

Modell eines unverglasten photovoltaisch-thermischen Kollektors basierend auf genormten Prüfverfahren

Martin Stegmann¹, Erik Bertram¹, Gunter Rockendorf¹, Stefan Janßen²

¹Institut für Solarenergieforschung GmbH Hameln (ISFH)

Am Ohrberg 1, 31860 Emmerthal;

Tel.: 05151/999-645; E-Mail: stegmann@isfh.de

²Janßen energieplanung, Hohenzollernstraße 51, 30161 Hannover

Einleitung

Existierende Modelle für photovoltaisch-thermische Kollektoren (PVT-Kollektoren) simulieren die Energieströme mit Hilfe von physikalischen Ansätzen. Daher benötigen sie zur Parametrierung konstruktive Details, was die Parametrierung aufwendig bis unmöglich macht. Zudem gelten die meisten dieser Modelle für verglaste PVT-Kollektoren. Aus diesem Grund wurde innerhalb des Projektes „Solare Gebäude-Wärmeversorgung mit unverglasten photovoltaisch-thermischen Kollektoren, Erdsonden und Wärmepumpen“¹ ein neues Modell für unverglaste PVT-Kollektoren entwickelt, das zur Parametrierung ausschließlich Daten aus genormten Prüfverfahren benötigt. Dementsprechend lässt sich das Verhalten eines PVT-Kollektors mit für den Anwender leicht zugänglichen Daten ohne Kenntnis des inneren Aufbaus einschließlich der physikalischen Eigenschaften der Komponenten beschreiben. Das Modell wurde in einen TRNSYS-Type umgesetzt und während einer einjährigen Messung in einer Pilotanlage validiert.

Das Modell basiert auf der Kombination der Leistungskennlinien für den unverglasten solarthermischen Kollektor und ein Standard PV-Modul. Das thermische Modell berechnet die instationäre Energiebilanz mit einer nach EN 12975 (EN 12975 2006) aufgenommenen thermischen Kennlinie. Dabei werden die solare Einstrahlung, die Windgeschwindigkeit, die Fluid-, Umgebungs- und Himmelstemperatur sowie die Kollektorausrichtung berücksichtigt. Für das elektrische Modell wird auf das „Effektive Solarzellen-Kennlinien-Modell“ (Wagner 2006) zurückgegriffen, welches zur Parametrierung ausschließlich nach (EN 60904-1 2007) aufgenommene Kennwerte benötigt. Diese sind im Modultypenschild angegeben. Beide Modelle sind über die Einstrahlungsbilanz und die Zelltemperatur miteinander verknüpft. Das entwickelte Modell wurde an Hand einer einjährigen Messung an einer Pilotanlage mit 40 m² PVT-Kollektorfeld validiert.

1 Das Projekt „Solare Gebäude-Wärmeversorgung mit unverglasten photovoltaisch-thermischen Kollektoren, Erdsonden und Wärmepumpen für 100% Deckungsanteil (BiSolar-WP)“ (FKZ 0325952), in Zusammenarbeit mit der Firma GEFGA, wurde vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestags gefördert.

Modellanforderungen

Modelle für PVT-Kollektoren sind erhältlich für luft- und flüssigkeitsgekühlte PVT-Kollektoren. Weiterhin kann bei den Modellen zwischen verglasten und unverglasten Kollektoren² unterschieden werden. Innerhalb des Forschungsprojektes wurde ein Modell für unverglaste PVT-Kollektoren benötigt, welches zur Parametrierung nur Kennwerte von Standard-Testverfahren oder Datenblättern benötigt und folgende für unverglaste Kollektoren entscheidende Einflussfaktoren berücksichtigt:

- Windgeschwindigkeit in Kollektorebene
- Infrarotstrahlungsbilanz zwischen Kollektoroberfläche und Himmel
- Wärmekapazität des Kollektors
- Kondensationseffekte auf der Kollektoroberfläche.

Existierende Modelle haben Ansätze, die auf physikalischen Zusammenhängen wie Transport- oder Bilanzgleichungen basieren. Sie benötigen für die Parametrierung konstruktive Details, die dem Nutzer unbekannt sind.

Modellkonzept

Für das PVT-Kollektormodell werden zwei Kennlinienmodelle für die Beschreibung von thermischer (Sonnenkollektor) und elektrischer Leistung (PV-Modul) miteinander kombiniert. Das thermische Modell wird durch die nach (EN 12975 2006) gemessene thermische Leistungskennlinie eines unverglasten Kollektors beschrieben. Das elektrische Modell wird durch das „Effektive Solarzellen-Kennlinien-Modell“ (Wagner 2006) beschrieben, welches zur Parametrierung ausschließlich Kennwerte von PV-Moduldatenblättern, die wiederum aus einer normgerechten Messung nach (EN 60904 2007) stammen, benötigt. Somit sind für die dynamische Beschreibung des Verhaltens unverglaster PVT-Kollektoren nur Parameter notwendig, die durch genormte Prüfungen ermittelt werden und dem Kollektor beiliegenden Datenblättern entnommen werden können. Die beiden Modelle sind verknüpft über die Einstrahlung und die Zelltemperatur. Zur Bestimmung der Zelltemperatur und der Oberflächentemperatur des Kollektors wurde das Modell um einen physikalischen Ansatz erweitert. Der dafür notwendige interne thermische Leitwert wird aus den Parametern der thermischen Kollektorkennlinie bestimmt.

Thermisches Kollektormodell

Das thermische Kollektormodell basiert auf einer instationären Energiebilanz. Dabei erfolgt die Berechnung mit Hilfe des expliziten Finite-Differenzen-Verfahrens in Form einer Temperaturfeldberechnung in Strömungsrichtung des Fluids mit einer Diskretisierung von einem Gitterpunkt pro m². Die enthaltene thermische Kennlinie wird mit

2 Der Begriff unverglaster Kollektor bedeutet, dass zwischen Absorber und oberer Abdeckung kein wärmedämmender Luftspalt vorhanden ist. Die obere Abdeckung ist im Fall von PVT-Kollektoren, obwohl in der Regel eine Glasscheibe, als Teil des Absorbers zu bewerten.

einer Messung nach EN 12975-2 bestimmt. Das Modell beinhaltet die Einflüsse von direkter und diffuser Sonnenstrahlung, Windgeschwindigkeit, Fluid-, Umgebungs- und Himmelstemperatur. Weiterhin sind eine Reduktion der Einstrahlung durch Einstrahlungswinkelkorrekturfaktoren für Diffus- und Direktstrahlung, die Einflüsse durch die Wärmekapazität des Kollektors sowie auftretende Kondensationseffekte auf der Kollektoroberfläche einbezogen.

Elektrisches Modell (PV-Modul)

Das für das elektrische Modell verwendete „Effektive Solarzellen-Kennlinie-Modell“ ermöglicht die Berechnung der elektrischen Leistung eines PV-Moduls aus den Eingangsgrößen solare Bestrahlungsstärke und Zelltemperatur und den Kennwerten aus dem Datenblatt des verwendeten PV-Moduls. Das Modell wird durch eine empirisch gefundene mathematische Gleichung beschrieben, welche die gesamte PV-Modulkennlinie mit einer Ungenauigkeit von weniger als 1% berücksichtigt. Die Berechnung ist für alle bekannten Solarzellentypen möglich (Wagner 2006). Im Modell wird die elektrische Gleichstromleistung im Punkt der maximalen Leistung (MPP – Maximum Power Point) berechnet.

Kombination thermisches und elektrisches Kennlinienmodell

Einstrahlungsaufteilung

Das PVT- Kollektormodell setzt sich aus dem thermischen und dem elektrischen Kennlinienmodell zusammen. Bild 1 zeigt ein Energieflussdiagramm des Modells.

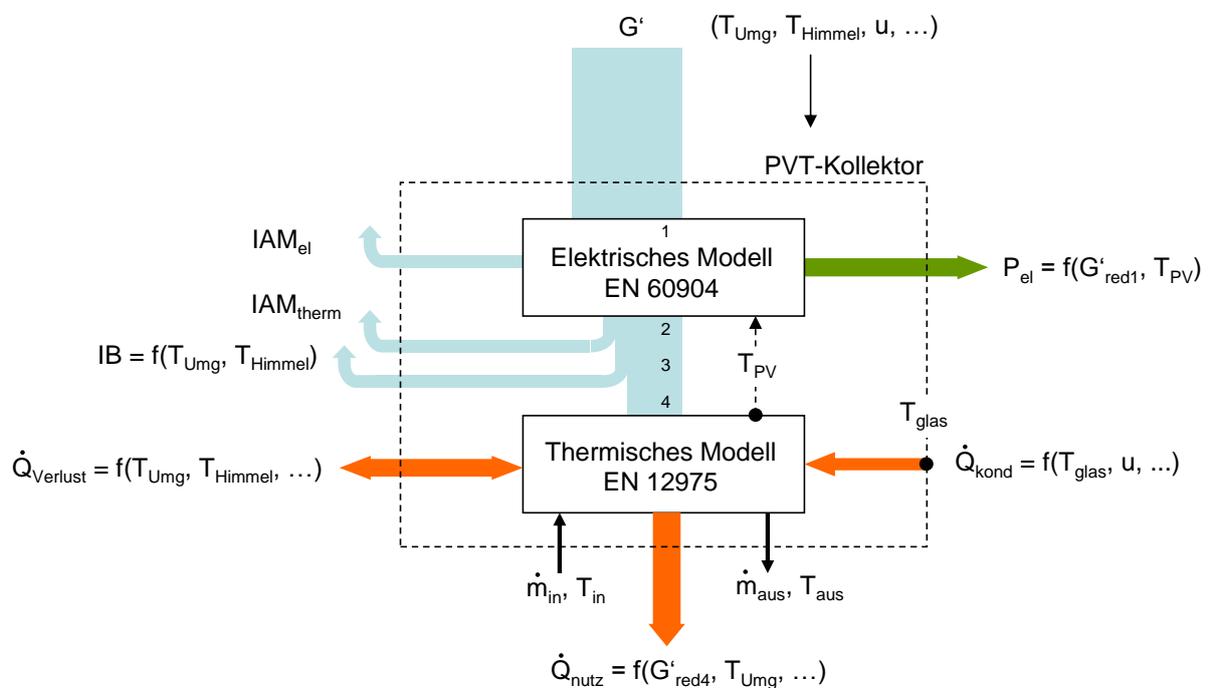


Bild 1 Energieflussdiagramm zur Darstellung der Kombination des thermischen und des elektrischen Anteils im PVT-Kollektormodell

Die in Kollektorebene einfallende solare Strahlung G' wird um die Einstrahlwinkelkorrektur IAM_{el} für das elektrische PV-Modul reduziert (vgl. Bild 1). Dafür wird die einfallende Direktstrahlung um den transversalen und longitudinalen Einstrahlwinkelkorrekturfaktor und die einfallende Diffusstrahlung um den diffusen Einstrahlwinkelkorrekturfaktor korrigiert (Gl. 1). Die so reduzierte Einstrahlung G'_{red1} wird jetzt mit dem photovoltaischen Wirkungsgrad multipliziert und anteilig in Form von elektrischer Leistung P_{el} aus dem PVT-Kollektor abgeführt. Somit ergibt sich die für die Umwandlung in Wärme zur Verfügung stehende Einstrahlung G'_{red2} aus der um die abgeführte PV-Leistung P_{el} reduzierten einfallenden Einstrahlung G' (Gl. 3). Weiterhin muss die Einstrahlung G'_{red2} um die thermisch wirkende Einstrahlwinkelkorrektur IAM_{therm} analog zu IAM_{el} reduziert werden (Gl. 4)³, so dass sich G'_{red3} ergibt.

Anschließend erfolgt eine Korrektur der Einstrahlung G'_{red3} durch die Infrarotstrahlungsbilanz IB, um den langwelligen Strahlungsaustausch der Kollektoroberfläche mit dem Himmel zu berücksichtigen (Gl. 6). Dafür wird die Infrarotstrahlungsbilanz zwischen einfallender und ausgehender Infrarotstrahlung gebildet. Somit steht für die Umwandlung in Wärme die Netto-Bestrahlungsstärke G'_{red4} zur Verfügung. Die (Gl. 1) bis (Gl. 6) zeigen die beschriebenen Einstrahlungsberechnungen.

$$G'_{red1} = G' \cdot \left[k_{\Theta,dir,eff,PV}(\Theta) \cdot \left(1 - \frac{G'_{dif}}{G'} \right) + k_{dif,PV} \cdot \frac{G'_{dif}}{G'} \right] \quad (Gl. 1)$$

$$k_{\Theta,dir,eff,PV}(\Theta) = k_{\Theta,dir,t,PV}(\Theta_t) \cdot k_{\Theta,dir,l,PV}(\Theta_l) \quad (Gl. 2)$$

$$G'_{red2} = \left(G' - \frac{P_{PV}}{A_{PVT}} \right) \quad (Gl. 3)$$

$$G'_{red3} = G'_{red2} \cdot \left[k_{\Theta,dir,eff,th}(\Theta) \cdot \left(1 - \frac{G'_{dif}}{G'} \right) + k_{dif,th} \cdot \frac{G'_{dif}}{G'} \right] \quad (Gl. 4)$$

$$k_{\Theta,dir,eff,th}(\Theta) = k_{\Theta,dir,t,th}(\Theta_t) \cdot k_{\Theta,dir,l,th}(\Theta_l) \quad (Gl. 5)$$

$$G'_{red4} = G'_{red3} + IB = G'_{red3} + \frac{\varepsilon}{\alpha} \cdot \sigma \cdot \left((T_{sky} + 273,15K)^4 - (T_{Umg} + 273,15K)^4 \right) \quad (Gl. 6)$$

Nutzwärmestrom

Die Umwandlung der reduzierten Einstrahlung G'_{red4} in den Nutzwärmestrom wird mit Hilfe der Kollektorleistungskennlinie nach EN 12975-2 beschrieben. Das thermische

3 Die Benutzung von unterschiedlichen Einstrahlwinkelkorrekturfaktoren für die elektrische und thermische Wandlung ist im Modell vorgesehen. Einschränkend muss hier angemerkt werden, dass oft nicht beide Datensätze (die zudem nur mit höherer Unsicherheit zu bestimmen sind) zur Verfügung stehen. Für die Praxis wird man sich daher häufig auf denselben IAM-Verlauf beschränken, was aufgrund der wesentlichen Ursachen für den IAM auch physikalisch sinnvoll ist. Damit erscheint auch die im Modell zugrunde liegende Annahme gerechtfertigt, dass die anteilige Zusammensetzung der Einstrahlung aus Direkt- und Diffusstrahlung durch die Abfuhr der PV-Leistung unverändert bleibt.

Modell selbst basiert auf einer instationären Energiebilanz, die die Absorption der einfallenden Strahlung, die Wärmeverluste an die Umgebung, die aus dem Kollektor abgeführte Nutzleistung \dot{q}_{nutz} , die Kollektorkapazität C_{eff} und den Kondensationswärmestrom \dot{q}_{kond} berücksichtigt ((Gl. 7))⁴.

$$C_{\text{eff}} \frac{dT_m}{dt} = G'_{\text{red4}} \cdot \eta_0 \cdot (1 - b_u \cdot u) + (b_1 + b_2 \cdot u) \cdot (T_m - T_{\text{Um}}) + \dot{q}_{\text{kond}} - \dot{q}_{\text{nutz}} \quad (\text{Gl. 7})$$

Elektrische Leistung

Die elektrische Leistung des PVT-Kollektors P_{PV} wird mit Hilfe des relativen elektrischen Wirkungsgrads η_{rel} relativ zu der momentan theoretisch maximalen elektrischen Leistung bei gegebener Einstrahlung und einer Zelltemperatur T_{STC} von 25°C (das entspricht Standard-Test-Bedingungen) berechnet (Gl. 8) (Wagner 2006). Der relative elektrische Wirkungsgrad berücksichtigt die Zelltemperatur T_{PV} , die Höhe der solaren Einstrahlung G'_{red1} und die gesamte PV-Modulkennlinie (Gl. 9). Für die Berechnung sind folgende Hilfsgrößen notwendig: Die Steigung der PV-Modulkennlinie M , der imaginäre Photovoltaikwiderstand R_{PV} und die physikalische Kenngröße Temperaturspannung U_T aus dem „Ein-Dioden-Modell“⁵ (siehe (Gl. 10) bis (Gl. 12)).

$$P_{\text{PV}} = \eta_{\text{STC}} \cdot \eta_{\text{rel}} \cdot G'_{\text{red1}} \cdot A_{\text{PVT}} \quad (\text{Gl. 8})$$

$$\eta_{\text{rel}} = (1 + c_T \cdot (T_{\text{PV}} - T_{\text{STC}})) \cdot \left(1 + \frac{U_{T,\text{STC}}}{U_{\text{MPP,STC}}} \cdot \ln\left(\frac{G'_{\text{red1}}}{G'_{\text{STC}}}\right) - \frac{R_{\text{PV,STC}} \cdot I_{\text{MPP,STC}}}{U_{\text{MPP,STC}}} \cdot \left(\frac{G'_{\text{red1}}}{G'_{\text{STC}}} - 1\right) \right) \quad (\text{Gl. 9})$$

$$M = \frac{U_L}{I_K} \cdot \left(-5,411 \cdot \frac{I_{\text{MPP}} \cdot U_{\text{MPP}}}{I_K \cdot U_L} + 6,450 \cdot \frac{U_{\text{MPP}}}{U_L} + 3,417 \cdot \frac{I_{\text{MPP}}}{I_K} - 4,422 \right) \quad (\text{Gl. 10})$$

$$R_{\text{PV}} = -M \cdot \frac{I_K}{I_{\text{MPP}}} + \frac{U_{\text{MPP}}}{I_{\text{MPP}}} \cdot \left(1 - \frac{I_K}{I_{\text{MPP}}} \right) \quad (\text{Gl. 11})$$

$$U_T = -(M + R_{\text{PV}}) \cdot I_K \quad (\text{Gl. 12})$$

Zelltemperatur

Zur Berechnung der elektrischen Leistung und als Ausgangspunkt für die Berechnung des Kondensations-Wärmegewinns ist die Zelltemperatur erforderlich. Dafür wird das Modell um den physikalischen Ansatz des internen thermischen Leitwerts zwischen PV-Zellen und das den Kollektor durchströmende Fluid erweitert. Ausgehend von der mittleren Fluidtemperatur T_m wird die Zelltemperatur T_{PV} mit dem Nutzwärmestrom \dot{q}_{nutz} und dem internen thermischen Leitwert u_{int} nach (Gl. 13) berechnet.

$$T_{\text{PV}} = \frac{\dot{q}_{\text{nutz}}}{u_{\text{int}}} + T_m \quad (\text{Gl. 13})$$

4 Die Größen in (Gl. 7) sind auf die Kollektorfläche bezogen.

5 Das „Ein-Dioden-Modell“ ist ein einfaches elektrisches Ersatzschaltbild zur Beschreibung des elektrischen Verhaltens einer Solarzelle.

Dabei entspricht die Zelltemperatur der energetisch gemittelten Absorbtemperatur über der Kollektorfläche. Der Nutzwärmestrom des PVT-Kollektors wird im thermischen Modell mit Hilfe mehrerer über der Kollektorfläche verteilter Knoten berechnet. Dem zu Folge sind die Teil-Nutzwärmeströme nicht an allen Knoten des Kollektors gleich groß. Bei Verwendung des Nutzwärmestroms zur Bestimmung der Zelltemperatur wird deshalb indirekt eine Wichtung der einzelnen Knotentemperaturen mit den dazugehörigen Teil-Nutzwärmeströmen vorgenommen, so dass die Zelltemperatur der energetisch gemittelten Absorbtemperatur entspricht.

Wärmegewinn aus Kondensation

Unverglaste PVT-Kollektoren können einen Teil des Nutzwärmestroms durch Kondensation auf der Kollektoroberfläche gewinnen. Fällt die Temperatur der Kollektoroberfläche T_{glas} unterhalb der Taupunkttemperatur T_d der Umgebungsluft, kommt es dort zur Kondensation von in der Umgebungsluft enthaltener Feuchtigkeit. Die dabei freiwerdende Kondensationswärme kann teilweise über den Wärmeträger abgeführt werden. Zur Berechnung der Oberflächentemperatur des Kollektors wird das in Bild 2 dargestellte Wärmewiderstandsnetzwerk verwendet. Dabei werden folgende Vorgänge berücksichtigt: Wärmeleitung durch die Kollektorabdeckung, die Infrarotabstrahlung zum Himmel und der konvektive Wärmeübergang an die Umgebungsluft. Die so ermittelte Oberflächentemperatur ist dabei ausschließlich eine Hilfsgröße zur Bestimmung der Kondensationswärme nach (Gl. 14) (Pitz-Paal 1988). Die Berechnung des Nutzwärmestroms des PVT-Kollektors erfolgt wie zuvor beschrieben nach (Gl. 7).

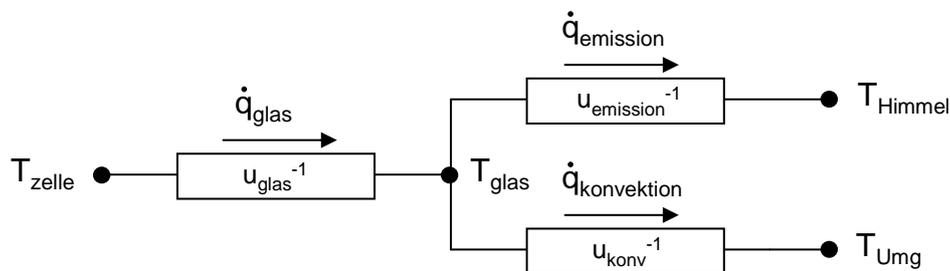


Bild 2 Netzwerk zur Berechnung der Oberflächentemperatur T_{glas} des PVT- Kollektors

Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient u_{konv} wird mit Hilfe einer empirisch bestimmten Gleichung nach (Gl. 15) berechnet. Die Einbeziehung der Wärmestrahlung an den Himmel erfolgt mit dem Wärmeübergangskoeffizienten nach (Gl. 16), mit der effektiven Umgebungstemperatur T_{eff} nach (Gl. 17). Die effektive Umgebungstemperatur berücksichtigt mit dem Sichtfaktor F , dass der Kollektor mit dem Neigungswinkel β teilweise den Himmel und teilweise die Umgebung sieht (Gl. 18). Der Wärmeübergangskoeffizient der Kollektorabdeckung u_{glas} wird nach (Gl. 19) berechnet. Mit (Gl. 15) bis (Gl. 19) ergibt sich somit die Temperatur der PVT- Kollektoroberfläche nach (Gl. 20).

$$\dot{q}_{\text{kond}} = \frac{R_L}{R_D} \cdot \frac{\Delta h_v}{p_0 c_L} \cdot Le^{m-1} \cdot u_{\text{konv}} \cdot [p_s(T_{\text{glas}}) - p_s(T_d)] \quad \text{mit } m \sim 1/3 \quad (\text{Gl. 14})$$

$$u_{\text{konv}} = \sqrt[3]{(0,123 \cdot (T_{\text{glas}} - T_{\text{Umg}}) + 2,7)^3 + (2,83 \cdot u + 4,3)^3} \quad (\text{Gl. 15})$$

$$u_{\text{emission}} = \sigma \cdot \varepsilon_{\text{PV}} \cdot (T_{\text{glas}}^2 + T_{\text{eff}}^2) \cdot (T_{\text{glas}} + T_{\text{eff}}) \quad (\text{Gl. 16})$$

$$T_{\text{eff}} = \sqrt[4]{F \cdot T_{\text{Himmel}}^4 + (1 - F) \cdot T_{\text{Umg}}^4} \quad (\text{Gl. 17})$$

$$F = 0.5 \cdot (1 + \cos\beta) \quad (\text{Gl. 18})$$

$$u_{\text{glas}} = \left(\frac{d_{\text{glas}}}{\lambda_{\text{glas}}} + \frac{d_{\text{Folie}}}{\lambda_{\text{Folie}}} + \dots + \frac{d_n}{\lambda_n} \right) \quad (\text{Gl. 19})$$

$$T_{\text{glas}} = \frac{T_{\text{PV}} \cdot u_{\text{glas}} + T_{\text{eff}} \cdot u_{\text{emission}} + T_{\text{Umg}} \cdot u_{\text{konv}}}{u_{\text{glas}} + u_{\text{emission}} + u_{\text{konv}}} \quad (\text{Gl. 20})$$

Bestimmung des internen thermischen Leitwerts

Die Messung des internen thermischen Leitwerts u_{int} zwischen den PV-Zellen und das den Kollektor durchströmende Fluid ist besonders für PVT-Kollektoren sehr schwierig. Eine Montage von Temperatursensoren auf den PV-Zellen ist in der Regel nicht möglich, da diese einlaminiert sind. Messungen auf der Glasscheibe oder der Rückwand können die Temperatur nur näherungsweise bestimmen. Darüber hinaus ist die Bestimmung des u_{int} -Werts nicht Bestandteil des Prüfverfahrens nach EN 12975-2. Für die korrekte Berechnung der PV-Leistung im Modell ist der u_{int} -Wert jedoch unerlässlich. Im Modell wird deshalb ein Ansatz aus der Kollektorthorie integriert, der es erlaubt, u_{int} aus der thermischen Leistungskennlinie zu bestimmen.

Man kann davon ausgehen, dass der Wärmeübergang zwischen Absorber und Fluid unabhängig von der Windgeschwindigkeit ist, d. h. er ist bei allen Windgeschwindigkeiten gleich. Aus der windabhängigen Kollektorkennlinie kann daher bei bekannten optischen Eigenschaften des Kollektors der interne thermische Leitwert berechnet werden. Der windabhängige Konversionsfaktor $\eta_{0,u}$ des PVT-Kollektors kann aus der thermischen Kennlinie oder aus der Kollektorthorie nach (Gl. 21) bestimmt werden (Duffie and Beckman 2006). Die Steigung der thermischen Kennlinie, welche die Wärmeverluste an die Umgebung wiedergibt, wird nach (Gl. 22) ebenfalls aus der Kennlinie bzw. nach der Kollektorthorie berechnet. Der Kollektorwirkungsgradfaktor F'_u ist gegeben durch (Gl. 23) (Rockendorf, Bartelsen, and Witt 1995).

$$\eta_{0,u} = \eta_0 \cdot (1 - b_u \cdot u) = F'_u \cdot \alpha \quad (\text{Gl. 21})$$

$$b_{v,u} = b_1 + b_2 \cdot u = F'_u \cdot u_{\text{Verlustu}} \quad (\text{Gl. 22})$$

$$F'_u = \frac{u_{\text{int}}}{u_{\text{int}} + u_{\text{Verlustu}}} \quad (\text{Gl. 23})$$

Mit (Gl. 21) bis (Gl. 23) kann der interne thermische Leitwert nach (Gl. 24) bestimmt werden. In dem in TRNSYS umgesetzten Type wird dieser für die Windgeschwindigkeit u von 1.5 m/s berechnet.

$$u_{\text{int}} = \frac{F_u' \cdot u_{\text{Verlustu}}}{1 - F_u'} = \frac{b_{v,u}}{1 - \frac{\eta_{0,u}}{\alpha}} = \frac{\alpha \cdot b_{v,u}}{\alpha - \eta_{0,u}} = \frac{\alpha \cdot (b_1 + b_2 \cdot u)}{\alpha - \eta_0 \cdot (1 - b_u \cdot u)} \quad (\text{Gl. 24})$$

Innerhalb des Projektes konnte diese Methode an gemessenen PVT-Kollektoren mit geringen Abweichungen bestätigt werden, d. h. es konnte gezeigt werden, dass der interne Leitwert keine Funktion der Windgeschwindigkeit ist, da sich für unterschiedliche Windgeschwindigkeiten aus dem Kennlinienfeld immer der gleiche u_{int} -Wert ergibt. Bei der Benutzung von thermischen Kollektorkennlinien, die nur in einem kleinen Bereich von Windgeschwindigkeiten aufgenommen wurden oder unzulässige Streuungen aufweisen, kann diese Methode allerdings fehlschlagen. Im umgesetzten TRNSYS-Type ist deshalb ein Algorithmus integriert, der bei über verschiedenen Windgeschwindigkeiten nicht konstanten u_{int} die Berechnung aus der thermischen Kennlinie ausschließt und eine externe Vorgabe des u_{int} durch den Benutzer erzwingt.

Validierung

Das PVT-Kollektormodell wurde als Modell für das Simulationsprogramm TRNSYS entwickelt. Zur experimentellen Begleitung und Überprüfung der Modellentwicklung wurden Messungen am Testdach am ISFH durchgeführt. Zur Validierung wurden Messungen in einer Pilotanlage mit einem 40 m² PVT-Kollektorfeld, integriert in einem Wärmepumpensystem mit Erdsonde, über einen Zeitraum von einem Jahr herangezogen.

Für das Modell werden Leistungsparameter benötigt. Wie beim Benutzer des Modells stammen die thermischen Parameter aus einer thermischen Leistungsmessung nach EN 12975-2 und die elektrischen Parameter aus dem PV-Moduldatenblatt des im PVT-Kollektor verwendeten PV-Moduls (bestimmt nach EN 60904-1). Weitere Parameter, wie z. B. Kollektororientierung und -fläche werden der tatsächlichen Anlage entsprechend angegeben. Für die Einstrahlwinkelkorrektur IAM_{el} der elektrischen Leistung wurden Daten einer Messung eines Standard-PV-Moduls verwendet (Balenzategui and Chenlo 2005). Aufgrund fehlender Daten werden für den thermischen IAM_{therm} dieselben Korrekturfaktoren verwendet.

Die in der Pilotanlage gemessenen meteorologischen Daten werden dem Modell als Input zugeführt. Zusätzlich werden die in den Messungen aufgenommenen thermischen und elektrischen Leistungsdaten eingelesen und direkt mit den simulierten Leistungen verglichen. Für die Validierung werden dafür die Erträge in der Pilotanlage in einem Intervall von je 24 h über den Zeitraum von einem Jahr aufsummiert. Das grundsätzliche Prinzip der Validierung des PVT-Kollektormodells ist in Bild 3 dargestellt.

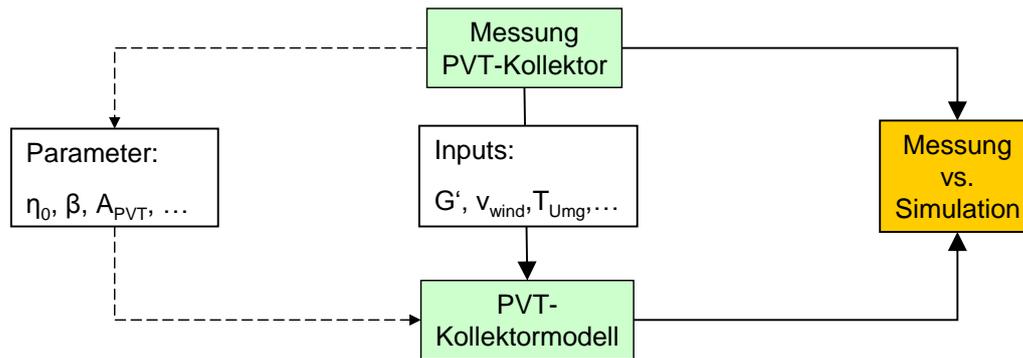


Bild 3 Prinzipielles Schema der Validierung des PVT- Kollektormodells an Hand der Messungen am Testdach bzw. in der Pilotanlage

Bewertung der Abweichungen zwischen Simulation und Messung

Die Abweichung des thermischen Ertrags ΔQ und des elektrischen Ertrags ΔE_{el} wird nach (Gl. 25) bestimmt. Dabei wird die relative Abweichung des thermischen und elektrischen Ertrags zwischen Simulation und Messung berechnet.

$$\Delta Q = \frac{\sum (Q_{sim} - Q_{mess})}{\sum Q_{mess}} \quad \Delta E_{el} = \frac{\sum (E_{el,sim} - E_{el,mess})}{\sum E_{el,mess}} \quad (\text{Gl. 25})$$

Darüber hinaus wird die relative quadratische Abweichung (Hilmer et al. 1999) für den thermischen und elektrischen Ertrag nach (Gl. 26) berechnet. Die Größe \bar{x}_{mess} bezeichnet dabei den arithmetischen Mittelwert des Ertrags pro Intervall über alle Intervalle des Messzeitraums. In der Pilotanlage über den Zeitraum von einem Jahr werden die tägliche Abweichung des Ertrags und der arithmetische Mittelwert der täglichen Erträge über den Zeitraum von einem Jahr gebildet.

$$\bar{V} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \sqrt{\frac{(x_{sim} - x_{mess})^2}{\bar{x}_{mess}^2}} \quad (\text{Gl. 26})$$

Modellvalidierung in der Pilotanlage

Das PVT-Kollektormodell wird validiert an Hand von Messdaten, die an einem 40 m² PVT-Kollektorfeld, integriert in einem Wärmepumpensystem mit Erdsonde, gemessen werden. Dies sind die Einstrahlung, die Windgeschwindigkeit, die Temperaturen von Umgebung, Himmel, Kollektorein- und austritt, der Fluidmassenstrom, Strom und Spannung sowie der Betriebszustand des Wechselrichters. Die über 1 Jahr in Zeitschritten von 1 Minute aufgenommenen Wetterdaten werden dem Modell als Eingangsgrößen zugeführt. Zusätzlich werden die gemessenen Leistungsdaten in TRN-SYS eingelesen und mit den simulierten Leistungen verglichen. Die gemessenen Erträge im Zeitraum von einem Jahr betragen für die Nutzwärme 439.8 kWh/m² und für den elektrischen Ertrag 74.3 kWh/m² (Feld 1) und 74.4 kWh/m² (Feld 2⁶). Die Un-

6 Es werden zwei Teilfelder von PVT- Kollektoren untersucht, die sich konstruktiv geringfügig unterscheiden.

sicherheit bei der Bestimmung der gemessenen thermischen Leistung liegt im Nennbetrieb⁷ bei $\pm 4.1\%$. Für die Bestimmung des gemessenen elektrischen Jahresertrags liegt die Unsicherheit für das Kollektorfeld 1 bei $\pm 1.7\%$ und für Feld 2 bei $\pm 1.6\%$.

Da in den Messdaten nur die Globalstrahlung in Kollektorebene aufgezeichnet wurde, wird die für das Modell erforderliche Direktstrahlung mit dem Perez-Modell (Type 16) umgerechnet. Wie in allen Messungen über sehr lange Zeiträume wurden fehlende Daten durch Messfehler oder Ausfälle mit dafür geeigneten Daten anderer Zeiträume ersetzt. Für den elektrischen Teil der Validierung wurden nur Zeiträume ohne Schatten oder Schnee auf den Modulen verwendet⁸. Die gemessenen und simulierten Leistungen zu Tageswerten aufsummiert worden. Tage mit fehlerhaften Datensätzen z. B. aufgrund von Stromausfall werden durch vollständige Nachbartage ersetzt.

Bild 4 zeigt die gemessenen und simulierten Tageserträge im Zeitraum April 2009 bis März 2010. Um die geringen Abweichungen zu verdeutlichen, sind in Bild 5 die absoluten Abweichungen der elektrischen und thermischen Tageserträge abgebildet.

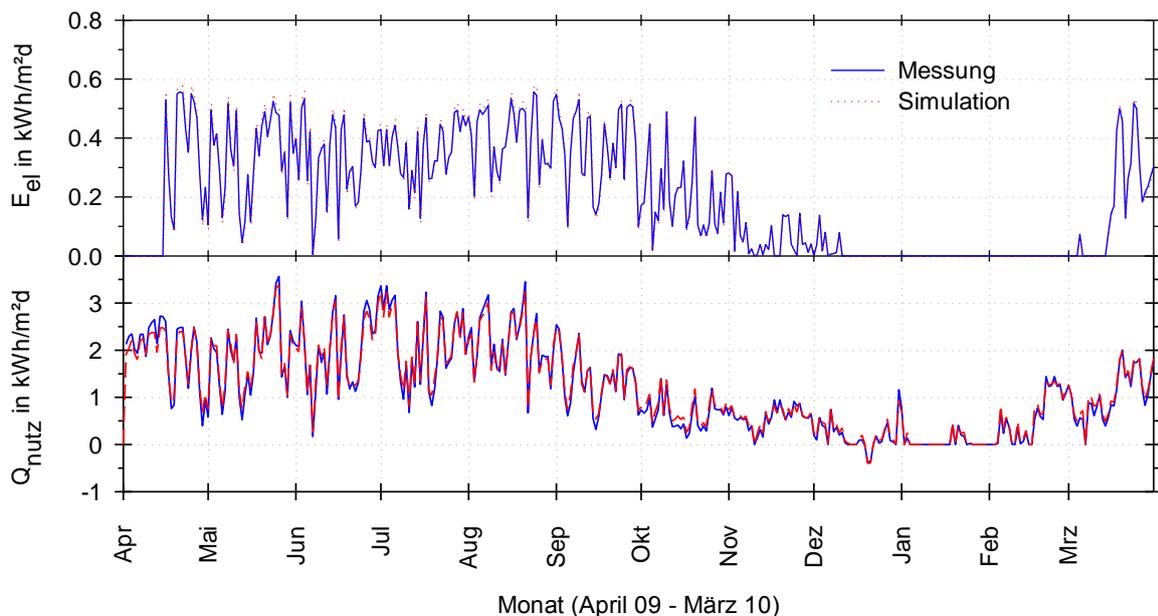


Bild 4 Gemessene und simulierte thermische und elektrische Tageserträge über den Zeitraum von einem Jahr.

7 Als Nennbetrieb wurde folgender Betriebszustand gewählt: abgegebene Nutzleistung 500 W/m², Massenstrom 2500 kg/h, Kollektoreintrittstemperatur 17°C, Kollektoraustrittstemperatur 25°C, Mischungsverhältnis Glykol- / Wasser 40%.

8 Der elektrische Jahresertrag bezieht sich nur auf die Zeiträume, in denen kein Schatten vorliegt und die Wechselrichterleistung des PVT-Kollektorfelds größer als 10% der Nennleistung ist.

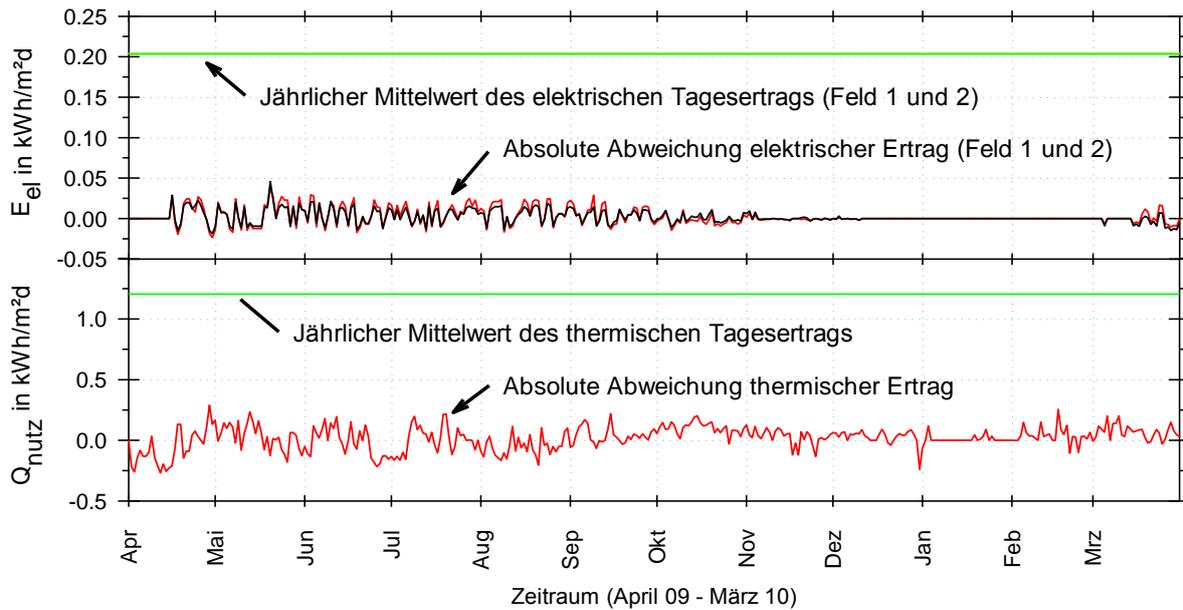


Bild 5 Abweichung der elektrischen und thermischen Tageserträge zwischen Simulation und Messung im Vergleich zum Jahresmittelwert der Tageserträge.

Bild 6 stellt die gemessenen und simulierten Erträge als Monatssummen dar. Die elektrischen Erträge von Feld 1 und Feld 2 sind gemeinsam dargestellt. Die Abweichung des simulierten und des gemessenen thermischen Ertrags beträgt 1.7%. Wie in Bild 6 zu erkennen sind die monatlichen Abweichungen teilweise höher und von unterschiedlicher Tendenz. Die relative quadratische Abweichung der Stundenwerte des thermischen Ertrags liegt bei 6.3%. Für den elektrischen Ertrag beträgt die relative Abweichung von Feld 1 1.0% und von Feld 2 1.4%, die relativen quadratischen Abweichungen liegen bei 2.7% bzw. 3.4%.

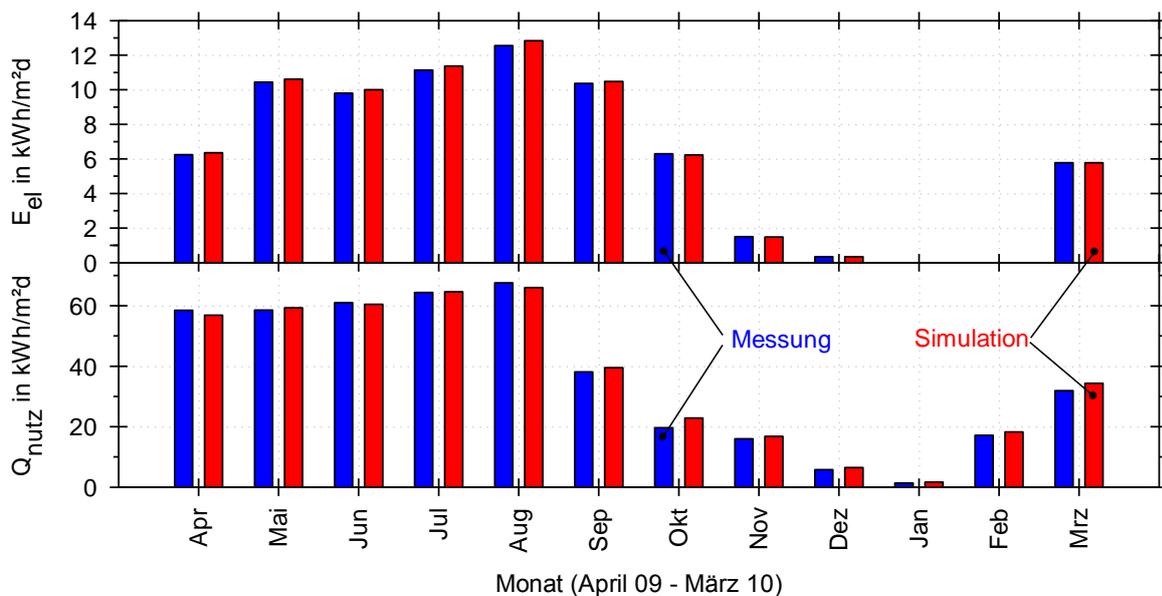


Bild 6 Gemessene und simulierte thermische und elektrische Monatssummen über den Zeitraum von einem Jahr

Tabelle 1 fasst die Ergebnisse der Validierung zusammen.

Tabelle 1: Zusammenfassung der Validierungsergebnisse (Pilotanlage)

Thermischer Ertrag		Elektrischer Ertrag			
		Feld 1		Feld 2	
ΔQ	\bar{V}	ΔE	\bar{V}	ΔE	\bar{V}
1.7%	6.3%	1.0%	2.7%	1.4%	3.4%

Zusammenfassung

Die in anerkannten Normen eingesetzten Kennlinienmodellen für das thermische Verhalten unverglaster Kollektoren einerseits und das elektrische Verhalten von PV-Modulen andererseits sind die Basis für ein neues Simulationsmodell für unverglaste PVT-Kollektoren. Die für unverglaste Kollektoren besonders wichtigen Einflussgrößen Windgeschwindigkeit, Infrarotstrahlungsbilanz, Wärmekapazität des Kollektors und die Effekte von Kondensation auf der Kollektoroberfläche werden im Modell berücksichtigt. Das Modell wurde an Hand von Prüfstandsmessungen und einer einjährigen Messung an einer Pilotanlage überprüft. Der Vergleich zwischen Messung und Modellrechnung zeigt eine hohe Genauigkeit bei der Abbildung des thermischen und des elektrischen Ertrags.

Das Modell wird im Simulationsprogramm TRNSYS als eigenständiger Type umgesetzt. Der Type kann bei den Autoren bezogen werden. Das erstellte Modell und der umgesetzte TRNSYS-Type bieten somit dem Anwender eine zuverlässige und einfach handhabbare Möglichkeit, die thermischen und elektrischen Erträge von Systemen mit PVT-Kollektoren zu simulieren.

Literaturverzeichnis

- Balenzategui, J. L., and F. Chenlo. 2005. "Measurement and analysis of angular response of bare and encapsulated silicon solar cells." *Solar Energy Materials and Solar Cells* 86 (1) (February 15): 53-83. doi:16/j.solmat.2004.06.007.
- EN 12975. 2006. EN 12975-2 Thermische Solaranlagen und ihre Bauteile: Kollektoren - Teil 2 Prüfverfahren. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin.
- EN 60904-1. 2007. *Photovoltaische Einrichtungen - Teil 1: Messen der photovoltaischen Strom- Spannungskennlinien*. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin.
- Hilmer, F., K. Vajen, A. Ratka, H. Ackermann, W. Fuhs, and O. Melsheimer. 1999. "Numerical Solution and Validation of a Dynamic Model of Solar Collectors Working with Varying Fluid Flow Rate." *Solar Energy* 65 (5): 305-321. doi:10.1016/S0038-092X(98)00142-X.
- Pitz-Paal, R. 1988. Kondensation an unabgedeckten Sonnenkollektoren. München : Diplomarbeit, Ludwig-Maximilians-Universität.
- Rockendorf, G., Bartelsen, B. and Witt, A. 1995. Methods to determine the internal heat transfer coefficient between absorber and fluid of solar collectors. Proc. of ISES Solar World Congress, Harare, International Solar Energy Society.
- Wagner, A.. 2006. Photovoltaik Engineering: Handbuch für Planung, Entwicklung und Anwendung. Springer-Verlag, Berlin.