

Saisonale Abschattung von transparent gedämmten Wänden mit Hilfe von Prismenscheiben

von Dirk Christoffers,
Philipp Kneser und
Ute Schramm

Überblick

Mit Hilfe von Prismenscheiben kann eine sonnenstandsabhängige, saisonale Verschattung realisiert werden. Damit lassen sich solare Gewinne aus direkter Einstrahlung sehr gut an den jährlichen Verlauf des Heizenergiebedarfs von Gebäuden anpassen. Sie eignen sich als nach Süden weisende Fenster- und Fassadenelemente vorzugsweise in Bereichen, die keinen freien Durchblick benötigen, insbesondere auch für transparent gedämmte Solarwände. Die auf die Südfassade treffende Direktstrahlung wird durch die Prismenscheibe an klaren Wintertagen auf etwa 90 %, an klaren Sommertagen auf 10 % reduziert. Der Beitrag beschreibt die Ergebnisse von Simulationsrechnungen und die Erfahrungen aus einem einjährigen Praxistest.

Using prismatic panes, a seasonal shading responsive to the sun's position can be realized. Thus the solar gains from direct radiation can be closely matched to the annual pattern of the heating requirements of buildings. The panes are suitable for window or facade elements in applications which do not need transparency, and their especially in front of transparently insulated walls. The direct radiation received on a vertical South-oriented facade is reduced to 10 % on clear summer days, while 90 % is transmitted on clear winter days. The paper reports on results from computer simulations and experiences from a one year field test.

1. Einleitung

Solare Gewinne in Gebäuden sind im Winter und in den Übergangszeiten wünschenswert, im Sommer sind sie aber problematisch, da sie dann zu Überhitzungen und damit zu Komforteinbußen führen können. Je größer die besonnten Glasflächen sind, desto wichtiger wird auch der Einbau eines wirksamen Sonnenschutzes.

Konventionelle Verschattungseinrichtungen sind in einer Vielzahl von Varianten auf dem Markt. Sie lassen sich in zwei Gruppen einteilen: Variable und statische Systeme. Zur ersten Gruppe gehören Vorhänge, Jalousien, Rollos, Markisen, Rolläden, Klappläden, usw.. Da sie bewegliche Teile enthalten, unterliegen sie Verschleiß. Außerdem sind sie verhältnismäßig aufwendig und teuer.

Statische Abschattungen wie z. B. Lamellengitter und Dachüberstände regeln die solare Einstrahlung in Abhängigkeit von der Sonnenhöhe. Sie sind einfach aufzubauen und relativ preiswert, ihre Verschattungscharakteristik ist jedoch unbefriedigend. Der Übergang von verschattend zu nicht verschattend ist zu weich, um die solare Einstrahlung während der Heizperiode voll zu nutzen bzw. eine Überhitzungsgefahr im Sommer weitgehend auszuschließen. Eine bessere Regelcharakteristik weist ein handelsübliches Isolierglas auf, dessen Luftraum spezielle Spiegelprofile enthält [1]. Ein anderes Element arbeitet mit Zylinderlinsen in Kombination mit reflektierenden Streifen [2].

Die hier vorgestellte Prismenscheibe gehört zu den statischen Abschattungssystemen. Prismen werden schon seit langem für Tageslichtbeleuchtung eingesetzt. So gibt es z. B. Fenster, die das direkte Licht größtenteils reflektieren, das diffuse jedoch hindurchlassen [3]. Ferner dienen Prismenscheiben dazu, die Bestrahlungsstärke in Gewächshäusern während des Winters zu erhöhen und im Sommer zu reduzieren [4,5].

Da Prismenscheiben keinen freien Durchblick gestatten, ist ihr Anwendungsspektrum im Fensterbereich sehr begrenzt, z. B. auf Oberlichter. Weit aus besser sind sie jedoch für Solarwände mit transparenter Dämmung (TWD) geeignet, um für eine Selbstverschattung im Sommer zu sorgen. Eine Anordnung aus Prismenscheibe als saisonaler Verschattungseinrichtung und TWD-Solarwand wurde erstmals in [6] vorgeschlagen. Sie wird seit Mitte 1996 in einer Fassade der solaren Experimentierhäuser des Instituts für Solarenergieforschung (ISFH) auch im direkten Vergleich mit anderen transparenten Dämmsystemen getestet [7,8]. Eine Prinzipskizze vom Aufbau der Testwand zeigt [Abbildung 1](#).

In neuerer Zeit sind Abschattungselemente entwickelt worden, die thermochrome [9] oder elektrochrome [10] Schichten enthalten. Das Umschalten zwischen transmittierendem und streuend/reflektierendem Verhalten wird bei ihnen durch Temperaturveränderungen bzw. Anlegen eines elektrischen Feldes bewirkt. Sie schal-

Dr.-Ing. Dirk Christoffers ist Leiter der Arbeitsgruppe Passive Solarenergienutzung in Gebäuden, Philipp Kneser (Diplomand) und Dipl.-Phys. Ute Schramm (Doktorandin) sind Mitarbeiter der Abteilung Systemtechnik von Solarenergieanlagen am Institut für Solarenergieforschung GmbH Hameln/Emmerthal (ISFH), Emmerthal.

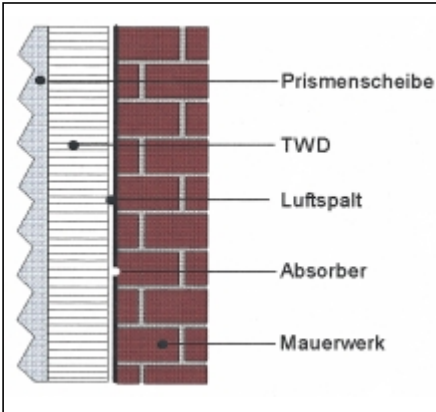


Abbildung 1: Schematische Darstellung einer Solarwand mit Prismenscheibe als saisonaler Überhitzungsschutz

ten um zwischen transmittierend und streuend/reflektierend in Abhängigkeit von der Temperatur bzw. durch Anlegen eines elektrischen Feldes. Beide Systeme sind noch nicht serienreif. Die Herstellungskosten dürften jedoch über denen herkömmlicher Verschattungseinrichtungen liegen und eine breite Anwendung dieser Komponenten erschweren.

2. Funktionsprinzip der Prismenscheibe

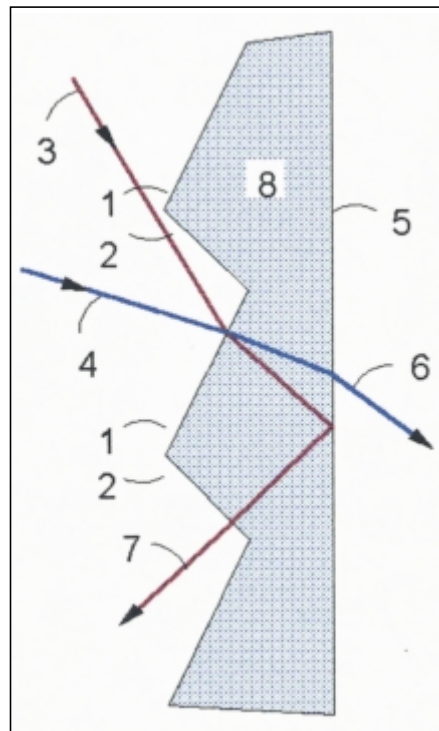
In **Abbildung 2** ist das Schnittbild einer Prismenscheibe dargestellt. Die beiden eingezeichneten typischen Strahlengänge verdeutlichen das Funktionsprinzip der Prismenscheibe. Flach einfallende Sonnenstrahlen werden durchgelassen. Dabei ist es gleichgültig, ob sie auf die nach oben oder nach unten geneigten Prismenflächen auftreffen. Strahlen mit großem Einfallswinkel (hoher Sonnenstand) werden dagegen an den nach oben geneigten Flächen so zur Scheibenrückseite gebrochen, daß sie dort den Grenzwinkel der Totalreflexion überschreiten und reflektiert werden. Die Prismenwinkel werden so gewählt, daß bei hohen Sonnenständen ein Auftreffen der Direktstrahlung auf die nach unten geneigten Flächen nicht möglich ist.

Für die Bestimmung der richtungsabhängigen Transmissionskoeffizienten wurde eine Testscheibe mit den Prismenwinkeln 30° und 42° angefertigt. Die Winkel wurden so gewählt, daß an einer senkrecht aufgestellten und

nach Süden ausgerichteten Scheibe bei süd-stehender Sonne ab einem solaren Höhenwinkel von 48° Totalreflektion eintritt. Die Scheibe wurde aus Acrylglas gefräst, anschließend wurden die Oberflächen poliert. Der Brechungsindex von Acryl ist 1,491. Für Fensterglas ($n=1,517$) differieren die Winkel nur geringfügig. Eine detaillierte Beschreibung der Meßapparatur wird in [11] gegeben.

In **Abbildung 3** sind die Sonnenbahnen für einen Standort von 52° nördlicher Breite und die Grenzlinie der Testscheibe dargestellt. Bei Sonnenständen unterhalb der Grenzlinie wird das direkte Licht überwiegend transmittiert, darüber reflektiert. Die Form der Grenzlinie wurde zunächst mit Hilfe einer Raytracing-Methode berechnet und später durch das Experiment verifiziert.

Abbildung 2: Schnittbild einer Prismenscheibe (8) mit brechenden Flächen (1,2) sowie die beiden Hauptstrahlengänge. Einfallende Sonnenstrahlen (3,4) werden derart auf die rückwärtige Begrenzungsfläche (5) gelenkt, daß sie in Abhängigkeit vom Einfallswinkel (Sonnenstand) durchgelassen (6) oder, bei Überschreitung des Grenzwinkels der Totalreflektion, reflektiert werden (7).



In der Tabelle sind die gemessenen richtungsabhängigen Transmissionskoeffizienten wiedergegeben. Die Winkel δ und φ beschreiben die Richtung der einfallenden Strahlung. Sie entsprechen den Höhen- und Azimutwinkeln der Sonne gegenüber einer senkrechten, nach Süden ausgerichteten Scheibe. Zur Veranschaulichung des Schaltverhaltens dient die graphische Darstellung des Verlaufs von τ in Abhängigkeit des solaren Höhenwinkels δ bei einem festen Azimutwinkel von $\varphi=0$, d. h. die Sonne steht exakt süd (**Abbildung 4**).

3. Simulationsrechnungen

Heizenergieersparnis im Winter aber auch Überhitzungserscheinungen im Sommer sind vor allem an sonnigen Tagen zu erwarten. Die Wirksamkeit der saisonalen Verschattung von Südfassaden mit Hilfe von Prismenscheiben gegenüber direkter Einstrahlung verdeutlichen die **Abbildungen 5 und 6**. Die tägliche direkte Strahlungssumme eines klaren Januartages wird nur auf 90 %, an einem Julitag dagegen auf 10 % reduziert (**Abbildung 7**).

Die Bestrahlungsstärke (kW/m^2) an klaren Tagen resultierend aus direkter Bestrahlung wurde nach Bossel [12] aus einer mittleren Strahlungsinintensität (52° Breitengrad, Höhe 0 m, offene Landschaft, bei 80 % des Sonnenhöchststandes) des betreffenden Monats und dem Kosinus des Einfallswinkels berechnet. Die Bestrahlungsstärken hinter der Prismenscheibe ergeben sich durch Multiplikation mit τ als Funktion von δ und φ . Die täglichen Strahlungssummen errechnen sich aus der Integration der Bestrahlungsstärke über die Zeit, in der sich die Sonne über dem Horizont und vor der Südfassade befindet. Den Berechnungen liegt die örtliche Solarzeit zugrunde.

In **Abbildung 8** ist das Transmissionsverhalten der Prismenscheibe für den Standort Hameln für verschiedene Abweichungen von der Südausrichtung dargestellt. Wiederum ist ausschließlich direkte Einstrahlung berücksichtigt. Bis zu Abweichungen von $\pm 20^\circ$ ist die Abschattungswirkung kaum beeinträchtigt. Als Grenze für den Einsatz wird ein Wert von $\pm 30^\circ$ Südabweichung angesehen. Diese Ein-

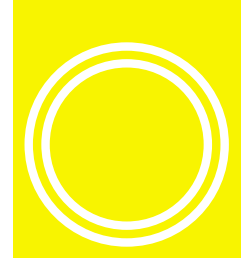
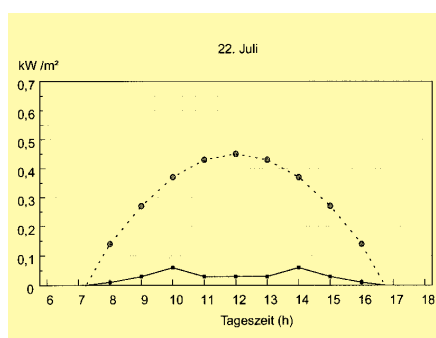
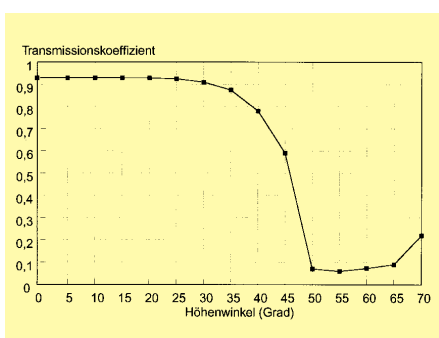
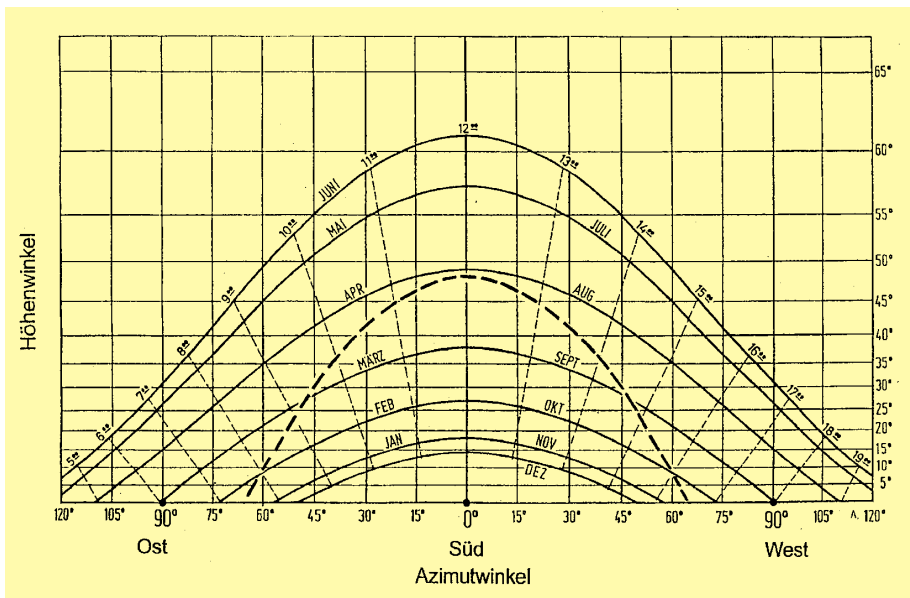


Tabelle: Transmissionskoeffizienten (%) der Prismenscheibe in Abhängigkeit vom Höhen- und Azimutwinkel der einfallenden Strahlung (Meßgenauigkeit ± 3%)

		Azimutwinkel φ (Grad)																	
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
Höhenwinkel δ (Grad)	70	22	21	20	19														
	65	8	8	8	8	8	8	8											
	60	7	7	7	7	8	9	9	8	7	9								
	55	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	8	13	13					
	50	7	7	7	7	7	6	7	8	11	17	17	17	15	14	13	13		
	45	59	59	55	45	14	9	10	18	18	16	15	14	12	11	11	11	13	23
	40	79	79	77	76	74	70	60	21	18	16	15	13	11	10	10	10	11	19
	35	87	87	87	86	83	82	78	72	58	18	16	15	13	10	9	9	10	16
	30	90	90	90	90	89	87	85	82	76	65	24	19	16	11	8	8	9	14
	25	93	92	92	91	91	90	89	87	83	78	66	24	20	11	8	8	8	12
	20	93	93	93	92	92	91	90	89	87	83	76	60	24	10	9	8	8	11
	15	93	94	93	94	93	93	92	91	89	87	82	72	36	12	9	9	8	12
	10	94	93	93	93	93	92	92	91	90	87	83	76	58	12	10	9	6	7
	5	94	94	94	94	94	93	93	92	90	89	85	78	62	14	11	9	6	7
	0	94	94	94	94	94	93	93	92	90	89	85	78	62	32	12	8	5	7

Abbildung 3: Sonnenbahndiagramm für 52° nördliche Breite und Grenzlinie (gestrichelt dargestellt) einer senkrechten, nach Süden orientierten Prismenscheibe. Sonnenbahnen jeweils für den 22. eines Monats. Brechungsindex $n=1,51$, Prismenwinkel 30° und 42°. Bei Sonnenständen unterhalb der Grenzlinie wird die direkte Strahlung überwiegend transmittiert, darüber reflektiert.



schränkung ist jedoch von geringer Relevanz, da der Einsatz von transparenten Dämmungen in Hinblick auf die nachlassende Effizienz bei größeren Südabweichungen nicht empfohlen werden kann. Eine grundsätzlich mögliche Anpassung an Südabweichungen durch Drehung der Prismenscheibe um die Flächennormale erscheint nicht notwendig und wurde deshalb nicht weiter untersucht.

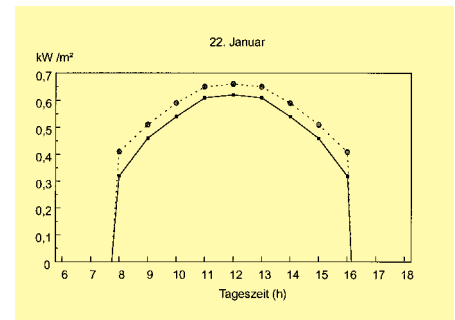


Abbildung 6: Bestrahlungsstärke (kW/m^2) aus direkter Einstrahlung an der Südfassade an klaren Januartagen mit —■— und ohne•..... vorgehängter Prismenscheibe

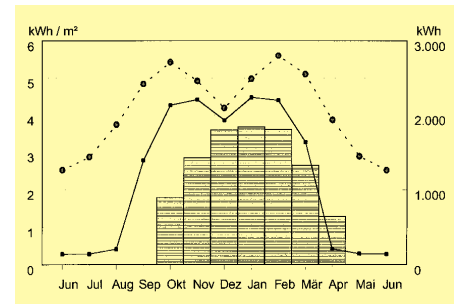


Abbildung 7: Tägliche Strahlungssumme (kWh/m^2) an der Südfassade aus direkter Strahlung an klaren Tagen mit —■— und ohne•..... vorgehängter Prismenscheibe. Die Säulen zeigen zum Vergleich den monatlichen Heizenergieverbrauch (kWh) eines gut gedämmten Einfamilienhauses in Norddeutschland.

Abbildung 4: Verlauf des Transmissionskoeffizienten der Prismenscheibe in Abhängigkeit vom solaren Höhenwinkel bei einem Azimutwinkel von $\varphi = 0^\circ$ (süd)

Abbildung 5: Bestrahlungsstärke (kW/m^2) aus direkter Einstrahlung an der Südfassade an klaren Julitagen mit —■— und ohne•..... vorgehängter Prismenscheibe

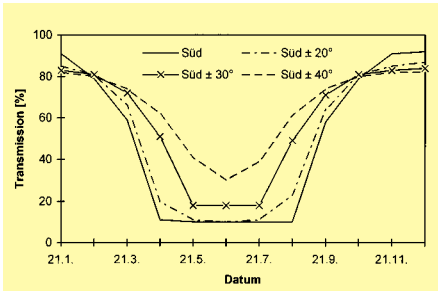
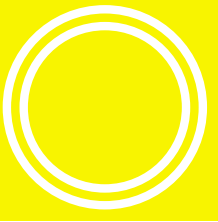
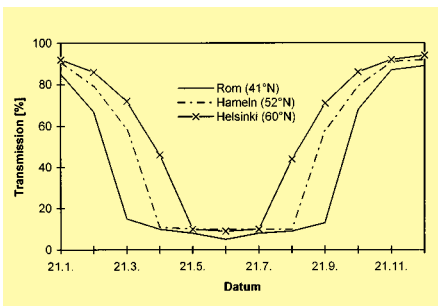


Abbildung 8: Berechnete Transmission der Prismenscheibe für Abweichungen von der Südausrichtung am Standort Hameln

Abbildung 9: Berechnete Transmission der Prismenscheibe für Rom, Hameln und Helsinki im Verlauf eines Jahres bei südlicher Ausrichtung



Da die Prismenscheibe auf den Sonnenstand reagiert, ist ihre Transmission auch von der geographischen Breite des Einsatzortes abhängig. [Abbildung 9](#) zeigt den Transmissionsgrad über das Jahr für die Standorte Rom, Hameln und Helsinki. Man erkennt, daß die winterliche Phase hoher Transmission um so länger wird, je weiter man nach Norden kommt. Damit paßt sich das System hervorragend den länger währenden Heizperioden an.

4. Praxistest

Die ISFH-Versuchshäuser bieten die Möglichkeit, Fassadenelemente in situ zu testen. Die Häuser sind mit einer Datenerfassungsanlage und einer Vielzahl von Sensoren ausgestattet. Unter anderem werden alle wichtigen meteorologischen Daten erfaßt. Das Testelement ist wie in [Abbildung 1](#) skizziert aufgebaut. Die transparente Wärmedämmung ist 10 cm dick, die dahinter liegende Wand besteht aus 24 cm Kalksandstein. Das Referenzelement hat einen identischen Aufbau, lediglich ist die Prismenscheibe durch eine gewöhnliche plane Glasscheibe ersetzt



Abbildung 10: Transparentes Dämmelement mit Prismenscheibe sowie ein Referenzelement vor dem Einbau in die Südfassade eines ISFH-Versuchshauses

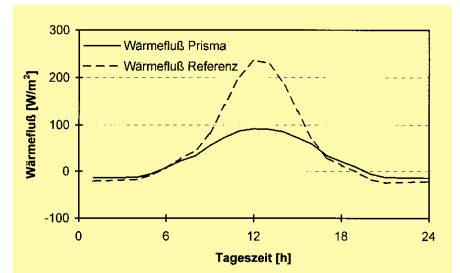
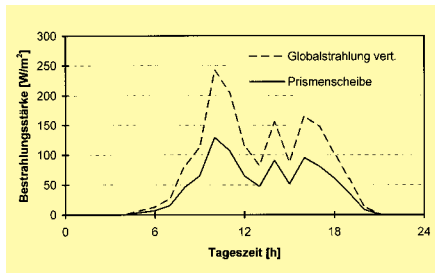


Abbildung 11: Globalstrahlung (vertikal, Süd) und Bestrahlungsstärke hinter der Prismenscheibe an einem stark bedeckten Sommertag (26. 6. 1997) mit überwiegend diffusem Strahlungsanteil; Transmissionsgrad 56%

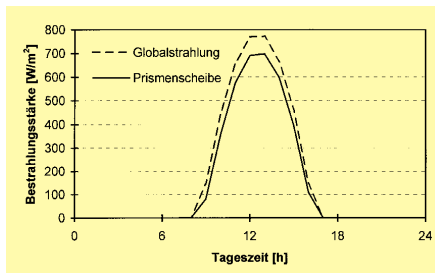


Abbildung 12: Globalstrahlung (vertikal, Süd) und Bestrahlungsstärke hinter der Prismenscheibe an einem klaren Wintertag (16. 1. 1997); Transmissionsgrad 86%

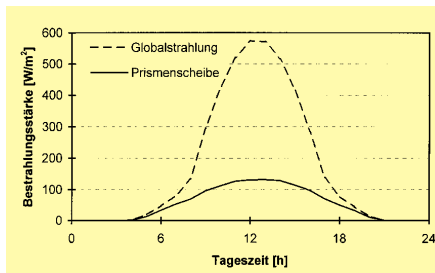


Abbildung 13: Globalstrahlung (vertikal, Süd) und Bestrahlungsstärke hinter der Prismenscheibe an einem klaren Sommertag (03. 6. 1997); Transmissionsgrad 30%

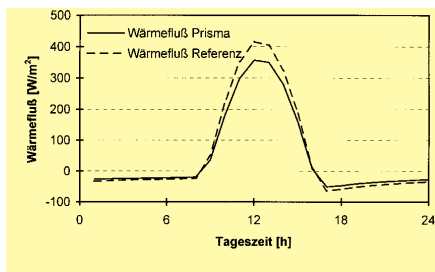
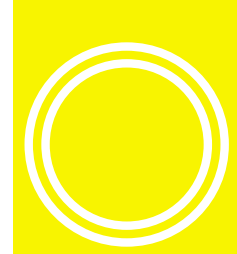


Abbildung 14: Wärmefluß in die solare Südfassade an einem klaren Wintertag (16. 1. 1997). Dargestellt sind die zeitlichen Verläufe am Testelement mit Prismenscheibe und am Referenzelement.

Abbildung 15: Wärmefluß in die Solarwand an einem klaren Sommertag (3. 6. 1997)



worden. [Abbildung 10](#) zeigt die Elemente vor dem Einbau in die Fassade.

Um das Schaltverhalten der Prismenscheibe unter Freilandbedingungen zu demonstrieren, wurden drei Tage mit verschiedenen Einstrahlungsbedingungen ausgewählt ([Abbildung 11 bis 13](#)). Aufgetragen sind jeweils der zeitliche Verlauf der Globalstrahlung (Süd, vertikal) und der Bestrahlungsstärke hinter der Prismenscheibe.

Die gemessene Winter/Sommer-Modulation der transmittierten Strahlung ist aufgrund des stets vorhandenen Diffusanteils im Sonnenlicht und aufgrund der vom Boden rückgestreuten Strahlung erwartungsgemäß nicht so stark wie für rein direkte Strahlung (siehe Abschnitt 3). Die Werte zeigen aber, daß ein effektiver Überhitzungsschutz im Sommer bei guter Ausnutzung der solaren Einstrahlung im Winter gegeben ist. An bewölkten Tagen mit fast ausschließlich diffuser Strahlung ist wegen der insgesamt niedrigen Einstrahlung auch im Sommer keine Überhitzung der Gebäude zu erwarten.

Die Abschattungseffizienz der Prismenscheibe im Zusammenwirken mit dem TWD-Material kann mit Hilfe der in die Wand eintretenden Wärmeströme demonstriert werden ([Abbildungen 14 und 15](#)). Die Röhrenstruktur des TWD-Materials bewirkt eine geringe sommerliche Abschattung, die jedoch nicht ausreichend ist. Die Prismenscheibe reduziert die Wärmeflüsse am klaren Sommertag auf weniger als die Hälfte, während die Wärmeflüsse im Winter fast ebenso hoch sind wie am Referenzelement.

5. Ausblick

Werden Gebäude mit einer wirksamen transparenten Dämmung ausgerüstet, so sollten die Elemente mit einer Verschattungseinrichtung versehen werden, damit sommerliche Überhitzungen vermieden werden. Prismenscheiben erreichen eine saisonale Verschattung mit guter Effizienz. Sie sind einfach im Aufbau, haben keine beweglichen Teile und sind daher wartungs- und verschleißfrei. Es ist zu erwarten, daß die Kosten weit unter denen vergleichbarer Verschattungseinrichtungen liegen werden und damit die Markteinführung von transparenten

Dämmungen allgemein erleichtert wird.

Anstatt mit transparenten Wärmedämmungen im engeren Sinne (z. B. Röhrrchen, Honeycombs) lassen sich Solarwände auch mit isolierenden Verglasungen aufbauen, da diese heute z. B. in Form der Wärmeschutzverglasungen über ausgezeichnete Dämmwirkung bei hoher solarer Transmission verfügen. Die Prismenstruktur könnte auf die innere Scheibe aufgebracht werden. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, eine Prismenplatte in den Scheibenzwischenraum einzulegen ([Abbildung 16](#)).

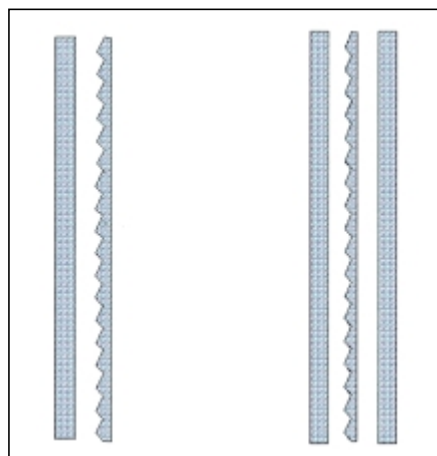
Da die Funktion der Prismenscheibe nicht von den absoluten Dimensionen abhängt, könnten auch Folien mit entsprechender Oberflächenstruktur zum Einsatz kommen. Diese können verspannt oder auf die planen Innenscheiben aufgelegt (Fixierung durch Adhäsion) bzw. verklebt werden.

Ein Simulationsprogramm zur Berechnung des Transmissionsverhaltens der Prismenscheibe unter natürlichen Einstrahlungsbedingungen ist im Test [13].

6. Dank

Wir danken Frau Barbara Jacobi, Herrn Gerd Schiewe und Herrn Andreas Treder für die technische Unterstützung sowie für die Hilfe bei der Erstellung des Manuskripts.

Abbildung 16: Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung bestehend aus Planglas und Prismenscheibe sowie eine Ausföhrung mit eingelegter Prismenplatte aus Glas oder Kunststoff



Literatur

- [1] H. Köster
„Solarenergie- und Tageslichtnutzung im Wohnungs- und Verwaltungsbau“, Proceedings 7th Intl. Solar Forum, Frankfurt am Main (1992) 484
- [2] K. Kuhnke, G. Hammer
„Directional Selective Transmission with Cylindrical Lenses“, Solar Energy 52,1 (1994) 127
- [3] K. Daniels, Ch. Bartenbach
„Tageslichtdurchflutung durch Sonnenschutz“, Technik am Bau, (1977) 291
- [4] D.L. Critten
„Light enhancement using E-W aligned long prismatic arrays at high latitude“, Solar Energy 41,6 (1988) 583
- [5] K. Kurata
„Scale-model experiments of applying a fresnel prism to greenhouse covering“ Solar Energy 46,1 (1991) 55
- [6] D. Christoffers
„Saisonale Abschattung von Sonnenlicht mit Hilfe von Prismenscheiben“, Proc. Building Physics Symp., Budapest (1995)
- [7] P. Kneser, U. Schramm, D. Christoffers
„Charakterisierung von Prismenscheiben zur saisonalen Abschattung von TWD-Elementen bei verschiedenen Einstrahlungsbedingungen“, Proc. 7. Symp. Therm. Solarenergie (OTTI), Staffelstein (1997) 401
- [8] U. Schramm, P. Kneser, D. Christoffers
„Vergleichende Untersuchungen zum saisonalen Verhalten verschiedener TWD-Systeme“, Proc. 7. Symp. Therm. Solarenergie (OTTI), Staffelstein (1997) 406
- [9] A. Beck, W. Korner, T. Hoffmann, J. Fricke
„Thermochromic gels for control of insulation“, Solar Energy 50 (1993) 407
- [10] „Solaroptimierte Gebäude mit minimalem Heizwärmebedarf“, Projektträger Biologie, Energie, Ökologie des Bundesministeriums für Forschung und Technologie, Statusbericht, Hannover (1994) 105
- [11] D. Christoffers
„Saisonal shading of vertical south facades with prismatic panes“ Solar Energy 57,5 (1996) 339
- [12] U. Bossel
„Kosinus Stunden“, ISBN 3-7880-7115-X, Verlag C.F. Müller, Karlsruhe (1979)
- [13] P. Kneser
„Untersuchungen an Prismenscheiben zur saisonalen Abschattung von transparenten Wärmedämmelementen“, Diplomarbeit, ISFH und Universität Oldenburg (1997)