

Thermische und elektrische Charakterisierung von unabgedeckten PVT-Kollektoren

Daniel Zenhäusern¹, Andreas Bohren¹, Matthias Rommel¹, Sebastian Dittmann²,
Thomas Friesen² und Francesco Frontini²

¹Hochschule für Technik Rapperswil (HSR), Institut für Solartechnik (SPF), CH-8640 Rapperswil,
www.spf.ch, daniel.zenhaeusern@spf.ch

²University of Applied Sciences of Southern Switzerland (SUPSI), Institute for Sustainability Applied to
the Built Environment (ISAAC), CH-6952 Canobbio,
www.supsi.ch/isaac, sebastian.dittmann@supsi.ch

1. Einleitung

Photovoltaisch-Thermische (PVT) Kollektoren ermöglichen die Umwandlung von Solarstrahlung in elektrische Energie und nutzbare Wärme (für einen Zugang zur Literatur siehe z.B. [1]). Dadurch, dass sie die ansonsten in PV-Modulen dissipierte Wärme nutzbar machen, erreichen PVT-Kollektoren einen besonders hohen flächenspezifischen Energieertrag. Gleichzeitig ergeben sich durch die Wärmeabnahme tiefere PV-Zelltemperaturen und damit, im Fall von kristallinen Modulen, höhere elektrische Wirkungsgrade gegenüber reinen PV-Modulen.

Die Leistungs-Charakterisierung von reinen PV- oder Thermie-Komponenten ist in IEC 61215 respektive EN12975/ISO9806 normiert. Bei einem PVT-Kollektor beeinflussen sich der thermische und der elektrische Teil gegenseitig. Die maximal für die Wärmeerzeugung verfügbare Solarenergie hängt davon ab, welcher Anteil der Solarstrahlung in elektrische Energie umgewandelt wird. Die photovoltaische Effizienz wiederum hängt von der Zelltemperatur ab, welche ihrerseits massgeblich von der Fluidtemperatur beeinflusst wird. Die Parametrisierungen (Modelle) für die Effizienz von reinen PV- oder Thermiekomponenten berücksichtigen diese Wechselwirkungen nicht und beschreiben deshalb PVT-Kollektoren nur ungenügend.

Eine Parametrisierung, welche zur Charakterisierung von Produkten eingesetzt werden soll, muss einen möglichst guten Kompromiss zwischen Einfachheit und Detailliertheit darstellen. In der Literatur sind bereits mehrere einfache Modelle für PVT-Kollektoren zu finden. Das Modell von Florschuetz [2] basiert auf der Annahme, dass der Wärmeübergang zwischen PV-Zellen und Absorber sehr gut ist und deshalb die Zelltemperatur der Absorbertemperatur gleich gesetzt werden kann. Beim Modell von Stegmann et al. [3] wird die Annahme gemacht, dass sich der Temperaturunterschied zwischen PV-Zellen und Wärmeträgerfluid proportional zum Nutzwärmestrom verhält. Ein anderer Ansatz, welcher z.B. von der Software Polysun [4] genutzt wird, besteht

darin, die Zelltemperatur der Fluidtemperatur gleichzusetzen. All diese Ansätze ermöglichen eine relativ gute Abbildung der thermischen Leistung von PVT-Kollektoren. Die Güte der gemachten Annahmen zur Bestimmung der Zelltemperatur hängt jedoch stark vom Design des Kollektors ab. Für die quantitative Abbildung des elektrischen Mehrertrags, welcher sich durch die Kühlung der PV-Zellen ergibt, sind diese Modelle deshalb nur mit entsprechenden Einschränkungen ausreichend genau.

Wir präsentieren eine einfache Erweiterung des bei thermischen Kollektoren standardmässig angewandten Hottel-Whillier Modells für unabgedeckte PVT-Kollektoren. Das Modell erlaubt die Identifizierung neuer PVT-spezifischer Parameter, welche eine gute Abbildung der PV-Zelltemperatur ermöglichen. Die Parameter können ohne grossen Mehraufwand durch Messung der Zelltemperatur (via Messung der Leerlaufspannung) während der thermischen Prüfung bestimmt werden. Zur Validierung des Modells und der Bestimmung der entsprechenden Parameter wurden Indoor- und Outdoormessungen an einem unabgedeckten PVT-Kollektor durchgeführt.

Im Rahmen dieser Arbeiten wurde auch der Einfluss der inhomogenen Temperaturverteilung auf die elektrische Leistung untersucht. Dieser Einfluss hat sich als gering erwiesen. Die Resultate wurden in [5] präsentiert.

2. Erweiterung de Hottel-Whillier Modells

Eine detaillierte Darstellung des Hottel-Whillier Modells für thermische Kollektoren ist beispielsweise im Buch von Duffie und Beckman [6] zu finden. Die folgende Abhandlung ist direkt an diejenige in der genannten Referenz angelehnt und verwendet dieselben Grundannahmen und dieselbe Notation. Der Aufbau eines unabgedeckten PVT-Kollektors ist in Abbildung 1 dargestellt.

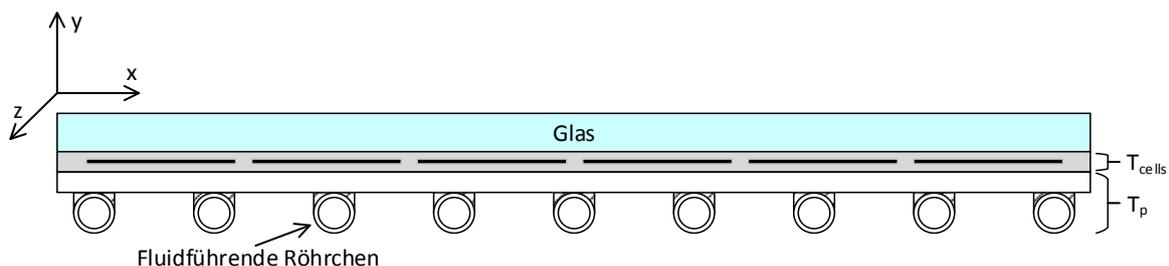


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Aufbaus des PVT-Kollektors. Die oberste Materialschicht besteht aus Glas. Darunter liegt die Schicht mit den PV-Zellen und dem Einbettungsmaterial (etwa EVA od. PVB). Zuunterst liegt das Wärmeabnehmerblech mit den fluidführenden Kanälen.

Es wird angenommen, dass in y-Richtung innerhalb der Materialschichten kein Temperaturgradient besteht und dass die Wärmeflüsse in x- und z-Richtung voneinander unabhängig sind. Weiter wird angenommen, dass die Absorption der Solarstrahlung einzig in der Materialschicht mit den PV-Zellen („Zellschicht“) geschieht. Die lokale Energiebilanz dieser Materialschicht, für ein Element mit

infinitesimaler Ausdehnung in x-Richtung und Einheitslänge in z-Richtung, ist dann gegeben durch

$$k_{cells}\delta_{cells}\frac{d^2T_{cells}}{dx^2} = U_{top}(T_{cells} - T_a) + h_{ca}(T_{cells} - T_p) - \tilde{S}. \quad \text{Gl. 1}$$

k_{cells} ist der Wärmeleitkoeffizient und δ_{cells} die Dicke der Schicht. U_{top} ist der Wärmeübergangskoeffizient zwischen der Zellschicht und der Umgebung und h_{ca} derjenige zwischen der Zellschicht und dem Wärmeabnehmerblech („Absorber“). \tilde{S} ist die Differenz zwischen der absorbierten Einstrahlung und der elektrischen Leistung

$$\tilde{S} = S - P_{el}/A_c,$$

wobei A_c für die Fläche des Kollektors steht. Wir treffen die Annahme, dass in dieser Materialschicht der Energiefluss in x-Richtung vernachlässigt werden kann. Damit kann die Temperatur der Zellschicht wie folgt ausgedrückt werden

$$T_{cells} = \frac{\tilde{S} + U_{top}T_a + h_{ca}T_p}{U_{top} + h_{ca}}. \quad \text{Gl. 2}$$

Die lokale Energiebilanz für die Absorberschicht ist

$$k_p\delta_p\frac{d^2T_p}{dx^2} = U_{back}(T_p - T_a) - h_{ca}(T_{cells} - T_p). \quad \text{Gl. 3}$$

Hier ist k_p der Wärmeleitkoeffizient und δ_p die Dicke des Absorbermaterials. U_{back} ist der rückseitige Wärmeübergangskoeffizient zwischen Absorber und Umgebung. Durch Substitution von T_{cells} durch den Ausdruck von Gl. 2 erhalten wir

$$\frac{d^2T_p}{dx^2} = \frac{\tilde{U}_L}{\mu_{top}k_p\delta_p}\left(T_p - T_a - \frac{\tilde{S}}{\tilde{U}_L}\right), \quad \text{Gl. 4}$$

mit $\mu_{top} = \frac{h_{ca} + U_{top}}{h_{ca}}$ und $\tilde{U}_L = U_{top} + \mu_{top}U_{back}$.

Nun können die gleichen Schritte wie in Ref. [6] durchgeführt werden, um zu folgendem Resultat für die nutzbare Wärmeleistung zu gelangen

$$Q_u = A_c \tilde{F}' \left(\tilde{S} - \tilde{U}_L(T_m - T_a) \right). \quad \text{Gl. 5}$$

Für ein Absorberdesign wie in Ref. [6] ist \tilde{F}' gleich definiert wie in der Referenz, bis auf den Unterschied dass \tilde{U}_L anstatt U_L und $\tilde{m} = \sqrt{\tilde{U}_L/(\mu_{back}k_p\delta_p)}$ anstatt m eingesetzt werden.

2. Thermischer Kollektorstufigungsgrad

Für ungedeckte Kollektoren kann \tilde{S} ausgedrückt werden als

$$\tilde{S} = \alpha G'' - P_{el}/A_c = \alpha \left(G'' - \frac{P_{el}/A_c}{\alpha} \right) = \alpha G_{eff}. \quad \text{Gl. 6}$$

α ist der hemisphärische Absorptionsgrad für das Solarspektrum, G_{eff} eine neu definierte „effektive Einstrahlung“ und G'' die bei ungedeckten Kollektoren üblicherweise verwendete netto Einstrahlung [7]

$$G'' = G + \frac{\epsilon}{\alpha} (E_L - \sigma_{SB} T_a^4),$$

wobei ϵ den langwelligen Emissionsgrad und E_L die langwellige Einstrahlung in der Kollektorebene bezeichnen.¹

Der thermische Kollektorwirkungsgrad kann nun wie folgt definiert werden

$$\eta_{th} = \frac{Q_u}{A_c G_{eff}} = \alpha \tilde{F}' - \tilde{F}' \tilde{U}_L \frac{T_m - T_a}{G_{eff}}. \quad \text{Gl. 7}$$

Bei Leistungstests von unabgedeckten Kollektoren gemäss EN 12975 werden die Parameterkombinationen $\alpha \tilde{F}'$ und $\tilde{F}' \tilde{U}_L$ gemessen. Es wird dabei angenommen, dass diese Kombinationen nur schwach von der Temperatur und der Einstrahlung abhängen und deren Windabhängigkeit ausreichend gut mit einem linearen Zusammenhang erfasst werden kann. Der thermische Wirkungsgrad kann demzufolge ausgedrückt werden als

$$\eta_{th} = \eta_0 (1 - b_u u) - (b_1 + b_2 u) \frac{T_m - T_a}{G_{eff}}, \quad \text{Gl. 8}$$

wobei u die Windgeschwindigkeit in Kollektorebene bezeichnet. Wenn der PVT-Kollektor keine elektrische Leistung produziert (Leerlaufbetrieb) ist $G_{eff} = G''$ und der obige Ausdruck entspricht dem eines rein thermischen Kollektors. Die thermischen Parameter η_0, b_u, b_1 und b_2 können also durch eine thermische Standardmessung bestimmt werden. Die Verwendung von G_{eff} anstatt G'' für PVT-Kollektoren hat den Zweck, dass damit die Werte der Parameter unabhängig vom elektrischen Betriebspunkt sind.

3. PV-Zelltemperatur

Als nächstes wollen wir einen Zusammenhang zwischen der mittleren Fluidtemperatur T_m und der mittleren Temperatur der Zellschicht \bar{T}_{cells} finden. Dazu bemerken wir, dass die Nutzwärmeleistung auch durch den folgenden Ausdruck gegeben ist

$$Q_u/A_c = \tilde{S} - U_{top}(\bar{T}_{cells} - T_a) - U_{back}(\bar{T}_p - T_a), \quad \text{Gl. 9}$$

mit der mittleren Temperatur der Absorberschicht \bar{T}_p . Nun mitteln wir Gl. 2 und nutzen die resultierende Gleichung zum Eliminieren von \bar{T}_p in Gl. 9. Wir erhalten folgendes Resultat

$$Q_u/A_c = \mu_{back} \tilde{S} - \tilde{U}_L (\bar{T}_{cells} - T_a), \quad \text{Gl. 10}$$

mit $\mu_{back} = \frac{h_{ca} + U_{back}}{h_{ca}}$.

¹ Bei einem PVT-Kollektor bei dem die Vorderseite aus einer Glasscheibe besteht, wird die Wärmestrahlung nicht bei der Temperatur der absorbierenden Schicht (Zellen) sondern bei der Temperatur der Glasscheibe emittiert. Deshalb müsste der zweite Term in der Definition von G'' strikt genommen mit dem Faktor $1/(1 + (h_c + h_r)/h_{gc})$ multipliziert werden. Da jedoch der Wärmeübergangskoeffizient h_{gc} zwischen Glas und Zellschicht um rund einen Grössenordnung grösser ist als die Summe der konvektiven und radiativen vorderseitigen Wärmeübergangskoeffizienten h_c und h_r kann dieser Faktor vernachlässigt werden.

Durch Ersetzen von Q_u durch den Ausdruck von Gl. 5 erhalten wir

$$T_{cells} - T_a = \frac{\tilde{F}'(\mu_{back} - \tilde{F}')}{\tilde{F}'\tilde{U}_L} \tilde{S} + \tilde{F}'(T_m - T_a), \quad \text{Gl. 11}$$

und nach Einsetzen von \tilde{S} aus Gl. 6 und Dividieren durch G_{eff} erhalten wir schliesslich

$$\frac{T_{cells} - T_a}{G_{eff}} = \frac{\alpha\tilde{F}'(\mu_{back} - \tilde{F}')}{\tilde{F}'\tilde{U}_L} + \tilde{F}'\frac{T_m - T_a}{G_{eff}}. \quad \text{Gl. 12}$$

Dies ist der gesuchte Zusammenhang zwischen der Temperatur der Zellschicht, der Fluidtemperatur und den Umgebungsvariablen. Wie im Fall des thermischen Wirkungsgrades wollen wir annehmen, dass die Temperaturabhängigkeit bestimmter Parameterkombinationen vernachlässigt werden kann und deren Windabhängigkeit durch lineare Abhängigkeiten beschrieben werden kann. Entsprechend definieren wir eine „thermische Kopplungszahl“ wie folgt

$$\kappa_{th} \equiv \frac{T_{cells} - T_a}{G_{eff}} = c_0(1 - c_u u) + (d_1 - d_2 u) \frac{T_m - T_a}{G_{eff}}. \quad \text{Gl. 13}$$

Spezialfälle

Die in Abschnitt 1 erwähnten Ansätze für die Beziehung zwischen Zelltemperatur und Fluidtemperatur ergeben sich als Spezialfälle des hier beschriebenen Modells. Ist die rückseitige Wärmeverlustzahl klein gegenüber h_{ca} , d.h. für $U_{back}/h_{ca} \ll 1$ und damit $\mu_{back} \sim 1$ ergibt sich aus Gl. 5 und Gl. 10 die Proportionalität $T_{cells} - T_m \propto Q_u$ von Ref. [3]. Im Falle eines sehr guten Wärmeübergangs zwischen Zell- und Absorberschicht ($h_{ca} \rightarrow \infty$) ergibt sich zusätzlich $T_{cells} = T_p$ wie in Ref. [2]. Für $\mu_{back} \sim 1$ und eine sehr hohe Absorbereffizienz $\tilde{F}' \sim 1$ erhält man $T_{cells} = T_m$.

4. Messungen

4.1 Methode

Für die thermische Charakterisierung des PVT-Kollektors wurden Indoormessungen (Sonnensimulator) und Outdoormessungen (Tracker) nach der „steady-state Methode“ gemäss EN12975 durchgeführt. Die Indoormessungen wurden einmal mit und einmal ohne MPP-Tracking und jeweils bei drei verschiedenen Windstufen durchgeführt. Die Outdoormessung erfolgte im MPP-Betrieb bei nur einer Windstufe. Während der thermischen Messungen wurden jede Minute der Kurzschlussstrom I_{sc} und die Leerlaufspannung V_{oc} gemessen. Damit wurde jeweils die äquivalente Zelltemperatur (equivalent cell temperature ECT) gemäss IEC 60904-5 bestimmt.

$$T_{ECT} = 25 \text{ } ^\circ\text{C} + \frac{1}{\beta} \left[\frac{V_{oc}}{V_{oc}^{STC}} - 1 - a \ln \left(\frac{G}{1000} \right) \right] \quad \text{Gl. 14}$$

β ist der Temperaturkoeffizient der Leerlaufspannung und $\alpha = \frac{V_{oc}^4 - V_{oc}^3}{V_{oc}^3 \ln(G_4/G_3)}$ mit den Leerlaufspannungen gemessen bei einer fixen Temperatur und zwei unterschiedlichen Einstrahlungsleistungen.

4.2 Ergebnisse

Eine typische Messsequenz ist in Abbildung 2 dargestellt. Das Beispiel stammt aus einer Outdoormessung, bei welcher das Modul mit MPP-Tracking betrieben wurde. Die Fluidtemperatur wurde auf verschiedene Niveaus eingestellt. Für höhere Fluidtemperaturen nehmen die thermische Effizienz und damit die thermische Leistung ab. Mit höheren Fluidtemperaturen steigt die Zelltemperatur. Dies resultiert in einer verringerten elektrischen Leistung. Der Unterschied zwischen Zell- und Fluidtemperatur ist kleiner bei höheren Temperaturen, da bei diesen Temperaturen weniger Wärmeabnahme über das Fluid erfolgt.

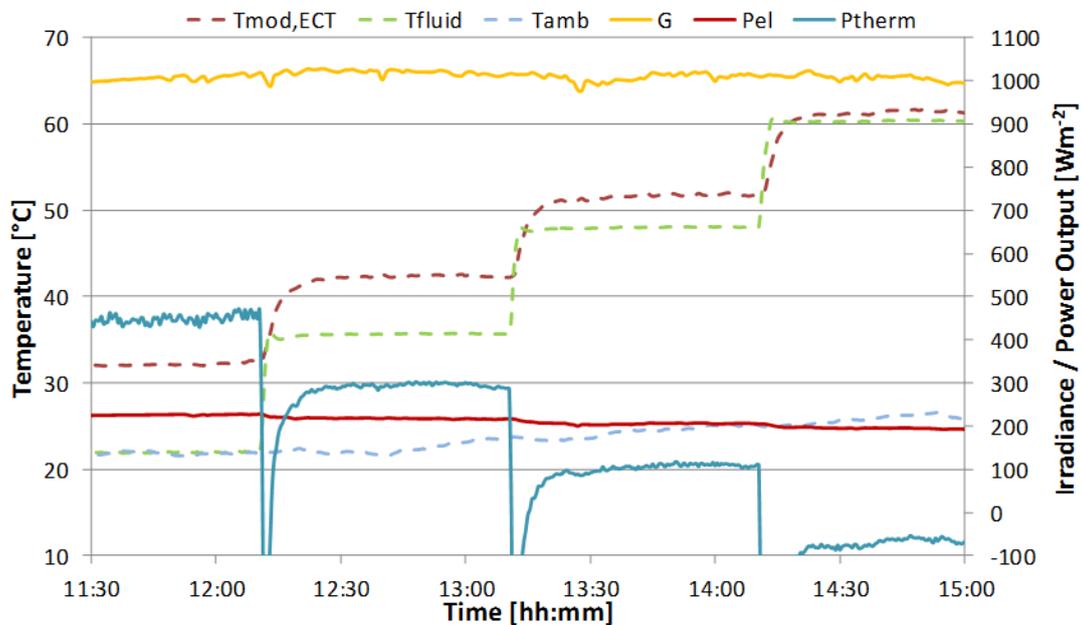


Abbildung 2: Darstellung einer typischen Outdoor-Messesequenz (Modul in MPP-Betrieb).

Messwerte, welche die relevanten Stabilitätskriterien erfüllten, wurden dann dazu genutzt, die in Gl. 8 und Gl. 13 definierten Kennlinien zu bestimmen. Zur Bestimmung von G'' und schliesslich G_{eff} sind die Werte für Absorption α und Emission ϵ erforderlich. Die Absorption wurde durch eine Messung bestimmt, $\alpha = 0.92$. Für die Emission wurde der Wert für Glas $\epsilon = 0.92$ eingesetzt. Die Sensibilität der Resultate auf die genauen Werte von α und ϵ ist jedoch relativ gering. Die Resultate der Indoor- und Outdoormessungen sind in den folgenden Plots dargestellt. Die Bestimmung der Parameter erfolgte durch einen least-squares-fit über die Messpunkte aller Windstufen.

Indoor-Messungen

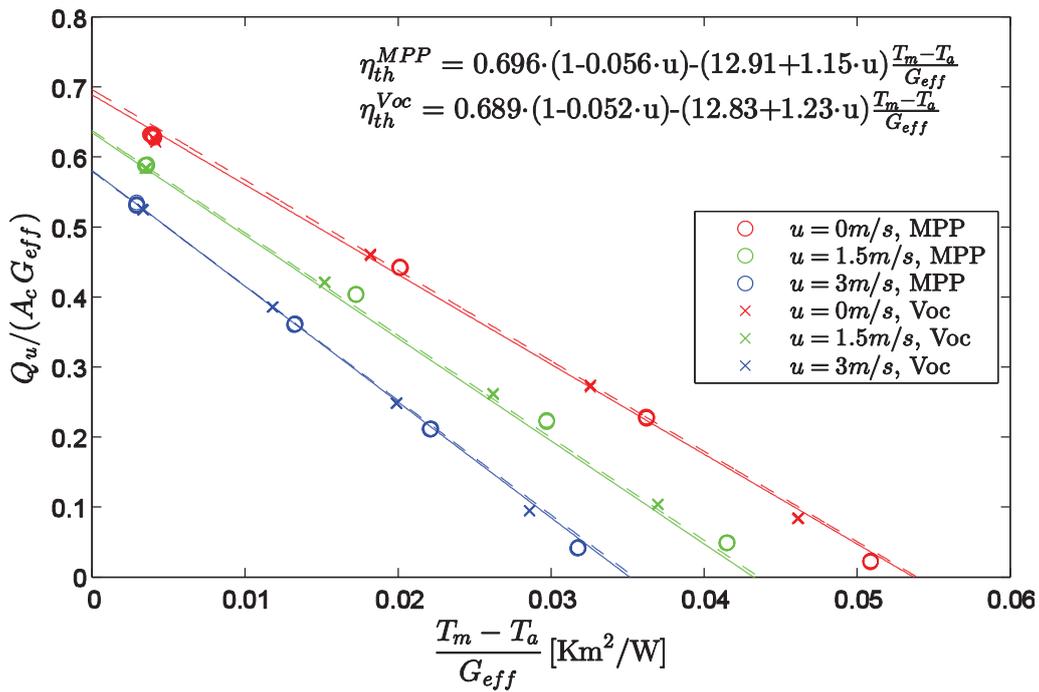


Abbildung 3: Bestimmung des thermischen Wirkungsgrades aus Indoormessung.

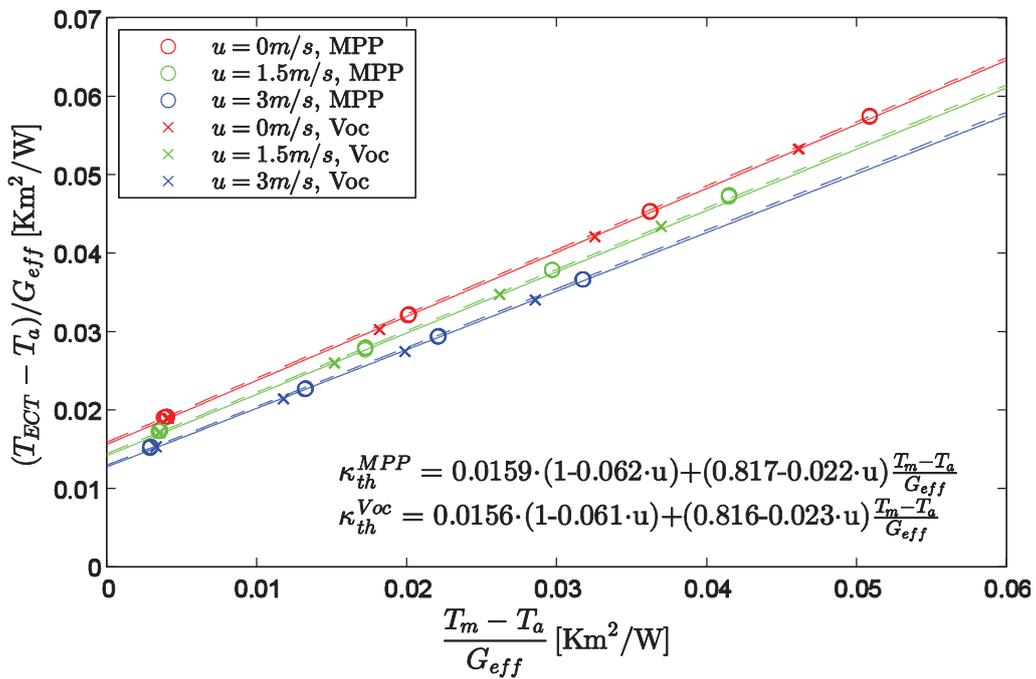


Abbildung 4: Bestimmung der thermischen Kopplungszahl κ_{th} aus Indoormessung.

Outdoor-Messungen

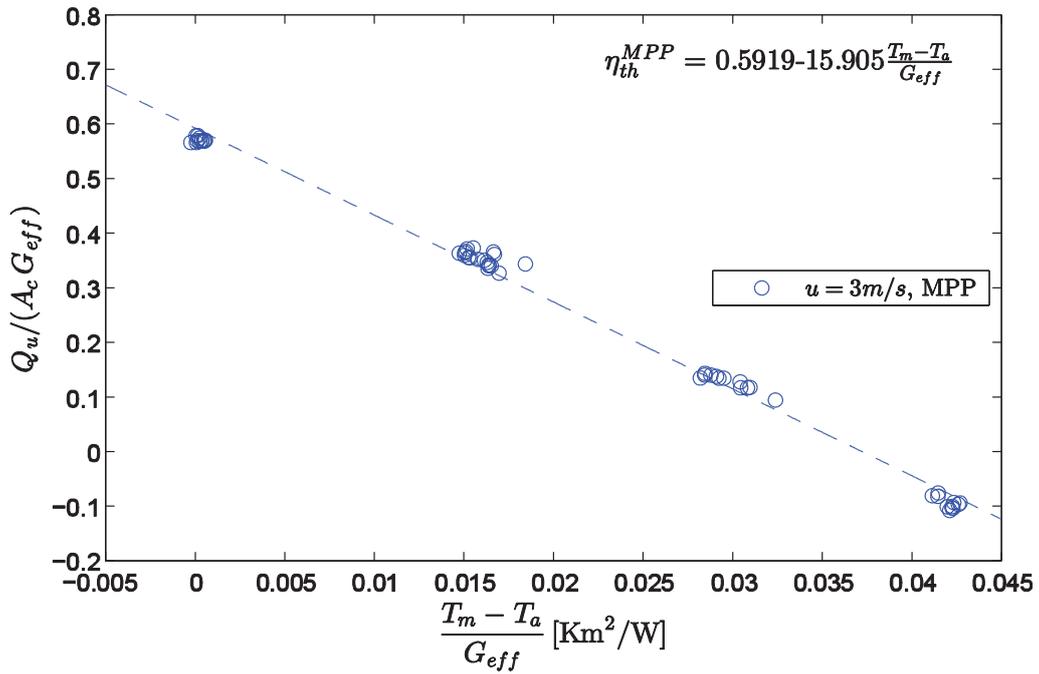


Abbildung 5: Bestimmung des thermischen Wirkungsgrades aus Outdoormessung.

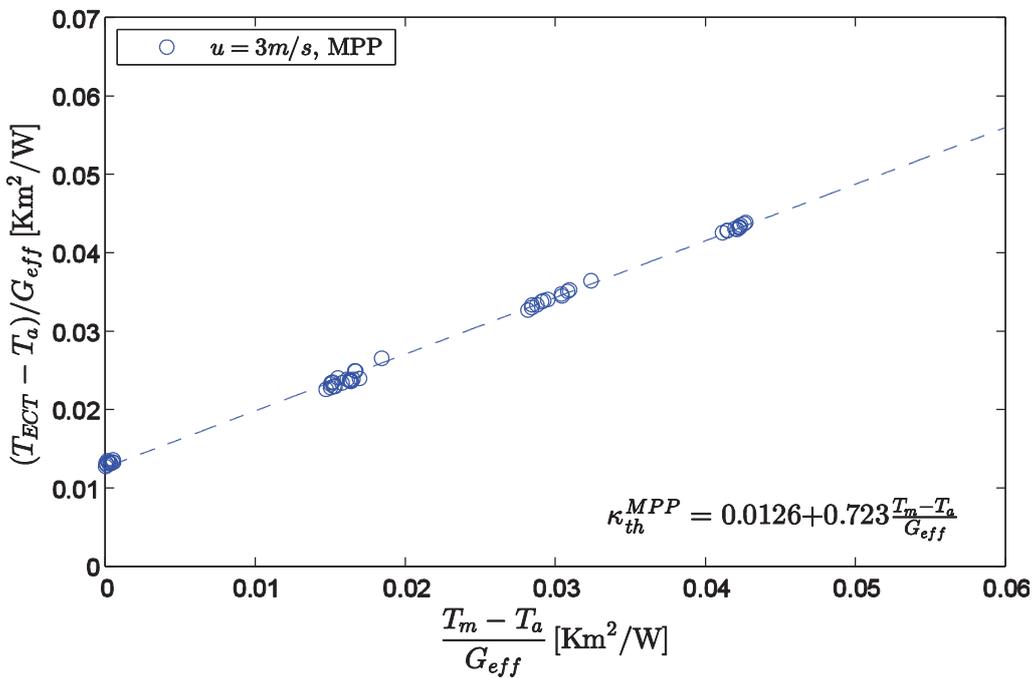


Abbildung 6: Bestimmung der thermischen Kopplungszahl κ_{th} aus Outdoormessung.

4.3 Diskussion der Ergebnisse

Die Resultate der Indoor- und Outdoormessungen zeigen für eine gegebene Windgeschwindigkeit eine gute lineare Korrelation von $(T_m - T_a)/G_{eff}$ sowohl mit $Q_u/(A_c G_{eff})$ als auch mit $(T_{ECT} - T_a)/G_{eff}$. Die Verwendung von G_{eff} anstelle von G'' bringt das gewünschte Resultat. Die Bestimmung der Parameter aus den Messungen im MPP-Betrieb und im Leerlauf-Betrieb ergeben praktisch identische Werte. Auch der Vergleich der Indoor- mit den Outdoorresultaten ergibt eine gute Übereinstimmung.

Die Resultate zeigen also, dass Kennlinien der Form von Gl. 8 und Gl. 13 eine gute Beschreibung der Daten ermöglichen. Bei der Bestimmung der Kennlinien wurden die Parameter $\eta_0, b_u, b_1, b_2, c_0, c_u, d_1$ und d_2 als unabhängig behandelt. Im theoretischen Modell von Gl. 7 und Gl. 12 besteht jedoch folgender Zusammenhang zwischen den Parametern, $\frac{\eta_0(1-b_u u)}{\alpha} = d_1 + d_2 u$. Mit den ermittelten Parameterwerten ergeben sich Abweichungen von diesem Zusammenhang im Bereich von 10-15%, abhängig vom Windlevel. Gründe für diese Abweichungen sind vor Allem in den vereinfachten Annahmen zu suchen, welche bei der Modellbildung getroffen wurden. So ist beispielsweise die Annahme, dass die Absorption der Solarstrahlung nur in den Zellen geschieht, nicht ganz präzise, da ein Teil der Strahlung zwischen den Zellen und am Modulrand eintrifft und teilweise vom Backsheet absorbiert wird. Auch nicht berücksichtigt wurde etwa die Tatsache, dass das Wärmeabnehmerblech im Bereich der Anschlussbox unterbrochen ist und deshalb dort keine Zellkühlung stattfindet.

Die Messdaten erlauben auch eine Beurteilung der Gültigkeit von zusätzlich vereinfachten Modellen für die Zelltemperatur. In Abbildung 7 ist die Differenz zwischen Zell- und Fluidtemperatur $T_{cells} - T_m$ in Funktion der spezifischen Wärmeleistung Q_u/A_c dargestellt.

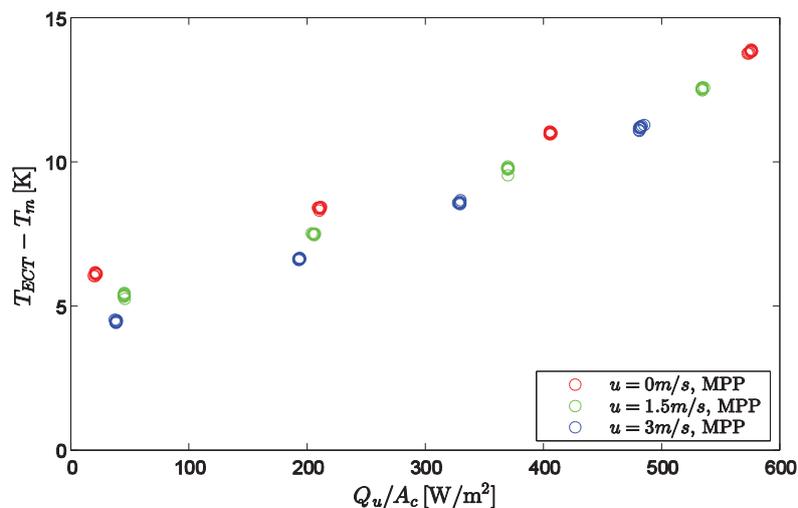


Abbildung 7: Differenz zwischen Zell- und Fluidtemperatur in Abhängigkeit der Wärmeleistung.

Auch ohne Wärmeabnahme besteht ein klarer Temperaturunterschied zwischen Zellen und Fluid, welcher von einem Modell der Form $T_{cells} - T_m \propto Q_u$ nicht abgebildet wird. Ein solches Modell würde also den Einfluss der Modulkühlung auf die elektrische Leistung insbesondere bei tiefen Wärmeleistungen etwas überschätzen. In einem weiter vereinfachten Modell, in dem $T_{cells} = T_m$ angenommen wird, würde der Effekt der Modulkühlung noch etwas stärker überschätzt.

5. Fazit

Basierend auf einer Erweiterung des Hottel-Whillier Modells für thermische Solarkollektoren, konnte eine Parametrisierung von Wirkungsgradkennlinien zur Charakterisierung von unabgedeckten PVT-Kollektoren vorgeschlagen werden. Kennlinien der Form von Gl. 8 und Gl. 13, deren Parameter messtechnisch bestimmt werden, in Kombination mit einem Modell für die elektrische Leistung der Form $P_{el} = P_{el}^{25^\circ} \cdot (1 - \gamma(T_{Zelle} - 25^\circ))$ erlauben die Bestimmung der thermischen und elektrischen Leistung in Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen.

Danksagung

Dieses Projekt wurde unterstützt vom Bundesamt für Energie der Schweizerischen Eidgenossenschaft.

Literaturverzeichnis

- [1] H. Zondag, „Flat-plate PV-Thermal collectors and systems: A review,“ *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, Bd. 12, pp. 891-959, 2008.
- [2] L. W. Florschuetz, „Extension of the Hottel-Whillier model to the analysis of combined photovoltaic/thermal flat plate collectors,“ *Solar Energy*, Bd. 22, pp. 361-366, 1979.
- [3] M. Stegmann, E. Bertram, G. Rockendorf und S. Janssen, „Model of an unglazed photovoltaic thermal collector – based on standard test procedures,“ in *Proc. of ISES Solar World Congress 2011*, Kassel, 2011.
- [4] <http://www.velasolaris.com/>.
- [5] S. Dittmann, T. Friesen, F. Frontini, A. Bohren, D. Zenhausern und M. Rommel, „Indoor and Outdoor Testing of an Unglazed PVT Collector,“ in *EU PVSEC*, Amsterdam, 2014.
- [6] J. Duffie und W. Beckman, *Solar engineering of thermal processes*, Hoboken: J. Wiley & Sons, Inc., 2006.
- [7] G. L. Morrison und D. Gilliaert, „Unglazed Solar Collector Performance Characteristics,“ *J. Sol. Energy Eng.*, Bd. 114, Nr. 3, pp. 194-200, 1992.