

# **Einfluss der Neigung auf den äusseren konvektiven Wärmeübergang unabgedeckter Absorber**

Daniel Philippen, Michel Y. Haller, Elimar Frank  
SPF Institut für Solartechnik  
Oberseestrasse 10, CH-8640 Rapperswil  
Tel.: 0041 55 222 48 30, Fax: 0041 55 222 48 44  
E-Mail: daniel.philippen@solarenergy.ch  
Internet: www.solarenergy.ch

## **Einleitung**

Für die Erzeugung von Brauchwarmwasser und Raumwärme in Gebäuden können Sonnenkollektoren mit Wärmepumpen kombiniert werden. Bei Verwendung unabgedeckter Kollektoren kann der Kollektorkreis dabei auch mit Temperaturen unter Umgebungstemperatur betrieben werden, bspw. bei bedecktem Himmel oder nachts, und die gewonnene Wärme dem Verdampfer der Wärmepumpe zugeführt werden. Bei der Wärmeübertragung am Absorber müssen dann Prozesse berücksichtigt werden, welche bei abgedeckten Kollektoren und hoher Solareinstrahlung vernachlässigt oder stark vereinfacht werden können. Diese Prozesse sind der langwellige Strahlungsaustausch und die Wärmeübertragung durch Kondensation, Niederschlag und Konvektion. In diesem Beitrag werden Ergebnisse von Messungen an unabgedeckten Kollektoren mit Kissenabsorbern vorgestellt, mit denen die Abhängigkeit des äusseren konvektiven Wärmeübergangs von der Kollektorneigung bei unterschiedlichen Wetterbedingungen (insbesondere Windgeschwindigkeiten) untersucht wurde.

## **Theoretische Grundlagen**

Der Literatur können verschiedene Modelle für die konvektive Wärmeübertragung zwischen Umgebung und Absorberoberfläche bei unabgedeckten Kollektoren entnommen werden ([1], [2]). Meist enthalten diese Modelle eine lineare oder exponentielle Abhängigkeit des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha_{\text{conv}}$  von der Windgeschwindigkeit in einer bestimmten Distanz zur Absorberoberfläche. Den Autoren ist keine Studie bekannt, in welcher der Einfluss der Kollektorneigung auf die konvektive Wärmeübertragung bei unabgedeckten Kollektoren untersucht wurde. Dieser Einfluss ist jedoch zu erwarten, wenn die Windgeschwindigkeiten klein sind und der Wärmeübergang somit massgeblich durch freie Konvektion beeinflusst wird. Auf Grund der bekannten Nusselt-Korrelationen, welche die freie Konvektion

beschreiben [3], ist ein Einfluss bei typischen Kollektorneigungswinkeln vor allem dann zu erwarten, wenn die Oberflächentemperatur des Absorbers unter der Umgebungstemperatur liegt. Solche Betriebszustände mit niedrigen Fluidtemperaturen sind insbesondere beim Betrieb in Kombination mit Wärmepumpen gegeben.

Die Wärmebilanz  $\dot{Q}_{gain}$  eines Kollektors mit der Absorberfläche  $A_{coll}$  setzt sich zusammen aus den flächenbezogenen Gewinnen aus der Absorption kurzwelliger Strahlung ( $\dot{q}_{abs,S}$ ), dem langwelligen Strahlungsaustausch mit der Umgebung ( $\dot{q}_{rad,L}$ ), latenter Wärme durch Kondensation (oder Resublimation) von Luftfeuchtigkeit ( $\dot{q}_{lat}$ ), Wärmeleitung ( $\dot{q}_{cond}$ ) und Konvektion ( $\dot{q}_{conv}$ ) zu:

$$\frac{\dot{Q}_{gain}}{A_{coll}} = \dot{q}_{gain} = \dot{q}_{abs,S} + \dot{q}_{rad,L} + \dot{q}_{lat} + \dot{q}_{cond} + \dot{q}_{conv}$$

Bei Änderung der Energieflüsse muss bis zur Einstellung eines Gleichgewichtszustands zusätzlich die Wärmekapazität des Kollektors berücksichtigt werden. Da die hier präsentierten Messreihen nachts durchgeführt wurden, kann die Absorption der kurzwelliger Strahlung vernachlässigt werden. Ebenfalls vernachlässigt wird die Wärmeleitung über die Rückseite des Kollektors, da diese wärmegeämmt wurde ( $U = 0.3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ). Der Energiefluss durch Konvektion kann vereinfacht mit  $\dot{q}_{conv} = \alpha_{conv} \cdot (T_{amb} - T_m)$  beschrieben werden. Der Energiefluss durch Kondensation wiederum kann in Abhängigkeit von  $\alpha_{conv}$  ausgedrückt werden gemäss [4], da die Kondensation via Massenfluss der Luftfeuchtigkeit an der Absorberoberfläche von der Konvektion beeinflusst ist:

$$\dot{q}_{lat} = \alpha_{conv} \cdot C_{cond} [p_{sat}(T_{DP}) - p_{sat}(T_m)], \text{ mit } C_{cond} = \frac{R_L \cdot r \cdot Le^{-0,66}}{R_D \cdot p_{amb} \cdot c_L}.$$

Der äussere konvektive Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha_{conv}$  des Kissenabsorbers ergibt sich mit Einsetzen in die Energiebilanz deshalb zu<sup>1</sup>:

$$\alpha_{conv} = \frac{\dot{q}_{gain} - \dot{q}_{rad,L}}{|T_m - T_{amb}| + C_{cond} \cdot [p_{sat}(T_{DP}) - p_{sat}(T_m)]}$$

## Messaufbau

Die Messungen wurden nachts auf dem Dach der Hochschule für Technik Rapperswil mit selektiven und nicht-selektiven unabgedeckten Flachkollektoren

<sup>1</sup>  $T_{amb}$  = Lufttemperatur,  $T_m$  = Mittlere Temperatur Absorber-Oberfläche,  $p_{sat}$  = Sättigungsdampfdruck,  $T_{DP}$  = Taupunkttemperatur,  $R_L$  = spez. Gaskonstante Luft,  $R_D$  = spez. Gaskonstante Wasserdampf,  $r$  = Phasenwechselenthalpie,  $Le$  = Lewis-Zahl,  $p_{amb}$  = Luftdruck,  $c_L$  = spez. Wärmekapazität Luft

durchgeführt. Die Kollektoren (Kissenabsorber aus Stahl) wurden mit verschiedenen Eintritts-Temperaturen unter Umgebungstemperatur betrieben und durch einen Tracker in verschiedene Neigungen gebracht. Während einer nächtlichen Messreihe wurde die Eintrittstemperatur jeweils mit einem konstanten Temperaturunterschied zur Lufttemperatur über der Kollektorebene nachgeführt. Relevante meteorologische Größen wie die Windgeschwindigkeit, der langwellige Strahlungsaustausch, die kurzwellige Strahlung sowie Feuchte und Temperatur der Luft wurden direkt auf der Kollektorebene, beziehungsweise neben der Kollektorebene gemessen. Messdaten gingen nur dann in die Auswertungen ein, wenn die Rahmenbedingungen für die Energieflüsse zeitlich relativ konstant waren.

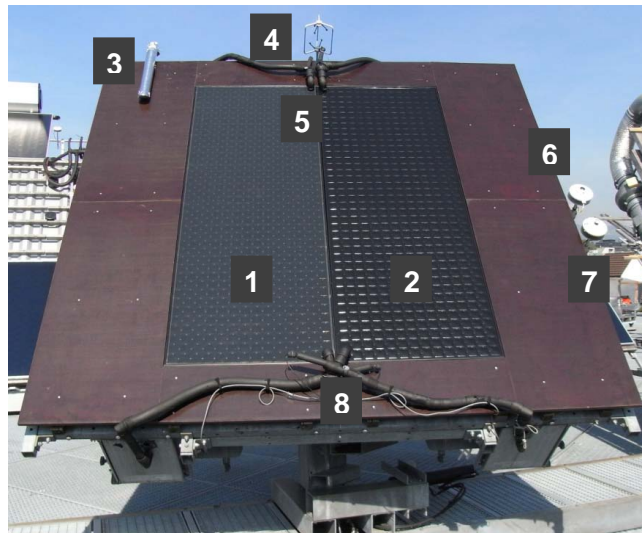


Abbildung 1: Messaufbau auf dem Tracker mit selektivem (1) und nicht-selektivem (2) unabgedecktem Kollektor. Messstellen: Temperatur über Kollektor (3), Ultraschall-Anemometer (4), Pyranometer (6), Pyrgeometer (7), Temperatur Kollektoreinlass (8), Temperatur Kollektorauslass (5).

## Messresultate

### **Verlust der Selektivität unabgedeckter Absorber durch Kondensation:**

Nach Einsatz vollflächiger Kondensation auf den Absorbern (Abbildung 2, ab 21 Uhr) nimmt im Laufe der Nacht die Dicke des Kondensatfilms soweit zu, dass der selektive Absorber seine Selektivität vollständig verliert (siehe Annäherung der spezifischen Leistung des selektiven Absorbers an diejenige des nicht-selektiven). Der temporäre Verlust der Selektivität kann bei niedrigen Neigungen dazu führen, dass nachts mit dem ursprünglich selektiven Absorber keine Wärme mehr gewonnen werden kann.

### **Energiegewinn nicht-selektiver Absorber-Oberflächen ist neigungsabhängig:**

Abbildung 2 kann auch entnommen werden, dass die spezifische Leistung nicht-selektiver Absorber-Oberflächen nachts stark von der Temperatur des Halbraums

über der Kollektorebene<sup>2</sup> abhängt. Diese Temperatur wiederum ist in der Regel von der Neigung abhängig und bei freiem Himmel (0° Neigung) am geringsten.

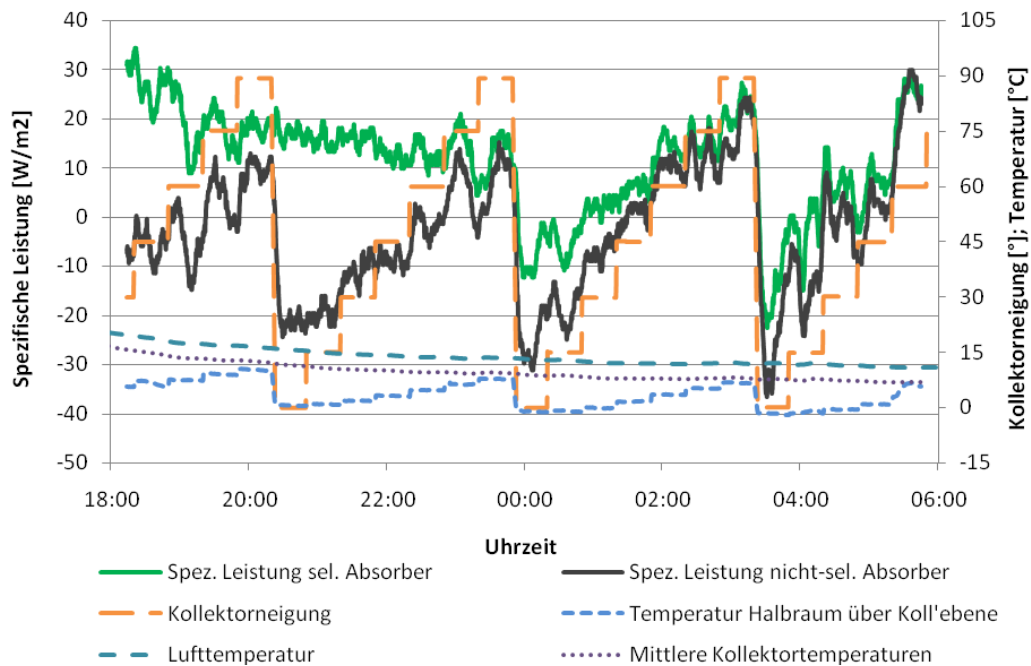


Abbildung 2: Spezifische Leistungen des selektiven und des nicht-selektiven ungedeckten Absorbers und Temperatur des Halbraums über der Kollektorebene während einer Nachtmessung bei wechselnden Kollektorneigungen (Messung vom 21./22.10.2010, Temperatur Kollektoreinlass 4 K unter Aussentemperatur).

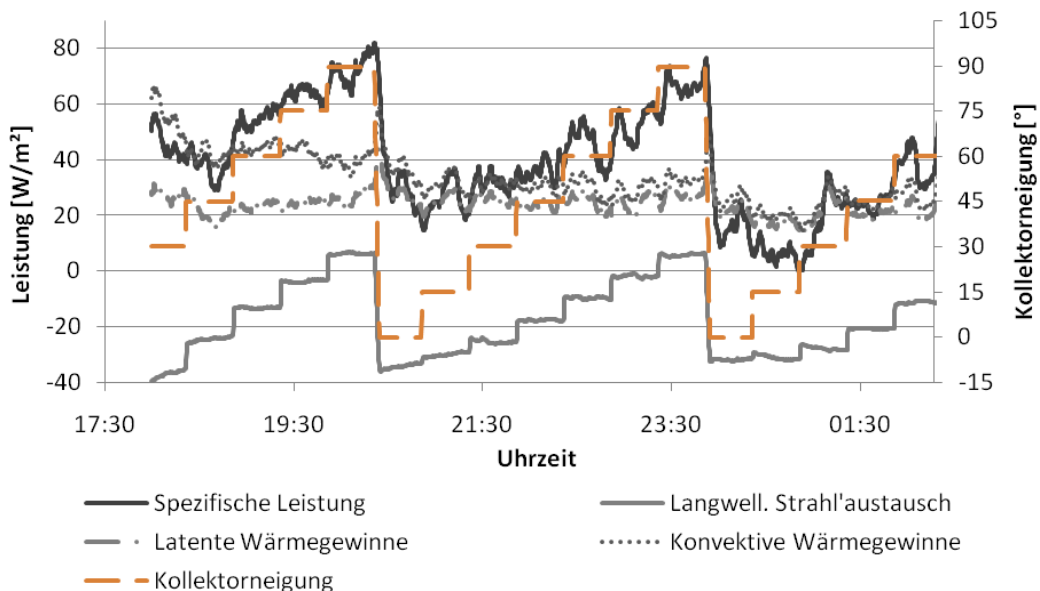


Abbildung 3: Energieflüsse am nicht-selektiven Absorber bei verschiedenen Kollektorneigungen (Messung vom 20./21.10.2010, Temperatur Kollektoreinlass 8 K unter Aussentemperatur).

<sup>2</sup> Die Temperatur des Halbraums über der Kollektorebene ist die der langwelligigen Gegenstrahlung des Halbraums entsprechende Schwarzkörpertemperatur.

Bei den dargestellten Messreihen konnte der nicht-selektive Absorber, betrieben mit Absorbertemperaturen 4 K unter Aussentemperatur, nur bei grossen Neigungswinkeln von 75 - 90° immer Wärme gewinnen.

Die Abhängigkeit des Wärmegewinns der Kollektoren vom langwelligen Strahlungsaustausch und somit indirekt von der Kollektorneigung zeigt auch Abbildung 3 mit den untersuchten Energieflüssen am Absorber. Im Gegensatz zum langwelligen Strahlungsaustausch ist bei den konvektiven und latenten Wärmegewinnen keine Neigungsabhängigkeit erkennbar.

### **Neigungsabhängigkeit des äusseren konvektiven Wärmeübergangs kann nicht bestätigt werden:**

Wie Abbildung 4 beispielhaft für eine Nacht zeigt, konnte mit den Messungen keine deutliche Abhängigkeit des äusseren konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha_{\text{conv}}$  von der Neigung der Kollektorebene bei kleinen Windgeschwindigkeiten festgestellt werden. Auch mit der statistischen Auswertung der Messreihen mehrerer Nächte konnte der erwartete Zusammenhang nicht gezeigt werden. Insbesondere die Messwerte für horizontal ausgerichtete Absorber ergeben nicht die tiefsten Werte, sondern Werte welche eher im Mittelfeld liegen (Abb. 4). Auch die Messwerte bei 60° ergeben ein eher uneinheitliches Bild. Nur die Rangfolge der Messwerte bei 15°, 30°, 45°, 75° und 90° zeigt einigermaßen die erwartete Tendenz.

Die beobachteten Extremwerte für den konvektiven Wärmeübergang bei Windgeschwindigkeiten unter 0,5 m/s liegen dabei im Bereich von 3 W/(m<sup>2</sup>K) bis rund 6 W/(m<sup>2</sup>K) und stimmen somit gut mit den Werten für freie Konvektion überein [3].

## **Schlussfolgerungen**

Mit den Messungen konnte der erwartete systematische Einfluss der Neigung unabgedeckter Kollektoren auf den äusseren konvektiven Wärmeübergang beim Betrieb unter Umgebungstemperatur bei tiefen Windgeschwindigkeiten nicht eindeutig nachgewiesen werden. Ursache dafür ist vermutlich, dass der Effekt kleiner ist, als die Theorie der freien Konvektion erwarten lässt, dass die Aussenmessungen instabil sind (Wind-, Temperaturschwankungen) und dass hohe Messunsicherheiten im Bereich von 25 bis 60% vorliegen (grösster Anteil: langwellige Gegenstrahlung mit ca. 50%).

Für den Betrieb unabgedeckter Kollektoren mit Temperaturen unter Umgebungstemperatur können aus den Messungen weitere Erkenntnisse abgeleitet werden: Bei unabgedeckten selektiven Kollektoren ist zu beachten, dass ihre Selektivität bei Taubildung temporär verloren gehen kann. Da während der gesamten Messperiode schon kurz nach der Dämmerung Taubildung auf den kalten Absorberoberflächen

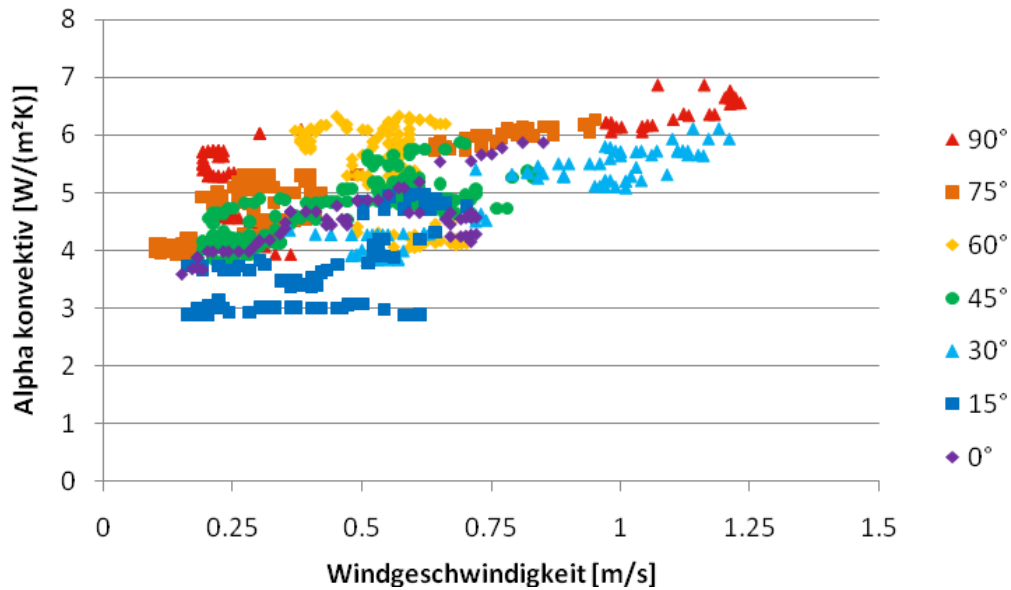


Abbildung 4: Berechneter konvektiver Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha_{\text{conv}}$  der unabgedeckten Kollektoren in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit und der Kollektorneigung (Messung vom 17./18.2.2011, Temperatur Kollektoreinlass 7 K unter Aussentemperatur).

einsetzte (bei Absorbertemperaturen ab 4 K unter Umgebungstemperatur), könnte die Abnahme der Selektivität bei Betrieb der Kollektoren mit Wärmepumpen einen relevanten Einfluss auf die Systemeffizienz haben.

Für die spezifische Leistung nicht-selektiver unabgedeckter Absorber konnte eine deutliche Neigungsabhängigkeit aufgezeigt werden, welche auf den langwelligen Strahlungsaustausch zurückzuführen ist. Diese Neigungsabhängigkeit ist v.a. bei klaren Nächten gegeben, wenn die Halbraumtemperatur stark mit der Neigung der Kollektorebene variiert und bei geringen Windgeschwindigkeiten, wie sie während der Messperiode grösstenteils vorherrschten.

## Literatur

- [1] Palyvos, J., 2008. *A survey of wind convection coefficient correlations for building envelope energy systems' modeling*. Applied Thermal Engineering, 28(8-9), 801-808.
- [2] B. Perers, *An Improved Dynamic Solar Collector Model Including Condensation And Asymmetric Incidence Angle Modifiers*, Eurosun, 2010.
- [3] Y. A. Cengel, *Heat Transfer, a practical approach*, International Edition, McGraw-Hill Higher Education, New York, 2003
- [4] E. Frank, *Modellierung und Auslegungsoptimierung unabgedeckter Solar-kollektoren für die Vorerwärmung offener Fernwärmenetze*, Dissertation, kassel university press GmbH, Kassel, 2007.