

Entwicklung eines abgedeckten PVT-Isolierglaskollektors

Matthias Kreuzer B.Eng. / Oliver Stark M.Sc. / Prof. Dr. Tobias Plesing

Institut für Wasser und Energiemanagement (iwe), Hochschule Hof, Alfons-Goppel-Platz-1, D-95028 Hof

Abstract

Der neuentwickelte PVT-Isolierglas-Flachkollektor, in abgedeckter Bauweise, kann im Vergleich zu herkömmlichen PVT-Kollektoren sogar bei winterlichen Außentemperaturen ausreichend Wärmeenergie, auf einem höheren Temperaturniveau, zur Verfügung stellen. Dies wird durch einen innenliegenden und höchst effizienten Absorber erreicht. Der erzeugte Strom kann direkt verbraucht werden oder den Netzbezug einer Wärmepumpe verringern. Durch seine Konstruktion wird eine direkte Heizungsunterstützung/Brauchwassererwärmung möglich. Marktverfügbare PVT-Kollektoren entziehen ihre Energie häufig aus der Umgebungsluft, dies schränkt ihre Verwendung während der Heizperiode stark ein. Außerdem befinden sich die PV-Zellen des neuentwickelten Kollektors gut geschützt, einlaminiert zwischen zwei Scheiben, was einen Einsatz bei aggressiven Umweltbedingungen möglich macht, z.B. im landwirtschaftlichen Bereich.

1. Motivation

Während der Heizperiode benötigen Gebäude sowohl Wärme als auch Strom. Der Großteil entfällt hierbei auf den Wärmesektor. Im Durchschnitt werden in Deutschland pro Jahr 108 kWh Energie pro Quadratmeter in Mehrfamilienhäusern und 116 kWh pro Quadratmeter in Einfamilienhäusern, für die Beheizung der Wohnfläche, verbraucht (Durchschnittswert 2014). Der mittlere Stromverbrauch von Haushalten in Ein- und Mehrfamilienhäusern betrug 2017 hingegen nur 3.000 bis 4.000 kWh. Die erneuerbaren Energien hatten 2016 im Wärmesektor dabei lediglich einen Anteil von 13,5 % (siehe Abbildung 1). [1] [2] [3]

Bis zum Jahr 2050 will Deutschland weitestgehend treibhausgasneutral werden (Klimaschutzplan 2050). [4]



Abbildung 1: Anteil erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch, am Endenergieverbrauch für Wärme und Kälte sowie am Endenergieverbrauch im Verkehrssektor [3]

„Die gebäuderelevanten CO₂-Emissionen, die nach dem Verursacherprinzip ermittelt werden, summierten sich im Jahr 2016 auf insgesamt 215 Megatonnen CO₂. Dies entsprach rund 28,2 % der energiebedingten CO₂-Emissionen. Wohngebäude haben daran einen Anteil 23 %, Nicht-Wohngebäude 14 % und Sonstige 63 %.“ [5] [6]

Wenn Hausbesitzer, Gewerbetreibende oder die Industrie Investitionen in erneuerbare Energien beschließen, entscheiden Sie sich meist aus monetären Gründen für eine reine PV-Anlage. Einzig das Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich (EEWärmeG) sorgt für einen gewissen Absatz von solarthermischen Kollektoren.

Durch den Einsatz von PVT-Kollektoren, die neben Strom auch Wärme produzieren, soll die Akzeptanz von solarthermischen Anlagen weiter gefördert werden. Je nach Einsatzzweck und Kollektortyp liegt der Fokus entweder auf der Stromproduktion oder auf der Gewinnung von Wärmeenergie. Durch die Kombination mit einer Wärmepumpe und einem Eisespeicher kann im Sommerbetrieb ein Kühleffekt erreicht werden, der einen Mehrertrag von 5 % im Vergleich zu herkömmlichen PV-Modulen zur Folge hat, außerdem könnten Dach- und Fassadenflächen effizienter genutzt werden. Durch das hochtransparente abgedeckte PV-Absorber-Element wirkt das äußere Erscheinungsbild, verglichen mit herkömmlichen Modulen, sehr modern und lässt sich auch in anspruchsvolle Architektur, z.B. im Fassadenbereich, integrieren.

2. Aufbau des Kollektors

Abbildung 2 zeigt die Vorder- und Rückansicht des PVT-Kollektors. Auf der Rückansicht sind die harfenförmige Verrohrung und die Anschlussstücke zu erkennen, durch die das Wärmeträgerfluid fließt. Die Vorderseite zeigt den Absorber mit seinen 50 einlamierten PV-Zellen.

Technische Daten:

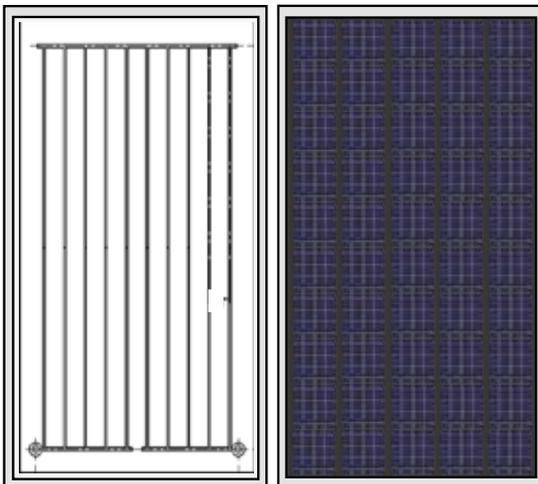


Abbildung 2: PVT-Kollektor Rück- und Vorderansicht

Allgemein:

- Länge 1723 mm
- Breite 1023 mm
- Tiefe 63 mm
- Gewicht 69 kg

Solarthermie:

- Bruttofläche 1,77 m²
- Aperturfläche 1,61 m²
- Absorberfläche 1,57 m²
- Durchflussrate > 60 l/h

Photovoltaik (STC):

- MPP-Spannung 27 V
- MPP-Stromstärke 7,5 A
- Maximale Leistung 202 W
- Fläche PV-Zellen 1,22 m²

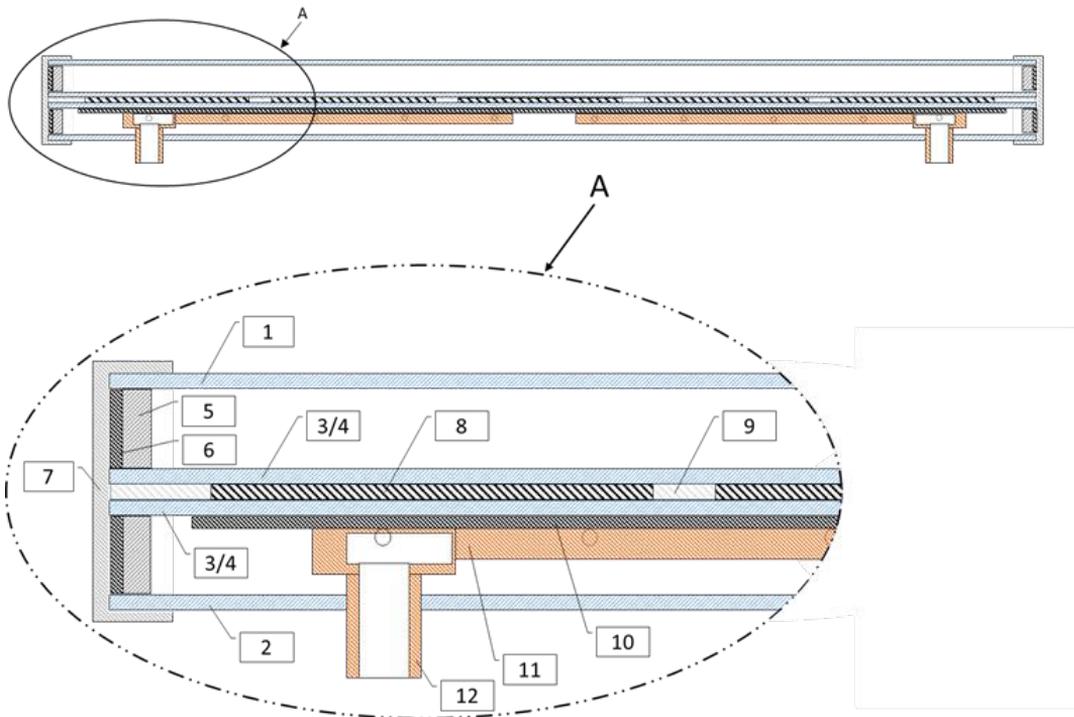


Abbildung 3: Prototyp des PVT-Isolierglaskollektors in abgedeckter Bauweise als Schnittzeichnung (obere Abbildung) mit Detailansicht (untere Abbildung).

Die äußere Glasabdeckung **(1)** besteht aus einer thermisch gehärteten Solarglasscheibe mit 3 mm Stärke, die mit einer Anti-Reflexbeschichtung versehen ist. Die rückseitige Scheibe ist 4 mm stark und besitzt ebenfalls obige Eigenschaften. Die fünfzig monokristallinen PV-Siliziumzellen **(8)** sind zwischen zwei 2 mm dicken Solarglasscheiben **(3/4)** einlamiert, verklebt und abgedichtet mit transparentem Spezialsilikon **(9)**.

Die Abstandhalter (Spacer) **(5)** aus Aluminium bilden einen wesentlichen Teil des Isolierglasscheiben-Verbundes. Im Inneren sind sie mit Trockenmittel gefüllt und besitzen eine Buthyldichtung, die den Scheibenzwischenraum abdichtet. Um den Scheibenverbund zusätzlich zu stabilisieren und das Austreten des Argongases aus dem Scheibenzwischenraum langfristig zu verhindern, wird eine Polysulfid-Abdichtung **(6)** angebracht. Das eingebrachte Argon verringert konvektive Wärmeverluste und verhindert das innenseitige Beschlagen.

Der Aluminiumrahmen **(7)** besteht aus vier verschraubten Einzelelementen und muss alle Gewichtskräfte aufnehmen können. Er bildet das Bindeglied zwischen Kollektor und Montagesystem.

Punkt **(8)** zeigt eine monokristalline Siliziumzelle im Schnitt, die von Spezialsilikon **(9)** umschlossen ist, und so vollständig vor schädlichen Umweltbedingungen geschützt ist. Ein zuverlässiger und beständiger Feuchteschutz ist für die VDE-Konformität zwingend erforderlich.

Der eigentliche Absorber **(10)** besteht aus Aluminiumblech, das mit einer Spezialbeschichtung versehen ist. Er wandelt die Strahlung der Sonne, die direkt auf die Zell-Zwischenräume fällt, in Wärme um. Außerdem muss er die Wärme zu den harfenförmigen Rohren **(11)** leiten und für eine Wärmeabfuhr an

den Siliziumzellen sorgen. Die harfenförmigen Rohre führen das Wärmeträgerfluid und wurden mit Hilfe des Rollschweißverfahrens am Absorberblech befestigt.

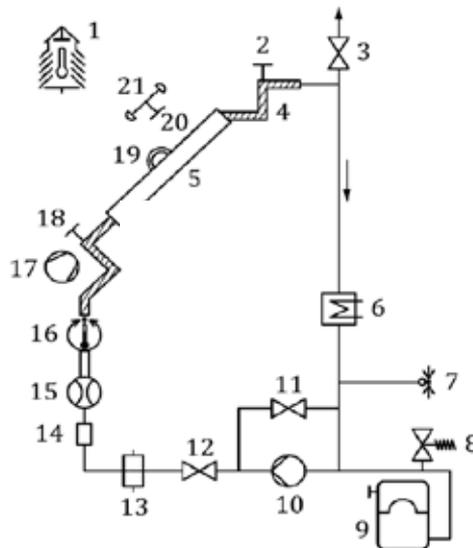
Das Anschlussstück (**12**) besitzt einen metallisch konisch-dichtenden Anschluss (3/4 Zoll) und wurde eigens entwickelt, um das Austreten des Argons während der gesamten Lebensdauer zu verhindern. Durch seine intelligente Konstruktion ist eine Beschädigung des Glases, durch ein zu starkes Drehmoment, während des Montageprozesses ausgeschlossen.

Vorteile bei der Montage: Nach dem das PV-Absorberpaket vorgefertigt wurde, kann der Zusammenbau mit einem hohen Automatisierungsgrad kostengünstig in einer Isolierglaslinie erfolgen.

3. Thermische Leistungsmessung

Am „Bayerischen Zentrum für Angewandte Energieforschung e. V.“ (ZAE Bayern) wurde die thermische Leistungsfähigkeit des PVT-Kollektors zur Bestimmung der Kollektorkennlinie in einer Freilandmessung ermittelt, in Anlehnung an die DIN EN ISO 9806:2018-04. Abbildung 4 zeigt den generellen Messaufbau [7]

Messaufbau



Legende

- | | |
|---|------------------------------------|
| 1 Umgebungsluft-Temperaturfühler | 12 Durchflussregelventil |
| 2 Temperaturfühler (θ_a) | 13 Filter (200 μm) |
| 3 Entlüftung | 14 Schauglas |
| 4 wärmeisoliertes Rohr | 15 Durchflussmessgerät |
| 5 Sonnenkollektor | 16 sekundärer Temperaturregler |
| 6 Heizer/Kühler für die primäre
Temperaturregelung | 17 Windgenerator |
| 7 Druckmessgerät | 18 Temperaturfühler (θ_m) |
| 8 Sicherheitsventil | 19 Pyrometer |
| 9 Expansionsspeicher | 20 Pyranometer |
| 10 Pumpe | 21 Anemometer |
| 11 Umgehungsventil | |

Abbildung 4: Prüfkreislauf (DIN EN ISO 9806:2018-04) [7]

Abbildung 5 zeigt den PVT-Prüfstand am ZAE in Garching mit montiertem PVT-Kollektor. In der linken Bildhälfte ist der nachführbare Messaufbau („solar tracker“) zu erkennen, während in der rechten Bildhälfte die Messtechnik und der Thermostat zu sehen sind.



Abbildung 5: PVT-Prüfstand mit „solar tracker“ am ZAE Garching

Kollektorleistung nach dem stationären Prüfverfahren (SST) [7] [8]

Die Betriebsbedingungen, wie die Bestrahlungsstärke G und die Kollektorein- und Austrittstemperatur ($T_{F,in}/T_{F,out}$), dürfen während der Messung in nur sehr engen Grenzen schwanken. Vergleiche Tabelle 1 und Tabelle 2. Die Nutzleistung \dot{Q} wird wie in Gleichung (1) angegeben gemessen:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_f \cdot (T_{F,in} - T_{F,out}) = \dot{m} \cdot c_f \cdot \Delta T \quad (1)$$

Die Energiebilanz kann wie folgt angegeben werden:

$$\begin{aligned} \frac{\dot{Q}}{A_G} = \eta_{0,hem} \cdot K_{hem}(\theta) \cdot G - a_1 \cdot (T_m - T_a) - a_2 \cdot (T_m - T_a)^2 \\ - a_3 \cdot u \cdot (T_m - T_a) + a_4 \cdot (E_L - \sigma \cdot T_a^4) - a_6 \cdot u \cdot G \\ - a_7 \cdot u \cdot (E_L - \sigma \cdot T_a^4) - a_8 \cdot (T_m - T_a)^4 \end{aligned} \quad (2)$$

Dabei ist,

$$a_4 = \eta_{0,hem} \cdot \frac{\epsilon}{\alpha} \quad \text{und} \quad a_6 = \eta_{0,hem} \cdot b_u \quad \text{und} \quad a_8 = \eta_{0,hem} \cdot b_u \cdot \frac{\epsilon}{\alpha} \quad (3)$$

Die Parameter a_3, a_4, a_6, a_7 und a_8 können bei einem abgedeckten Kollektor vernachlässigt werden. Aus Gleichung (2) folgt: [8]

$$\frac{\dot{Q}}{A_G} = \eta_{0,hem} \cdot G - a_1 \cdot (T_m - T_a) - a_2 \cdot (T_m - T_a)^2 \quad (4)$$

Bei senkrechter Einstrahlung, mit einem hohen Direktstrahlungsanteil, kann der Einfallswinkelkorrekturfaktor $K_{hem}(\theta)$ vernachlässigt werden. $\eta_{0,hem}$ ist der theoretische hemisphärische Spitzenwirkungsgrad des Kollektors. Die Wärmedurchgangskoeffizienten werden durch $a_1 \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$ und $a_2 \left[\frac{W}{m^2 \cdot K^2} \right]$ repräsentiert. Für den Wirkungsgrad kann folgender Term angegeben werden [8]:

$$\eta = \frac{\dot{Q}}{G \cdot A_G} = \eta_{0,hem} - a_1 \cdot \frac{(T_m - T_a)}{G} - a_2 \cdot \frac{(T_m - T_a)^2}{G} \quad (5)$$

Grundlegende Anforderungen an die Messung [7]

- Kollektorfläche (A_G) > 1 m²
- Mittlere Bestrahlungsstärke (G) > 700 W/m² ± 1 %
- Senkrechter Strahleneinfall ± 2 °
- Keine Beeinflussung durch reflektiertes Licht und Infrarotstrahlung
- Geschwindigkeit Umgebungsluft (u) parallel zur Kollektorebene 3 m/s ± 1 m/s
- Vorbehandlung des Kollektors durch Freilandbewitterung
- PV-Module im MPP-Betrieb
- Turbulente Rohrströmung $R_e > 2300$
- Erfassung von mind. vier Datenpunkten
- zulässige Abweichungen und Messunsicherheiten siehe Tabelle 1 und Tabelle 2)

Tabelle 1: Größte zulässige Messunsicherheiten (DIN EN ISO 9806:2018-04) [7]

Parameter	Messwert	Standardunsicherheit
\dot{V}	Volumenstrom	± 1 %
θ_{th}	Temperatur des Luftstroms an der Messeinrichtung zur Bestimmung des Volumenstroms	± 1 K
p_{abs}	Absolutdruck der Umgebungsluft	± 50 Pa
\dot{m}	Massenstrom	± 2 %

Tabelle 2: Zulässige Abweichungen der gemessenen Parameter während einer Messperiode (DIN EN ISO 9806:2018-04) [7]

Parameter	Zulässige Abweichung vom Mittelwert	
	Flüssigkeitskollektor	Luftkollektor
Hemisphärische solare Bestrahlungsstärke	± 50 W/m ²	
Thermische Bestrahlungsstärke (ausschließlich WISC)	± 20 W/m ²	
Umgebungslufttemperatur	± 1,5 K	
Wärmeträgermassenstrom	± 1 %	± 2 %
Wärmeträgertemperatur am Kollektoreintritt	± 0,1 K	± 1,5 K
Wärmeträgertemperatur am Kollektorausritt	± 0,4 K	± 1,5 K
Luftgeschwindigkeit in der Umgebung	± 1,0 m/s Abweichung vom eingestellten Wert	

Berechnung der Wärmekapazität [7]

Die effektive Wärmekapazität des Kollektors C wird als Summe der Gesamtwärmekapazitäten $m_i c_i$ aller Kollektorbestandteile (Glas, Absorber, enthaltene Flüssigkeit und Wärmedämmung) berechnet, die durch einen allgemeinen Faktor p_i gewichtet werden:

$$C = \sum_i p_i \cdot m_i \cdot c_i \tag{6}$$

Der Gewichtungsfaktor p_i (zwischen 0 und 1) berücksichtigt die Tatsache, dass bestimmte Bauteile nur teilweise an der thermischen Trägheit des Kollektors beteiligt sind. Die Werte von p_i sind in Tabelle 3 angegeben. Sämtliche Teile des Kollektors, die in direkten Kontakt mit dem Wärmeträgerfluid (Flüssigkeit oder Luft) kommen, müssen mit dem Faktor $p_i = 1$ gewichtet werden. [7]

Tabelle 3: Werte für die Gewichtungsfaktoren [7]

Bauteile	p_i
Absorber	1
Wärmedämmung	0,5
Wärmeträgerfluid	1
Äußere Abdeckung	$0,01 \cdot a_1$
Zweite Abdeckung	$0,2 \cdot a_1$

Auswertung

Abbildung 6 zeigt beispielhaft einen Messzyklus einer Freilandmessung mit der Einstrahlung in Kollektorebene in W/m^2 (G_{hem} - hellblaue Linie) und der Umgebungstemperatur in $^{\circ}C$ (orangene Linie). Die dunkelblaue Kurve stellt die mittlere Kollektortemperatur in $^{\circ}C$ dar. Es wurden jeweils Messungen bei einer mittleren Kollektortemperatur T_m von 10, 20, 40 und 50 $^{\circ}C$ durchgeführt. Nur die stationären Bereiche können ausgewertet (gepunktet) werden. Der Abfall der Globalstrahlung bei ca. 12.000 bis 16.500 Sekunden ist auf einen Fehler im Tracker zurückzuführen. Abbildung 7 zeigt die Kollektorkennlinie. Der Wärmedurchgangskoeffizient a_1 lässt sich aus der Steigung direkt ablesen. In Abbildung 8 ist die berechnete thermische Wirkungsgradkennlinie bei drei verschiedenen Einstrahlungsbedingungen dargestellt. Die Photovoltaik arbeitet dabei im MPP-Betrieb.

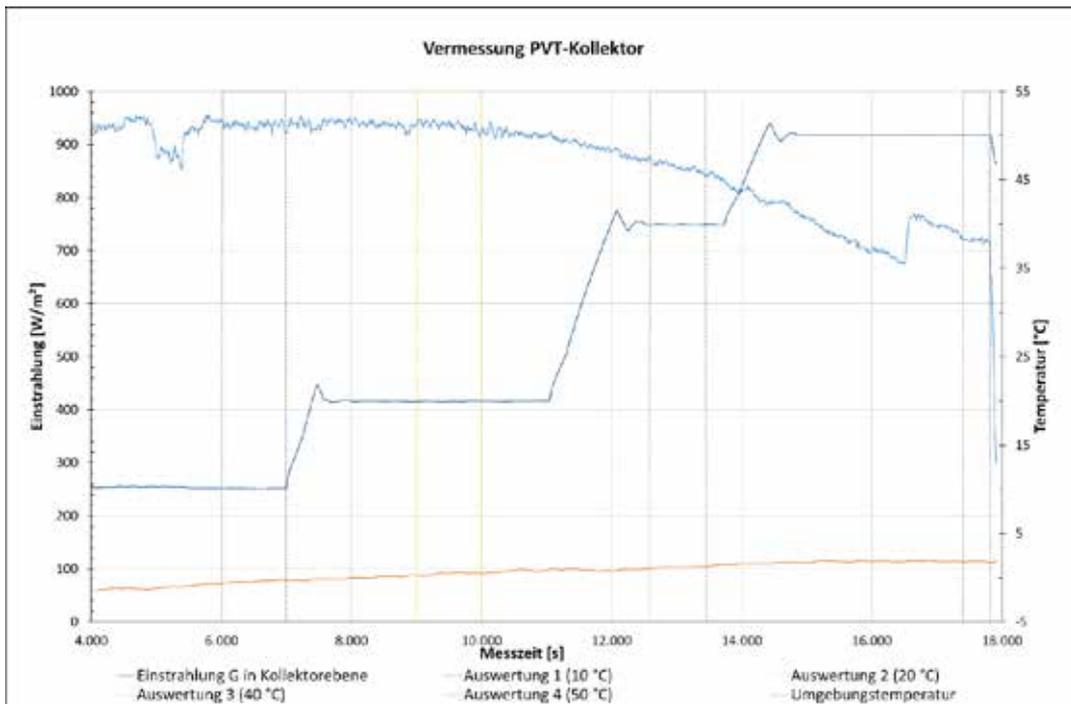


Abbildung 6: Messzyklus - Einstrahlung, Umgebungstemperatur, mittlere Kollektortemperatur

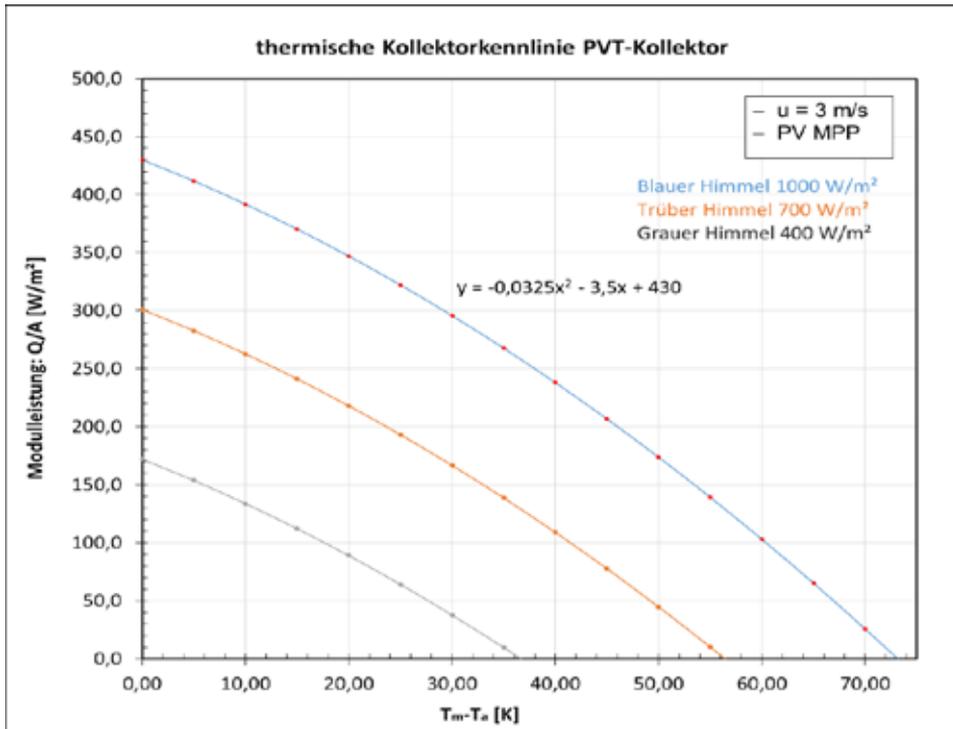


Abbildung 7: Kennlinie PVT-Kollektor

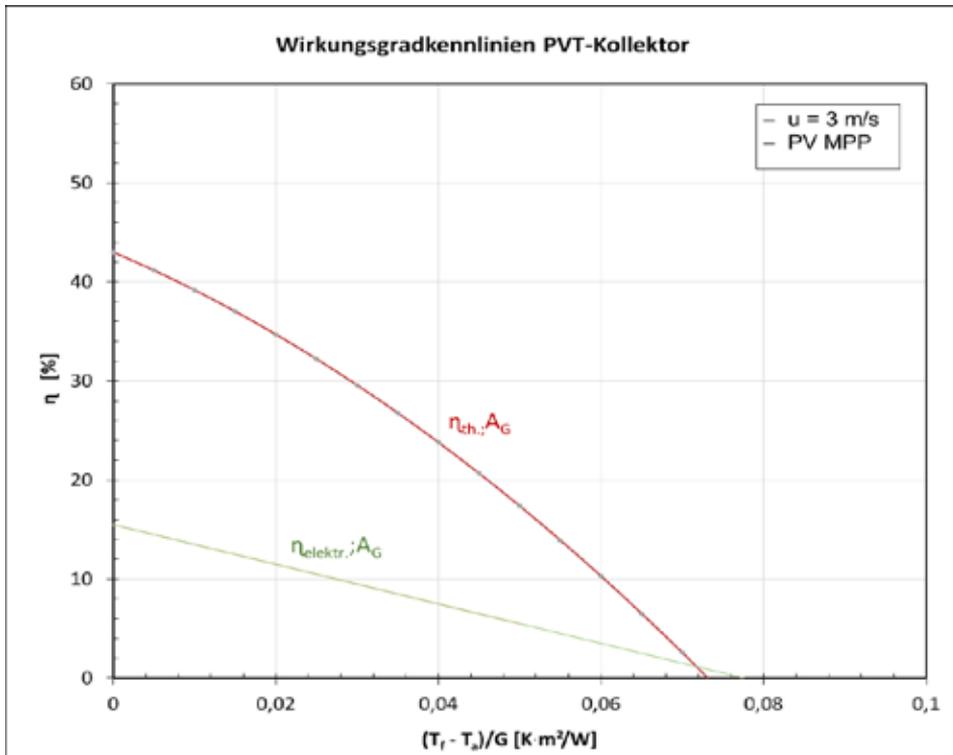


Abbildung 8: Thermische und elektrische Wirkungsgradkennlinie PVT-Kollektor

Ergebnisse

Die Koeffizienten $\eta_{0,hem}$, \dot{Q}_{peak} , a_1/a_2 sowie die Stillstandstemperatur wurden nach der graphischen Methode ermittelt. Für die Berechnung der Stillstandstemperatur ist die Umgebungstemperatur zu berücksichtigen. Außerdem ist der Absorber ca. 20 K heißer als das Fluid. Aus Gleichung 7 wird der Absorptionskoeffizient α errechnet.

$$\eta_{0,hem} = \tau \cdot \alpha \tag{7}$$

Die Wärmekapazität wurde nach Formel (6) berechnet. Der Transmissionskoeffizient für die Frontglas-Kombination beträgt 0,82.

Tabelle 4: Technische Daten PVT-Kollektor

Parameter (* im MPP-Betrieb)	Wert	Einheit
Thermischer Spitzenwirkungsgrad η_0^*	0,43	-
Transmissionskoeffizient τ	0,82	-
Absorptionskoeffizient α^*	0,52	-
Wärmedurchgangskoeffizient a_1^*	3,50	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$
Wärmedurchgangskoeffizient a_2^*	0,033	$\frac{W}{m^2 \cdot K^2}$
Peakleistung Kollektor \dot{Q}_{peak} ($G=1000 \text{ W/m}^2$)*	430	W
Stillstandstemperatur ($G=1000 \text{ W/m}^2$ und $T_a=30 \text{ }^\circ\text{C}$)*	120	$^\circ\text{C}$
Effektive Wärmekapazität C	20 ± 3	$\frac{KJ}{K}$

4. Fazit

Fertigung / Zusammenbau

Fertigungstechnisch ist der Kollektor als unproblematisch einzustufen. Die verwendeten PV-Glas-Glas-Module sind erprobt und zuverlässig und schützen die PV-Zellen, selbst wenn die Frontabdeckung, z.B. durch einen Hagelschlag, zerstört wurde. Die Endmontage kann in einer gewöhnlichen Isolierglasfertigungslinie erfolgen. Optimierungspotential ist beim Wärmetauscher vorhanden. Im Serienmodell könnte durch einen vollflächig durchströmten Wärmetauscher die Montage vereinfacht werden. So können Kosten eingespart werden und es sind weitere Leistungssteigerungen im thermischen und elektrischen Bereich zu erwarten.

Transport / Montage

Das hohe Gewicht von ca. 69 kg pro Modul erschwert das Handling der Module bei der Dach- oder Fassadenmontage. Mechanische Hilfsmittel, wie z.B. ein kleiner Kran, sind zu empfehlen. Außerdem sollte bei der Montage auf die Glasrückseite geachtet werden. Die hydraulischen und elektrischen Anschlüsse sind noch weiter zu optimieren. Eine PV-Anschlussbox und seitlich angebrachte Verschraubungen oder Steckverbinder sind denkbar.

Funktion und Aufbau

Der Kollektor ist nicht nur für den Wärmepumpenbetrieb, sondern auch für die direkte Heizungsunterstützung und/oder für eine Brauchwassergewinnung gedacht. Der thermische Wirkungsgrad im MPP-Betrieb, verglichen mit anderen auf dem Markt erhältlichen Modellen, ist überdurchschnittlich. Üblicherweise fallen bei anderen PVT-Kollektoren die Wirkungsgradkurven schneller ab. Im direkten Wärmepumpen- oder im Eisspeicherbetrieb kann er jedoch seine Stärken ausspielen, dort kommt ihm auch sein träges Verhalten zu Gute. Wird die Sonne für ein paar Minuten

durch Wolken verdeckt, kann der Kollektor immer noch Energie abgeben und so den Weiterbetrieb einer Wärmepumpe für eine gewisse Zeit sicherstellen. Kombiniert mit Eisspeichern oder Erdwärmesonden liefern die Kollektoren selbst bei stark bewölktem Himmel (Einstrahlung $< 250 \text{ W/m}^2$) noch Energie.

Durch seinen mehrschichtig aufgebauten Absorber, der aus zwei 2 mm Gläsern und den PV-Zellen besteht, die direkt mit dem Absorberblech mittels Silikons verklebt sind, lässt sich der große Wärmedurchgangskoeffizient a_1 und die hohe Wärmekapazität erklären. Normalerweise liegt der Absorptionskoeffizient α bei ca. 0,9 (herkömmlicher Flachkollektor). Die verwendeten Solargläser stellen für Wellenlängen von 300 bis 2500 nm keine große Barriere dar. Die PV-Zellen und das verwendete Silikon, das sich zwischen den beiden Innenscheiben und zwischen dem Absorberblech und der zweiten Scheibe befindet, absorbieren bereits einen Teil der eingestrahlten Energie. Dabei entsteht Wärme, die durch Wärmeleitung zunächst bis zum Absorberblech gelangen muss. Auch die thermische Ankopplung an das Wärmeträgerfluid ist noch zu optimieren. Die Photovoltaikzellen heizen sich dadurch weniger auf und liefern mehr elektrische Energie. Da die Stillstandstemperatur nur bei ca. $120 \text{ }^\circ\text{C}$ liegt, ist mit keiner Schädigung des Silikons oder des Wärmeträgerfluides zu rechnen. Aufgrund der Wärmeausdehnung des Absorberblechs, kann es zu kleineren Ablösungen kommen, die bei ausreichender Silikonüberdeckung (mind. 2 mm) zu vermeiden wären, was allerdings zu Lasten der Wärmeleitung gehen würde.

Es könnte gezeigt werden, dass das entwickelte Konzept durchaus Zukunft hat. Wird das noch vorhandene Optimierungspotential ausgenutzt, kann ein ernst zu nehmendes Produkt mit Marktauglichkeit entstehen.

5. Danksagung

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben „Entwicklung eines PVT-Isolier-/Nurglas-Flachkollektor“ wurde in Kooperation mit der Firma IPS-solar GmbH, der Firma SUNOVATION Produktion GmbH und mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM) unter dem Förderkennzeichen ZF4084707GM7 aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Die Autoren danken für die Unterstützung. Besonderen Dank gilt außerdem auch dem Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e. V. (ZAE Bayern) und der Firma Glas-Dreisbusch GmbH & Co. KG. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt ausschließlich bei den Autoren.

6. Literaturverzeichnis

- [1] S. Bundesamt, „Heizenergie - Verbrauch in Deutschland nach Gebäudetyp 2014 im Jahresvergleich 2006 und 2014,“ 20 September 2018. [Online]. Available: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/245455/umfrage/heizenergieverbrauch-in-mehrfamilienhaeusern-in-deutschland/>. [Zugriff am 19 Dezember 2019].
- [2] B. (Strompreisinitiative), „Jährlicher Stromverbrauch eines 4-Personen-Haushalts in Deutschland nach Gebäudetyp im Jahr 2017,“ April 2017. [Online]. Available: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/558288/umfrage/stromverbrauch-einen-4-personen-haushalts-in-deutschland/>. [Zugriff am 19 Dezember 2019].
- [3] UBA, (Umweltbundesamt), „Erneuerbare Energien in Zahlen,“ 2019. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen>. [Zugriff am 28 August 2019].
- [4] BMU, (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz un, „Der Klimaschutzplan 2050 – Die deutsche Klimaschutzlangfriststrategie,“ 27 August 2019. [Online]. Available: <https://www.bmu.de/themen/klima-energie/klimaschutz/nationale-klimapolitik/klimaschutzplan-2050/>. [Zugriff am 19 Dezember 2019].
- [5] (F. I. 2. u. B. UBA, „Energieeffizienz in Zahlen,“ BMWi, Berlin, 2018.
- [6] IWU, „Anteil der CO²-Emissionen durch Gebäude im Jahr 2010,“ *Capital* 11/2010, p. 27, Oktober 2010.
- [7] D. D. I. f. N. e. V, *DIN EN ISO 9806*, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2018.
- [8] V. Wesselak, *Handbuch Regenerative Energietechnik*, Berlin: Springer Vieweg, 2017.

7. Symbole

A_G	Brutto-Kollektorfläche nach ISO 9488	m^2
a_1	Wärmedurchgangskoeffizient	$J/(m^2 \cdot K)$
a_2	Temperaturabhängiger Wärmedurchgangskoeffizient	$J/(m^3 \cdot K^2)$
a_3	Von der Windgeschwindigkeit abhängiger Wärmedurchgangskoeffizient	$J/(m^3 \cdot K)$
a	Von der Himmelstemperatur abhängiger Wärmedurchgangskoeffizient	-
a_6	Von der Windgeschwindigkeit abhängiger Konversionsfaktor	s/m
a	Von der Windgeschwindigkeit abhängiger IR-Strahlungsaustausch	$W/(m^2 \cdot K^4)$
a_8	Strahlungsverluste	$W/(m^2 \cdot K^4)$
b_u	Kollektorwirkungsgradfaktor (windabhängig)	s/m
C	Effektive Wärmekapazität des Kollektors	J/K
c_i	Spezifische Wärmekapazität	$J/(kg \cdot K)$
$\eta_{0, hem}$	Spitzenwirkungsgrad des Kollektors ($\eta_{0, hem}$ bei $T_m - T_a = 0 K$), basierend auf der hemisphärischen solaren Bestrahlungsstärke G_{hem}	-
G	Bestrahlungsstärke Kollektor	W/m^2
$T_{F, in}$	Temperatur des Fluids bei Kollektor Eintritt	$^{\circ}C$
$T_{F, out}$	Temperatur des Fluids bei Kollektor Austritt	$^{\circ}C$
T_m	Mittlere Temperatur des Wärmeträgerfluides	K
ΔT	Temperaturdifferenz Kollektor Ein- Austritt	K
T_a	Umgebungslufttemperatur	K
\acute{u}	Reduzierte Geschwindigkeit der Umgebungsluft $u' = u - 3 m/s$	m/s
\dot{Q}	Nutzleistung des Kollektors	W
\dot{m}	Massenstrom des Wärmeträgerfluides	kg/s
ΔT	Temperaturunterschied zwischen Fluidaustritt und -eintritt ($T_{F, in} - T_{F, out}$)	K
c_f	Spezifische Wärmekapazität des Wärmeträgerfluides	$J/(kg \cdot K)$
$\tau \cdot \alpha$	Effektives Transmissionsgrad-Absorptionsgrad-Produkt	-
E_L	Langwellige Bestrahlungsstärke ($\lambda > 3 \mu m$)	W/m^2
\dot{V}	Volumenstrom	m^3/s
ϑ_{in}	Temperatur des Luftstroms an der Messeinrichtung zur Bestimmung des Volumenstroms	K
p_{abs}	Absolutdruck der Umgebung	Pa
ϵ	Emissionsgrad	-
m	Masse	kg
$K_{hem}(\theta)$	Einfallswinkelkorrekturfaktor	-
p	Bauteile	-
η	Wirkungsgrad	-
α	Absorptionskoeffizient	-
σ	Stefan-Boltzmann-Konstante	$W/(m^2 \cdot T^4)$
u	Windgeschwindigkeit	m/s
τ	Transmissionsgrad	-