

Nutzung passiver Effekte bei der aktiven solaren Gebäudeheizung

H. Kerskes, H. Müller-Steinhagen
 Universität Stuttgart, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW)
 Pfaffenwaldring 6, D-70550 Stuttgart
 Tel.: 0711/685-3536, Fax: 0711/685-3503
 email: kerskes@itw.uni-stuttgart.de

1 Einleitung

Die Nutzung der thermischen Solarenergie zur Beheizung von Gebäuden gewinnt immer stärker an Bedeutung. Bezüglich der Weiterentwicklung dieser Technik sind derzeit sehr starke Bemühungen spürbar, die auf eine deutliche Erhöhung des solaren Beitrag bei der Gebäudeheizung abzielen. Angestrebt werden Deckungsanteile oberhalb 50%. Zur Erreichung dieses Ziels sind zwangsläufig größere Kollektorflächen erforderlich. Diese Tatsache führt hinsichtlich der Realisierung zu zwei neuen Gesichtspunkten. Zum einen kann es bei kleinen kompakten Gebäuden, wie sie Niedrigenergiehäuser oft darstellen, zu einem Mangel an geeigneter Dachfläche führen. Zum anderen gewinnt die Solaranlage an der Gebäudehülle eine optisch dominantere Rolle. Diese wird unter ästhetischen Gesichtspunkten zum Teil kontrovers diskutiert.

Um auch der Solartechnik im Bereich der Gebäudeintegration neue Wege zu eröffnen, ist eine „solare Aktivierung“ von normalerweise passiven Gebäudeelemente ein interessanter Ansatz. Dies bedeutet, typische Gebäudeelemente wie zum Beispiel Fassaden, Fenster, Verschattungseinrichtungen, Vordächer und der gleichen werden als aktive Kollektorfläche ausgelegt.

Die Gebäudefassade als Kollektor nutzbar zu machen bietet zwei wichtige Vorteile: erstens steht viel Fläche zur Verfügung und zweitens ist eine nach Süden orientierte Wand für die solare Raumheizung besser geeignet, als oft angenommen wird. Denn gegenüber einer optimalen Kollektorneigung, die bei einem Neigungswinkel zwischen ca. 45° und 60° liegt, werden mit senkrechter Anstellung des Kollektors noch 85% des maximalen Ertrags erreicht. Aufgrund dieser günstigen Randbedingungen haben sich bereits Fassadenkollektoren als kommerzielle Produkte etabliert.

Ein neuer Ansatz, der in diesem Beitrag vorgestellt und diskutiert wird, ist die Nutzung des Fensters als Solarkollektor. In Zusammenarbeit mit der Fa. Robin [3] und der Straßburger Hochschule Ensais [4] wurde ein Fassadenelement auf seine thermische Leistungsfähigkeit hin untersucht. Es besteht aus einer konventionellen Doppelverglasung und einem durchströmten Kollektorelement, dass zwischen den Glasscheiben eingebracht ist. Der prinzipielle Aufbau dieses „Fensterkollektors“ ist in Abbildung 1 dargestellt. Neben der Bereitstellung von Wärme bietet der Fensterkollektor einen zusätzlichen Lichtgewinn für das Gebäude. Damit schafft er noch mehr gestalterische Freiheiten als ein Fassadenkollektor. Als Randbedingung für die Auslegung des Kollektors galt, dass bei senkrechtem Blick auf das Fenster mindestens 50% der Fensterfläche transparent bleiben.

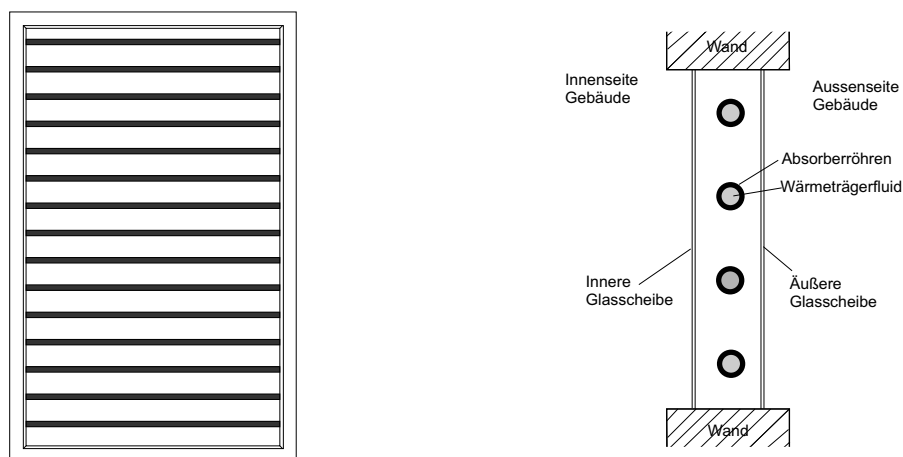


Abb. 1: Schematische Darstellung des Fensterkollektors, Frontansicht (links), Querschnitt (rechts).

2 Simulation einer Solaranlage zur Trinkwassererwärmung und Heizungsunterstützung unter Verwendung des neuen Kollektordesigns

Ziel der Simulationsstudie war es, die anteilige jährliche Energieeinsparung f_{sav} einer Solaranlage unter Verwendung des Fensterkollektors gegenüber einer konventionellen Heizungsanlage, bzw. einer Solaranlage mit konventionellem Kollektor zu berechnen. Eine Frage die sich bei der Vorstellung eines „beheizten Fensters“ sofort aufdrängt ist, wie verändert sich das Innenraumklima des angrenzenden Raumes durch die Maßnahme. Auch diesbezüglich liefert die dynamische Gebäudesimulation erste Aufschlüsse.

Für eine maximale Wärmeausbeute ist besonders bei senkrechter Einbaulage der Wirkungsgrad des Kollektors in Abhängigkeit des Einstrahlungswinkels anzupassen. Betrachtet man die Einstrahlung auf eine nach Süden orientierte senkrechte Fläche z.B. für den Standort Würzburg, so wird deutlich, dass in den Monaten der Heizperiode die meiste Energie in longitudinaler Richtung in einem Winkelbereich zwischen 30 und 60° eingestrahlt wird. Für diese Einstrahlungswinkel soll der Fensterkollektor einen möglichst großen Wirkungsgrad aufweisen. Hierfür wurden zusätzlich zu den Absorberröhren spezielle Reflektoren in das Fenster integriert.

Die Optimierung der optischen Eigenschaften wurden mit Hilfe des Raytracing-Verfahrens durchgeführt. Dabei wird, unter Berücksichtigung aller relevanter physikalischen Effekte, berechnet, welcher Anteil der auf eine Fläche eingestrahlt Energie auf einer Zielfläche (im vorliegenden Fall die Absorberröhren) ankommt. Bei der Berechnung wurden folgende Kenngrößen zugrunde gelegt:

- das Absorptionsvermögen des Absorbers beträgt 95 %
- das Absorptionsvermögen des Absorbers ist richtungsabhängig
- die Transmission der Glasabdeckung beträgt 97 %
- das Reflektionsvermögen des Reflektormaterials beträgt 95 %
- der Brechungsindex der Glasabdeckung beträgt 1,52

Richtungsabhängigkeit des Absorptionsvermögens bedeutet, dass das angegebene Absorptionsvermögen von 95% nur für Strahlen gilt, die senkrecht auf den Absorber auftreffen. Mit zunehmendem Einstrahlungswinkel steigt am Absorber der Anteil der reflektierten Strahlung, so dass sich das Absorptionsvermögen verringert. Die bei diesen Berechnungen zugrunde gelegte Abhängigkeit wurde von *Craig und Harding* [1] für den Sydney-Absorber ermittelt.

Unter Berücksichtigung dieser realen Werte kann der Einfallswinkelkorrekturfaktor (IAM) für den Kollektor zuverlässig berechnet werden. Der Wert für den Einstrahlungswinkel 0° (senkrechte Strahlung) stellt den Konversionsfaktor η_0 dar, mit der Vereinfachung, dass der Kollektorwirkungsgradfaktor F' zu eins gesetzt wird.

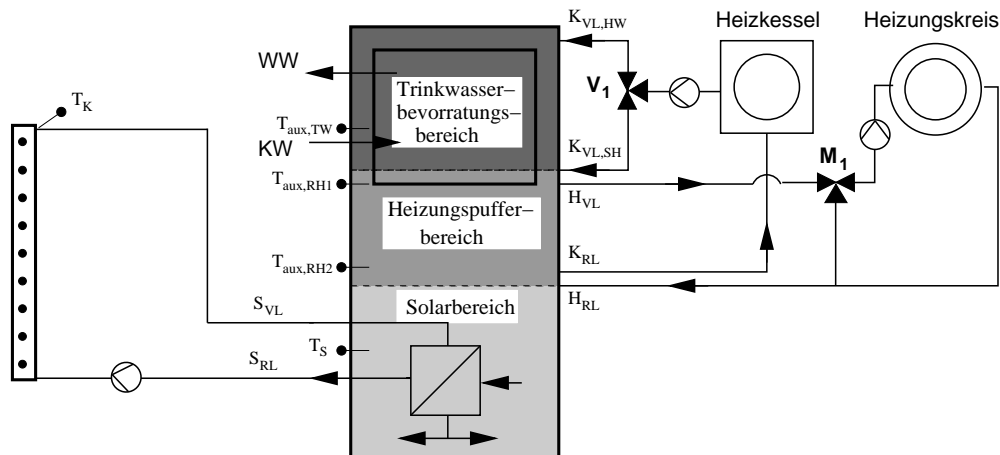
Für den betrachteten Fensterkollektor wurden folgende optische Kennwerte (η_0, IAM) aus der Raytracing-Studie berechnet und die thermischen Kennwerte (k_1, k_2, C) anhand typischer Werte einer Doppelverglasung abgeschätzt:

Kollektor:										
Kennwerte bezogen auf Aperturfläche	$\eta_0 = 0,23$ $k_1 = 2,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})^a$ $k_2 = 0,0 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^2)$ $C = 10,0 \text{ kJ}/(\text{m}^2\text{K})$									
Einfallswinkel-Korrekturfaktoren	Θ	0°	20°	30°	40°	50°	55°	60°	70°	90°
	$K^{dir}(\Theta_L)$	1,0	1,31	1,64	2,04	2,33	2,77	2,15	1,78	0,0
	$K^{dir}(\Theta_T)$	1,0	0,99	0,99	0,97	0,95	0,92	0,84	0,69	0,0
	$K^{dif} = 1,65$									

^ader k_1 -Wert wurde abgeschätzt. Das verwendete Fenster hat einen k-Wert von 1,4. Da die Wärmequelle in der Mitte des Fensters sitzt, wurde für den k_1 -Wert des Kollektors der doppelte k-Wert des Fensters angenommen.

Dieser Kollektor wurde in eine typische Kombianlage integriert.

Eine schematische Darstellung der verwendeten Solaranlage ist in Abbildung 2 dargestellt. Sie ist als Anlage mit einem „Tank-im-Tank“-Speicher ausgeführt, da dies der am häufigsten verwendete Speichertyp ist. Das Speichervolumen beträgt 750 l. Der Heizkessel erwärmt über das Umschaltventil V_1 entweder den Trinkwasserbevorzugungsbereich oder den Heizungspufferbereich. Der Solarkreis speist seine Wärme über einen im unteren Teil des Speichers eingetauchten Wärmeübertrager ein. Die detaillierte Beschreibung der Referenzanlage findet sich im Abschlussbericht des Kombianlagenprojekts [2].



Bezeichnungen

$K_{VL,HW}$	Heizkesselvorlauf HW	H_{VL}	Heizungsvorlauf	S_{VL}	Solarkreisvorlauf
$K_{VL,SH}$	Heizkesselvorlauf SH	H_{RL}	Heizungsrücklauf	S_{RL}	Solarkreisrücklauf
K_{RL}	Heizkesselrücklauf	V_1	Umschaltventil	M_1	Mischventil
WW	Warmwasser	KK	Kaltwasser		
$T_{aux,TW}$	Temperaturfühler Nachheizung Trinkwasser				
$T_{aux,RH1}$	Temperaturfühler Nachheizung ein Raumheizung				
$T_{aux,RH2}$	Temperaturfühler Nachheizung aus Raumheizung				
T_K	Temperaturfühler Solarkreis Kollektor				
T_S	Temperaturfühler Solarkreis Speicher				

Abb. 2: Schematische Darstellung der Referenzanlage

Die Kombianlage selbst ist in einem Einfamilienhaus mit einer Wohnfläche von 128 m^2 installiert. Der Jahres-Heizwärmebedarf des Hauses beträgt ca. 70 kWh pro Quadratmeter. Das Gebäude besitzt eine Fensterfläche von insgesamt 20 m^2 , davon 10 m^2 auf der Südseite. Die verwendeten Fenster haben einen Wärmedurchgangskoeffizienten von $1,4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{k})$.

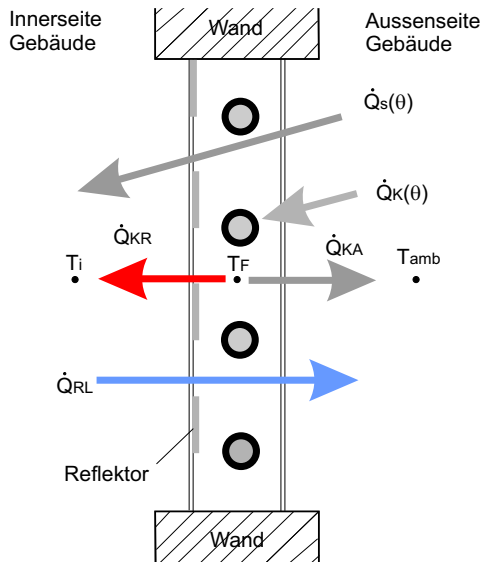
Die Berechnung der Energieeinsparung der untersuchten Solaranlage im Vergleich zu einer herkömmlichen Heizungsanlage erfolgt auf Grundlage der anteiligen jährlichen Energieeinsparung f_{sav} , die folgendermaßen definiert ist:

$$f_{sav} = \frac{Q_{conv,net} \cdot \frac{1}{\eta_{conv}} - Q_{aux,net} \cdot \frac{1}{\eta_{aux}}}{Q_{conv,net} \cdot \frac{1}{\eta_{conv}}}$$

mit

f_{sav}	anteilige jährliche Energieeinsparung
$Q_{aux,net}$	Zusatzenergiebedarf einer solaren Heizungsanlage
$Q_{conv,net}$	Energiebedarf einer konventionellen (nicht solaren) Heizungsanlage
η_{aux}	Nutzungsgrad einer solaren Heizungsanlage
η_{conv}	Nutzungsgrad einer konventionellen (nicht solaren) Heizungsanlage

Die Berechnung der jährlichen Energieeinsparung bei Verwendung des Fensterkollektors als ein Fenster in der Gebäudewand machte eine dynamische Gebäudesimulation notwendig. Die thermische Koppelung zwischen Gebäude und Fensterkollektor wurde in dem verwendeten Simulationsprogramm TRNSYS unter Berücksichtigung gezielter Vereinfachungen realisiert. Abbildung 3 veranschaulicht die Wärmeströme und Temperaturen, die dieser Modellierung zu Grunde liegen. Folgende Größen und Vorgänge werden berücksichtigt:



- Passive Strahlungsgewinne $\dot{Q}_s(\theta)$
- Wärmetransport zwischen Raum und Kollektor \dot{Q}_{KR}
 $\dot{Q}_{KR} = k_1 \cdot A \cdot (T_F - T_i)$
- Wärmetransport zwischen Kollektor und Umgebung \dot{Q}_{KA}
 $\dot{Q}_{KA} = k_1 \cdot A \cdot (T_F - T_{amb})$
- Wärmeverlust des Raums an die Umgebung \dot{Q}_{RL}
 $\dot{Q}_{RL} = 2 \cdot k_1 \cdot A \cdot (T_i - T_{amb})$
- Wärmegewinne des Kollektors durch die Einstrahlung $\dot{Q}_K(\theta)$
- T_F entspricht der mittleren Kollektortemperatur
 $T_F = \frac{T_{ci} + T_{co}}{2}$

Abb. 3: Darstellung der berechneten Wärmeströme und Temperaturen bei der Modellierung des Fensterkollektors als Element der Gebäudefassade

Auf Grund der optischen Eigenschaften des Kollektors sind die passiven solaren Gewinne des Gebäudes durch den Fensterkollektor sehr stark vom Einstrahlungswinkel der Sonne abhängig: Entsprechend des IAM des Kollektors wird der hinter dem Fensterkollektor liegende Raum in Abhängigkeit vom Sonnenstand unterschiedlich stark abgeschattet. Dies muss berücksichtigt werden, wenn die passiven solaren Gewinne korrekt berechnet werden sollen. Abbildung 4 zeigt, wie die Abschattung mit steigendem Sonnenstand zunimmt.

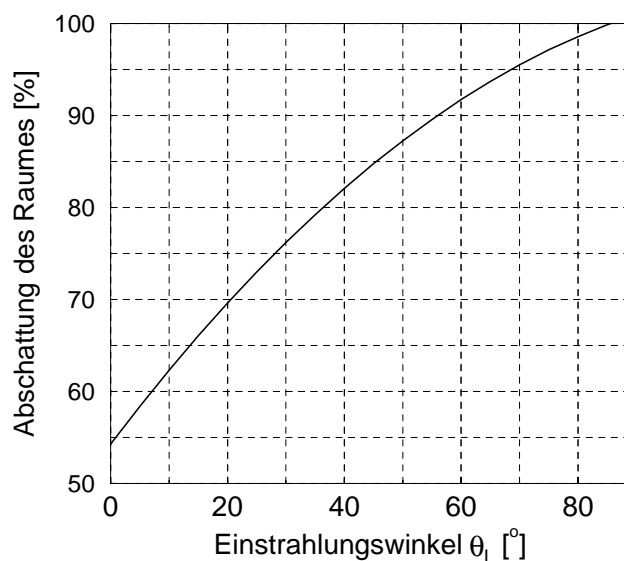


Abb. 4: Prozentuale Abschattung eines hinter dem Fensterkollektor liegenden Raums in Abhängigkeit des Einstrahlungswinkels Θ_L

3 Ergebnisse der Simulationsstudie

Die nachfolgend vorgestellte Simulationsstudie dient dazu, einen Eindruck von der thermischen Leistungsfähigkeit des Fensterkollektors zu gewinnen. Dazu wurde der Kollektor mit den oben angegebenen Kollektorparametern in die Referenzanlage eingesetzt und die jährliche anteilige Energieeinsparung berechnet. Fünf Varianten wurden miteinander verglichen:

- A Referenzgebäude ohne Solaranlage (Referenz)
- B Referenzgebäude mit Solaranlage, Kollektor dachmontiert (Neigungswinkel 45° , Fläche 15 m^2)
- C Referenzgebäude mit Solaranlage, Kollektor an der Fassade montiert (Neigungswinkel 90° , Fläche 15 m^2)
- D Gebäude mit Solaranlage und Fensterkollektor (Neigungswinkel 90° , Fläche 15 m^2)
- E Gebäude ohne Solaranlage mit einer zusätzlichen Fensterfläche von 15 m^2 in der Südfassade

Die erzielbare Energieeinsparung der einzelnen Varianten ist in Tabelle 1 zusammengestellt.

Variante	Gesamtenergiebedarf Q_{ges} [kWh]	Heizwärmebedarf Q_{SH} [kWh]	Nachheizenergie Q_{aux} [kWh]	Einsparung Q_{sav} [kWh]	f_{sav} [%]
A	12674	9090	12674	–	–
B	13028	9090	9480	3193	25,2
C	12951	9090	9862	2812	22,2
D	12688	8907	10500	2174	17,2
E	13503	9919	13503	- 829	- 6,5

Tab. 1: Vergleich der jährlichen Energieeinsparungen für die fünf oben beschriebenen Varianten

Der Gesamtenergiebedarf setzt sich zusammen aus dem Heizwärmebedarf (Referenz 9090 kWh/a), dem Wärmebedarf zur Trinkwassererwärmung (2940 kWh/a) und den Wärmeverlusten des Warmwasserspeichers (Referenz 644 kWh/a).

Die Installation einer typischen Kombianlage mit einem auf dem Schrägdach montierten Kollektor, wie in Variante **B** beschrieben, führt zu einer jährlichen Energieeinsparung von 3193 kWh oder 25,2 % gegenüber dem gleichen Gebäude ohne Solaranlage. Die Montage des gleichen Kollektors an der Fassade statt auf dem Dach vermindert die Energieeinsparung auf 2812 kWh oder 22,2 %. Wird nun der Fassadenkollektor durch den Fensterkollektor ersetzt, führt dies zu einer Verminderung der Energieeinsparung von 638 kWh. Das bedeutet, der Fensterkollektor liefert eine um 23 % geringere Energieeinsparung als der Fassadenkollektor. Die verhältnismäßig geringe Verminderung ist erstaunlich, bedenkt man, dass beim Fensterkollektor nur die Hälfte der Aperturfläche als aktive Kollektorfläche ausgelegt ist. Im Vergleich dazu, ein Fassadenkollektor mit ebenfalls nur der halben Kollektorfläche führt zu einer Verminderung der Einsparung von 1018 kWh oder 36 %. Es wäre naheliegend zu vermuten, dass die geringere Verminderung der Energieeinsparung auf passive solare Gewinne zurückzuführen ist, die durch das zusätzliche Südfenster erzielt werden.

Die Berechnung der Variante **E** zeigt jedoch, dass der Einbau eines zusätzlichen 15 m^2 großen Fensters zu einer Erhöhung des Heizwärmebedarfs um 829 kWh/a führt. Zwar werden durch die Südausrichtung passive Solargewinne von 428 kWh/a erreicht, die zusätzlichen Transmissionswärmeverluste von 1417 kWh/a überkompensieren jedoch diesen Gewinn.

Der Fensterkollektor erzielt dagegen nur etwa 200 kWh passive solare Gewinne. Im Gegensatz zu einem normalen Fenster treten hier jedoch wesentlich geringe Transmissionswärmeverluste auf. Denn, ist der Kollektorkreis in Betrieb, ist die Scheibeninnentemperatur T_F in der Regel höher als die Innenraumtemperatur T_i . In diesem Moment entstehen keine Wärmeverluste durch die zusätzliche Glasfläche. Im Gegenteil, es fließt der Wärmestrom \dot{Q}_{KR} vom Fensterkollektor zum Raum. Diese Tatsache ist neben der speziell auf die Einstrahlungswinkel angepasste Optik ein Grund, warum der Fensterkollektor eine höhere Energieeinsparung erbringt als ein Fassadenkollektor mit gleicher Absorberfläche.

3.1 Raumklima

Bezüglich der Behaglichkeit in dem Raum mit Fensterkollektor stellt sich die Frage, in wie weit das Raumklima, besonders im Sommer, durch das „beheizte“ Fenster beeinflusst wird. Diese Frage ist durch die hier durchgeführte Simulationsstudie nicht ausreichend zu beantworten.

Mit Hilfe der Gebäudesimulation konnte jedoch gezeigt werden, dass die „eingebaute Verschattung“ des Fensterkollektors eine Überhitzung des Gebäudes im Sommer vermeidet. Während bei Einbau eines „normalen“ Fensters mit gleicher Fläche die Raumtemperaturen im Sommer auf über 35°C ansteigen, lag die maximale Innenraumtemperatur bei Einbau des Fensterkollektor nicht höher als ca. 25°C.

Problematischer könnte die relativ hohe Temperatur der inneren Glasscheibe sein. Die Simulationen zeigten, dass die Scheibeninnentemperatur T_F , die ungefähr der mittleren Kollektortemperatur entspricht, häufig Werte zwischen 40 und 55°C erreicht. Daraus resultiert nach grober Abschätzung eine Temperatur von ca. 28 bis 35°C an der Außenseite der inneren Glasscheibe. Verlässliche Werte werden Messungen liefern, die an einem Prototypen geplant sind.

4 Fazit

Die Untersuchung zeigt, dass die Kombination aus aktivem Solarsystem und passiven Gebäudeelementen eine energetisch sinnvolle Lösung darstellt. Das System Fensterkollektor zeichnet sich durch folgende Vorteile aus:

- Aktive solare Wärmeerzeugung
Der Vergleich zwischen konventionellem Flachkollektor und Fensterkollektor zeigt, dass die thermische Leistungsfähigkeit bezogen auf die wirksame Kollektorfläche etwa der eines guten Flachkollektors entspricht. Die anteilige jährliche Energieeinsparung beträgt bei einem Fensterkollektor mit einer Fläche von 15 m² für das Referenzhaus mit Niedrigenergiestandard und Standort Würzburg 17,2 %. Dies ist ein sehr guter Wert und entspricht etwa dem Wert der gleichen Solaranlage mit 10 m² Flachkollektor, wenn dieser auf dem 45° geneigtem Dach montiert wäre.
- Passive Gewinne
 - Verminderung des Heizwärmebedarfs.
Durch das „beheizte Fenster“ werden die Transmissionswärmeverluste vermindert. Zusätzlich fließt ein Teil der Kollektorverluste als Wärmestrom dem Gebäude zu.
 - Zusätzlicher Lichtgewinn für das Gebäude durch die zusätzliche große, nach Süden orientierte Glasfläche. Durch die „eingebaute Verschattung“ des Fensterkollektors tritt keine Überhitzung im Sommer auf. Genaue Daten über die Oberflächentemperatur der inneren Glasscheibe müssen Messungen liefern.
 - Neue gestalterische Möglichkeiten bei der Integration großer Kollektorflächen in Gebäuden.

Damit ist gezeigt, dass der Fensterkollektor als aktives Solarsystem mit gleichzeitiger Nutzung weiterer passiver Effekte, einen kreativen Beitrag zur weiteren Verbreitung der solaren Gebäudeheizung liefert.

Literatur

- [1] S.Craig und G.I. Harding. *Composition, optical properties and degradation of Cu (graded metal carbon) solar selective surfaces*. Thin solid films, Vol. 101 pp. 79-113, 1983.
- [2] G.Stryi-Hipp, H.Kerskes, H.Drück und S.Bachmann. *Abschlussbericht des Projekts „Kombianlagen - Solaranlagen zur kombinierten Trinkwassererwärmung und Heizungsunterstützung*. Dezember 2001.
- [3] J.M.Robin. Ernst Maurerweg 5, 77694 Kehl-Querbach.
- [4] A.Erb und B.Flament. Ecole Nationale Supérieure des Arts et Industries de Strasbourg.