zusammenarbeit

Die Arbeiten der EMPA sind mit dem IEA Solar Task 27 "Performance assessment of solar building components" koordiniert, der Ende 2004 abgeschlossen wird. Die EMPA leitet das Teilprojekt "Solar building components and integrated assemblies" mit rund 10 beteiligten Labors und wirkte an zwei Plenarmeedings in Lissabon (April 2003) und Freiburg i.Br. (Oktober 2003) mit. Ergebnisse wurden an einem IEA-Workshop in Freiburg [2] und an der DAME-BC Konferenz in Ispra [7] präsentiert. Die EMPA ist weiterhin assoziiertes Mitglied in der *PASLINK EEIG* [8].

Bewertung 2003 und Ausblick 2004

Der Vergleich von Messungen und *detaillierten* Berechnungen an Isolierverglasungen und belüfteten Doppelfassaden mit Sonnenschutz hat eine gute Übereinstimmung gezeigt. Vereinfachte Modelle sind bei mechanisch belüfteten Fassaden jedoch nur beschränkt anwendbar. Für unkritische Konstruktionen wird das vereinfachte EMPA-Modell *WinSim* (Grundlage ISO 15099, 2003 erweitert für zylindrische Lamellen) in GLAD integriert werden, damit winkelabhängige Eigenschaften von Glasfassaden mit Lamellenbeschattung für HELIOS und TRNSYS vorberechnet werden können.

Die Vergleiche verschiedener Mess- und Rechenmethoden von Glasfassaden mit Sonnenschutz und weitere Arbeiten in IEA Solar Task 27 werden abgeschlossen. Die Resultate über Isolierverglasung und belüftete Doppelfassaden mit Beschattung werden zusammengestellt und veröffentlicht. Im Bereich TWD-Fassaden wird die Untersuchung von "Einbaueffekten" und die Leistungscharakterisierung in einem IEA Projektbericht dokumentiert und publiziert.

Referenzen

- [1] H. Simmler, B. Binder, R. Vonbank, *Wärmelasten transparenter Bauteile und Sonnenschutzsysteme*, Schlussbericht, EMPA/BFE, Dezember 2000
- [2] H. Simmler, *Performance assessment of solar façade components*, IEA/SHC Solar Task 27 Workshop D-Freiburg, Oktober 2003
- [3] H. Simmler: *WinSim simulation tool*, internal project EMPA, 2003
- [4] W.J. Platzer: *Performance assessment for solar shading devices – state of the art*, IEA/SHC Solar Task 27 Workshop D-Freiburg, Oktober 2003
- [5] H. Manz, H. Simmler: *Experimental and numerical study of a mechanically ventilated glass double facade with integrated shading device*, Building Physics Conference, Leuven, 2003.
- [6] *Ernst Schweizer AG*, CH-8908 Hedingen.
- [7] H. Simmler, B. Binder, *Determination of the angular-dependent solar heat gain of glazing with exterior venetian blind shading*, DAME-BC conference, JRC Ispra, November 2003
- [8] *PASLINK European Economic Interest Grouping of Outdoor Test Centres (EEIG)*, c/o BBRI, Violetstraat 21-23, B-1000 Brüssel (<http://www.paslink.org>).
- [9] GLAD, Glasdatenbank der EMPA