

Messung und Simulation von transparenten Bauteilen mit Sonnenschutz

Ausgearbeitet durch

Dr. Hans Simmler, EMPA

.....

Im Auftrag des

Bundesamtes für Energie

Dezember 2004

Auftraggeber:

Bundesamtes für Energie
Forschungsprogramm Rationelle Energienutzung in Gebäuden

Auftragnehmer:

EMPA Abteilung Bauphysik

Autoren:

Dr. Hans Simmler, EMPA, Dübendorf
Dr. Heinrich Manz, EMPA, Dübendorf
Dr. Anne Haas, EMPA, Dübendorf
Pier Angelo Favaro, Università Technica delle Marche, Ancona (I)

Mitwirkung:

Bruno Binder, EMPA, Dübendorf
Stefan Carl, EMPA, Dübendorf
Thomas Nussbaumer, EMPA, Dübendorf
Roger Vonbank, EMPA, Dübendorf
IEA Task 27 Projektpartner

Begleitgruppe:

M. Zimmermann / H. Bertschinger, Programmleitung BFE, EMPA, Dübendorf

2004

Diese Studie wurde im Rahmen des Forschungsprogrammes „Rationelle Energienutzung in Gebäuden“ des Bundesamtes für Energie erarbeitet. Für den Inhalt ist alleine der/die Studiennehmer/in verantwortlich.

Bundesamt für Energie BFE

Worbentalstrasse 32, CH-3063 Ittigen • Postadresse: CH-3003 Bern
Tel. 031 322 56 11, Fax 031 323 25 00 • office@bfe.admin.ch • www.admin.ch/bfe

Vertrieb: EMPA ZEN, Überlandstrasse 129, 8600 Dübendorf, www.empa-ren.ch
ENET, Egnacherstrasse 59, 9320 Arbon, enet@temas.ch, www.energieforschung.ch

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	2
Isolierverglasung mit Sonnenschutz.....	3
Modellierung des Strahlungs- und Wärmedurchgangs	3
Vergleich von Messung und Berechnung	5
Zusammenfassung	8
Glasdoppelfassade mit integriertem Sonnenschutz	9
Abluftfassade	9
Natürlich belüftete Doppelfassade	12
Zusammenfassung	13
Rechenmodule für Glasfassaden mit Beschattung	13
Glasfassade mit Beschattung	13
Kopplung Fassade-Gebäude	14
Zusammenfassung	19
Transparente Wärmedämmung	20
Untersuchung von Einbaueffekten.....	20
Solargewinne einer verglasten Holzlamellen-Fassade.....	26
Isolierglaselement mit integriertem Latentwärmespeicher	27
Schlussfolgerungen.....	29
Referenzen.....	30
Anhang 1: EMPA Solarprüfstand	33
Messprinzip	33
Messeinrichtung / Datenerfassung	33
Datenauswertung	34
Systemkalibration.....	35
Messunsicherheit	35
Anhang 2: Modellierung des Strahlungsdurchgangs durch eine ebene	
Lamellenstruktur.....	36
Schichteigenschaften	36
Direkt transmittierte Sonnenstrahlung	37
Indirekt transmittierte Sonnenstrahlung	37
Anhang 3: g-Wert und effektiver U-Wert einer Aussenwand mit verglaster	
Holzlamellenfassade	42
Anhang 4: Datenfluss und Fenstermodell in Trnsys	45

Einleitung

Die Gebäudehülle von Bürogebäuden wird immer häufiger als Leichtkonstruktion aus stockwerk hohen Fassadenelementen mit hohem Glasanteil oder als vollständige Glas-Doppelhautkonstruktion realisiert. Auf der anderen Seite ist bekannt, dass Gebäude mit hohem Glasflächenanteil in der Gebäudehülle besonders kritisch sind in Bezug auf thermische Behaglichkeit und Kühlleistungsbedarf [1].

Für eine energetisch optimale Auslegung und Vermeidung von Komfortproblemen sind daher möglichst genaue Kenntnisse der solaren Eigenschaften von Fassadenbauteilen und Sonnenschutzsystemen erforderlich. Während die optische bzw. thermische Charakterisierung einzelner Materialien und einfacher Schichtstrukturen heute weitgehend standardisiert ist, gibt es bei komplexen Komponenten wie Verglasungen mit integrierten Beschattungssystemen, belüfteten Komponenten und Bauteilen mit transparenter Wärmedämmung keine anerkannten messtechnischen und rechnerischen Verfahren zur Leistungsbestimmung im realen Klima. Entsprechend werden die Eigenschaften solcher Komponenten in Gebäudesimulationswerkzeugen und Nachweisverfahren meist nur in Form von konstanten, abgeschätzten Kennwerten berücksichtigt. Dies kann je nach Fassadentyp, -orientierung und Klimadaten zu einer beträchtlichen Fehleinschätzung der solaren Warmegewinne führen, mit entsprechend negativen Folgen für den thermischen Komfort und / oder die Energieeffizienz des Gebäudes.

Aus diesen Gründen wirkte die EMPA in IEA Task 27 "Performance, Durability and Sustainability of advanced windows and solar components for building envelopes" mit [2], in dem zusammen mit den Partnerinstituten folgende Ziele verfolgt wurden:

- Genauere Bestimmung 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 Charakterisierung solarer Fassadenbauteile einschliesslich Sonnenschutz.



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

Projektziele der EMPA waren insbesondere die Entwicklung von Rechenmodellen für Glasfassadenbauteile mit Sonnenschutz, die durch Messungen im Aussenklima (Abbildung 1, Kurzbeschreibung des Messverfahrens in Anhang 1) zu validieren sind, sowie die Umsetzung in vereinfachte Modelle bzw. Datensätze für Gebäudesimulationsprogramme, damit Gebäude bezüglich Kühllasten und thermischer Behaglichkeit beurteilt und in der Planungsphase optimiert werden können. Daneben wurde das reale Verhalten von solaren Wandheizsystemen mit transparenter Wärmedämmung (TWD) im Vergleich zu Labordaten untersucht. In den folgenden Abschnitten werden die wichtigsten Ergebnisse vorgestellt.

Isolierverglasung mit Sonnenschutz

MODELLIERUNG DES STRAHLUNGS- UND WÄRMEDURCHGANGS

Bei der Modellierung des Gesamtenergiedurchlassgrads

$$g = \tau_e + q_i \quad (1)$$

durch eine teiltransparente Schichtstruktur ist zu unterscheiden zwischen dem kurzwelligen Solarstrahlungsanteil τ_e und dem sekundären Wärmeabgabegrad q_i , der durch Strahlungsabsorption in den verschiedenen Schichten und Wärmetransport durch die beschattete Verglasung transportiert wird. Die standardisierten Berechnungsverfahren für Mehrfach-Isolierverglasungen [3] sind für die Kombination von Verglasung und Beschattung nicht anwendbar, da sowohl der Strahlungsdurchgang als auch der sekundäre Wärmestrom durch die nicht ebene, luftdurchlässige „Lamellenschicht“ wesentlich komplexer ist. Es existieren heute mehr oder weniger vereinfachte Modelle [4], in denen für die Lamellenebene ersatzweise optische Schichteigenschaften berechnet werden. Das Strahlungsaustauschmodell basiert im solaren wie auch im langwelligen Infrarotbereich auf der Annahme von diffus reflektierenden oder transmittierenden Oberflächen, was für die meisten Sonnenschutzmaterialien gut erfüllt ist. Eine wesentliche Vereinfachung ist beispielsweise die Annahme einer flachen Lamelle, womit bei kleinen Einfallswinkeln (tiefer Sonnenstand) der solare Transmissionsgrad überschätzt wird. Vereinfacht ist auch die Berechnung des konvektiven Wärmetransports im Bereich der Beschattung.

In Anlehnung an diese Verfahren wurde an der EMPA das Fassadenmodell „WinSim“ entwickelt. Anhang 2 enthält eine Beschreibung des optischen Modells für ebene Lamellen. In der aktuellen Fassung wurde das Modell durch geometrische Algorithmen für zylindrisch gekrümmte Flächen erweitert. Für metallisch verspiegelte Lichtlenklamellen mit hohem direktem Reflexionsgrad ist das Modell nicht anwendbar, bzw. es muss mit grösseren Abweichungen gerechnet werden.

Auf dieser Grundlage lassen sich optische und thermische Eigenschaften des ganzen Pakets aus Glasschichten und Beschattungs"ebene" in Funktion des Einfallswinkels und der Lamellenstellung vergleichbar zu einer Mehrfachverglasung berechnen (Abbildung 2). Auftriebsströmung und Luftaustausch im Bereich der Beschattung kann berücksichtigt werden. Eine Luftdurchlässigkeit der Beschattung wird dabei nicht einbezogen.

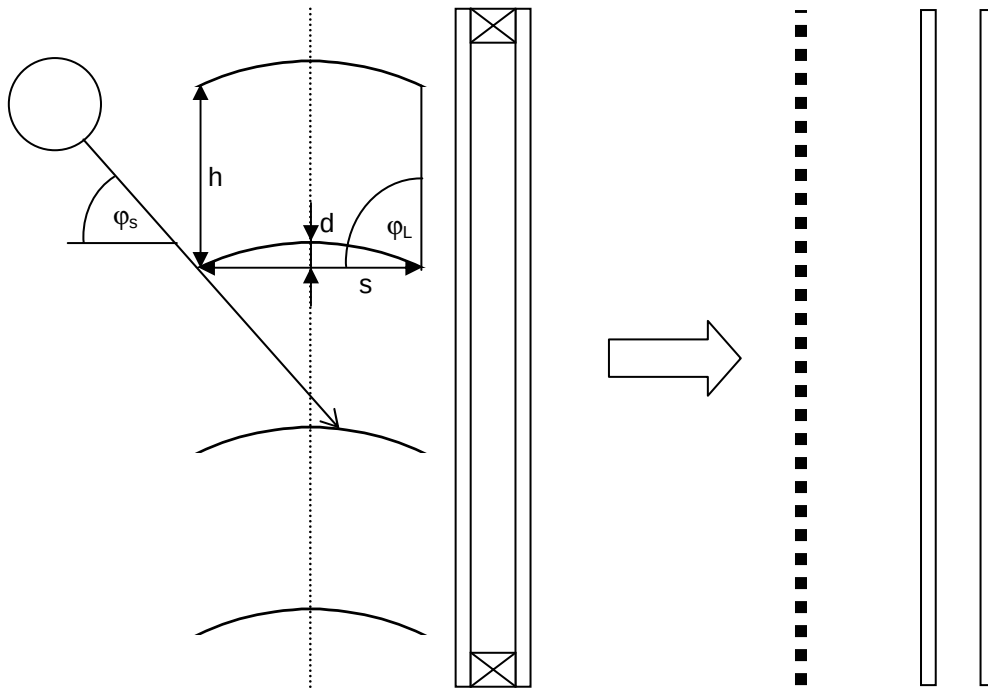


Abbildung 2: Geometrische Daten des Lamellen-Beschattungsmodells (links), aus denen zusammen mit den optischen Oberflächeneigenschaften äquivalente Schichteigenschaften berechnet werden.

In Abbildung 3 ist der berechnete g-Wert der in den Messungen eingesetzten 2-fach-Isolierverglasung mit aussen liegender, weisser Lamellenbeschattung in Funktion des in Fensterrichtung projizierten Sonnenhöhenwinkels dargestellt. Negative Sonnenhöhenwinkel spielen eine Rolle bei der von unten wirkenden Albedostrahlung.

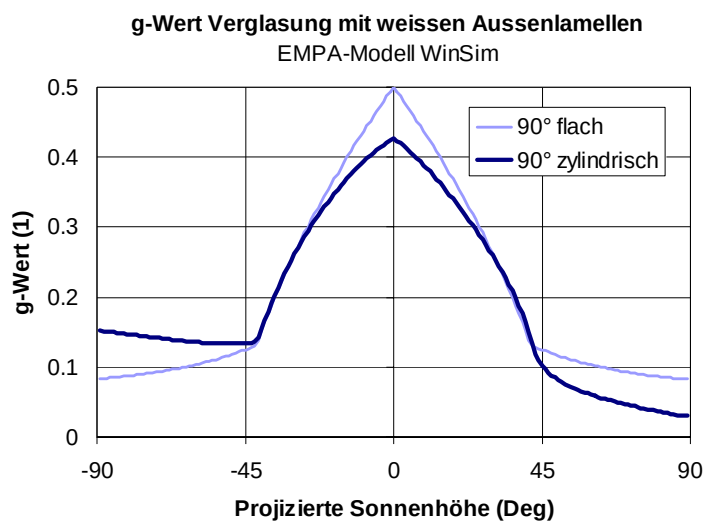


Abbildung 3: Berechneter g-Wert einer 2-fach-Isolierverglasung mit aussen liegender, weisser Lamellenbeschattung (horizontale Stellung) in Funktion der projizierten Sonnenhöhe. Im Vergleich zur flachen Lamelle ergibt die gekrümmte Lamelle einen asymmetrischen Verlauf mit deutlich tieferem g-Wert bei kleinen Einfallswinkeln

VERGLEICH VON MESSUNG UND BERECHNUNG

Aussen liegender Sonnenschutz

Für die Messungen an aussen liegenden Sonnenschutzsystemen wurde eine 2-fach-Isolierverglasung aussenseitig in einen hoch isolierenden Prüfraumen eingebaut und allseitig überlappend mit einer massiven Verbundraffstore in verschiedenen Oberflächenausführungen beschattet (Abbildung 5).

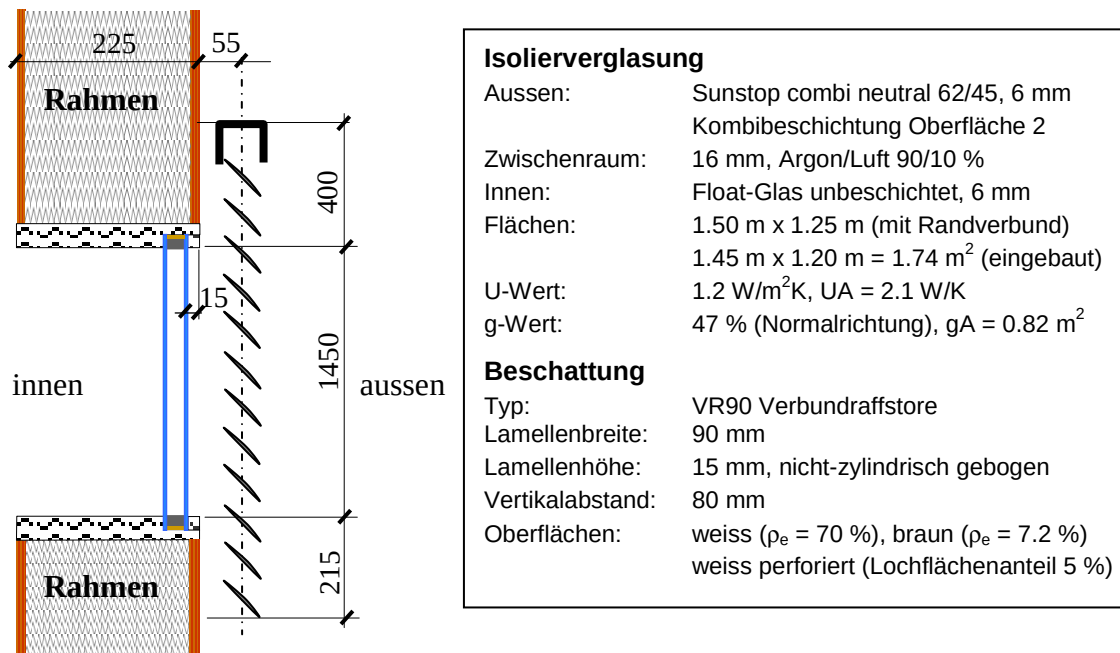


Abbildung 5: Schnitt durch die Testfassade (links), Eigenschaften der Isolierverglasung (oben) und der Aussenbeschattung.

Die Ergebnisse der Auswertungen (Zeitraum März-April 2003) sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Wie erwartet hängt der g-Wert der beschatteten Verglasung stark von der Lamellenstellung und -oberfläche ab. Die weisse Oberfläche ergibt die dynamischsten Eigenschaften: Der g-Wert ist praktisch Null im geschlossenen Zustand, in horizontaler Position dagegen rund 16 %, bedingt durch den Lichtlenkungseffekt der hoch reflektierenden Lamelle. Die braune Lamelle ergibt im geschlossenen Zustand einen Solargewinn von 3-4 %, der auf den hohen sekundären Wärmeﬂuss durch die absorbierende Lamellenschicht zurückgeführt werden kann. In offenen Positionen ist der g-Wert vergleichsweise tief, da kaum reflektierte Strahlung transmittiert wird.

Die Perforierung der weissen Lamelle – um auch in geschlossener Position eine gewisse Durchsicht zu ermöglichen – hat einen minimalen Gesamtenergiedurchlassgrad von etwa 4 % zur Folge. In horizontaler Stellung führen Mehrfachreflexionen am Lochraster dagegen zu einem etwas tieferen g-Wert im Vergleich zur weissen Massivlamelle.

Tabelle 1: Mittlere g-Werte der Isolierverglasung mit verschiedenen Oberflächeneigenschaften der Lamelle.

Lamellenwinkel φ _L (°)	g-Wert (%)		
	weiss	braun	weiss perforiert
0	0.9	3.5	4.0
45	6.7	3.9	7.1
90	15.5	10.0	12.5

Bei den angegebenen g-Werten ist zu beachten, dass es sich um einen Mittelwert im realen Klima handelt, der sich aus einem Direktanteil (über den Sonnengang gemittelt) und einem Diffusanteil zusammensetzt. Die saisonale Abhängigkeit wurde am Beispiel der sensitivsten Konfiguration (weisse Lamelle, horizontale Position) zwischen Mitte März und Mitte Juni überprüft. Die Auswertung ergibt eine Abnahme des g-Werts um ca. 13 % relativ. Der eher geringe Saisoneffekt erklärt sich einerseits durch die Winkelunabhängigkeit des Diffus- und Albedoanteils und andererseits durch den beschränkten Bereich der in Fassadenrichtung projizierten Sonnenhöhe von etwa 40° bis 60°, welcher in der strahlungsintensiven Tageszeit den mittleren g-Wert massgeblich bestimmt.

Für einen Vergleich mit anderen Mess- und Rechenmethoden wurde in der Parameteridentifikation die direkte Komponente der gemessenen Solarstrahlung mit einer winkelabhängigen, aus zwei linearen Teilen zusammengesetzten Funktion in Anlehnung an Abbildung 3 gewichtet [6]. Damit kann der g-Wert für Direktstrahlung bei Normaleinfallswinkel aus den Daten extrahiert werden. Das Ergebnis ist zusammen mit dem berechneten Wert (WinSim) sowie Resultaten des Instituts für Solare Energiesysteme (ISE) [7] in Tabelle 2 zusammengestellt. Insgesamt ergibt sich trotz des nicht-zylindrischen Lamellenprofils eine überraschend gute Übereinstimmung zwischen den verschiedenen Mess- und Rechenmethoden.

Tabelle 2: Vergleich der Ergebnisse verschiedener Mess- und Rechenmethoden zur Bestimmung des Gesamtenergiedurchlassgrads bei senkrechtem Einfall (2-fach-Isolierverglasung mit weissem, aussen liegendem Sonnenschutz in Horizontalstellung).

Methode	Beschreibung	$g_{\text{direkt}} (\varphi_s = 0)$
Aussenmessung EMPA	Parameteridentifikation LORD (winkelabhängig)	44.1 %
Numerisches Modell EMPA	Verglasung+Beschattung (zylindrische Lamelle) Solarband	42.8 %
Labormessung ISE	Kalorimetrische Breitbandmessung mit Solarsimulator	43.2 %
Numerisches Modell ISE	Verglasung+Beschattung (zylindrische Lamelle) Spektrale Integration	42.1 %

Ein Vergleich des mittleren identifizierten g-Werts während einer längeren Messperiode mit berechneten Werten ist nicht ganz einfach, da die räumliche Verteilung der nicht-direkten Strahlung ist nicht bekannt ist. Dies zeigte sich visuell deutlich bei der weissen Lamelle, bei der in 45°-Stellung deutlich mehr Tageslicht in den Testraum gelangte als in Horizontalstellung. Der relativ stark reflektierende hellgraue Betonbelag vor der Testfassade zeigte sich als dominante Komponente im nicht-direkten Strahlungsanteil. Die Annahme einer diffusen Strahlungsverteilung im Modell ergibt somit einen zu hohen mittleren g-Wert. Mit einer Gewichtung von Albedo- zu Diffusstrahlung für sonnige Tage von drei zu eins ergibt sich eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung mit den realen Klimadaten im Rahmen der Messunsicherheit (Tabelle 3).

Tabelle 3: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten mittleren g-Werten eines aussen liegenden Sonnenschutzes vor 2-fach-Isolierverglasung.

Lamellenposition	g-Wert	
	Aussenmessung	Berechnung WinSim
VR 90 weiss, horizontal	16 %	20 % diffus
		17 % gewichtet
VR 90 braun, horizontal	10 %	12 % diffus
		9 % gewichtet

Raumseitiger Sonnen- / Blendschutz

Weitere Untersuchungen wurden an einem raumseitigen weissen Lamellen-Sonnen-/Blendschutz ($\rho_e = 71\%$, $s = 25\text{ mm}$, $d = 2\text{ mm}$, $h = 22\text{ mm}$) durchgeführt. Für die Messungen wurde dieselbe Isolierverglasung wie vorher raumseitig in die Testfassade eingebaut. Neben den g-Werten war eine zusätzliche Fragestellung, wie stark die Wärmeabgabe an den Raum durch die Einbausituation des Sonnenschutzes beeinflusst würde. Dazu wurde ein maximal abgeschirmter mit einem voll belüfteten (frei hängenden) Einbau verglichen (Abbildung 6). Die Ergebnisse sind zusammen mit den gewichteten Mittelwerten des Berechnungsmodells (Kap. 2) in Tabelle 4 zusammengestellt.

Allgemein ist die Übereinstimmung zwischen den gemessenen und den gewichteten berechneten g-Werten gut. Wie verschiedene Auswertevarianten zeigen, können die etwas tieferen g-Werte der Messungen auf Leibungseffekte zurückgeführt werden.

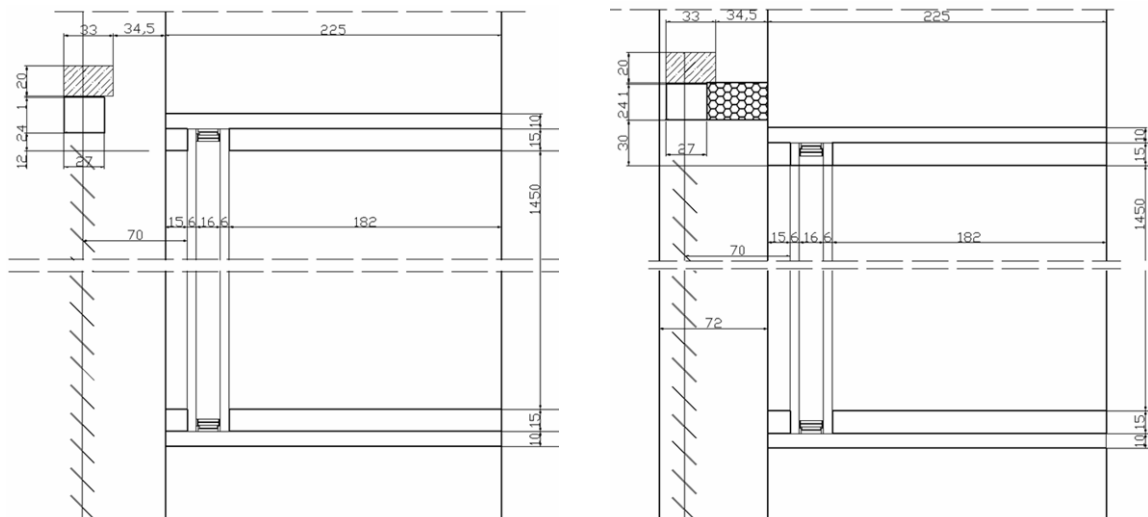


Abbildung 6: Schematischer Vertikalschnitt durch die Testfassade mit eingebauter Isolierverglasung und raumseitigem Sonnenschutz. Links ist die Luftströmung seitlich und oben blockiert, rechts ist der Sonnenschutz frei an die Decke gehängt.

Die Ergebnisse zeigen, dass die maximale konvektive Abschirmung des Sonnenschutzes in diesem Beispiel den g-Wert absolut um etwa 2 % senkt. Trotzdem liegen die Solargewinne mit einem raumseitigen Sonnenschutz im allgemein über dem unkritischen Bereich und erfordern eine wirksame Sonnenschutzverglasung oder einen zusätzlichen aussen liegenden Sonnenschutz.

Tabelle 4: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten mittleren g-Werten einer Isolierverglasung mit raumseitigem Sonnenschutz (Einzelheiten im Text)

Lamellenposition	g-Wert	
	Aussenmessung	Berechnung WinSim
Ohne Beschattung	39 %	41 %
Horizontal	32 %	33 %
45°	28 %	28 %
Geschlossen (ca. 20°) Maximale freie Konvektion	25 %	26 %
Geschlossen (ca. 20°) Blockierte Konvektion	23 %	24 %

ZUSAMMENFASSUNG

Insgesamt darf aus den verschiedenen Vergleichsergebnissen geschlossen werden, dass das Fassadenmodell WinSim den solaren Strahlungs- und Wärmetransport von Verglasungen mit aussen liegender oder raumseitiger, diffus reflektierender Lamellenbeschattung im realen Aussenklima mit ausreichender Genauigkeit wiedergibt [8]. Grössere Abweichungen können auftreten, falls die Verteilung der einfallenden Solarstrahlung stark von den Annahmen im Modell (direkt / diffus) abweicht. Aussagen zur Anwendbarkeit in mehrschichtigen Glasfassaden mit integrierter Beschattung folgen im nächsten Kapitel.

Glasdoppelfassade mit integriertem Sonnenschutz

Die Strömungsverhältnisse und deren Einfluss auf das Temperatur- und Energiedurchlassverhalten wurde an einer mehrschichtigen, belüfteten Glasdoppelfassade ("Doppelfassade") ohne Rahmenkonstruktion untersucht. Dazu wurden Messungen an unterschiedlichen Konfigurationen mit mechanischer und natürlicher Belüftung durchgeführt und mit Modellrechnungen verglichen. Die Berechnung der Strömungsverhältnisse durch ein validiertes thermisch-fluiddynamisches Modell liefert insbesondere die thermische Belastung eines Raums hinter der Fassade und erlaubt die Übertragung auf unterschiedliche Betriebszustände.

ABLUFTFASSADE

In einer ersten Messreihe wurde eine Abluftfassade untersucht, bei der die Raumluft mechanisch durch die Fassade abgesaugt wird [11]. Der Schichtaufbau (Abbildung 7) besteht aus einer äusseren Isolierverglasung mit Sonnenschutzglas und einem inneren Einfachglas mit einer Niedrigemissionsbeschichtung und Belüftungsöffnungen unten und oben. Im dazwischen liegenden Luftraum befindet sich ein textiler Sonnenschutz mit metallisierter Aussenoberfläche.

Das Doppelfassadenelement wurde in einen hoch isolierten Prüfraum im EMPA Solarprüfstand eingebaut. Die optischen Schichteigenschaften (Tabelle 5) wurden spektral gemessen und entsprechend EN 410 [3] mit dem Solarspektrum gewichtet.

Während der Messzeit wurden in einem Zeitintervall von einigen Minuten alle relevanten Luft- und Oberflächentemperaturen, Solarstrahlungs- und weitere Klimadaten sowie Heiz- und Kühlleistung im thermisch isolierten Testraum erfasst.

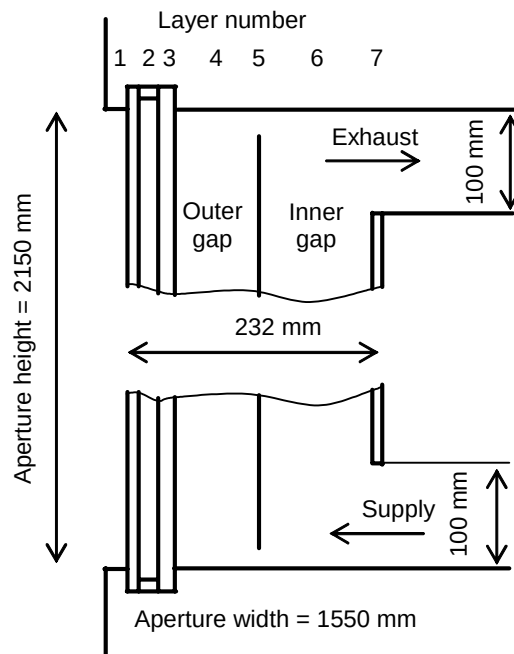


Abbildung 7: Vertikalschnitt durch die Doppelfassade mit dazwischen liegendem Sonnenschutz. Der Sonnenschutz wurde oben und unten mit je 20 mm Belüftungsöffnung eingebaut. Das Innenglas hat unten und oben Zu-/Abluftöffnungen von 100 mm Höhe auf der ganzen Breite.

Schicht Nummer	Bezeichnung	Dicke (mm)	Emissionsgrad aussen (-)	Emissionsgrad innen (-)	Solarer Reflexionsgrad aussen (-)	Solarer Reflexionsgrad innen (-)	Solarer Transmissionsgrad (-)	Solarer Absorptionsgrad (-)
1	Sonnen-/Wärmeschutz-Glas	10	0.89	0.05	0.32	0.39	0.39	0.33
2	90% Argon / 10% Luft	18	-	-	-	-	-	-
3	Laminiertes ESG	14	0.89	0.89	0.07	0.07	0.78	0.03
4	Luft	70	-	-	-	-	-	-
5	Metallisierte Stoffstore	1	0.51	0.81	0.48	0.46	0.09	0.17
6	Luft	113	-	-	-	-	-	-
7	Wärmeschutz-Glas	6	0.22	0.86	0.11	0.09	0.68	0.004

Tabelle 5: Schichteigenschaften der Doppelfassade (optische Daten für Normaleinfallswinkel).

In einer detaillierten Analyse wurde das instationäre thermisch-fluidmechanische Gleichungssystem (Wärmeleitung und -strahlung, Navier-Stokes-Gleichungen für Masse, Impuls und Energie im Strömungsfeld) mit Hilfe des Softwaretools FLOVENT 3.2 [12] modelliert. Dieser Code basiert auf einer "finite-volume"-Methode mit rechteckigem Gitter und verwendet das k- ϵ Turbulenzmodell sowie logarithmische Wandfunktionen. Aufgrund der uniform angenommenen Schichtabsorptionen und der geringen Randeffekte wurden die Berechnungen aus Zeitgründen 2-dimensional durchgeführt.

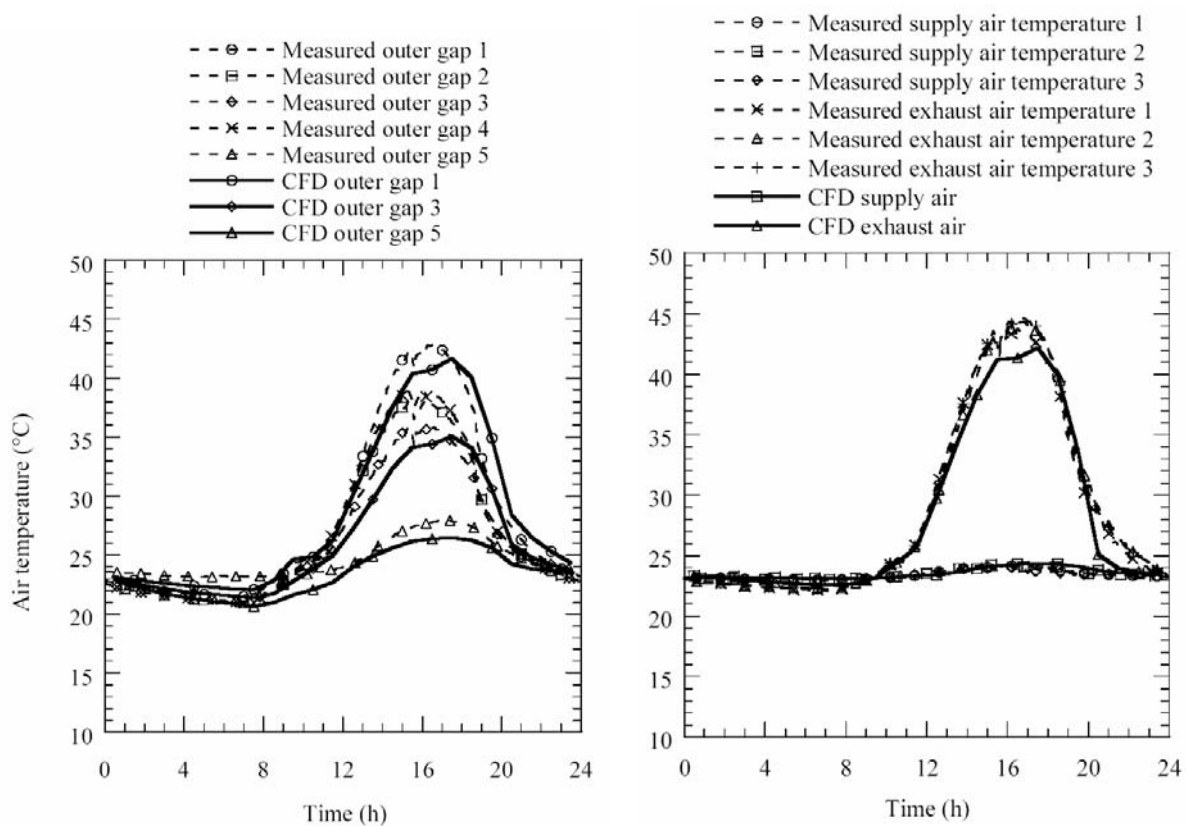


Abbildung 8: Vergleich der gemessenen und berechneten Temperaturschichtung im äusseren Luftzwischenraum der Abluftfassade während eines sonnigen Tages [11].

Für den Vergleich zwischen Messung und Berechnung wurden Messdaten von zwei sonnigen Tagen im Frühherbst 2002 gewählt (Solarstrahlung bis 800 W/m^2 , Lufttemperatur bis 28°C). Die Temperatur in der Testzelle war ca. 24°C . Der Luftvolumenstrom im Luftzwischenraum lag bei $60 \text{ m}^3/\text{h}$ (ca. 100-facher Luftwechsel) für die beiden Konfigurationen mit Strömungsrichtung nach oben bzw. nach unten.

Als Beispiel der Auswertung zeigt Abbildung 8 die Temperaturen im äusseren Luftzwischenraum und in den Zuluft-/Abluftöffnungen mit Strömungsrichtung nach oben. Die Sensorpositionen 1-3 im Luftspalt sind in der Mittelsenkrechten des Elements vertikal übereinander unten (no. 1), in der Mitte (no. 2) und oben (no. 3). Die berechneten Werte werden durch unterschiedliche Zeitschritte und nicht exakt erfasste Speichereffekte etwas geglättet. Insgesamt wird der Verlauf der Temperaturen durch die Berechnung jedoch gut wiedergegeben.

Eine Gesamtbilanz der Strahlungsdurchgangs und der Wärmeströme ist in Abbildung 9 dargestellt. Durch den hohen Absorptionsgrad der mehrschichtigen Fassade gelangt nur 3 % der Solarstrahlung direkt in die Testzelle. Die effiziente Wärmeabfuhr im Luftzwischenraum beschränkt den sekundären Wärmeabgabegrad auf 4 % in der Konfiguration mit Fassadenbelüftung nach oben, also parallel zur Auftriebsrichtung. Bei Belüftungsrichtung nach unten steigt jedoch der sekundäre Wärmeabgabegrad auf rund 12 %, da die mechanische Belüftung gegen die Auftriebsströmung arbeitet und sich dadurch eine Zweiwegströmung mit Rückströmung erwärmter Luft nach oben in den Raum einstellt. Dieser Effekt bei starker Sonneneinstrahlung zeigte sich sowohl direkt durch Visualisierung während der Messung als auch in der CFD-Simulation. Die Verdreifachung des sekundären Wärmegewinns in der Fassade äussert sich in einer wesentlich höheren thermischen Belastung des Raums, welche oft eine Überschreitung von Grenzwerten in Bezug auf den thermischen Komfort zur Folge hat.

Der Gesamtenergiedurchlassgrad der Fassade steigt bei entgegen gesetzter Belüftungsrichtung von rund 7 % (nach oben) auf rund 15 % (nach unten) und überschreitet damit deutlich die Empfehlung $g < 10 \%$ für hoch verglaste Gebäude [1]. Wird der konvektive Wärmetransport im belüfteten Zwischenraum anhand von ISO 15099 [4] berechnet (Annahme Kolbenströmung), ergibt sich ein sekundärer Wärmeabgabegrad von rund 8 % bzw. ein g-Wert von etwa 11 %. Diese Werte für "schwerelose" Luft liegen also zwischen den genaueren Resultaten für die günstige bzw. ungünstige Belüftungsrichtung.

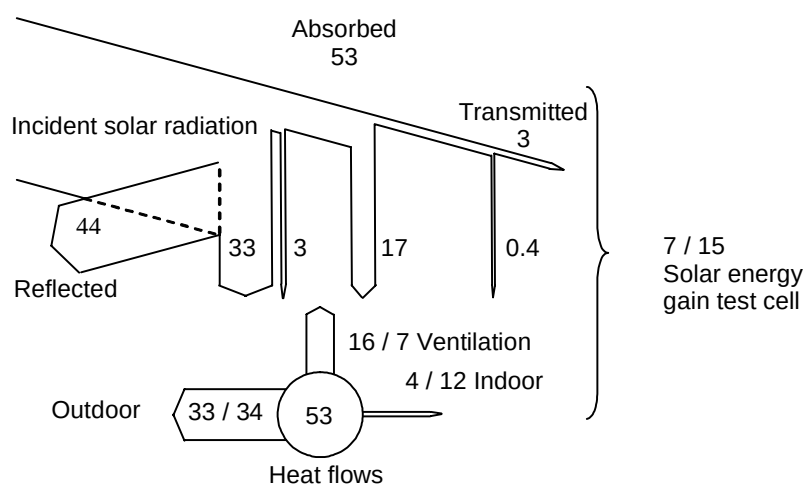


Abbildung 9: Berechnete Solarstrahlungs- und Energiebilanz in Prozent bei ungefähr senkrechter Einstrahlung für mechanische Belüftung nach oben/unten (aus [11]).

NATÜRLICH BELÜFTETE DOPPELFASSADE

Weitere Messungen und Berechnungen wurden für die häufigere Konfiguration einer Glasdoppelfassade mit raumseitiger Isolierverglasung, natürlich belüftetem Luftzwischenraum mit Sonnenschutz und äusserer Einfachverglasung durchgeführt [13]. Experimentell wurde diese Situation mit den gleichen Komponenten wie vorher durch Vertauschen der beiden Glaskomponenten in Abbildung 7 realisiert.

Der Einfluss der Belüftung ist in Abbildung 10 dargestellt. Neben der Wichtigkeit einer guten äusseren Belüftung (markante Absenkung des g-Werts bis zu Öffnungshöhen von etwa 5 cm unten/oben) ist auch der starke Einfluss einer zusätzlichen Hinterlüftung des Sonnenschutzes zu erkennen. Diese ist bei (nicht vollständig geschlossener) Lamellenbeschattung durch die Luftdurchlässigkeit der Lamellenebene gegeben, kann jedoch bei Rollos (insbesondere oben) eingeschränkt sein.

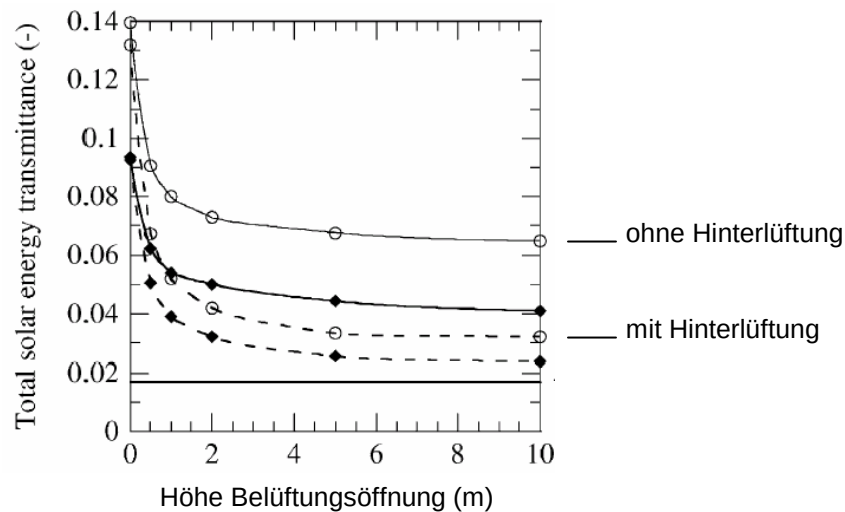


Abbildung 10: Einfluss von Belüftungshöhe und Hinterlüftung (0 / 2 cm) des Sonnenschutzes auf den g-Wert einer Doppelfassade (aus [13]).

Es stellt sich die Frage, wie weit ein vereinfachtes Strömungsmodell wie WinSim (ISO 15099) Belüftungseffekte bei integrierter Beschattung korrekt wiedergibt. Vergleichszahlen des sekundären Wärmeabgabegrads für das obige Beispiel enthält die folgende

Tabelle 6

Belüftungsöffnung	Sekundärer Wärmeabgabegrad			
	Ohne Hinterlüftung		Mit Hinterlüftung	
	CFD	WinSim	CFD	WinSim
0 cm	0.122	0.118	0.115	0.113
1 cm	0.063	0.087	0.035	0.051
2 cm	0.057	0.078	0.025	0.039
5 cm	0.050	0.067	0.016	0.036
10 cm	0.048	0.059	0.015	0.034

Der Einfluss der Belüftung der benachbarten Luftschichten auf den sekundären Wärmeabgabegrad wird im vereinfachten Modell im Prinzip richtig erfasst, die Werte liegen jedoch systematisch rund 1 – 2 % höher. Entsprechend höher sind die berechneten g-Werte.

ZUSAMMENFASSUNG

Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass vereinfachte Strömungsmodelle zu einer Unterschätzung der sekundären Wärmegewinne in Glasdoppelfassaden führen können. Dies gilt insbesondere für mechanisch belüftete Systeme mit integrierter Beschattung oder allgemeiner für Konfigurationen mit komplexen Strömungsfeldern wie grosse (z.B. stockwerkübergreifende) Lufträume, Atrien usw.

Bei vergleichsweise einfachen Konfigurationen mit natürlicher Belüftung des Sonnenschutzes scheinen die vereinfachten Ansätze Ergebnisse zu liefern, die nicht allzu weit von genaueren Berechnungen abweichen.

Rechenmodule für Glasfassaden mit Beschattung

GLASFASSADE MIT BESCHATTUNG

In einer internen Version (Eingabedaten in Textdateien) steht das Rechenmodul **WinSim** zur Verfügung. Darin werden Strahlungs- und Wärmetransport durch eine beschattete Glasfassade für eine Reihe von Klimadatenätzen berechnet.

Das optische Berechnungsmodul von WinSim wurde in eine Entwicklungsversion der EMPA-Glasdatenbank GLAD eingebaut. Diese Version **GLAD-WinSim** berechnet den Strahlungsdurchgang durch eine Verglasung mit Beschattung spektral und gibt integrale Transmissions- und Reflexionsdaten für die Wellenlängenbereiche UV, solar und visuell aus (Abbildung 11).

The screenshot displays the GLAD-WinSim software interface. The main window is titled 'Glasdatenbank Administrator'. It features a menu bar with options like 'Datei', 'Bearbeiten', 'Ansicht', 'Format', 'Datensätze', and 'Fenster'. Below the menu bar is a toolbar with various icons. The main area is divided into several sections:

- Optics:** Includes a 'Norm. Berech.' button and a 'Norm. Berech.' label.
- Bemerkung:** A text field for notes.
- LW:** A dropdown menu set to '45'.
- AZ:** A dropdown menu set to '399'.
- EL:** A dropdown menu set to '399'.
- Breite:** A text field set to '1200'.
- Höhe:** A text field set to '1200'.
- Beschattung:** A section with two rows of input fields for 'Beschattung aussen' and 'Beschattung innen'. Each row includes a 'Beschattung' dropdown, a 'Typ' dropdown, and a 'Dicke [mm]' text field.
- Verglasung:** A dropdown menu set to '2V'.
- Lamellen:** A section with a 'Lamelle weiss 010' dropdown, a 'Hersteller' text field, a 'Bemerkung' text field, and an 'Attest' text field.
- Wärmeleitfähigkeit:** A text field set to '0.9'.
- Beschichtungsart:** A dropdown menu set to 'unbeschichtet'.
- normales Epsilon:** A text field set to '90'.
- IR:** A text field set to '90'.
- Berechnete Kennwerte aus den Spektraldaten:** A section with a 'Norm' dropdown and a 'Reflexion: [%]' text field.
- Spektrum:** A section with a 'Transmiss.: [%]' text field and a 'Reflexion: [%]' text field.
- Solar:** A text field set to '74.2'.
- Sichtbar:** A text field set to '83.7'.
- UV:** A text field set to '8.4'.
- blind_s:** A text field set to '90'.
- blind_h:** A text field set to '80'.
- blind_d:** A text field set to '15'.

At the bottom of the interface is a table with the following columns: 'konfig', 'Az', 'Was', and a series of numerical values for different wavelengths (0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90). The table contains 10 rows of data, each representing a different configuration.

Abbildung 11: GLAD-WinSim mit Ein-/Ausgabedaten für eine Lamellenbeschattung.

Mit GLAD-WinSim kann auch ein Textfile mit winkelabhängigen Daten erzeugt werden, die für ein vorgegebenes Raster von Winkeln berechnet werden. Winkelparameter sind Sonnenhöhe, Sonnenazimut und Kippwinkel der Lamelle. Diese Version musste noch auf der Basis der bisherigen Datenbank-Applikation in MS Access 2.0 realisiert werden, da zurzeit keine Ressourcen für eine Portierung in die aktuelle Access-Version zur Verfügung stehen. GLAD-WinSim wird deshalb vorerst nicht nach aussen abgegeben.

KOPPLUNG FASSADE-GEBÄUDE

Das winkelabhängige Glasfassadenmodell wird im Rahmen der aktuellen Gesamt-Überarbeitung (BFE-Projekt Nr. 100'488) in das Programm HELIOS eingebaut. Eine entsprechende Testversion wird voraussichtlich bis Mitte 2005 verfügbar sein.

Die Integration eines Fenstermodells in Trnsys, das die winkelabhängigen Daten von GLAD-WinSim verarbeitet, ist zurzeit in Bearbeitung und wird ebenfalls im 1. Halbjahr 2005 abgeschlossen sein. Das Fenstermodell wurde als eigenständiger Type 230 "NewWindow" realisiert. Das Multizonen-Gebäudemodell von Trnsys, Type 56, und das Fenstermodell tauschen Daten über Inputs und Outputs aus (Abbildung 12). Diese Verknüpfungen werden im übergeordneten Modellbeschrieb (Trnsys Deck) definiert. Der Datenaustausch und das thermische Fenstermodell sind in Anhang 4 näher beschrieben.

Der Type 230 benötigt drei Files zur Beschreibung des Fensters (Abbildung 12): Konfigurationsdaten und zugehörige optische und thermische Basisdaten des Fensters werden mit dem GLAD Transfer File aus einer vorgängigen GLAD-WinSim Berechnung übernommen. Geometrie und tatsächliche Abmessungen des Fensters werden in einem weiteren File abgelegt. Das dritte File enthält Basiskoeffizienten zur Berechnung der thermischen Kennwerte der verwendeten Gasmischungen. Dieses File ist für alle Fenster dasselbe.

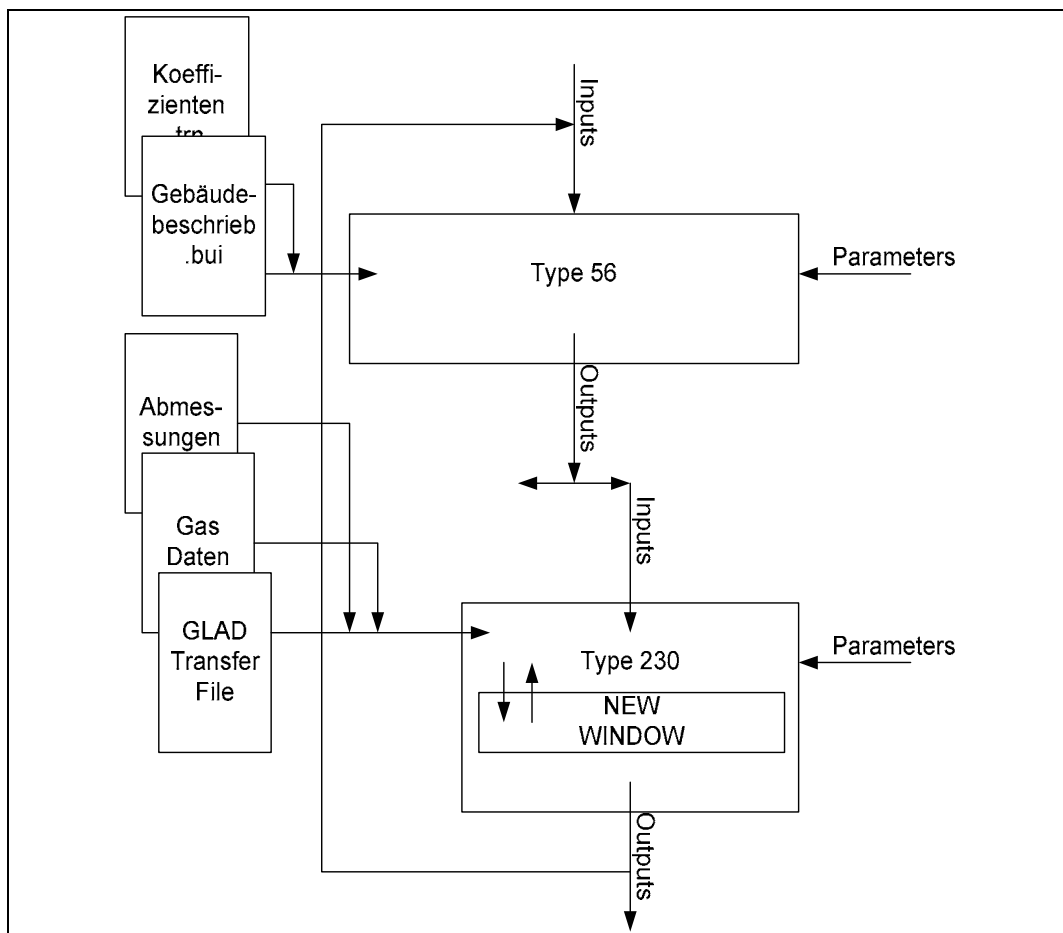


Abbildung 12: Schema des Datenflusses bei der Einbindung des neuen Fenstermodells Type 230 in Trnsys.

Zur vereinfachten Beurteilung des thermischen Verhaltens einer Zone wurde ein Rechenmodell erstellt, in dem das winkelabhängige Fassadenmodell WinSim mit einem thermischen Netz gekoppelt wird, das die wesentlichen Einflüsse wie Speichermassen, Wände gegen konstantes Klima und gegen Aussenklima, Kühl- und Heizleistung, interne Lasten und Luftwechsel beinhaltet (Abbildung 13).

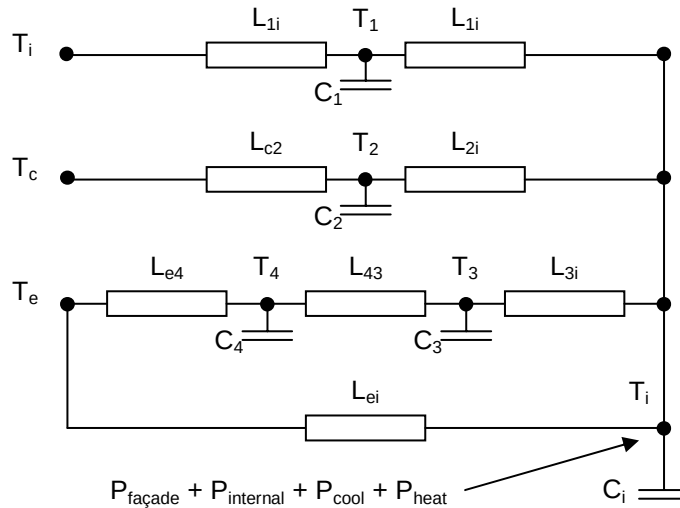


Abbildung 13: Vereinfachtes Netzwerkmodell zur Kopplung einer thermischen Zone mit dem Fassadenmodell WinSim.

Eingabegrößen in einem Textfile sind die Wärmekapazitäten C und die thermischen Leitwerte L . Die Temperaturen T_1 (Speichermasse), T_2 (Wand gegen konstante Temperatur T_c), T_3 und T_4 (Aussenwand) sowie die Innenlufttemperatur T_i werden in Halbstundenintervallen durch ein Einschrittverfahren 2. Ordnung berechnet. Klimadaten werden als Textzeilen in der Form Monat, Tag, Stunde, Aussentemperatur (T_e), Globalstrahlung horizontal (G_h), Diffusstrahlung horizontal (D_h), Direktstrahlung normal (B_n), relative Luftfeuchtigkeit (rH) und Windgeschwindigkeit (v_w) verarbeitet. Für die Berechnung der Diffusstrahlung auf die Fassadenebene wird zurzeit ein vereinfachter Ansatz nach [14]

$$D_{\text{Fassade}} = \frac{1}{2} [D_h (1 + \sin(\gamma_F)) + G_h A (1 - \sin(\gamma_F))] \quad (2)$$

mit dem Höhenwinkel der Flächennormale γ_F und dem Albedo A benutzt.

Um die Kopplung einer winkelabhängig modellierten beschatteten Fassade mit hohem Glasanteil und einer Raumzone zu illustrieren wurden unterschiedliche Beschattungstypen und -regelungen anhand der vorher beschriebenen 2-fach-Isolierverglasung mit dem Netzwerkmodell untersucht [9]. Als Klimadatensatz wurde das Design Reference Year (DRY) für Zürich-Kloten aus MeteoNorm 4.0 [10] verwendet. Die Albedo A in Gl. (2) wurde auf 0.2 gesetzt. Als Raum wurde ein Büroraum mit einer Aussenwand (Aussenisolation), Boden/Decke (Beton) und Seitenwände (Backstein) gegen gleiche Nachbarräume (adiabatisch) und Rückwand gegen konstante Temperatur angenommen. Die Raumdaten (vgl. Abbildung 13) sind Tabelle 7 zusammengestellt.

Tabelle 7: Raumdaten und Randbedingungen für das Beispiel einer Raumzone mit angekoppelter Glasfassade einschliesslich winkelabhängiger Beschattung.

Beschreibung	Grössen	Einheiten	Werte
Raumvolumen	C_i, L_i	Wh/K, W/K	199.0, 5.0
Seitenwände Decke/Boden	C_1, L_{1i}	Wh/K, W/K	7853.0, 369.0
Rückwand ($T_c = 22^\circ\text{C}$)	C_2, L_{2i}, L_{c2}	Wh/K, W/K, W/K	573.0, 44.1, 44.1
Aussenwand (innen)	C_3, L_{3i}, L_{43}	Wh/K, W/K, W/K	651.0, 34.7, 5.77
Aussenwand (ausser)	C_4, L_{e4}	Wh/K, W/K	8.78, 5.81
Raumgeometrie	$l \times b \times h$	m^3	6 x 5 x 3
Fläche Glasfassade	A_F	m^2	5.0 x 1.5
Heiz-/Kühlgrenze	$T_{\min}, T_{\max}$	$^\circ\text{C}, ^\circ\text{C}$	20.0, 26.0
Aussenluftstrom (7 – 19, 20 – 6 h)	$V_{\text{Tag}}, V_{\text{Nacht}}$	$\text{m}^3/\text{h}, \text{m}^3/\text{h}$	27.0, 27.0
Interne Wärmequellen (Mo-Fr 8 – 18 h, sonst)	$Q_i \text{ Arbeit}, Q_i \text{ sonst}$	W, W	300.0, 50.0

Als Basisbeispiel sind in Abbildung 14 aus Stundenwerten berechnete, gewichtete Tageswerte von Gesamtenergiedurchlassgrad und Solargewinn durch die Glasfassade mit der aussen liegenden weissen Lamellenstore (horizontal) in Süd- und Westorientierung dargestellt. Im Sommer ist der Solargewinn in Südorientierung geringer als in Westorientierung, im Winter umgekehrt. Das zeigt sich auch in den maximalen Tages-temperaturen von Innenluft und Innenoberfläche (Abbildung 15). Die Glastemperatur steigt in Westorientierung auf über 30°C , während sie in Südorientierung im Wesentlichen unter 28°C bleibt.

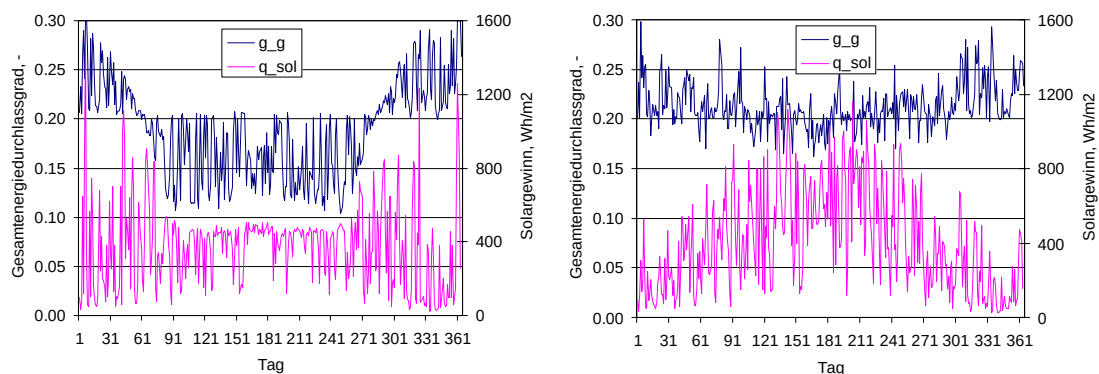


Abbildung 14: Tagesgang des Gesamtenergiedurchlassgrads (g_g) und des Solareintrags (q_{sol}) der Fassade mit horizontaler Lamellenbeschattung (weiss) in Südorientierung (links) und Westorientierung (rechts).

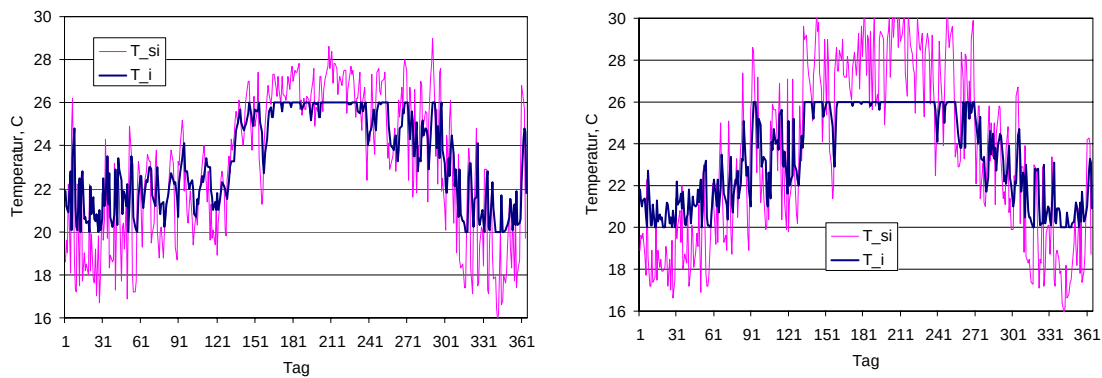


Abbildung 15: Tagesmaxima der Temperaturen von Raumluft (T_i) und Innenoberfläche der Verglasung (T_{si}) in Südorientierung (links) und Westorientierung (rechts).

Charakteristische Unterschiede der Transmissionseigenschaften zeigt Abbildung 16. In Südorientierung fällt der gewichtete monatliche globale g-Wert von rund 0.28 im Winter auf unter 0.15 im Sommer. Dies vor allem infolge des stark abfallenden Transmissionsgrads für Direktstrahlung (< 0.03), gewichtet mit der Direktstrahlung in Fassadenebene. In Westorientierung bleibt der g-Wert fast konstant und liegt auch im Sommer bei über 0.20. Der Transmissionsgrad für Direktstrahlung fällt nur im Juni unter 0.15.

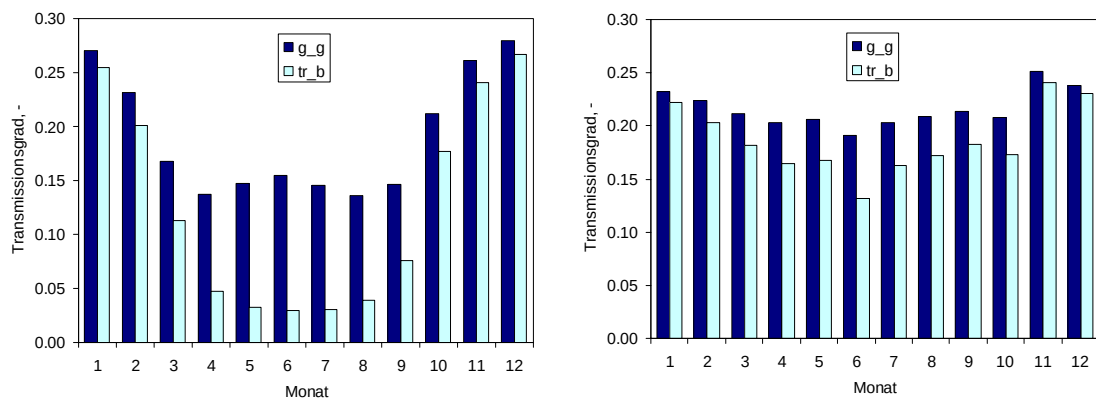


Abbildung 16: Gesamtenergiedurchlassgrad bezogen auf die einfallende Globalstrahlung (g_g) und solarer Transmissionsgrad für Direktstrahlung (tr_b) in Südorientierung (links) und Westorientierung (rechts).

Für den Lamellenwinkel 45° sind die Unterschiede zwischen den mittleren g-Werten in Süd- und Westorientierung im Sommer gering. Sie liegen bei rund 0.10 bei konstanter Beschattung. Erfolgt die Aktivierung der Beschattung für Werte der Globalstrahlung G_v ab 150 W/m^2 , liegen die Werte bei etwa 0.15.

Vor allem in Westorientierung fallen bei horizontaler Lamellenstellung erhebliche Kühllasten an. Abbildung 17 zeigt den monatlichen Heiz-/Kühlenergiebedarf mit weißer horizontaler Lamellenbeschattung im Vergleich zu einer weniger reflektierenden beige Lamelle (Reflexionsgrad $\rho_e = 0.33$) in 45° -Stellung. Die Beschattung wird jeweils für G_v ab 150 W/m^2 aktiviert. Durch die bessere Beschattung steigt zwar der Heizenergiebedarf wegen reduzierter Solargewinne im Winter von 46 auf 58 MJ/m^2 . Der Kühlenergiebedarf nimmt jedoch von 39 auf 7 MJ/m^2 ab. Die Innenlufttemperatur erreicht ohne Kühlung noch maximal rund 29°C . Auswirkungen auf die Tageslichtverhältnisse und Beleuchtungsenergie werden hier nicht einbezogen.

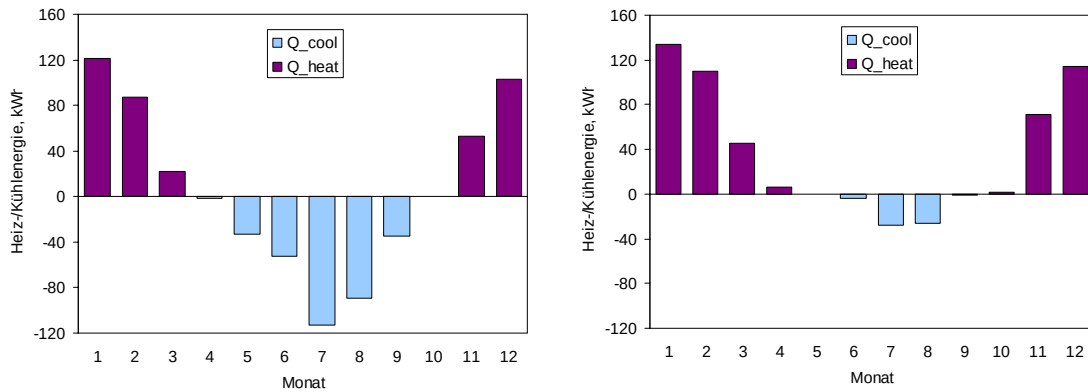


Abbildung 17: Monatlicher Heiz-/Kühlenergiebedarf für die Westorientierung mit Beschattung ab 150 W/m^2 Globalstrahlung. Links weisse horizontale Lamellen, rechts beige Lamellen in 45°-Stellung.

Wird die Fassade im vorherigen Beispiel (Westorientierung, 2-fach-Isolierverglasung, Lamellen beige, 45°) durch ein Einscheiben-Sicherheitsglas nach aussen abgeschlossen, ändert sich die Situation markant (Abbildung 18). Für diese Doppelhautkonstruktion mit integrierter Beschattung ergeben sich ähnlich grosse Kühllasten (40 MJ/m^2) wie für die einfache Fassade mit weisser horizontaler Beschattung. Die Solargewinne fallen jedoch überwiegend in Form von sekundärer Wärme an, die im Bereich der Beschattung erzeugt wird. Es entstehen hohe Temperaturen im ganzen Schichtaufbau mit Temperaturmaxima auf der Glasinnenoberfläche von über 36°C . Neben dem grossen Kühlenergiebedarf ist mit thermischen Komfortproblemen zwischen April und September zu rechnen. Ein positiver Aspekt ist der reduzierte Heizenergiebedarf durch die Kollektorwirkung der Fassade.

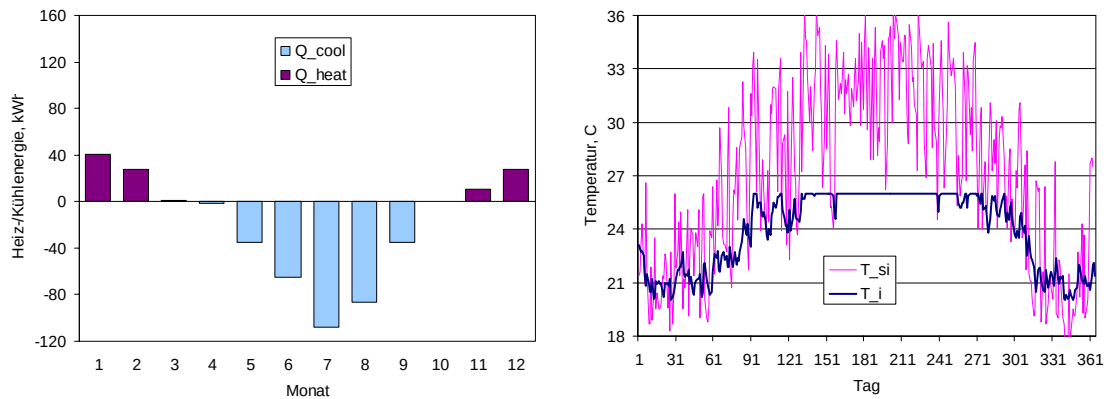


Abbildung 18: Monatlicher Heiz-/Kühlenergiebedarf (links) und Tagesmaxima der Temperaturen von Raumluft und Glasinnenoberfläche einer Glasdoppelhaut mit integriertem Sonnenschutz (unbelüftet).

Natürliche Belüftung der äusseren Glasfläche verbessert die Situation. Mit Öffnungsweiten im Aussenglas von 3 cm unten und oben sinkt aufgrund des vereinfachten Strömungsmodells der mittlere g-Wert in der Sommerperiode von etwa 0.17 auf 0.13, und die maximale Temperatur auf der Innenoberfläche der Glasfassade erreicht noch gut 31°C .

Im Kapitel **Glasdoppelfassade** wurde gezeigt, dass das vereinfachte konvektive Wärmetransportmodell, welches hier verwendet wurde, bei mechanisch belüfteten Glasdoppelfassaden mit integrierter Beschattung zu grösseren Abweichungen führen kann. Diese Klasse von Fassaden oder allgemein komplexe Fassaden- und Gebäudekonzepte sollten daher in einem mehrstufigen Prozess untersucht werden [15].

ZUSAMMENFASSUNG

Das optische Modell von WinSim für beschattete Glasfassaden wurde in die EMPA-Glasdatenbank GLAD eingebaut. Die Transmissionsgrade für Solarstrahlung und Tageslicht können nun in Funktion der Sonnenposition, Lamellenstellung und Fassadenorientierung berechnet werden. Die optischen Daten werden für ein Raster von Sonnenpositionen in einem Textfile gespeichert.

Für einfache Situationen wurde ein Programmmodul erstellt, in dem das Fassadenmodell mit einem thermischen Netzwerk gekoppelt ist. Die Berechnungsbeispiele einer beschatteten Glasfassade in einem Jahresklima zeigen, dass in Abhängigkeit von optischen Eigenschaften, Konstruktion, Fassadenorientierung, Stellung/Steuerung der Beschattung und Tages-/Jahreszeit sehr unterschiedliche Gesamtenergiedurchlassgrade und solare Wärmegewinne auftreten. Die Einbindung eines physikalischen Fassadenmodells wie WinSim in die Gebäudesimulationsprogramme HELIOS und Trnsys wird es erlauben, Kühlenergie- und Kühlleistungsbedarf sowie thermische Komfortbedingungen in hoch verglasten Gebäuden in Abhängigkeit der Fassadenkonstruktion und der Steuerung der Beschattung zu optimieren.

Transparente Wärmedämmung

Solare Wandheizung mit Hilfe von transparenter Wärmedämmung (TWD) auf opaken Aussenwandkonstruktionen ist seit längerer Zeit bekannt als effektives Konzept zur Verminderung des Heizenergiebedarfs [16] vor allem von Wohnbauten. Für die Berechnung der Wärmegewinne werden primär monatliche Bilanzverfahren vergleichbar zu Fenstern verwendet. Die Bauteileigenschaften wie g- und U-Werte werden gewöhnlich aus einfachen Kennwerten für ein 1-dimensionales Schichtsystem berechnet. Als g-Wert wird oft der Wert für diffus-hemisphärische Strahlung eingesetzt. In der Norm EN ISO 13790 [17] werden (kleine) monatliche Korrekturen vorgeschlagen [18]:

$$g_{TI,j,m} = g_{TI,h} - c_{j,m} g_{TI,n}$$

(3)

Der hemisphärische Wert $g_{TI,h}$ wird dabei durch den Wert bei Normaleinfallsrichtung $g_{TI,n}$ multipliziert mit einem Gewichtungsfaktor $c_{j,m}$, welcher von der Orientierung j und dem Monat m abhängt. Die rechnerisch bestimmten, tabellierten Werte $c_{j,m}$ erreichen für Südorientierung betragsmässig ca. 0.1, für Südwest/Südost noch etwa ein Drittel davon.

Trotz dieser recht detaillierten Berücksichtigung winkelabhängiger Eigenschaften ist wenig bekannt über die tatsächliche Leistung eines eingebauten TWD-Elements im Aussenklima. Verschiedene Einbaueffekte können den theoretischen U- und g-Wert beeinträchtigen: Wärmeverluste durch die Rahmenkonstruktion, konvektiven Wärmetransport im Modul, Luftaustausch mit der Umgebung, Eigenbeschattung im Rahmenbereich.

Im Rahmen des IEA-Projekts wurden an der EMPA verschiedene Messungen zur Leistungsbestimmung von TWD-Systemen im Aussenklima (Solarprüfstand) durchgeführt. An einem "Referenzsystem" mit thermisch getrenntem Alu-Rahmen und integrierem Absorber wurden verschiedene Einbaueffekte untersucht [19]. Bei zwei weiteren Systemen wurden die Sommer-/Wintereigenschaften messtechnisch untersucht.

UNTERSUCHUNG VON EINBAUEFFEKTEN

Als Testelemente wurden zwei vorgefertigte TWD-Module mit einer Alu-Rahmenkonstruktion, einem 14 cm dicken TWD-Paket aus horizontalen PMMA-Röhrchen (Durchmesser 3.3 mm) und integrierter Faserzement-Absorberplatte im Solarprüfstand vermessen (Abbildung 19). Die wichtigsten Eigenschaften sind in Tabelle 8 zusammengestellt.

Tabelle 8: Resultate der Aussenmessung und Labordaten der TWD-Module

Eigenschaft	Einheit	Aussenmessung	Vergleichswert	Bemerkung
g_{TI} (transparente Fläche)	1	0.49	0.55	Berechnet (spektral)
U_{TI} (mit Rahmenkonstr.)	$Wm^{-2}K^{-1}$	0.96	0.80	Hotbox Messung

Im Vergleich zum rechnerischen Wert $g_{TI,h}$, bestimmt aus optischen Transmissions- und Reflexionsdaten für das TWD-Paket und den Absorber, ist der reale g-Wert bezogen auf die transparente Fläche ohne Rahmenfläche ungefähr 10 % (relativ) tiefer, trotz relativ günstigem mittleren Einfallswinkeln in der Messperiode Anfang Jahr. Der Wärmedurchgangskoeffizient, in der Hotbox einschliesslich Rahmenkonstruktion gemessen, ist rund 17 % tiefer als im Aussenklima.

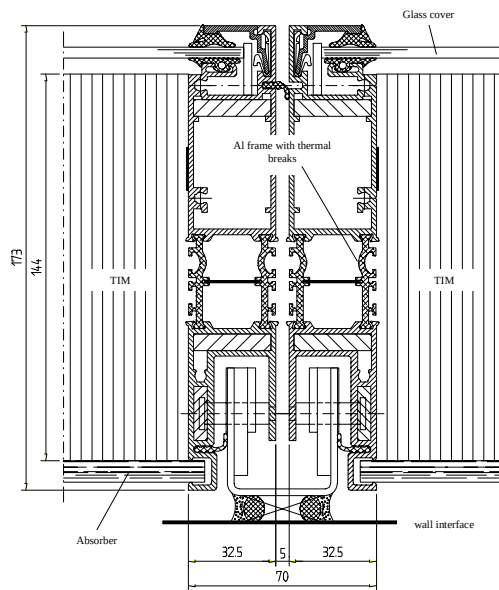


Abbildung 19: Horizontalschnitt einer Fassade aus vorfabrizierten TWD-Elementen (links) und Versuchsaufbau mit zwei identischen Elementen (rechts). Im oberen Bereich der Elemente ist Kondensation auf der Innenseite der Glasabdeckung sichtbar.

Mögliche Mechanismen für die beobachteten Leistungsminderungen werden in den folgenden Abschnitten beschrieben. Es soll jedoch darauf hingewiesen werden, dass eine Aussenwand mit dieser TWD-Bekleidung nach wie vor eine effiziente Wandheizung mit einem beträchtlichen Nettogewinn ergibt, trotz des hohen U-Werts im Vergleich zu einer konventionellen Niedrigenergie-Konstruktion.

Thermische Integrationseffekte

Eine Reduktion des Solargewinns kann durch verschiedene thermische Verluste auftreten. Luftaustausch mit der Umgebung durch temperaturbedingte "Atmung" kann aufgrund früherer Laborversuche als Ursache praktisch ausgeschlossen werden. Rechnerisch untersucht wurde die Wärmeableitung nach aussen durch die Rahmenkonstruktion via Absorber und TWD. Dazu wurde durch 2-dimensionale Temperaturfeldberechnungen ein linearer Randverlustfaktor bestimmt, mit dem ein korrigierter g-Wert definiert werden kann:

$$g_{2D} = g \left(1 - \frac{\ell}{A} \Psi_{lin} \right) \quad (4)$$

mit ℓ Randlänge (m)
 A Transparente Fläche (m²)
 Ψ_{lin} Randverlustfaktor (m)

Um auf der sicheren Seite zu sein wurde die absorbierte Solarwärme nicht nur auf dem Absorber, sondern in vier Ebenen bis in den äusseren Bereich der TWD-Schicht eingeleitet (siehe Abbildung 20).

Mit dem berechneten Wert $\Psi_{lin} = 0.0044$ m und $\ell / A = 3.8$ m⁻¹ ergibt sich eine Abminderung der g-Werts von rund 1.7 % relativ. Daraus kann geschlossen werden, dass der Wärmeverlust durch die Rahmenkonstruktion keine signifikante Reduktion des g-Werts zur Folge hat. Diese Schlussfolgerung lässt sich auch auf die häufigere Holzrahmenkonstruktion ohne integrierten Absorber übertragen.

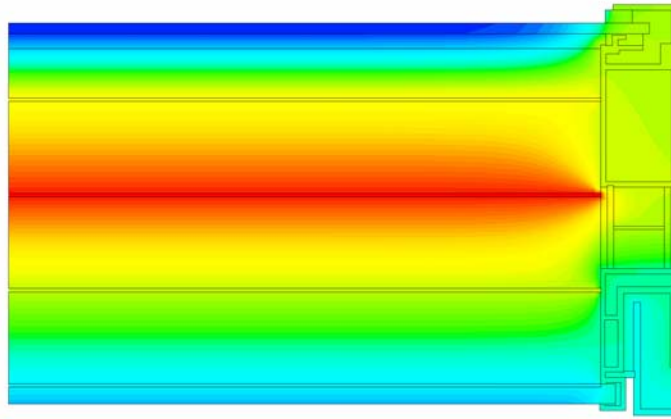


Abbildung 20: Berechnete Temperaturverteilung im Rahmenbereich eines TWD-Fassadenelements mit thermisch getrennter Aluminiumrahmenkonstruktion. Wärmequellen sind in 4 Ebenen angeordnet. Die Glasabdeckung befindet sich oben, der Absorber unten.

Luftaustausch zwischen erhitzter Luft im Absorberbereich und der Umgebung wäre eine andere plausible Ursache für Wärmeverluste unter Einstrahlung. Während der EMPA-Messungen war dies jedoch kaum möglich, da die Elemente effektiv satt und luftdicht abgeklebt in den Hartschaum-Prüfrahmen eingebaut waren.

Da sichtbare Kondensatspuren auf eine mögliche interne Strömung hinwiesen (vgl. Foto in Abbildung 19), wurden die Auswirkungen einer Kreisströmung durch die Röhrenschicht durch 3-dimensionale CFD-Berechnungen analysiert. Dazu wurden verschiedene Luftspaltpositionen angenommen (Abbildung 21). Idealerweise sollte nur ein Luftspalt zwischen Glasabdeckung und TWD sein, nicht aber zwischen TWD und Absorberplatte. In Laborversuchen wurde beobachtet, dass sich die Absorberplatte bei Einstrahlung etwas (in Richtung TWD) wölbt, womit ein Mechanismus für die Bildung eines zusätzlichen Luftspalts vorhanden ist. Durch Verformung und Setzung (Eigengewicht) bei starker Temperaturbelastung ist eine zusätzliche Spaltbildung möglich, da die TWD-Schicht mit der Absorberfläche nicht flächig verbunden ist.

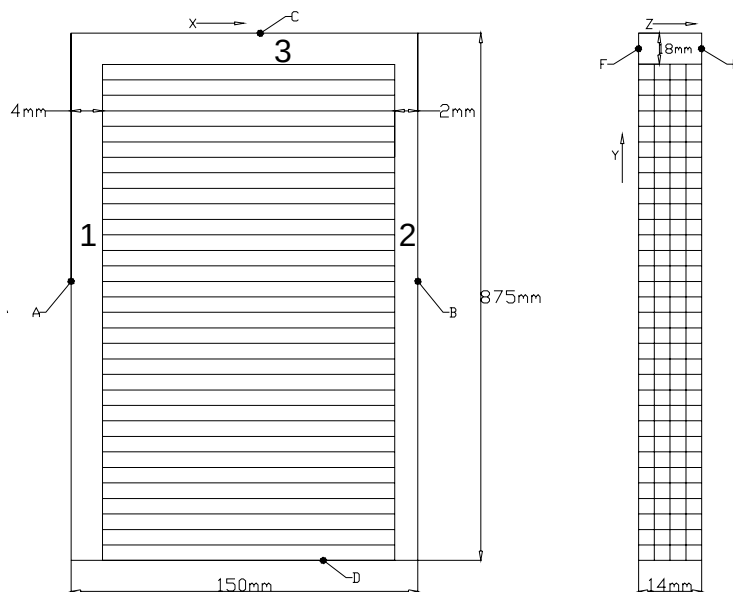


Abbildung 21: Links: Schematischer Vertikalschnitt durch das TWD-Modul mit Röhrenpaket. Luftspalt 1 zwischen Glasabdeckung und TWD ist beabsichtigt, Luftspalt 2 zwischen TWD und Absorber sollte nicht vorhanden sein. Luftspalt 3 (oben) entspricht einer Setzung. Rechts: Frontansicht des Zellausschnitts für die Berechnung (rechts).

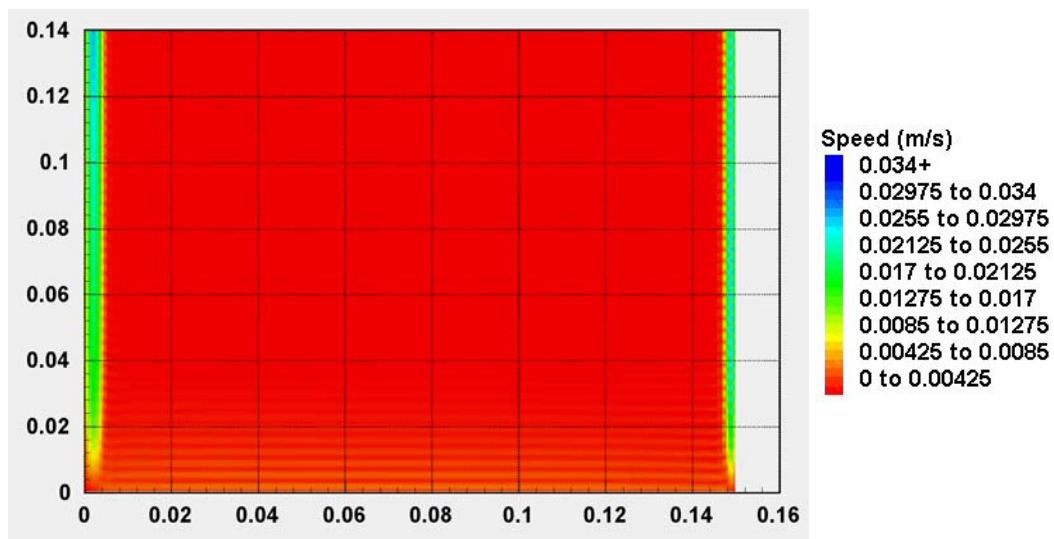


Abbildung 22: Schnitt durch das Geschwindigkeitsfeld einer senkrechten Ebene (Röhrchenmitte). Der Luftspalt zwischen TWD und Absorber (rechte Seite) bewirkt eine Kreisströmung zwischen Kalt- und Warmseite der TWD.

In der Simulation wurde Wärmeleitung durch die Röhrchenwand und Wärmestrahlungsaustausch vernachlässigt. Abbildung 22 zeigt ein Beispiel für das Strömungsfeld mit beidseitigem Luftspalt. Die Strömung durch die Röhrchen findet primär im untersten und obersten Bereich der TWD-Platte statt.

Die Konfigurationen und berechneten Nusselt-Zahlen (Wärmeübergangskoeffizient zwischen beiden Seiten mit Konvektion bezogen auf den Wärmeübergangskoeffizient ruhender Luft) sind in Tabelle 9 zusammengestellt. Im ungestörten Fall tritt praktisch keine Konvektion auf. Ein zusätzlicher Luftspalt 3 oben erzeugt ebenfalls kaum Wirkung. Eine Öffnung von Luftspalt 2 (hier 2 mm) führt dagegen zu einer Erhöhung des Wärmeübergangskoeffizienten von rund 50 %. Ein undichter Abschluss des Röhrchenpakets auf der Absorberseite ist also recht kritisch und kann eine starke Erhöhung des U-Werts nach sich ziehen. Die Situation unter Einstrahlung (einschliesslich die Auswirkung auf den g-Wert) sollte weniger kritisch sein, da sich die erhitzte Absorberplatte in Richtung TWD wölbt und dadurch einen allfälligen Luftspalt mindestens reduziert.

Tabelle 9: Berechnete Nusselt-Zahlen für eine Kavität mit horizontaler TWD-Struktur. Spalt 3 (oben) hat wenig Einfluss, Spalt 2 (TWD-Absorber, 2 mm) erhöht die Nusselt-Zahl hingegen um rund 50 %.

Konfiguration	Spalt 1	Spalt 2	Spalt 3	Nusselt-Zahl
Idealfall, einseitiger Spalt	6 mm	0 mm	0 mm	1.038
Setzungseffekt	6 mm	0 mm	8 mm	1.062
Verschiebung des Absorbers	4 mm	2 mm	0 mm	1.531
Verschiebung und Setzung	4 mm	2 mm	8 mm	1.531

Beschattungseffekt am Rand

Durch einem einfachen Versuch kann bestätigt werden, dass ein gerichteter Strahl, der unter einem bestimmten Einfallswinkel θ auf eine parallel geschichtete TWD-Paket fällt, konusförmig durch die Struktur propagiert und durch Vielfach-Reflexion an den Röhrchenwänden auf der anderen Seite als Lichtkegel austritt (Abbildung 23).

Falls der Kegel nicht durch den Rand gestört wird, entspricht der durchgehende Strahlungsanteil dem hemisphärischen Transmissionsgrad einer optischen Labormessung mit einer integrierenden (Ulbricht-) Kugel. Falls der Eintrittspunkt jedoch näher am Rand liegt als $d \cdot \tan(\theta)$, dann wird der Strahlungsdurchgang durch Absorption am Rand reduziert (Abbildung 23).

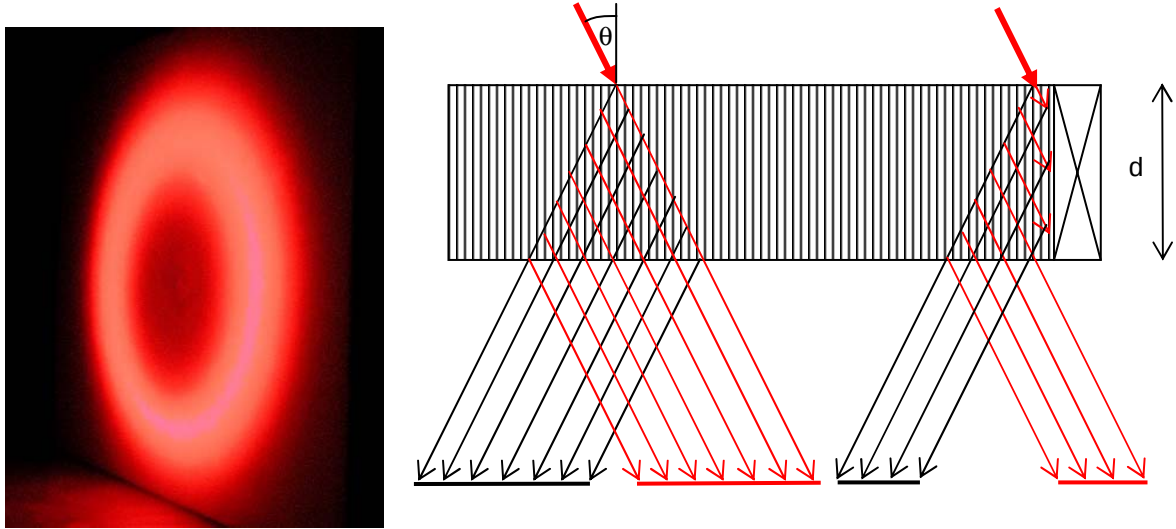


Abbildung 23: Foto des Transmissionskegels eines Laserstrahls (links), schematic sketch of the optical path in the central area and near the edge (right).

Für einen Einfallswinkel $\theta = 30^\circ$, Dicke $d = 140$ mm und die TWD-Fläche 1.345×0.875 m² (Aussenmessungen) wird die Randzone etwa 80 mm. 28 % der TWD-Fläche wird damit vom Rahmen beeinflusst. Ohne Berücksichtigung der Streuung entspricht der Strahlungsdurchgang durch eine ebene Schichtstruktur einem "Baum" aus transmittierten und reflektierten Teilen. Es ist bekannt dass sich der gesamte Transmissionsgrad in diesem Fall zu $\tau_{TI} = (\tau + \rho)^N$ berechnet, wobei N die Zahl der Schnittpunkte zwischen einem direkten Strahl und der Schichtstruktur ist. Die transmittierte Strahlung wird durch eine (symmetrische) Binomial-Verteilung beschrieben. Dies gilt nicht mehr bei Absorption am Rand. Um den Einfluss auf den Transmissionsgrad abzuschätzen wurde die Strahlungsverteilung nach dem Durchgang durch eine dünnwandige Schichtstruktur (Abstand 3.3 mm) mit Randabsorption numerisch simuliert mit den folgenden Parametern: $\theta = 30^\circ$, $d = 140$ mm, $\tau = 0.8$, $\rho = 0.18$, $\rho_{edge} = 0.3$ (Abbildung 24). Der relative Transmissionsgrad in der Randzone für $\theta = 40^\circ$ ist in Abbildung 25 für unterschiedliche Absorptionseigenschaften der Randfläche dargestellt. Offensichtlich ist die mittlere Transmission in der Randzone nicht einfach proportional zum Absorptionsgrad der Randstirnfläche. Die Berechnung zeigt, dass der relative Transmissionsgrad $r = \tau_{edge} / \tau_h$ in der Randzone etwa zwischen 0.7 und 0.8 liegt, abhängig vom durchschnittlichen Einfallswinkel und dem Reflexionsgrad der Stirnfläche (zwischen 0.2 und 0.6). Der gesamte mittlere Transmissionsgrad einer TWD-Elements mit Fläche A und Rahmenlänge ℓ und Dicke d ist dann

$$\tau_{TI} = \tau_h \left(1 - \frac{\ell}{A} d \tan(\theta)(1 - r)\right) \quad (5)$$

Für einen geschätzten mittleren Einfallswinkel $\theta_{\text{Mittel}} = 40^\circ$ für Direkt- und Diffusstrahlung während der Messungen im Solarprüfstand ergibt sich ein Reduktionsfaktor $\tau_{\text{TI}} / \tau_h = 91 \%$, welcher auf die Ergebnisse also einen substantziellen Einfluss hat.

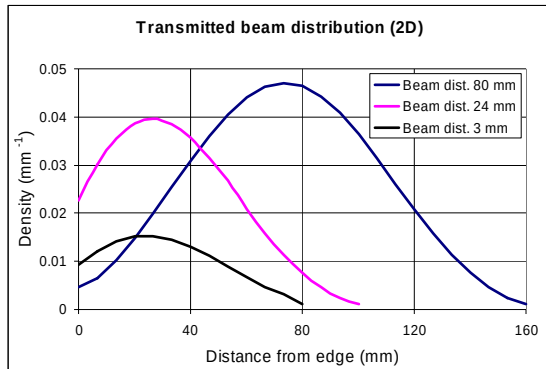


Abbildung 24: Intensitätsverteilung der durchgehenden Direktstrahlung durch eine 2-D TWD-Struktur für verschiedene Abstände zwischen Eintrittspunkt und Rand (Neigungswinkel 30°).

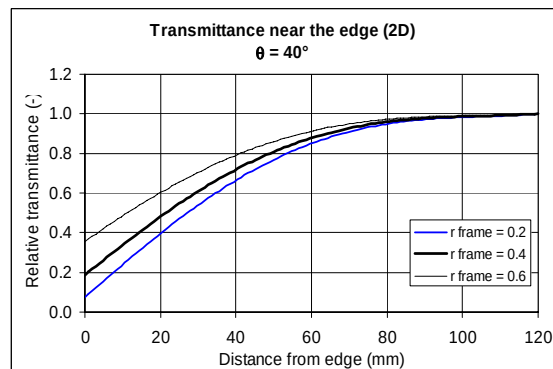


Abbildung 25: Relativer Transmissionsgrad im Randbereich einer 2-D TWD-Struktur (140 mm) für verschiedene Reflexionsgrade des Rahmens..

Beurteilung der Ergebnisse

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass hauptsächlich zwei Einbaueffekte zu beachten sind. Es wurde gezeigt, dass interne Konvektion die thermischen und solaren Eigenschaften deutlich verschlechtern kann, sobald eine horizontale TWD-Struktur nicht mindestens auf einer Seite weitgehend luftdicht abgeschlossen wird. Dieser Aspekt ist bei der Planung und Konstruktion zu beachten, aber nicht einfach zu realisieren ohne beidseitige transparente Deckschichten, welche leistungs- und kostenmässig nachteilig sind. Bisher nicht bewährt haben sich Klebeverbindungen und mechanische Klemmkonstruktionen. Analog führt auch der Luftaustausch zwischen der "heissen" Seite einer TWD-Fassade und der Umgebung zu Verlusten, z.B. durch undichte Fugen zwischen den Modulen oder eine unzureichend abgedichtete Luftschicht zwischen Massivwand und Fassade.

Beschattungseffekte durch Absorption des Strahlungskegels im Rahmenbereich sind weniger dramatisch, sind aber mit einer Grössenordnung von bis zu 10 % bei ungünstigen Verhältnissen zu beachten. Neben geometrischen Aspekten wie Dicke der TWD und Verhältnis von Rahmenlänge zu transparenter Fläche spielt der Absorptionsgrad der Rahmenstirnfläche eine Rolle. Grundsätzlich sind grossflächige Elemente mit kleinen Verhältnissen von Rahmenlänge zu Fläche unkritisch. Falls dies nicht realisiert werden kann ist ein hoher Rahmen-Reflexionsgrad und nicht zu grosse Dicke der TWD anzustreben.

Es soll jedoch auch daran erinnert werden, dass die solaren Wärmegewinne der TWD-Massivwand gemäss EN ISO 13790 [17] wie Direktgewinne der Fensterflächen durch eine Ausnutzungsfunktion abgemindert werden müssen, obwohl dies eher nicht der realen Situation entspricht. Es ist deshalb bei gut konstruierten TWD-Systemen gerechtfertigt, ausser den für Fenster üblichen Reduktionsfaktoren keine weitere Ertragsminderung einzurechnen.

SOLARGEWINNE EINER VERGLASTEN HOLZLAMELLEN-FASSADE

Im Rahmen der Messungen an solaren Wandkonstruktionen wurde eine als vollflächige Aussenwand konzipierte Holzrahmenkonstruktion [20] mit glasgedecktem Holzlamellen-Absorber mit den Abmessungen $1.60 \times 1.99 \text{ m}^2$ ($b \times h$) unter Sommer- und Winterbedingungen im Solarprüfstand gemessen (Abbildung 26). Die Konstruktion mit 12 cm Wärmedämmung hinter dem Absorber ist weniger als Gewinnsystem ausgelegt, sondern soll Wärmeverluste durch Solargewinne kompensieren und damit einen guten effektiven U-Wert und durch erhöhte Innenoberflächentemperaturen einen guten thermischen Komfort erreichen.

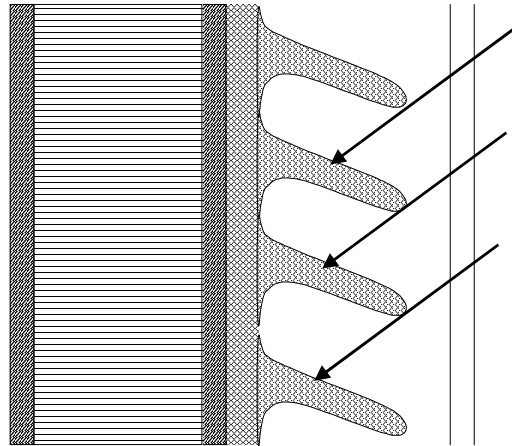


Abbildung 26: Holzrahmenkonstruktion mit verglastem Lamellenabsorber. Die Dicke der Wärmedämmung (rechts) ist in Wirklichkeit wesentlich grösser als die Breite der Holzlamellen.

Wegen dem geringen Wärmegewinn und grosser Phasenverschiebung wurde für dieses System ein anderes Modell für die Parameteridentifikation gewählt (Abbildung 27): das dynamische Verhalten der Temperatur auf der Lamellenrückseite (FCa_a) wurde angepasst durch Variation der Kapazitäten $C4-C8$ und der Leitwerte $H7-8$ and $H8-9$. Die übrigen Grössen wurden im Voraus bestimmt.

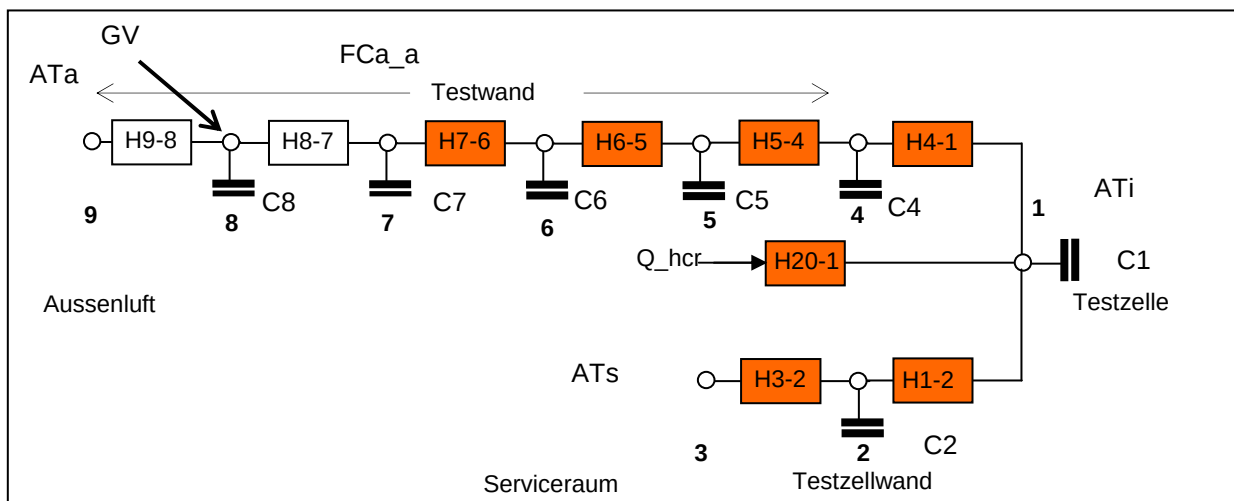


Abbildung 27: Thermisches Modell der Holzlamellenwand in der EMPA Testzelle.

Dieses Modell ergab stabile Resultate, die in Tabelle 10 zusammengefasst sind.

Tabelle 10: Resultate der Parameteridentifikation

Bedingung	g
Sommer (konstante Temperatur)	0.008 ± 0.001
Sommer (konstante Kühlleistung)	0.007 ± 0.001
Winter (konstante Temperatur)	0.028 ± 0.003

Obwohl die Wand nicht als eigentliches Heizsystem konzipiert ist, funktioniert die "Regelung" der solaren Wärmegewinne gut. Das Konzept wurde erfolgreich realisiert, beispielsweise bei einer Turnhalle, die im Bereich von 18°C mit sehr geringem Heizenergiebedarf betrieben wird.

Die Berechnung der solaren Wärmegewinne dieses Systems ist recht aufwändig. Neben den optischen und geometrischen Eigenschaften der Lamellenschicht ist auch das Strömungsfeld im Luftspalt zwischen Lamellenschicht und Glasabdeckung zu berücksichtigen, das von der Elementhöhe, Luftspaltbreite und Belüftungsöffnungen abhängt. Ein detailliertes Modell wurde anhand der EMPA-Messdaten validiert. Basierend auf diesen Resultaten wird für die Berücksichtigung der Wärmegewinne die Benutzung von klima- und orientierungsabhängigen Effektiv-Werten für den U-Wert vorgeschlagen (vgl. Anhang 3).

Das Ziel einer Null-Verlust-Wand bei schweizerischen Klimaverhältnissen könnte für Südwest- bis Südostorientierung mit vernünftigem Aufwand erreicht werden durch eine weitere Erhöhung des Wärmewiderstandes zwischen Absorber und Umgebung.

ISOLIERGLASELEMENT MIT INTEGRIERTEM LATENTWÄRMESPEICHER

Sommer- und Winterverhalten wurde auch an einem neuartigen Isolierglaselement mit integrierter Latentwärmespeicherschicht [21] untersucht (Abbildung 28). Das Element besteht aus vier Glasebenen (6 mm Sicherheitsglas, 8% ε-Beschichtung auf Position 2 und 5, weisse Siebdruckbeschichtung auf Position 8). Die Zwischenräume sind wie folgt ausgebildet:

- Zwischenraum 1 (36 mm, Argon) enthält eine Prismenstruktur aus Acrylglas um die Solarstrahlung bei hohen Einfallswinkeln (Sommer) zu reflektieren.
- Zwischenraum 2 (12 mm, Argon).
- Zwischenraum 3 (42 mm) ist gefüllt mit 2 Lagen von Plastikbehältern, die ein paraffinartiges PCM enthalten (Übergangstemperatur ca. 25-35°C).

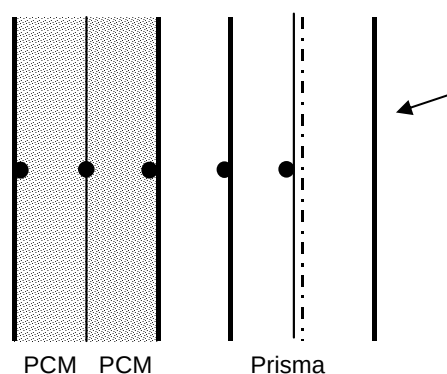


Abbildung 28: Schematischer Querschnitt durch das Glaselement mit zwei PCM-Speicherschichten. Die Punkte markieren interne Temperaturmessstellen.

Das Element ist schwach durchlässig im sichtbaren Bereich, besonders wenn sich das PCM im flüssigen Zustand befindet. Das grünliche durchgelassene Licht und die sichtbare Rechteckstruktur (Abbildung 29) im Testraum sind auf die eingefärbten PCM-Behälter zurückzuführen.

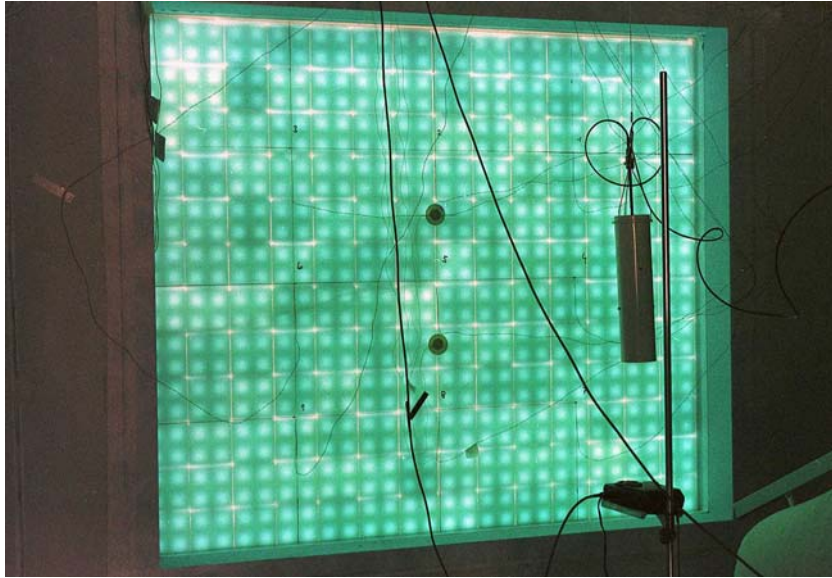


Abbildung 29: Blick vom Innenraum der Testzelle auf das PCM-Glaselement.

Der g-Wert wurde wieder durch LORD 2.0 identifiziert, mit 2 Kapazitäten (3 Leitwerten) für das Testelement. Für eine sonnige Woche im Juli (max. Einstrahlung global vertikal rund 550 W/m^2 während mehrerer Tage) ergab sich ein mittlerer g-Wert $\approx 18 \pm 3 \%$. Neben dem g-Wert ist das Speicherverhalten (Phasenverschiebung, Temperaturprofil) wichtig für einen sinnvollen Betrieb. Abbildung 30 zeigt den Temperaturverlauf auf einer Achse durch das Element während eines sonnigen Sommertags.

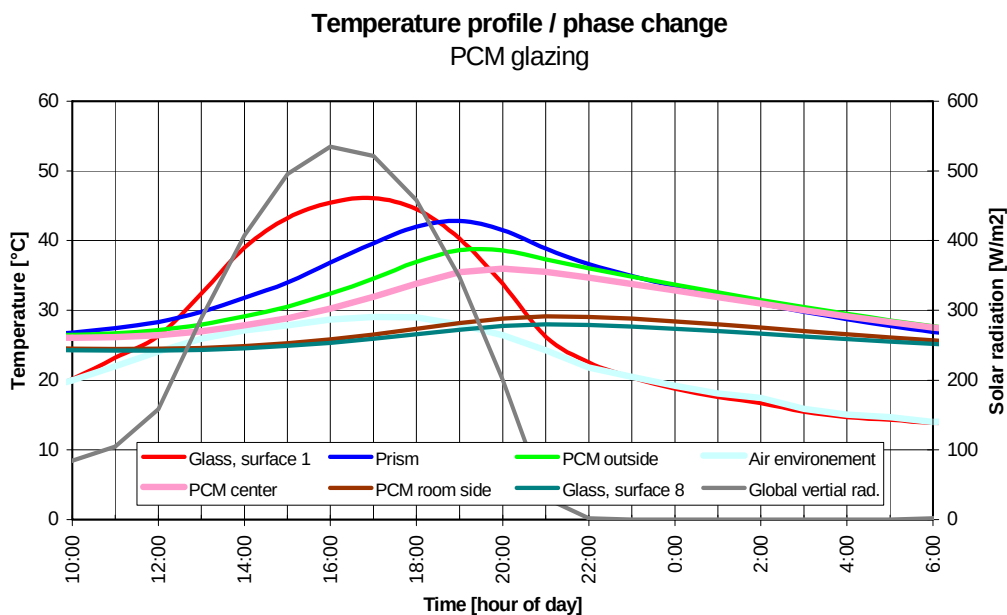


Abbildung 30: Temperaturprofil und Einstrahlung durch die PCM-Glaselement während eines Sommertags.

Die Zeitverschiebung zwischen den Maxima von Solarstrahlung und Oberflächentemperatur innen ist etwa 6 h, etwa im Bereich einer 18 cm Backsteinwand. Das Temperaturmaximum auf der Innenoberfläche bleibt unter 30°C (Lufttemperatur ca. 24°C), was zu keinen Komfortproblemen führen sollte. Der PCM-Speicher funktioniert offensichtlich gut als Temperaturregler. Der Speicher scheint vernünftig ausgelegt zu sein: Der äussere und mittlere Bereich ist vollständig geschmolzen (Temperaturen 36-38°C), der raumseitige Bereich (Maximaltemperatur 29°C) bleibt teilweise fest.

Die Messungen wurden Anfang Januar wiederholt um jahreszeitliche Einflüsse festzustellen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 11 zusammengefasst.

Tabelle 11: Kennwerte der Solarspeicherwand (Sommer / Winter)

Periode	g-Wert (-)	q _i (-)	Max. T _{si} (°C)	Zeitverschiebung (h)
Anfang Juli	0.18 ± 0.03	0.08	Ca. 28	6
Anfang Januar	0.35 ± 0.04	0.13	Ca. 35	4

Der g-Wert ist in der Winterperiode etwa doppelt so hoch wie im Sommer. Damit zeigt das System wie beabsichtigt ein saisonal adaptives Verhalten. Aus dem Vergleich der Temperaturen, der g-Werte und der (geschätzten) sekundären Wärmeabgabegrade kann geschlossen werden, dass die Schmelztemperatur im Winter (im Gegensatz zum Sommer) bei guter Einstrahlung im ganzen Speicher erreicht wird. Dadurch stellt sich ein wesentlich höherer solarer Transmissionsgrad ein, während sich die sekundäre Wärmeabgabe nicht extrem unterscheidet. Die raschere Entladung des flüssigen PCM reduziert die Zeitverschiebung zwischen den Maxima von Solarstrahlung und Oberflächentemperatur innen zwar auf etwa 4 h, doch die Oberflächentemperatur bleibt durch den Latentwärmestrom in den Abendstunden bis 9 Uhr im Bereich von 30°C. Insgesamt sind die Eigenschaften dieser Leichtbau-Solarwand viel versprechend. Eine industrielle Fertigung dieses Systems ist geplant.

Schlussfolgerungen

Die im Rahmen von IEA Task 27 durchgeführten Messungen zeigen, dass Messung und Berechnung von Verglasungen mit aussen oder innen liegender Beschattung heute weitgehend konsistente Ergebnisse liefert. Eine zylindrische Geometrie ist offenbar für diffus reflektierende Lamellen ausreichend genau. Bei heutigen Normverfahren oder Normentwürfen wird die „Dicke“ von Lamellen allerdings vernachlässigt, was zu einer Überschätzung des solaren Transmissionsgrads bei kleinen Einfallswinkeln führt. Abweichungen können auch bei nicht Lambert'scher Verteilung der einfallenden Strahlung auftreten, insbesondere bei Lamellen mit hohem Reflexionsgrad.

Einschränkungen gelten in Bezug auf vereinfachte konvektive Wärmetransportmodelle. Diese sind zumindest für mechanisch belüftete Fassadensysteme und andere Systeme mit komplexen Strömungsfeldern nicht anwendbar.

Wie die Messungen zeigen wird mit raumseitigen Beschattungs- oder Blendschutzsystemen auch bei hoch reflektierenden Oberflächen oft kein ausreichender Sonnenschutz erreicht. Der Einfluss unterschiedlich wirksamer konvektiver Wärmeabgabe an den Raum ist messbar, die Auswirkung auf den mittleren g-Wert ist aus praktischer Sicht jedoch nicht signifikant.

Die Berechnungen mit dem kombinierten Fassade-Raum-Modell demonstrieren, dass richtungsselektive Eigenschaften und die Steuerung (Kontrollstrategie) von Beschattungen einen grossen Einfluss auf die gesamtenergetischen Eigenschaften von Fassade und Gebäude haben. In Gebäudesimulationsprogrammen sind meist noch sehr einfache Beschattungsmodelle wie z.B. ein willkürlicher konstanter Reduktionsfaktor implementiert. Zukunft wird die Integration von besseren Modellen notwendig sein, damit die dynamischen Eigenschaften von Fassadenbauteilen mit Beschattung oder anderen

"smarten" Komponenten wie z.B. schaltbaren Schichten berücksichtigt werden können. Wichtig ist auch die Definition von möglichst einfachen Produktdatensätzen, die zur thermischen Bewertung von Verglasungen mit Beschattung und für vereinfachte Berechnungen besser geeignet sind als ein einziger Zahlenwert z.B. für den Gesamtenergiedurchlassgrad.

Innerhalb des Projekts (und innerhalb IEA Task 27) konnten die Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Aspekten Kühlenergie – Beleuchtungsenergie – thermischer Komfort – visueller Komfort noch nicht systematisch untersucht werden, da die entsprechenden Simulationswerkzeuge nicht oder erst gegen Ende der Projektphase zur Verfügung standen. Hier besteht noch Handlungsbedarf.

Für solare Wandheizsysteme wurden Leistungsdaten messtechnisch bestimmt und Einbaueffekte untersucht, die sich leistungsmindernd auswirken können. Diese liegen normalerweise in einer Größenordnung, welche eine Berücksichtigung über geltende Berechnungsgrundlagen hinaus nicht erfordert.

Referenzen

- [1] SIA Dokumentation 0176, *Gebäude mit hohem Glasanteil, Behaglichkeit und Energieeffizienz*, Zürich, 2002.
- [2] International Energy Agency (IEA), Solar Heating and Cooling Programme, *Task 27: Performance, Durability and Sustainability of advanced windows and solar components for building envelopes*, <http://www.iea-shc-task27.org>.
- [3] EN 410 (1998): *Glas im Bauwesen - Bestimmung der lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kenngrößen von Verglasungen*.
- [4] EN 13363-1 (2003) / prEN 13363-2: *Sonnenschutzeinrichtungen in Kombination mit Verglasungen - Berechnung der Solarstrahlung und des Lichttransmissionsgrades – Teil 1: Vereinfachtes Verfahren / Teil 2: Referenzverfahren*.
ISO 15099 (2003): *Thermal performance of windows, doors and shading devices – Detailed calculations*.
- [6] H. Simmler, B. Binder, *Determination of the angular-dependent solar heat gain of glazing with exterior Venetian blind shading*, Proc. Int. Conf. on Dynamic Analysis and Modelling to Energy Performance Assessment and Prediction of Buildings and Components, I-Ispira, 2003.
- [7] W.J. Platzer, *Performance assessment for solar shading devices – state of the art*, IEA Task 27 Dissemination Workshop, D-Freiburg i.Br., 2003.
- [8] H. Simmler, B. Binder, *Messung und Simulation von transparenten Bauteilen mit Sonnenschutz* 13. ZEN Statusseminar Energie- und Umweltforschung im Bauwesen, Zürich, 2004.
- [9] H. Simmler, *Sonnenschutz an Leichtbaufassaden: Messung und Berechnung der Solargewinne durch Glasfassaden mit Sonnenschutz*, Tagung Innovative Fassaden – Planung und Umsetzung, EMPA Dübendorf, 2004.
- [10] MeteoNorm 4.0, Meteotest Bern, 1999 (www.meteotest.ch).
- [11] H. Manz et al., *Air flow patterns and thermal behavior of mechanically ventilated glass double façades*, Building and Environment 39 (2004) 1023 – 1033.
- [12] FLOVENT Version 3.2. Manual, Flomerics Ltd., Hampton Court, UK, 2001.
- [13] H. Manz, *Total solar energy transmittance of glass double façades with free convection*, Energy and Buildings 36 (2004) 127–136.
- [14] R. Perez, R. Stewart, *Solar irradiance conversion models*, Solar Cells 18 (1986) pp. 213-222.

- [15] H. Manz, *Simulation des thermischen Verhaltens von Gebäuden mit Glas-Doppelfassaden: Sommerlicher Wärmeschutz, Nachtlüftung*, Tagung Innovative Fassaden – Planung und Umsetzung, EMPA Dübendorf, 2004
- [16] A. Kerschberger, W. Platzer, B. Weidlich, *Transparente Wärmedämmung*, Bauverlag Wiesbaden+Berlin, ISBN 3-7625-3444-6, 1997
- [17] EN 832 (1998): *Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Berechnung des Heizenergiebedarfs – Wohngebäude*.
EN ISO 13790 (2004): *Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Berechnung des Heizenergiebedarfs*.
- [18] W.J. Platzer, *Energetische Bewertung von Transparenter Wärmedämmung*, Bauphysik, Band 21 Heft 2 (1999), pp. 67-76.
- [19] H. Simmler, *Performance assessment of solar façade components*, IEA/SHC Task 27 Dissemination Workshop D-Freiburg i.Br., 2003.
- [20] Lucido-Fassade, Lucido Solar AG, CH-9500 Wil Rudenzburg.
- [21] Solarspeicherwand, Dietrich Schwarz Dipl. Architekt ETH, CH-7013 Domat/Ems.
- [22] H. Simmler, *Wärmelasten transparenter Bauteile und Sonnenschutzsysteme*, Schlussbericht EMPA/BFE Projekt Nr. 17'166, EMPA Dübendorf, 2001.
- [23] H. Simmler, H. Manz, *Measurement and Modelling of Solar Façade Components and Shading Systems*, Proceedings CISBAT, Lausanne, 1999.
- [24] LORD 2.3, Entwickler O. Gutschker, Technische Universität Cottbus, 2003.
- [25] PASLINK EEIG of Outdoor Test Centres, <http://www.paslink.org>.
- [26] H. Manz, H. Simmler, *WinSim-Dokumentation* (Entwurf), EMPA Dübendorf, 2002.
- [27] D.K. Edwards, *Solar absorption by each element in an absorber-coverglass array*, Solar Energy, Vol. 19 (1977) pp. 401-402.
- [28] A. Haas, Trnsys Module Type 230: NewWindow (Entwurf), EMPA Dübendorf (2004).

Weitere durch die EMPA erstellte Dokumente im Rahmen von IEA Task 27:

r-a3(1)-ch-2.doc	Performance of solar shading devices under outdoor exposure
r-a3(1)-ch-HS-1.doc	Description of EMPA reference cases
r-a3(1)-EMPA-HS-3.doc	Outdoor testing data of shading systems
r-a3(1)-EMPA-Bin-4.doc	Solar heat gain of glazing with interior Venetian blind shading
p-a3(2)-EMPA-HS-1.doc	Modelling of Air Flows in Double Facades with Shading Devices: Goal, First Steps and Outlook
r-a3(2)-EMPA-HS-2.doc	Experimental and numerical study of a double envelope façade: Status report
r-a3(3)-ch-1.doc	Performance of TI façades: Progress report 1
r-a3(3)-ch-2.doc	Total solar energy transmittance of a TI façade element measured in an outdoor test cell
r-a3(3)-ch-3.doc	Performance of TI façades: Progress report 2
r-a3(3)-EMPA-HS-4.doc	Performance of TI façades: Progress report 3
r-a3(3)-EMPA-HS-5.doc	Performance of TI façades: Progress report 4

r-a3(3)-EMPA-HS-FPR.doc	Performance of TI façades: Final Project Report
741152 Prüfbericht.doc	Messtechnische Bestimmung des Gesamt-energieschlossgrades (g-Wert) einer PCM-Verglasung
880054-2 Prüfbericht.doc	Messtechnische Bestimmung des Gesamt-energieschlossgrades (g-Wert) einer Holzlamellen-Fassade mit Glasabdeckung
880054-2 TA.doc	Technische Auskunft zum EMPA-Prüfbericht Nr. 880'054-2
r-a3(5)-ch1.doc	Window – Wall Assembly: Expanded linear thermal transmittance (common exercise)
r-a3(5)-ch-2.doc	Window – Wall Assembly: Expanded linear thermal transmittance (common exercise, update)

Anhang 1: EMPA Solarprüfstand

MESSPRINZIP

Zur Bestimmung der solaren und thermischen Eigenschaften von Fassadenbauteilen im Aussenklima wurde in den letzten Jahren an der EMPA eine Messanlage mit zwei unabhängigen Testzonen aufgebaut und optimiert [22][23]. Die Testfassade wird südseitig an eine hoch isolierte, luftdichte Testzone angeflanscht, die „schwebend“ im Holzelementgebäude eingebaut ist. Sie weist praktisch keine Wärmebrücken auf, so dass bei gleich gehaltener Lufttemperatur in der Zone und im Gebäude nur minimale Wärmeströme durch die übrigen Aussenflächen fliessen. Aus der Energiebilanz der Testzelle lassen sich unter Einbezug der äusseren Strahlungs- und Temperaturmessdaten Fassadenkennwerte wie der Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert) und der Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) auswerten (Abbildung 1).

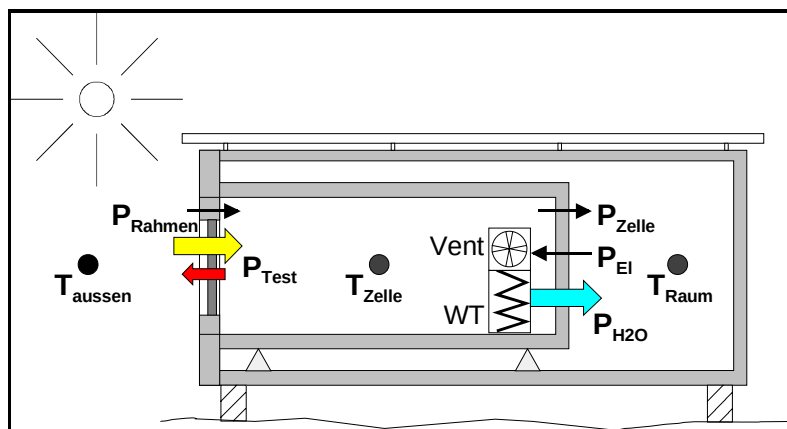


Abbildung 1: Messprinzip Solarprüfstand für Fassadenbauteile. Im Betrieb bei gleicher geregelter Zellen- und Raumtemperatur entspricht die technische Heiz-/Kühlleistung bis auf kleine Korrekturen dem Wärmestrom durch die Testfläche.

Im Normalbetrieb wird die Lufttemperatur der Testzelle und der umgebenden Raumluft auf einen möglichst gleichen Wert geregelt (Minimierung der Transmissions- und Luftaustauschwärmeströme). Der Energiestrom durch die Testfassade entspricht somit im Wesentlichen der technisch ab- oder zugeführten Wärmeleistung.

MESSEINRICHTUNG / DATENERFASSUNG

Die Testzelle ist eine hoch isolierende, luftdichte PU-Sandwichkonstruktion, die auf thermisch getrennten U-Blechprofilen steht. Alle übrigen Flächen sowie der Stirnbereich der Testzelle haben keine mechanische Verbindung zum Holzelementbau. Das Testelement wird in einen hoch isolierten, wärmebrückenfreien Prüfraumen eingebaut und bildet zusammen mit dem Prüfraumen die Südfassade der Testzelle. Die lichte Öffnung des Prüfraumens beträgt 1.500 m (Breite) x 2.000 m (Höhe) = 3.000 m².

Das Gebäude beinhaltet eine Kompressor-Kühlanlage, mit der die Lufttemperatur innerhalb der Testzelle mittels eines Luft-Wasser-Wärmetauschers konstant gehalten wird (± 0.2 K). Die Lufttemperatur im Gebäude wird mit einer konventionellen Split-Anlage geregelt. Bei gleichen Sollwerten liegt die mittlere Abweichung zwischen den Lufttemperaturen bei rund ± 0.3 K. Die Luftwechselrate durch die Testzellenwände wird ebenfalls minimiert. Sie beträgt mit eingebautem Testelement $n_{L50} < 0.5$ h⁻¹.

Die Standard-Messanordnung umfasst eine grosse Zahl verschiedener Messgrössen und -stellen. Alle Messstellen, ausser den Thermoelementen am Testelement, sind dabei fix montiert und Bestandteil der Prüfeinrichtung.

Die wichtigsten Messgrössen sind:

- Wärmetauscher:
 - Durchflussmessgerät
 - Temperaturdifferenzmessung Vor- und Rücklauf (Wärmetauscher WT)
- Temperaturen:
 - Zellwandoberflächen innen und aussen
 - Prüfraumen
 - Prüfraumluft, Serviceraumluft
 - Testelementoberfläche innen und aussen

Meteo-Daten:

Messgrösse	Messgerät
Globalstrahlung horizontal	Pyranometer
Globalstrahlung vertikal	Pyranometer
Diffusstrahlung horizontal	Pyranometer beschattet
Direktstrahlung	Pyrheliometer elektronisch nachgeführt
Infrarot-Strahlung	Pyrgeometer
Windgeschwindigkeit	Anemometer
Lufttemperatur und Feuchtigkeit	Thermohygrometer

Zur Datenerfassung wird eine Eigenentwicklung der EMPA eingesetzt, die auf der Datenbankumgebung MS Access basiert.

DATENAUSWERTUNG

Um (geringe) Temperaturschwankungen und Speichereffekte berücksichtigen zu können, wird für die Datenauswertung grundsätzlich ein dynamisches Gebäudemodell verwendet. Als einfachster Ansatz für ein Bauteil mit geringer Speichermasse kann $P_{\text{Test}}(t) = g_{\text{eff}} \cdot A \cdot I_{\text{global}}(t) - U_{\text{eff}} \cdot A \cdot (\theta_i(t) - \theta_a(t))$ verwendet werden. Das zeitliche Verhalten einer Testzone mit eingebautem transparentem Leichtbauteil kann dank des einfachen thermischen Systems der EMPA-Anlage gut durch ein Leitwert-/Kapazitätsnetzwerk mit wenigen Knoten modelliert werden (Abbildung 2).

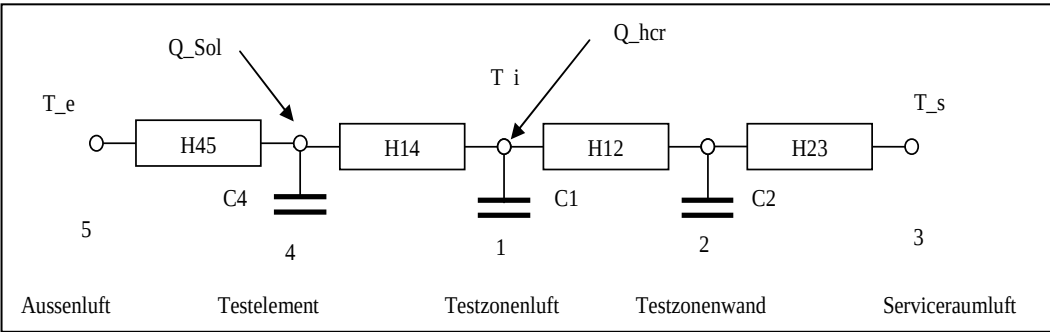


Abbildung 2: Einfachstes RC-Modell der EMPA-Testzone (rechte Seite) mit transparentem Leichtbauteil (linke Seite). Die thermischen Leitwerte und Kapazitäten der Testzone werden durch Kalibrationsmessungen bestimmt.

Die Testzelle ohne Testfassade wird durch die Kapazitäten C1 und C2 und die Leitwerte H12 und H23 repräsentiert. Der Übergang von Knoten 1 (Zellenlufttemperatur) zu Knoten 3 (Serviceraumlufthtemperatur) entspricht dem Wärmestrom zwischen Zellwand und Serviceraum. Die Unterteilung der Zellwand (Knoten 2) erlaubt die Berücksichtigung einer Dämpfung bei einer kurzfristigen (geringen) Temperaturänderung. Q_{hcr} ist die Summe der mittels Wärmetauscher eingebrachten Kühlleistung, der elektrischen Leistung (Ventilator) und des Wärmestroms durch den Prüfraum, der durch eine Responsefaktorberechnung bestimmt wird.

Das Testelement wird durch die Kapazität C4 und die Leitwerte H45 und H41 modelliert, wobei die Solarstrahlung beim Knoten 4 miteinbezogen wird. Das angewandte Modell (2 Widerstände und eine Kapazität) ist die einfachste Variante um ein Testelement mit geringer Wärmekapazität zu modellieren.

In der Auswertung wird die Abweichung zwischen gemessener und berechneter Kühl-/Heizleistung durch optimale Wahl der Kennwerte g_{eff} und U_{eff} mit Hilfe der "output error" oder der "prediction error" Methode minimiert. Dazu wird meist das Parameteridentifikationsprogramm LORD [24] verwendet, das innerhalb der europäischen PASLINK-Gruppe zur Untersuchung thermischer Netzwerke entwickelt wurde [25].

Die aus einer Kalibration bestimmten Grössen H12, H23, C1 und C2 werden festgehalten. Die freien Parameter werden mit der "Downhill Simplex Methode" (für die ersten Iterationen) und der "Monte-Carlo Methode" (für die späteren Iterationen) bestimmt. Aus den identifizierten Parametern werden der g-Wert und der U-Wert des Testelements berechnet. Diese Kennwerte sind mittlere Eigenschaften unter den gegebenen Randbedingungen und können sich von Normwerten unter Laborbedingungen unterscheiden.

SYSTEMKALIBRATION

Um mit obigem Modell einen g-Wert zu ermitteln ist vor der eigentlichen Messung mit eingebautem Testelement eine Kalibration notwendig. Ziel dieser Kalibration ist es die Eigenschaften der Zelle zu bestimmen. Diese bestimmbaren Zelleigenschaften bleiben während den Messungen unverändert.

Zur Kalibration wurde die für das Testelement vorgesehene Fläche mit einer thermisch genau bekannten Füllung versehen. Damit kann der Wärmestrom durch diese Füllung exakt berechnet werden. Es bleiben allein die gesuchten Grössen H12, H23, C1, C2 übrig, die durch Lösen der dynamischen Wärmestrombilanzgleichung ermittelt werden.

MESSUNSICHERHEIT

Die Unsicherheit des identifizierten Parameters g hängt von verschiedenen Einflussgrössen ab. Neben den klimatischen Randbedingungen (Solarstrahlung, Aussentemperatur) spielt vor allem ein möglicher Messfehler der Kühlleistungsmessung eine wichtige Rolle. In [22] wird gezeigt, dass durch die Anpassung nach kleinsten Quadraten der Einfluss eines möglichen Messfehlers deutlich kleiner ist als bei der Auswertung von Mittelwerten. Ein Messfehler in der Strahlungsmessung geht "nur" proportional zum g-Wert ein und spielt für kleine g-Werte keine wesentliche Rolle. Es wird für die Angabe der Messunsicherheit angenommen, dass die (möglichen) systematischen Abweichungen der Leistungs- und der Strahlungsmessung ungünstig kombiniert (betragsmässig addiert) sind. Zusätzlich wird ein grösser möglicher Nullpunkt-Messfehler in der Leistungsmessung und eine kleine Temperaturdifferenz über die Testfassade angenommen, was mögliche Messfehler vergrössert.

Als resultierende Unsicherheit des mittleren g_{eff} - Wertes bei üblichen Randbedingungen ist gemäss [22] folgende Formel anzunehmen: $s_g = 0.02 + 0.058 g$.

Anhang 2: Modellierung des Strahlungsdurchgangs durch eine ebene Lamellenstruktur

In diesem Anhang wird das Strahlungsaustauschmodell zur Berechnung der Transmissions- und Reflexionseigenschaften einer Lamellenstruktur in WinSim beschrieben [26]. Hier wird einfachheitshalber eine ebene Lamelle angenommen. Die Prinzipien der Berechnung für zylindrisch gekrümmte Lamellen sind identisch, die Ausdrücke für die Zellengeometrie und die Formfaktoren jedoch etwas weniger anschaulich. Eine erweiterte Dokumentation ist in Vorbereitung.

SCHICHTEIGENSCHAFTEN

Ein Sonnenschutz aus Lamellen wird als unendlich ausgedehnte, ebene und parallel zu der Verglasung positionierte Schicht betrachtet. Eine einzelne Lamelle wird durch die folgenden Größen charakterisiert:

τ_1	solarer direkt-direkter Transmissionsgrad
τ_2	solarer direkt-hemisphärischer Transmissionsgrad
τ_d	solarer hemisphärisch-hemisphärischer Transmissionsgrad
ρ_1	solarer direkt-direkter Reflexionsgrad
ρ_2	solarer direkt-hemisphärischer Reflexionsgrad
ρ_d	solarer hemisphärisch-hemisphärischer Reflexionsgrad

Analoge Materialkennwerte existieren auch für Strahlung auf die Rückseite der Lamellen. Diese Kennwerte werden zusätzlich mit dem Index ' bezeichnet. Geometrische Größen sind:

s	Lamellenbreite
h	Lamellenabstand
φ_s	projizierter Sonnenwinkel
φ_b	Neigungswinkel der Lamellen

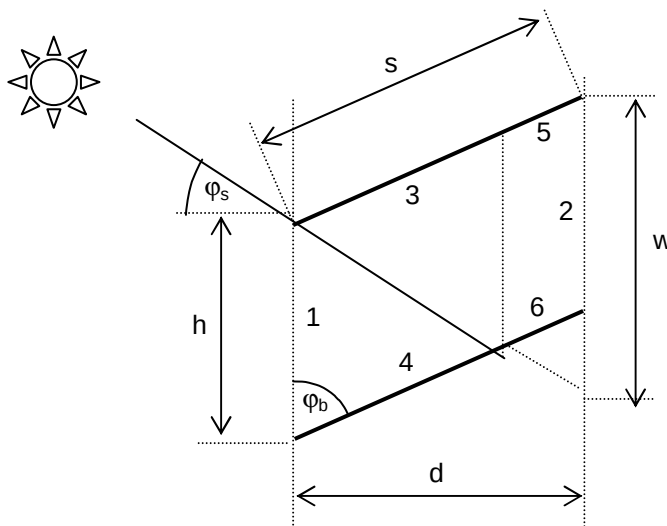


Abbildung 1: Geometrie der Lamellen

Die folgenden vereinfachenden Annahmen werden getroffen:

- $t=0$ Die Lamellen sind unendlich dünn.
- $\tau_{2,i}=\tau'_{2,i}$ Der direkt-hemisphärische Transmissionsgrad ist in beide Richtungen gleich gross [27].
- $\tau_{d,i}=\tau'_{d,i}$ Der hemisphärisch-hemisphärische Transmissionsgrad ist in beide Richtungen gleich gross [27].
- $\tau_{2,eff}=\tau_1+\tau_2$ Direkte Transmission durch die Lamellen wird wie direkt-hemisphärische Transmission behandelt
- $\rho_{2,eff}=\rho_1+\rho_2$ Direkte Reflexion auf den Lamellen wird wie direkt-hemisphärische Transmission behandelt
- Alle Oberflächen werden als ideal diffuse (Lambertsche Strahler) behandelt.

DIREKT TRANSMITTIERTE SONNENSTRAHLUNG

Der Anteil der direkt durch die Lamellenschicht ($i=L$) transmittierten Sonnenstrahlung beträgt:

$$\tau_{1L} = 1 - \frac{|w|}{h} \quad \text{für } w < h \quad (0-1)$$

$$\tau_{1L} = 0 \quad \text{für } w \geq h \quad (0-2)$$

Aufgrund der in Abbildung 1 dargestellten Geometrie kann die Länge w wie folgt berechnet werden:

$$w = s \cdot \frac{\cos(\varphi_b - \varphi_s)}{\cos \varphi_s} \quad (0-3)$$

Da angenommen wird, dass die Sonnenstrahlung nur diffus auf den einzelnen Lamellen reflektiert wird, gilt für den Reflexionsgrad der Lamellenschicht:

$$\rho_{1L} = 0 \quad (0-4)$$

INDIREKT TRANSMITTIERTE SONNENSTRAHLUNG

Allgemeine Eigenschaften

Zur Berechnung der indirekt transmittierten Sonnenstrahlung wird eine Zelle von der Form eines Rhomboides mit den Teilflächen 1 bis 6 betrachtet (siehe Abbildung 1). Es wird zwischen den folgenden Strahlungsflüssen unterschieden:

- J emittierter Strahlungsfluss
- G einfallender Strahlungsfluss
- Q Quell-Strahlungsfluss

Für die emittierten Strahlungsflüsse gilt:

$$J_1 = Q_1 \quad (1-1)$$

$$J_2 = Q_2 \quad (1-2)$$

$$J_3 = Q_3 + \rho'_d \cdot G_3 + \tau_d \cdot G_4 \quad (1-3)$$

$$J_4 = Q_4 + \tau'_d \cdot G_3 + \rho_d \cdot G_4 \quad (1-4)$$

$$J_5 = Q_5 + \rho'_d \cdot G_5 + \tau_d \cdot G_6 \quad (1-5)$$

$$J_6 = Q_6 + \tau'_d \cdot G_5 + \rho_d \cdot G_6 \quad (1-6)$$

Mit Hilfe der Matrix $\mathbf{F}$, welche alle Formfaktoren F_{ij} enthält (siehe Gleichungen 1-12 bis 1-22), kann der Vektor der einfallenden Strahlungsflüsse $\mathbf{G}$ wie folgt berechnet werden:

$$\mathbf{G} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{J} \quad (1-7)$$

$\mathbf{J}$ bezeichnet den Vektor der resultierenden Strahlungsflüsse. Mit den Gleichungen 1-3 bis 1-6 und der vektoriellen Gleichung 1-7 erhält man ein System mit 8 Unbekannten ($J_3 - J_6$ und $G_3 - G_6$):

$$\begin{aligned} J_3 - \rho'_d \sum_{j=3}^6 F_{3j} \cdot J_j - \tau_d \sum_{j=3}^6 F_{4j} \cdot J_j &= Q_3 + \rho'_d \sum_{j=1}^2 F_{3j} \cdot Q_j + \tau_d \sum_{j=1}^2 F_{4j} \cdot Q_j \\ J_4 - \tau'_d \sum_{j=3}^6 F_{3j} \cdot J_j - \rho_d \sum_{j=3}^6 F_{4j} \cdot J_j &= Q_4 + \tau'_d \sum_{j=1}^2 F_{3j} \cdot Q_j + \rho_d \sum_{j=1}^2 F_{4j} \cdot Q_j \\ J_5 - \rho'_d \sum_{j=3}^6 F_{5j} \cdot J_j - \tau_d \sum_{j=3}^6 F_{6j} \cdot J_j &= Q_5 + \rho'_d \sum_{j=1}^2 F_{5j} \cdot Q_j + \tau_d \sum_{j=1}^2 F_{6j} \cdot Q_j \\ J_6 - \tau'_d \sum_{j=3}^6 F_{5j} \cdot J_j - \rho_d \sum_{j=3}^6 F_{6j} \cdot J_j &= Q_6 + \tau'_d \sum_{j=1}^2 F_{5j} \cdot Q_j + \rho_d \sum_{j=1}^2 F_{6j} \cdot Q_j \end{aligned} \quad (1-8 \text{ a,b,c,d})$$

Die Gleichungen 1-8 a,b,c und d können auch vektoriell geschrieben werden:

$$\mathbf{M} \cdot \mathbf{J} = \mathbf{Q} \quad (1-9)$$

$$\mathbf{J} = \mathbf{M}^{-1} \cdot \mathbf{Q} \quad (1-10)$$

Die Vektoren $\mathbf{J}$ und $\mathbf{Q}$, sowie die Matrix $\mathbf{M}$ sind gegeben durch:

$$\mathbf{J} = \begin{pmatrix} J_3 \\ J_4 \\ J_5 \\ J_6 \end{pmatrix} \quad \mathbf{Q} = \begin{pmatrix} Q_3 + \rho'_d \sum_{j=1}^2 F_{3j} \cdot Q_j + \tau_d \sum_{j=1}^2 F_{4j} \cdot Q_j \\ Q_4 + \tau'_d \sum_{j=1}^2 F_{3j} \cdot Q_j + \rho_d \sum_{j=1}^2 F_{4j} \cdot Q_j \\ Q_5 + \rho'_d \sum_{j=1}^2 F_{5j} \cdot Q_j + \tau_d \sum_{j=1}^2 F_{6j} \cdot Q_j \\ Q_6 + \tau'_d \sum_{j=1}^2 F_{5j} \cdot Q_j + \rho_d \sum_{j=1}^2 F_{6j} \cdot Q_j \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 - \tau_d \cdot F_{43} & -\rho'_d \cdot F_{34} & -\tau_d \cdot F_{45} & -\rho'_d \cdot F_{36} \\ -\rho_d \cdot F_{43} & 1 - \tau'_d \cdot F_{34} & -\rho_d \cdot F_{45} & -\tau'_d \cdot F_{36} \\ -\tau_d \cdot F_{63} & -\rho'_d \cdot F_{54} & 1 - \tau_d \cdot F_{65} & -\rho'_d \cdot F_{56} \\ -\rho_d \cdot F_{63} & -\tau'_d \cdot F_{54} & -\rho_d \cdot F_{65} & 1 - \tau'_d \cdot F_{56} \end{bmatrix} \quad (1-11 \text{ a,b,c})$$

Die Formfaktoren zwischen zwei unendlich ausgedehnten, ebenen Schichten können wie folgt berechnet werden (Sie 93). Für die Geometrie gemäss Abbildung 2a gilt

$$F_{12} = \frac{S_1 + S_2 - S_3}{2S_1} \quad (1-12)$$

und für diejenige gemäss Abbildung 2b

$$F_{12} = \frac{d_1 + d_2 - (s_3 + s_4)}{2S_1} \quad (1-13)$$

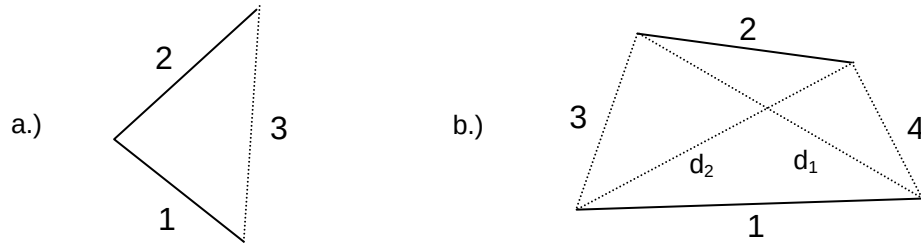


Abbildung 2: Geometrie von zwei unendlich ausgedehnten, ebenen Schichten.

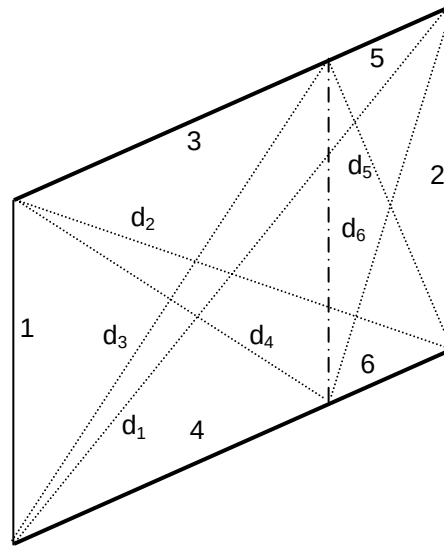


Abbildung 3: Geometrie einer Zelle zwischen zwei Lamellen.

Mit Hilfe der Gleichungen 1-12 und 1-13 können alle notwendigen Formfaktoren F_{ij} für eine Zelle gemäss Abbildung 3 berechnet werden. Für alle Formfaktoren mit $i=j$ gilt $F_{ij}=0$. Aufgrund der Geometrie in Abbildung 3 ergibt sich, dass zusätzlich auch $F_{35}=F_{53}=F_{46}=F_{64}=0$. Die Längen der Diagonalen d_1 bis d_6 können mit Hilfe des Cosinus-Satzes berechnet werden:

$$d_1 = \sqrt{h^2 + s^2 + 2h \cdot s \cdot \cos \varphi_b} \quad (1-14)$$

$$d_2 = \sqrt{h^2 + s^2 - 2h \cdot s \cdot \cos \varphi_b} \quad (1-15)$$

$$d_3 = \sqrt{h^2 + s_3^2 + 2h \cdot s_3 \cdot \cos \varphi_b} \quad (1-16)$$

$$d_4 = \sqrt{h^2 + s_3^2 - 2h \cdot s_3 \cdot \cos \varphi_b} \quad (1-17)$$

$$d_5 = \sqrt{h^2 + s_5^2 - 2h \cdot s_5 \cdot \cos \varphi_b} \quad (1-18)$$

$$d_6 = \sqrt{h^2 + s_5^2 + 2h \cdot s_5 \cdot \cos \varphi_b} \quad (1-19)$$

Die Hilfslängen s_3 bis s_6 werden mit Hilfe des Sinus-Satzes berechnet:

$$s_3 = s_4 = \frac{h \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_s\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{2} + \varphi_s - \varphi_b\right)} \quad (1-20)$$

$$s_5 = s_6 = s - s_3 \quad (1-21)$$

Die Matrix der Formfaktoren $\mathbf{F}$ ist dann gegeben durch:

$$\mathbf{F} = [\mathbf{F}_{ij}]$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & \frac{d_1 + d_2 - 2s}{2s_1} & \frac{h + s_3 - d_3}{2h} & \frac{s_3 + h - d_4}{2h} & \frac{s_5 - d_1 + d_3}{2h} & \frac{s_5 - d_2 + d_4}{2h} \\ \frac{d_1 + d_2 - 2s}{2s_1} & 0 & \frac{s_3 - d_2 + d_5}{2h} & \frac{s_3 - d_1 + d_6}{2h} & \frac{h + s_5 - d_5}{2h} & \frac{h + s_5 - d_6}{2h} \\ \frac{h + s_3 - d_3}{2h} & \frac{s_3 - d_2 + d_5}{2h} & 0 & \frac{d_3 + d_4 - 2h}{2s_3} & 0 & \frac{d_2 + h - (d_4 + d_5)}{2s_3} \\ \frac{s_3 + h - d_4}{2h} & \frac{s_3 - d_1 + d_6}{2h} & \frac{d_3 + d_4 - 2h}{2s_3} & 0 & \frac{d_1 + h - (d_3 + d_6)}{2s_3} & 0 \\ \frac{s_5 - d_1 + d_3}{2h} & \frac{h + s_5 - d_5}{2h} & 0 & \frac{d_1 + h - (d_3 + d_6)}{2s_3} & 0 & \frac{d_5 + d_6 - 2h}{2s_5} \\ \frac{s_5 - d_2 + d_4}{2h} & \frac{h + s_5 - d_6}{2h} & \frac{d_2 + h - (d_4 + d_5)}{2s_3} & 0 & \frac{d_5 + d_6 - 2h}{2s_5} & 0 \end{bmatrix} \quad (1-22)$$

Direkt-hemisphärischer Transmissionsgrad vorwärts

Falls

$$\varphi_b < \varphi_s + \frac{\pi}{2} \quad (2-1)$$

so fällt Sonnenstrahlung auf die Fläche 4. Quell-Strahlungsflüsse sind dann:

$$Q_3 = (\tau_1 + \tau_2) \cdot h / s_3 \quad (2-2)$$

$$Q_4 = (\rho_1 + \rho_2) \cdot h / s_4 \quad (2-3)$$

Die restlichen Quell-Strahlungsflüsse sind gleich Null. Falls

$$\varphi_b \geq \varphi_s + \frac{\pi}{2} \quad (2-4)$$

so fällt die Sonnenstrahlung auf die Fläche 3. Quell-Strahlungsflüsse sind in diesem Fall:

$$Q_3 = (\rho_1' + \rho_2') \cdot h / s_3 \quad (2-5)$$

$$Q_4 = (\tau_1 + \tau_2) \cdot h / s_4 \quad (2-6)$$

Die restlichen Quell-Strahlungsflüsse sind gleich Null. Nach der Berechnung des Vektors $\mathbf{G}$ ergeben sich der direkt-hemisphärische Transmissionsgrad bzw. der direkt-hemisphärische Reflexionsgrad der Lamellenschicht wie folgt:

$$\tau_{2,L} = G_2 \quad (2-7)$$

$$\rho_{2,L} = G_1 \quad (2-8)$$

Direkt-hemisphärischer Transmissionsgrad rückwärts

Zur Berechnung des direkt-hemisphärischen Transmissionsgrades rückwärts, wird die einfallende Strahlung gespiegelt und fällt nun mit einer neuen Richtung von der Rückseite her auf die Lamellenschicht. Die Berechnung ist analog derjenigen in Vorwärtsrichtung.

Hemisphärisch-hemisphärischer Transmissionsgrad vorwärts

Im Falle der hemisphärischen Einstrahlung muss eine Lamellenfläche nicht mehr in zwei unterschiedliche Bereiche aufgeteilt werden. Dieselben Beziehungen für die Formfaktoren können verwendet werden. Quell-Strahlungsfluss ist in diesem Fall:

$$Q_1 = 1 \quad (3-1)$$

Die restlichen Quell-Strahlungsflüsse sind gleich Null. Bei symmetrischer Unterteilung der Lamellenflächen gilt $s_3=s_5=s_4=s_6=s/2$. Nach der Berechnung des Vektors G ergeben sich der hemisphärisch-hemisphärische Transmissionsgrad bzw. der hemisphärisch-hemisphärische Reflexionsgrad der Lamellenschicht wie folgt:

$$\tau_{d,L} = G_2 \quad (3-2)$$

$$\rho_{d,L} = G_1 \quad (3-3)$$

Hemisphärisch-hemisphärischer Transmissionsgrad rückwärts

Quell-Strahlungsfluss ist in diesem Fall:

$$Q_2 = 1 \quad (5-1)$$

Die restlichen Quell-Strahlungsflüsse sind gleich Null. Nach der Berechnung des Vektors G ergeben sich der hemisphärisch-hemisphärische Transmissionsgrad bzw. der hemisphärisch-hemisphärische Reflexionsgrad der Lamellenschicht wie folgt:

$$\tau'_{d,L} = G_1 \quad (5-2)$$

$$\rho'_{d,L} = G_2 \quad (5-3)$$

Anhang 3: g-Wert und effektiver U-Wert einer Aussenwand mit verglaster Holzlamellenfassade

Ausgangslage

Die Lucido-Fassade wird auf eine opake Holz- oder Massivwand montiert und besteht im Prinzip aus einer Holzlamellenschicht mit vorgehängter, schwach hinterlüfteter Glasabdeckung (leicht strukturiertes 1-fach Weissglas) und einer Tragkonstruktion. Die Konstruktion bildet eine transparente Wärmedämmung (TWD) der Aussenwand. Die solaren Warmegewinne können gemäss SIA 380/1 bzw. EN 832 für die Berechnung des Heizwärmebedarfs eines Gebäudes berücksichtigt werden. Gemessene und berechnete Ergebnisse für die Lucido-Fassade werden im Folgenden kurz zusammengefasst und verglichen. Effektive U-Werte werden für ein Beispiel angegeben.

Messergebnisse

Im EMPA-Prüfbericht Nr. 880'054-2 werden Messungen des energetischen Verhaltens einer Lucido-Fassade in Kombination mit einer wärmegedämmten Aussenwandkonstruktion ($U_{\text{total}} = 0.26 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$) in Holzrahmenbauweise dokumentiert. Hauptergebnis ist der mittlere Gesamtenergiedurchlassgrad g_{total} , d.h. der Anteil der genutzten Solarwärme bezogen auf die Einstrahlung auf die transparente Fläche, im Aussenklima in Dübendorf:

- $g_{\text{total}} = 2.8 \%$ im Winter (Messperiode Februar)
- $g_{\text{total}} < 1.0 \%$ im Sommer (Messperiode August)

Diese Ergebnisse hängen neben der Jahreszeit hauptsächlich von den Eigenschaften der Lucido-Fassade und dem U-Wert der Massivwand ab. Einen geringeren Einfluss haben auch der Standort, die Fassadenorientierung (EMPA: süd-südwest) und die Klimabedingungen während der Messung.

Vereinfachte Berechnung, effektiver U-Wert

Für eine unbeschattete, verglaste Fläche (Rahmenfaktor $F_F = \text{Transparentfläche} / \text{Gesamtfläche}$) unter Solarstrahlung I_s (in W/m^2) ist der solare Warmegewinn stationär oder über eine hinreichende Zeitdauer gemittelt näherungsweise (vgl. EN 832):

$$q_{\text{solar}} = g_{\text{total}} I_s = U_{\text{total}} R_{\text{TWD}} F_F g_{\text{TWD}} I_s \quad (1)$$

R_{TWD} ist der Wärmedurchlasswiderstand zwischen Absorber und Aussenluft. g_{TWD} ist näherungsweise das Produkt des solaren Transmissionsgrads τ der Verglasung und des Absorptionsgrads α des Absorbers:

$$g_{\text{TWD}} = \tau \alpha \quad (2)$$

Mit $\tau_{\text{Weissglas}} = 0.92$, $\alpha_{\text{Absorber}} = 0.68$, $R_{\text{TWD}} = 0.17 \text{ m}^2\text{K/W}$, $U_{\text{total}} = 0.26 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ und $F_F = 1$ wird

$$g_{\text{total,Modell}} \approx 2.8 \% \quad (3)$$

Der Absorptionsgrad der Lamellenstruktur ($\alpha_{\text{Oberfläche}} \approx 0.50$) wurde mit einem Strahlungsaustauschmodell für Diffusstrahlung berechnet, R_{TWD} für Luftspalt + Verglasung + Wärmeübergang aussen mit $(0.125 + 0.005 + 0.04) \text{ m}^2\text{K/W}$ eingesetzt. Messung und Berechnung lassen sich also mit plausiblen Bauteilkennwerten in Übereinstimmung bringen.

Der relativ kleine, gleichmässig anfallende Solargewinn kann als Verlustverminderung oder Reduktion des U-Werts interpretiert werden. Aus der zeitlich gemittelten Wärme-verlustbilanz einer Aussenwand

$$q_{\text{total}} = q_{\text{Transmission}} - q_{\text{solar}} = U_{\text{total}} (\Delta T - F_F g_{\text{TWD}} R_{\text{TWD}} I_s) \quad (4)$$

kann ein klimaabhängiger "effektiver U-Wert"

$$U_{\text{effektiv}} = q_{\text{total}} / \Delta T = U_{\text{total}} (1 - F_F g_{\text{TWD}} R_{\text{TWD}} [I_s / \Delta T]) \quad (5)$$

berechnet werden, der die solaren Warmegewinne enthält. In U_{effektiv} geht neben den Bauteileigenschaften die standort- und orientierungsabhängige Klimagrösse $I_s / \Delta T$ ein, d.h. der Quotient von gemittelter Solarstrahlungsintensität und Temperaturdifferenz. Diese Klimagrösse kann für den Standort und die Fassadenorientierung aus gemessenen oder bekannten Klimadaten für die Heiztage ermittelt werden. Bei bekannten Heizgradtagen (HGT) und entsprechenden Solarstrahlungseinträgen $G_{S,E,W,N}$ (in kWh/m²) ist

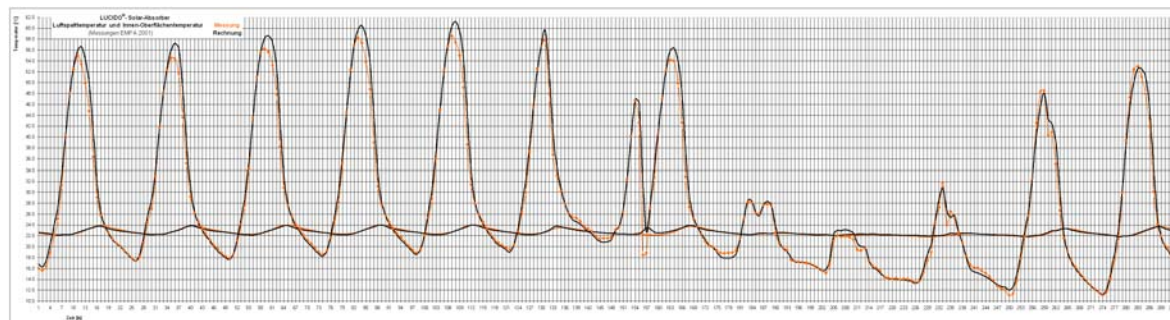
$$I_s / \Delta T = G_{S,E,W,N} \times 1000 / (\text{HGT} \times 24), \text{ in W/(m}^2\text{K)} \quad (6)$$

Die folgende Tabelle enthält diese Klimadaten für das Beispiel Zürich SMA (HGT 14/22 = 4486 K d).

Orientierung	Globalstrahlung G kWh/m ²	Klimagrösse $I_s / \Delta T$ W/(m ² K)
Süd	1098	5.32
West	748	3.34
Ost	724	3.20
Nord	352	1.56

Detaillierte Modellierung

In einem genaueren dynamischen Berechnungsmodell für den Wärmestrom durch die Aussenwand (Firma IB Buchner, D-44795 Bochum) werden die von der Elementhöhe abhängige Luftströmung im Luftspalt, Winkeffekte der Strahlungsabsorption, die Temperaturabhängigkeit von Materialeigenschaften usw. berücksichtigt. Die Modelle sind in verschiedenen Dokumenten beschrieben und zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Messdaten der EMPA (Grafik IB Buchner: Gemessene und berechnete Temperaturen im Luftspalt und auf der Innenoberfläche der Testwand).



Im Bericht "Wirkungsweise der Lucido-Solarfassade" (IB Buchner) wird gezeigt, dass die berechneten U_{effektiv} – Werte gut durch linearisierte Funktionen $U_{\text{effektiv}} (I_s / \Delta T)$ angenähert werden können. Für die ursprüngliche und eine optimierte Version des Lucido-Absorbers (15 mm Luftspalt und Ausströmöffnung oben, EMPA-Element: 30 mm Luftspalt) werden linearisierte Funktionen $U_{\text{effektiv}} (I_s / \Delta T)$ für die Elementhöhen 2 m, 2.5 m und 3 m angegeben.

Die oben beschriebene vereinfachte Berechnung stimmt mit den linearisierten U_{effektiv} – Werten des genaueren Modells überein, wenn der TWD-Wärmedurchlasswiderstand für $h = 2$ m auf $R_{\text{TWD}} = 0.225 \text{ m}^2\text{K/W}$ und für $h = 3$ m auf $R_{\text{TWD}} = 0.20 \text{ m}^2\text{K/W}$ gesetzt wird. Der Wärmedurchlasswiderstand gegen aussen ist somit etwas höher als beim EMPA-Element, was durch den reduzierten Wärmeverlust im Luftspalt plausibel ist.

In der folgenden Tabelle sind mit dem linearisierten Modell (5) berechnete U_{effektiv} – Werte für verschiedene Wärmedurchgangskoeffizienten U_W der Massivwand (ohne äusseren Wärmeübergang) kombiniert mit der optimierten Lucido-Fassade (15 mm Luftspalt, Elementhöhe $h = 2$ m, Annahme $F_F = 0.9$, keine Verschattung) für die Klimadaten des Standorts Zürich SMA (Heiztage 14/22) dargestellt.

Orientierung	U_{effektiv} für Zürich SMA, in $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$		
	$U_W = 0.2$	$U_W = 0.3$	$U_W = 0.4$
Süd	0.06	0.08	0.10
West	0.10	0.14	0.18
Ost	0.10	0.14	0.18
Nord	0.14	0.19	0.25
Ohne Solarwärme	0.17	0.24	0.31

Schlussfolgerungen

Messungen, vereinfachte und genauere Berechnungen ergeben ein konsistentes Bild. Durch die Lucido-Fassade wird der mittlere Wärmeverlust einer Aussenwand während der Heizperiode durch Solargewinne reduziert, erwartungsgemäss am deutlichsten in Südorientierung. Diese Gewinne können in der Heizperiode meist voll genutzt werden (kleine Beträge, langsame Änderung der Wärmeabgabe, Phasenverschiebung gegen den Abend). Die Berücksichtigung der Gewinne durch einen standort- und orientierungsabhängigen U_{effektiv} – Wert (= Verlustminderung) kommt somit der realen Situation nahe. Die getrennte Berechnung des Solarwärmegewinns durch die Fassade und dessen Berücksichtigung in der Summe aller Wärmegewinne, die durch einen Ausnutzungsgrad η gemäss SIA 380/1 bzw. EN 832 abgemindert wird, ist für dieses Bauteil weniger zutreffend.

Anhang 4: Datenfluss und Fenstermodell in Trnsys

Als Interface für das Fenster wird im Gebäudemodell eine Wand mit sehr kleinem Widerstand und vorgegebener äusserer Temperatur verwendet. Diese Temperatur ist die Oberflächentemperatur des dem Raum zugewandten Layers des Fensters. Umgekehrt wird dem Fenster die im Gebäudemodell berechnete Temperatur des Raumknotens des Starnetzwerks, sowie der äquivalente Widerstand zwischen diesem und der betrachteten Oberfläche der Interface-Wand vorgegeben.

Weiterhin müssen die an der Innenseite der Interface-Wand anfallenden Gewinne dem Fenster zugeführt werden. Dies sind die langwelligen Strahlungsgewinne von Heizung, internen Quellen, separat definierten Wallgains sowie ein Anteil an der im Raum verteilten Solarstrahlung.

Das Gebäudemodell benötigt noch die transmittierte Solarstrahlung, die in Type 230 berechnet wird. Für den Fall, dass später auch einmal innen liegende Storen gerechnet werden können, muss zur Berechnung der Konvektion die Raumlufthtemperatur zur Verfügung stehen.

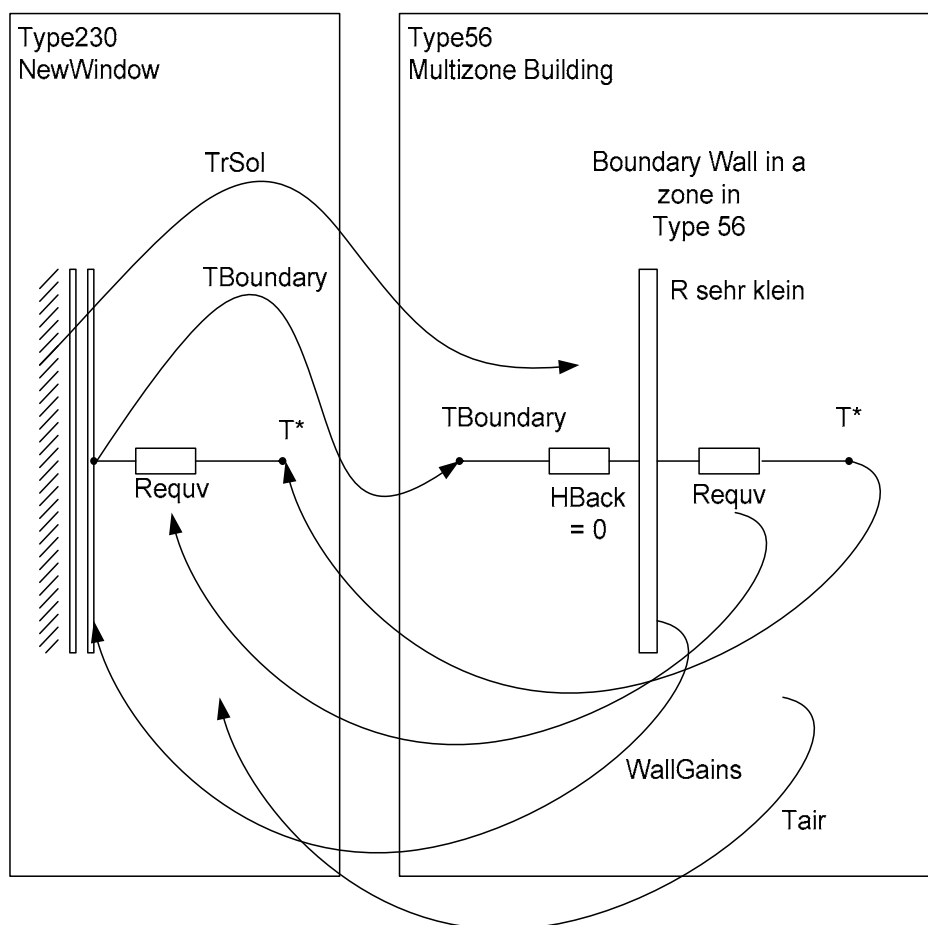


Abbildung 1: Kopplung des Types 230 NewWindow mit dem bestehenden Type 56 Multizone Building.

Das Fenstermodell wurde entsprechend den Vorgaben in ISO 15099 [4] aufgestellt. Knoten sind die Oberflächen der Schichten und die Gaszwischenräume, für die thermische Bilanzen berechnet werden. Abbildung 2 zeigt die möglichen Kopplungen für den Fall von 3 Schichten. Die Lösung erfolgt über eine gemischte Iteration / Matrixinversion. Für vorgegebene Temperaturen werden die Übergangskoeffizienten berechnet, durch Matrixinversion wird ein neuer Satz Temperaturen berechnet, mit denen verbesserte Koeffizienten bestimmt werden können, etc. Weitere Einzelheiten sind in [28] beschrieben.

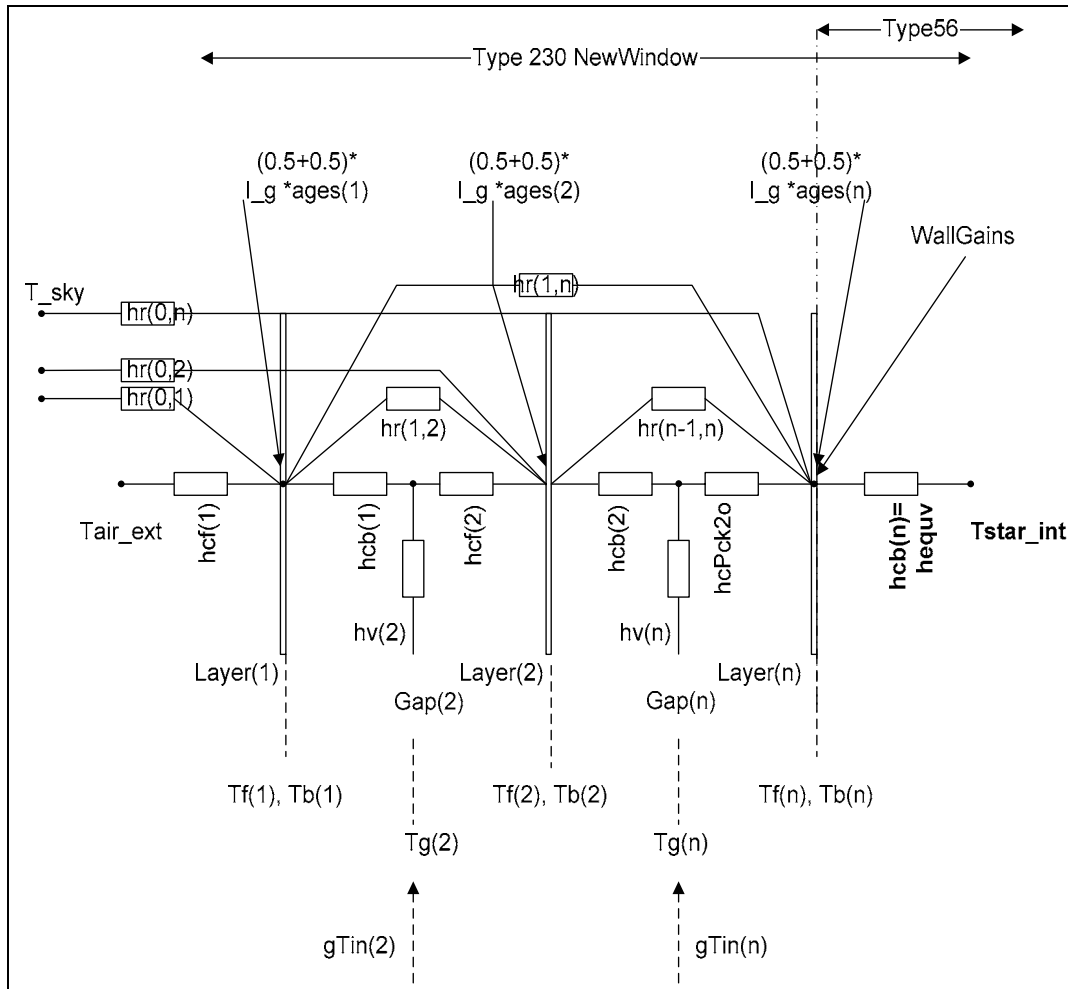


Abbildung 2: Thermisches Fenstermodell in Trnsys Module Type 230.