

Funktionskontrolle größerer Solaranlagen - Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Einstrahlungsmessung

M. Uecker, M. Krause, K. Vajen, H. Ackermann
 Universität Marburg, FB Physik
 Tel. 06421/282-4131, Fax /282-6535, solar@physik.uni-marburg.de

Eine der wichtigsten Einflussgrößen auf den solaren Ertrag einer thermischen Solaranlage ist die Einstrahlung auf den Kollektor, genauer: die absorbierte Strahlung. Für Funktionskontrollen mit Ertragsüberwachung wird daher die messtechnische Erfassung der solaren Einstrahlung durch (mindestens) einen in der Regel zusätzlichen Sensor erforderlich sein. Der vorliegende Beitrag beschäftigt sich daher mit der Quantifizierung der Unsicherheiten in der Bestimmung der absorbierten Strahlung und des von einem Solarsystem zu erzielenden solaren Ertrags. Zu untersuchen sind insbesondere die Einflüsse

- des Aufbaus und der Messgenauigkeit des verwendeten Strahlungssensors,
- der verwendeten Berechnungsalgorithmen zur Ermittlung der absorbierten aus der gemessenen eingestrahnten Leistung,
- der Sensorausrichtung (horizontal oder in Kollektorebene).

Die Auswirkungen der Unsicherheiten bezüglich der solaren Nutzwärmelieferung hängen darüber hinaus vom Aufbau des solaren Systems und dessen Betriebsrandbedingungen ab.

1. Feldtest verschiedener Strahlungssensoren

Seit Juni 1999 wird in Marburg die Globalstrahlung in der Horizontalen mit verschiedenen marktgängigen Strahlungssensoren (s. Tab.1) parallel erfasst und als Minuten-Mittelwerte abgespeichert. Im Rahmen der dargestellten Messwerte (s. Abb.1) erzielen die genaueren PV-Sensoren SSR 81 und

Name	Hersteller	Verkaufspreis in DM (Brutto)
CM 11 (PM)	Kipp& Zonen	Ca. 3400,-
CM 6b (PM)	Kipp& Zonen	Ca. 2250,-
CM 3 (PM)	Kipp& Zonen	Ca. 1000,-
SI-01TC (PV)	Mencke & Tegtmeier	Ca. 350,-
SPLite (PV)	Kipp& Zonen	Ca. 575,-
EN 01 (PV)	TriCom	Ca. 220,-
SSR 81 (PV)	TriCom	Ca. 460,-

Tab. 1: Im Feldtests eingesetzte Sensoren (PM: Pyranometer, PV: PV-Sensoren)

SpLite sowohl hinsichtlich der mittleren Abweichung als auch der Streuung keine schlechteren Ergebnisse als das CM3-Pyranometer.

2. Untersuchte Varianten zur Berechnung der absorbierten Strahlung

In der Literatur sind Methoden beschrieben, die es erlauben, allein mit Hilfe der (stündlichen) Werte der Globalstrahlung in der Horizontalen G^H die Einstrahlung auf dem Kollektor G^T zu bestimmen. Dabei wird das Strahlungsfeld aufgeteilt in den Anteil, der direkt aus der Sonnenrichtung G_{Beam}^T , der isotrop vom Boden G_{Boden}^T , der isotrop aus dem Himmelsraum

$G_{\text{Diffus}}^{\text{iso},T}$, aus dem sonnennahen Bereich des Himmels $G_{\text{Diffus}}^{\text{C},T}$ und dem Horizont $G_{\text{Diffus}}^{\text{Hor},T}$ einfällt.

$$G^T = G_{\text{Beam}}^T + G_{\text{Boden}}^T + G_{\text{Diffus}}^{\text{iso},T} + G_{\text{Diffus}}^{\text{C},T} + G_{\text{Diffus}}^{\text{Hor},T} = f(G_{\text{Glob}}^H)$$

Die Methoden unterscheiden sich einerseits in der Abschätzung des Diffusstrahlungsanteils $k_d = G_{\text{Diffus}}^H / G^H$ (Diffuskorrelationsmodelle Liu-Jordan, Boehs, Erbs, Reindl in [TRNSYS94]) als auch in der anschließenden Bestimmung der einzelnen Diffusstrahlungsanteile $G_{\text{Diffus}}^{\text{iso},T}$, $G_{\text{Diffus}}^{\text{C},T}$, $G_{\text{Diffus}}^{\text{Hor},T}$ (Umrechnungsmodelle „Isotrop“, Hay-Davies, Reindl, Perez in [TRNSYS94]). Bereits die Abschätzung von k_d ist schwierig. Meßwerte von k_d streuen um ca. +/-25%-Punkte um den sich nach Erbs ergebenden k_d -Wert. Daher wurden für jeden Messpunkt die Extremwerte von G^T (und G_{Nutz}) bestimmt, die sich bei einer derartigen Abweichungen von dem k_d -Wert nach Erbs ergeben. (Varianten Erbs-Max/Erbs-Min).

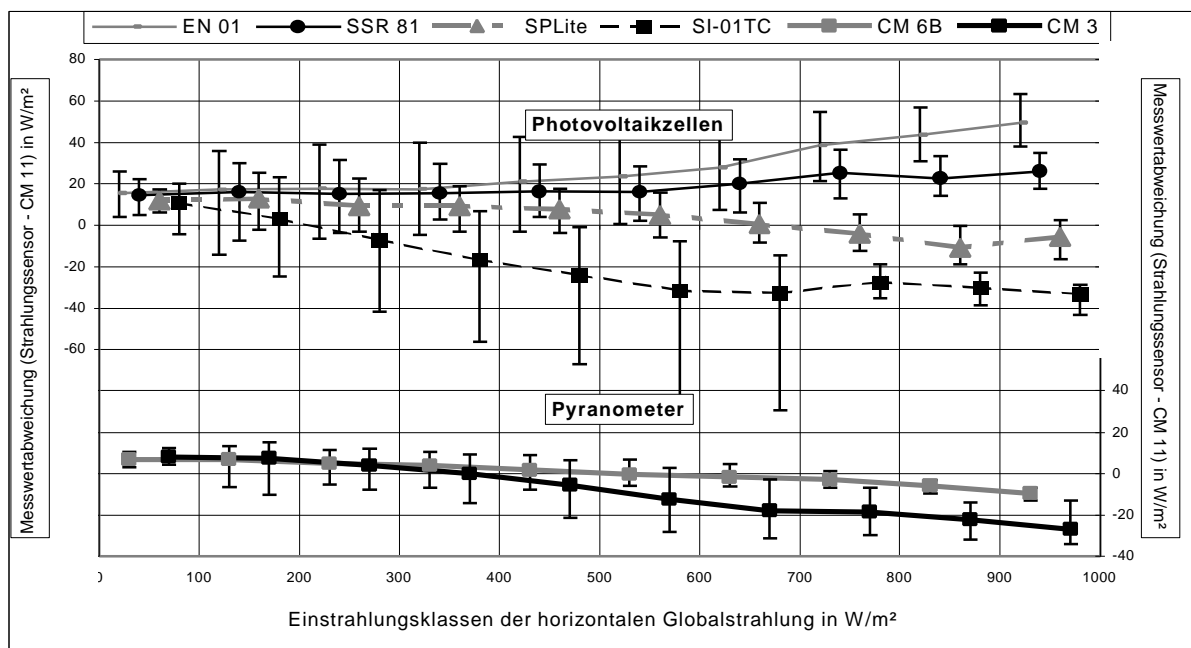


Abb. 1: Messwertabweichungen der Strahlungssensoren aus Tab. 1 bezüglich der Referenzmessung mit dem CM11-Sensor. Die Abszisse stellt diskrete Einstrahlungsklassen (Klassenbreite 100 W/m², z.B. Einstrahlungen im Bereich 100-200 W/m²) dar. Die aufgetragenen Punkte stellen die Mittelwerte der Abweichungen für die jeweilige Einstrahlungsklasse dar, die senkrechten Balken geben die Bereiche an, in denen 90 % der Abweichungen des jeweiligen Sensors liegen. (Messzeitraum 15.7.-30.9.99)

Zur Berechnung der im Kollektor absorbierten Strahlung ist zu berücksichtigen, dass sowohl die Transmission durch die Kollektorabdeckung als auch die Absorption der Strahlung vom Einfallswinkel abhängig ist. Die Nutzstrahlung berechnet sich daher mit dem Transmissionsabsorptionsprodukt für senkrechten Einfall $(ta)_{\perp}$ und unter Berücksichtigung der Einfallswinkelkorrekturfaktoren K für die einzelnen Strahlungsbestandteile zu

$$G_{\text{Nutz}} = (ta)_{\perp} \cdot \left(K_{\text{Beam}} G_{\text{Beam}}^T + K_{\text{Boden}} G_{\text{Boden}}^T + K_{\text{Diffus}}^{\text{iso}} G_{\text{Diffus}}^{\text{iso},T} + K_{\text{Diffus}}^{\text{C}} G_{\text{Diffus}}^{\text{C},T} + K_{\text{Diffus}}^{\text{Hor}} G_{\text{Diffus}}^{\text{Hor},T} \right).$$

Bei Vernachlässigung von Polarisierungseffekten und räumlichen Anisotropien hängt das Transmissions-Absorptions-Verhalten nur vom Einfallswinkel ab (d.h. $IAM(\mathbf{q})$) und kann nach [Ambrosetti85] mit $IAM(\mathbf{q}) = 1 - \tan^{1/r}(\mathbf{q}/2)$ beschrieben werden. Es gilt dann $K_{\text{Diffus}}^{\text{iso}}$

und $K_{\text{Beam}} = \text{IAM}(\mathbf{q})$ und in einer oft verwendeten Näherung $K_{\text{Diffus}}^{\text{C}} = K_{\text{Beam}}$. Zur Bestimmung von $K_{\text{Diffus}}^{\text{iso}}$ und K_{Boden} schlagen [Brandemuehl79] einen effektiven Einfallswinkel $\mathbf{q}_{\text{Diffus,eff}}^{\text{iso}}$ bzw. $\mathbf{q}_{\text{Boden,eff}}$ in Abhängigkeit von der Kollektorneigung vor, mittels dessen mit $\text{IAM}(\mathbf{q}_{\text{eff}})$ die Korrekturfaktoren $K_{\text{Diffus}}^{\text{iso}}$ und K_{Boden} bestimmt werden sollen (Variante Brandemuehl). Systematisch korrekter werden die Größen $K_{\text{Diffus}}^{\text{iso}}$, K_{Boden} und $K_{\text{Diffus}}^{\text{Hor}}$ durch Auswertung der folgenden Integrale bestimmt (Variante Integration, vgl. dazu [Uecker00]):

$$K_x = \frac{\int_{R(x)} \text{IAM}(\mathbf{q}) \cdot \cos(\mathbf{q}) \cdot d\Omega}{\int_{R(x)} \cos(\mathbf{q}) \cdot d\Omega} \quad \begin{array}{l} x = \text{Diffus,iso bzw. Diffus,Boden bzw. Diffus,Hor} \\ R(x) = \text{Einfallrichtungen, aus denen der betrachtete} \\ \text{Strahlungsanteil } x \text{ einfällt} \end{array}$$

3. Die Bestimmung der absorbierten Strahlung bei Messung in Kollektorebene

Wenn als Messwert nicht G^{H} sondern G^{T} vorliegt, steht man vor dem Problem der Aufteilung von G^{T} in die einzelnen Strahlungsbestandteile. Eine obere Abschätzung ist: $G_{\text{Nutz}} = G^{\text{T}} \cdot \text{Max}(K_{\text{Diffus}}^{\text{iso}}, K_{\text{Beam}})$; eine untere: $G_{\text{Nutz}} = G^{\text{T}} \cdot \text{Min}(K_{\text{Diffus}}^{\text{iso}}, K_{\text{Beam}})$ (Varianten „Max(G^{T})“, „(Min(G^{T}))“). Andererseits besteht die Möglichkeit $G^{\text{T}} = f(G^{\text{H}})$ als implizite Gleichung für G^{H} aufzufassen, daraus G^{H} numerisch zu bestimmen und dann auf dem in 2.) beschriebenen Weg eine Aufteilung durchzuführen. Dies führt zu neuen Unsicherheiten, da für hohe Kollektoreinfallswinkel die implizite Gleichung mehrere Lösungen hat. In diesem Fall wurde der kleinste der möglichen Werte von G^{H} verwendet.

4. Untersuchungsergebnisse zur Bestimmung der absorbierten Strahlung

Anhand dreier zur Verfügung stehender Datensätze aus detaillierten Systemvermessungen von größeren Kollektorsystemen (1/2h-Mittelwerte für G^{H} und G^{T} ; Standorte: Leipzig/ Zwickau/ Marburg; Datenumfang 1 Jahr/ 1 Jahr/ 3 Jahre; Kollektorausrichtung Süd $\pm 10^\circ$; Neigung $30^\circ/ 45^\circ/ 45^\circ$) wurde folgendes untersucht:

- i) Vergleich der aus G^{H} berechneten Werte für G^{T} mit dem G^{T} - Messwert zur Einschätzung der Güte der Diffuskorrelations- und Umrechnungsmodelle (Abb.2).
- ii) Vergleich der bestimmten Nutzstrahlung G_{Nutz} :
 - aus G^{T} (Abb.3) oder G^{H} für die Diffuskorrelations- und Umrechnungmodelle,
 - aus G^{T} (Abb.4) oder G^{H} für die Einfallswinkelkorrektur-Varianten,
 - aus $G^{\text{T,Sensor}}$ für die in 1.) vorgestellten verschiedenen Sensoren (Abb.5). Dazu wurde der Referenz-Messwert $G^{\text{T,Ref}}$ (CM 11) auf Basis von Abb. 1 mittels eines linearen Shifts und eines überlagerten Rauschens in einen Sensormesswert $G^{\text{T,Sensor}}$ transformiert.
- iii) Vergleich der für die unterschiedlichen Bestimmungsvarianten von G_{Nutz} mit TRNSYS-Systemmodellen in Jahressimulationen berechneten Kollektorerträge Q_{Sol} in die Pufferspeicher (Abb.5). Bei den Modellen handelt es sich um Abbildungen der vermessenen

Systeme in Leipzig bzw. Zwickau (Solarer Deckungsanteil ca. 30%, Kollektorfläche 160 bzw. 400 m², Verbrauchsprofil: Messdaten der Systeme (Wohnheime), vgl. [Uecker00]). Die Abb. 2-5 zeigen exemplarische Ergebnisse zu den Einflüssen der vorgestellten Varianten auf die Bestimmung von G^T bzw. G_{Nutz} anhand der Vergleichsgröße „Tagessumme“ und des Datensatzes Zwickau. Dargestellt ist der Median der Abweichungen der Tagessumme für die jeweilige Variante bzgl. einer Referenz und das Intervall, in dem 90% der Abweichungen bzgl. dieser Referenz liegen. Zusätzlich ist in den jeweiligen Abbildungsbeschriftungen auch die Unsicherheit in der Jahressumme ΔG_{Jahr} angegeben (sofern nicht anders vermerkt: $(\mathbf{ta})_{\perp}=0.73$; $r=0.33$; Einfallswinkelkorrektur durch Integrationsmethode aus 2.).

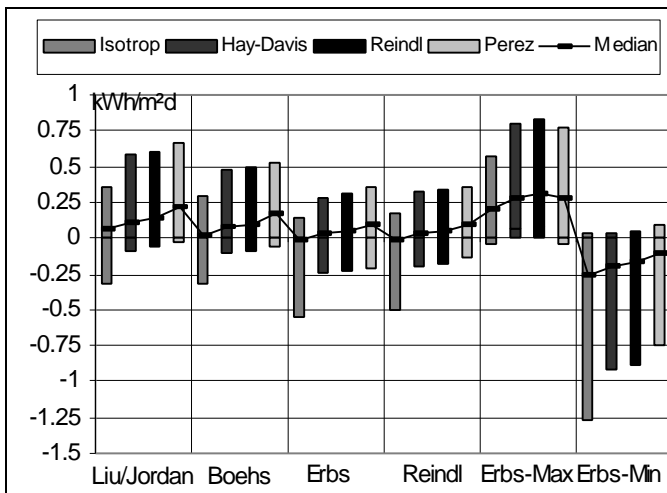


Abb. 2: Einfluss von Diffuskorrelations- und Umrechnungsmodellen auf die $G^T(G^{\text{H,mes}})$ -Tagessummen; dargestellt ist $|DG^T| = G^T(G^{\text{H,mes}}) - G^{\text{T,mes}}$. Die Bestimmung von G^T aus G^{H} gelingt am besten mittels der Variantenkombination Erbs/Hay-Davies. Die Abweichungen $|DG^T|$ sind allerdings (sehr) hoch. $|DG^{\text{T,Jahr}}|=0-100 \text{ kWh/m}^2\text{a}$

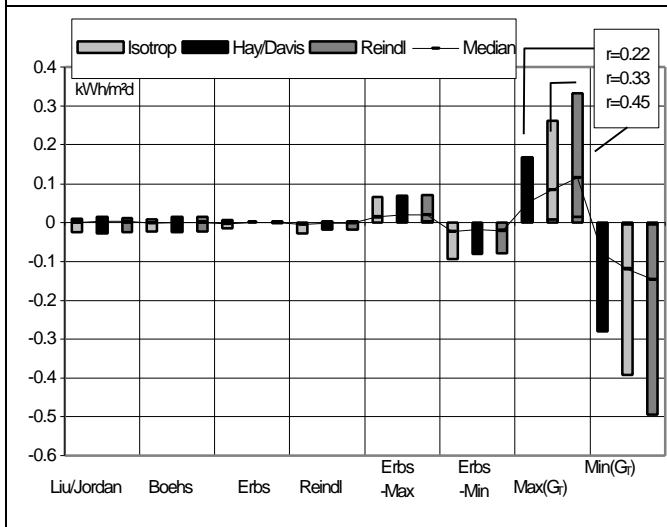


Abb. 3: Einfluss der Diffuskorrelations- und Umrechnungsmodelle auf die $G_{\text{Nutz}}(G^{\text{T,mes}})$ -Tagessummen; dargestellt sind die Abweichungen der einzelnen Diffuskorrelations- und Umrechnungsmodelle zu den mit Erbs/Hay-Davies als Referenz (Abb.2) berechneten Werten.

Die Abweichungen liegen mit weniger als 0.1 kWh/m²d ($Q_{\text{Sol}} < 0.04 \text{ kWh/m}^2\text{d}$) um mehr als einen Faktor 5 unter denen bei Bestimmung von $G_{\text{Nutz}}(G^{\text{H,mes}})$ ($|D|Q_{\text{Sol}}|$ bis zu 0.3 kWh/m²d, $|DQ_{\text{Sol,Jahr}}|$ bis zu 40 kWh/m²a). Daher ist die Messung der Globalstrahlung in Kollektorebene ($|DG_{\text{Nutz,Jahr}}| < 10 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ und $|DQ_{\text{Sol,Jahr}}| < 3 \text{ kWh/m}^2\text{a}$) der in Horizontalen vorzuziehen.. Die Varianten „Erbs-Max“ und „Erbs-Min“ verdeutlichen, dass bei einer aufwendigeren Aufteilung in Diffus- und Direktstrahlung zur Einfallswinkelkorrektur-Bewertung auch im Extremfall die Abweichungen unter 0.1 kWh/m²d bleiben. Dass die aufwendigere Aufteilung nötig ist, zeigen die großen Unsicherheiten von $\text{Max}(G^T)$ und $\text{Min}(G^T)$.

Schlussfolgerung

Aufgrund der Ergebnisse für die drei vorliegenden Datensätze lässt sich schließen:

- Zur Abschätzung des Diffusstrahlungsanteils und Umrechnung auf geneigte Ebenen ist am ehesten die Variante Erbs/Hay-Davies zu empfehlen (aufwendigere Modellvarianten

schneiden eher schlechter ab (vgl. Abb.2)).

- Die Messung in Kollektorebene ermöglicht eine Bestimmung von G_{Nutz} , die deutlich weniger sensitiv gegenüber den einzelnen Diffuskorrelations- und Umrechnungsmodellen ist als bei Messung in der Horizontalen (Variation der G_{Nutz} -Tagessumme $< 0.1 \text{ kWh/m}^2\text{d}$).
- Die Brandemuehl-Näherung zur Einfallswinkelkorrektur für Nichtdirektstrahlungsanteile kann zu Ungenauigkeiten in der G_{Nutz} -Tagessumme von bis zu $0.15 \text{ kWh/m}^2\text{d}$ führen.
- Die Abweichungen zwischen G_{Nutz} -Tagessummen bestimmt aus Messwerten gut kalibrierter PV-Strahlungssensoren gegenüber denen bestimmt mit einem Referenz-CM11 sind nur unwesentlich höher als die infolge der Unsicherheit der Diffuskorrelations- und Umrechnungsmodelle (vgl. Abb.5).

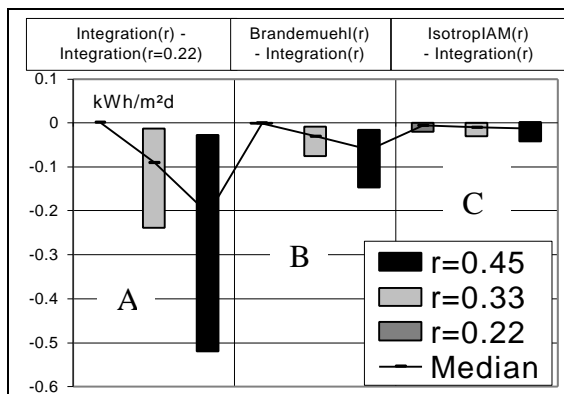


Abb. 4: Abweichungen der G_{NUTZ} -Tagessummen bei der Berechnung aus G^T -mit Erbs/Hay-Davies für unterschiedliche Varianten der Einfallswinkelkorrektur. In der Variante IsotropIAM wurde K_{Diffus}^C statt durch K_{Beam} durch $K_{\text{Diffus}}^{\text{iso}}$ genähert.

- A) Der Einfluss des Ambrosetti-Paramters r ist enorm ($\Delta G_{\text{Nutz, Jahr}} = 0-80 \text{ kWh/m}^2\text{a}$).
 B) Die systematische Unterschätzung durch die Brandemuehl-Näherung ist nicht zu vernachlässigen ($\Delta G_{\text{Nutz, Jahr}} = 0-25 \text{ kWh/m}^2\text{a}$).
 C) Der Einfluss einer unterschiedlichen IAM-Bewertung des Circumsolaren Anteils ist dagegen nicht ganz so groß.

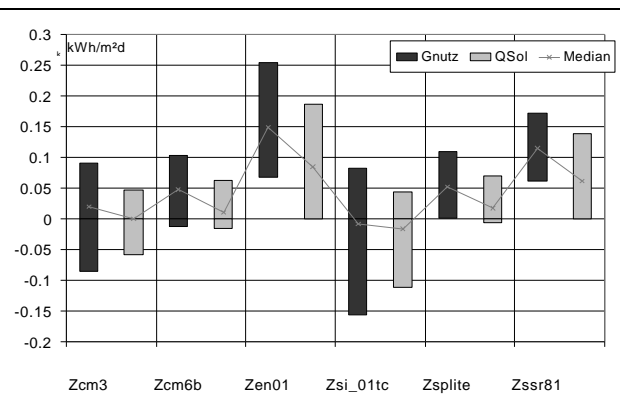


Abb. 5: Abweichungen der G_{NUTZ} -Tagessummen und der resultierenden Q_{Sol} -Tagessummen bei der Berechnung aus G^T mit Erbs/Hay-Davies infolge unterschiedlicher Messsensoren bzgl. der Werte, die mit dem Referenz-Messsensor (CM 11) bestimmt wurden.

Die Auswirkungen der unterschiedlichen Messsensoren auf die G_{Nutz} -Tagessumme liegen in der Größenordnung $\pm 0.25 \text{ kWh/m}^2\text{d}$, bei der Q_{Sol} -Tagessumme $0.18 \text{ kWh/m}^2\text{d}$. Auch wenn diese Werte knapp über den Unsicherheiten durch Diffuskorrelations- und Umrechnungsmodelle liegen, scheint eine Messung mit gut kalibrierten PV-Sensoren (SPLite) zufriedenstellende Ergebnisse zu liefern. ($\Delta G_{\text{Nutz, Jahr}} < 60 \text{ kWh/m}^2\text{a}$, $\Delta Q_{\text{Sol, Jahr}} < 30 \text{ kWh/m}^2\text{a}$).

- [Ambrosetti85]: Ambrosetti, P., Keller, J.: „Das neue Bruttowärmeertragsmodell für verglaste Sonnenkollektoren“, Technischer Bericht des Eidgenössisches Institut für Reaktorforschung (EIR), Würenlingen EIR, 1985
 [Brandemuehl79]: Brandemuehl, M. J., Beckmann, W. A.: „Transmission of Diffus Radiation Through CPC and Flat Plate Collector Glazings“. In: Solar Energy, Vol. 24 (1980), S.511-513
 [TRNSYS94]: „TRNSYS – A Transient System Simulation Program“. Manual zu Version 14.1, Madison 1994
 [Uecker00]: Uecker, M.: „Zur Vermessung, Simulation, Langzeitüberwachung und Optimierung von größeren solarintegrierten Wärmeversorgungsanlagen“, Vorläufiges Dissertationsthema, Marburg, Dissertation voraussichtlich Mai 2000

Die Forschungsarbeiten wurden unterstützt von der Deutschen Forschungsgemeinschaft und der ROM-Umwelt-Stiftung. Die Autoren bedanken sich bei der TU Chemnitz für die Zurverfügungstellung der im Rahmen diese Beitrags ausgewerteten Messdaten aus dem BMWi-Programm Solarthermie 2000.