

Bestimmung der thermischen Leistungsfähigkeit des Parabolrinnenkollektors PTC 1800

N. Janotte¹, S. Meiser¹, D. Krüger¹, R. Pitz-Paal¹, S. Fischer², H. Müller-Steinhagen^{1,2}, M. Walder³

¹Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Linder Höhe, D-51147 Köln

Tel.: +49 2203 601-2431, Fax: +49 2203 601-4141

Nicole.Janotte@dlr.de

<http://www.dlr.de/tt>

²Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik der Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 6, D-70550 Stuttgart

³Alanod Aluminium-Veredlung GmbH & Co. KG, Egerstr. 12, D-58256 Ennepetal

Einleitung

Parabolrinnenkollektoren werden in verschiedenen Projekten zur Erzeugung von Wärme im Temperaturbereich von 100 bis 180°C eingesetzt. Als Wärmeübertragungsmedium wird meist Druckwasser verwendet. Zur Ergänzung der Wärmebereitstellung für die Veredlung von Aluminiumbändern bei der Firma Alanod in Ennepetal wird ein Parabolrinnenkollektorfeld mit einer Gesamtaperturfläche von 108 m² installiert. Der im Solarfeld direkt erzeugte Sattdampf wird mit 143°C und 3,9 bar als Ergänzung zum konventionell erzeugten Dampf in die Energieversorgung der Produktion eingespeist.

Im Vorfeld wurde der zum Einsatz kommende Kollektortyp PTC1800 der Firma Solitem im DLR in Anlehnung an die Europäische Norm EN 12975 vermessen und seine Wirkungsgradkurve sowie der Einfallswinkelkorrekturfaktor ermittelt. Mit Eintrittstemperaturen zwischen 40°C und 155°C decken die Tests auch den für die Demonstrationsanlage vorgesehenen Betriebstemperaturbereich zwischen 100°C und 143°C ab.

Testaufbau und Durchführung

Für den Kollektortest wurden 4 Module mit jeweils ca. 9 m² Aperturfläche in Reihe geschaltet (Abbildung 1). Über einen Anschluss an die Heiz-Kühleinheit des Prüfstandes Sopran („Solare Prozesswärmeanwendungen“) wurde Druckwasser zwischen 40°C und 180°C am Eintritt des Kollektorstranges bei einem Massenstrom von ca. 1800 kg/h bereitgestellt. Die Kollektoren sind in Ost-West Achse ausgerichtet und einachsig nachgeführt, so dass die Einstrahlung zum solaren Mittag senkrecht auf

die Aperturfläche trifft und Messungen zur Ermittlung der Wirkungsgradfunktion möglich sind. Die Ermittlung der Einfallswinkelkorrekturfunktion erfolgt daher gleitend und beinhaltet auch den Endverlust. Er entsteht durch den schrägen Einfall von Strahlen, die am Ende des Stranges in die Fokallinie reflektiert werden, wo sich kein Receiver mehr befindet.

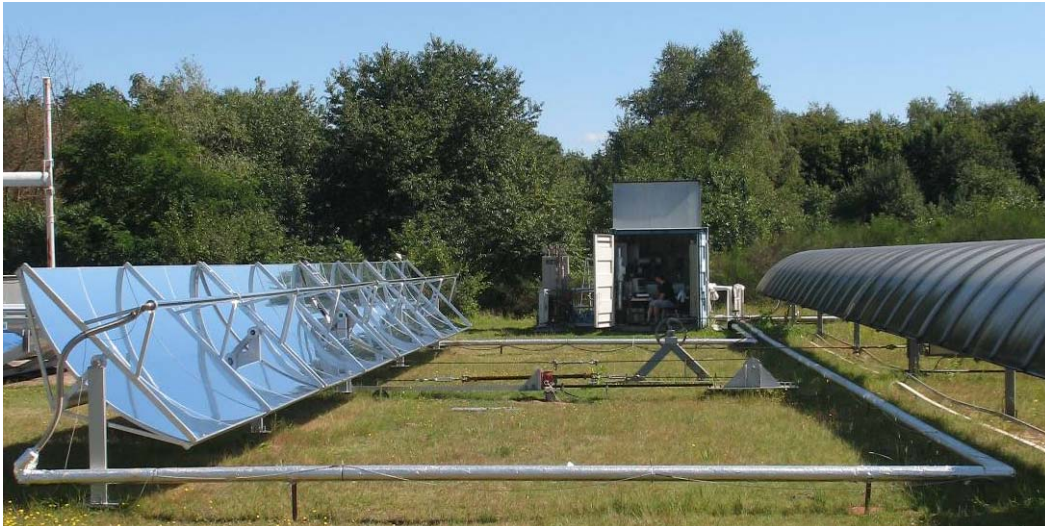


Abbildung 1: PTC1800 Kollektor mit Heiz-Kühleinheit im Hintergrund

Alle Module bestehen aus einem Aluminiumunterbau mit parabolisch geformten Spannten und einem für Außenanwendungen entwickelten mit Aluminium beschichtetem Aluminium-Reflektorblech (Miro Sun®). Das selektiv beschichtete Absorberrohr befindet sich in einem nicht evakuierten Glashüllrohr ohne Anti-Reflex-Beschichtung. Die Brutto-Aperturfläche beträgt $36,89 \text{ m}^2$, nach Abzug des Rahmens, der Verstrebungen und der Receiverhalterungen ergibt sich die Nettofläche zu $35,26 \text{ m}^2$. Für die Übergänge vom bewegten Receiver zur festen Feldverrohrung werden flexible Rohre verwendet. Das Tracking der Kollektorreihe erfolgt mittels einer motorbetriebene Seilnachführung, die von einem von Solitem entwickelten Solar-Auto-Controller basierend auf einem Sonnenstandsprogramm angesteuert wird und die Kollektoren der Sonne nachführt. Während der Vermessung der Kollektoren wurden diese allerdings manuell über den Kontrollschrank nachgeführt.

Die Temperaturmessung erfolgt mit PT-100 am Ein- (T_{ein}) und Austritt (T_{aus}) des Kollektorstranges zwischen Absorber und flexiblem Rohr, die Massenstrommessung (\dot{m}) mit einem Coriolismesser. Die Direktstrahlung (DNI) wird mit einem zweiachsig nachgeführten Pyrheliometer erfasst. Zusätzlich wird die Globalstrahlung in der Kollektorebene gemessen.

Die Versuchskampagne (Details s. Tabelle 1) fand in den Monaten September bis November 2008 statt. Bei wolkenfreiem Himmel konnte die Eintrittstemperatur während der 15-minütigen Messperioden um den solaren Mittag (sowie in den vorausge-

henden 15 Minuten zur Vorbereitung) auch bei hohen Temperaturen mit Abweichungen kleiner als $\pm 0,25$ K konstant gehalten werden. Der Massenstrom schwankte in einem Bereich von $\pm 3\%$ um den Mittelwert.

Tabelle 1: Stationär ausgewertete Kollektorwirkungsgradtests am PTC1800

	T_{ein} [°C]	T_{aus} [°C]	\dot{m} [kg/h]	G_b [W/m ²]	T_m^* [Km ² /W]	χ [-]
09.09.	39,92	50,66	1805	894	0,024	1
10.10.	129,21	134,91	1794	557	0,207	0,994
11.10.	153,68	160,66	1773	684	0,203	0,994
23.10.	99,09	107,63	1860	792	0,117	0,984
04.11.	35,12	43,79	1868	742	0,038	1

Auswertemethode

Die während der Messung aufgenommenen Daten wurden in Anlehnung an das stationäre Verfahren (EN 12975¹, Abschnitt 6.1) ausgewertet. Der um die Spiegelsauberkeit korrigierte thermische Wirkungsgrad in den Testpunkten bestimmt sich zu

$$\eta_{th}^* = \frac{\dot{m} \cdot \bar{c}_p \cdot (T_{aus} - T_{ein})}{\chi \cdot A_{brutto} \cdot G_b}$$

mit der sich aus der mittleren Fluidtemperatur ergebenden spezifischen Wärmekapazität \bar{c}_p von Wasser, der Brutto-Kollektorapertur A_{brutto} und dem senkrecht auf die Apertur eintreffenden Teil der Direktstrahlung G_b . Die Spiegelsauberkeit

$$\chi = \frac{\rho_{test}}{\rho_{sauber}}$$

berechnet sich aus dem Reflektionsgrad während des Tests (ρ_{test}) und dem Reflektionsgrad der gesäuberten Spiegel (ρ_{sauber}).

Die kombinierte Standardmessunsicherheit an den Punkten wurde nach der GUM-Methode² ermittelt. Dabei wird zwischen zwei Arten von Unsicherheiten unterschieden: Typ A Messunsicherheiten verursacht durch die Schwankungen in den Messgrößen und Typ B Unsicherheiten, die auf andere Quellen, in diesem Fall ausschließlich die Unsicherheit der Messgeräte und -kette, zurückzuführen sind. In Tabelle 2 sind die Ergebnisse der Testauswertung sowie ihre Unsicherheiten dargestellt (s. auch Abbildung 2). Zur Verdeutlichung der unterschiedlichen Einflüsse wurde an dieser Stelle zwischen Typ A und B unterschieden. Es fällt auf, dass der schwankungsbedingte Anteil an der Messunsicherheit untypisch groß ist, dies ist hauptsächlich auf

schwankende Massenströme und Einstrahlungen zurückzuführen. Letztere überstiegen die Grenze von $\pm 50 \text{ W/m}^2$ jedoch lediglich am 10.10.

Tabelle 2: Ergebnisse der Kollektorwirkungsgradtests mit Standardmessunsicherheit ($k=1, 1\sigma$)

	T_m^* [Km ² /W]	$u(T_m^*)$ [Km ² /W]	η_{th}^* [-]	$u(\eta_{th}^*)$ [±]	$u(\eta_{th}^*)$ Typ A [±]	$u(\eta_{th}^*)$ Typ B [±]
09.09.	0,024	0,0009	0,682	0,019	0,014	0,013
10.10.	0,207	0,0162	0,592	0,069	0,068	0,012
11.10.	0,203	0,0038	0,593	0,025	0,022	0,012
23.10.	0,117	0,0066	0,647	0,022	0,018	0,013
04.11.	0,038	0,0023	0,680	0,022	0,018	0,013

Die Unsicherheit in der Bestimmung der reduzierten Temperaturdifferenz T_m^* wird im Wesentlichen durch Einstrahlungsschwankungen sowie die Unsicherheit der Einstrahlungsmessung bedingt. Im Anschluss an die Datenselektion und Auswertung wurden die Koeffizienten der Wirkungsgradgleichung mit einem Verfahren der kleinsten Fehlerquadrate bestimmt. Dazu wurden die Messpunkte jeweils mit ihrer reziproken Messunsicherheit gewichtet.

Ergebnis

Für den stationären thermischen Wirkungsgrad ausgedrückt als

$$\eta_{th} = \eta_0 - a_1 \cdot T_m^* - a_2 \cdot G_b \cdot (T_m^*)^2 \quad \text{mit} \quad T_m^* = \frac{0,5 \cdot (T_{ein} + T_{aus}) - T_a}{G_b}$$

und der Umgebungstemperatur T_a ergeben sich aus den Messpunkten und ihren Messunsicherheiten die in Tabelle 3 angegebenen Parameter.

Tabelle 3: Ermittelte Parameter der Gleichung für den thermischen Wirkungsgrad

	η_0 [-]	a_1 [W/m ² K]	a_2 [W/m ² K ²]
Wert	0,6878	0,1601	0,0022
Parameterunsicherheit $u(x)$ für 1σ	0,0301	0,0871	0,0056

Die hohen Werte der Unsicherheit für die Parameter a_1 und a_2 spiegeln den Umstand, dass im Bereich großer reduzierter Temperaturdifferenzen nur wenige Messdaten vorliegen bzw. diese Punkte mit relativ hohen Unsicherheiten behaftet sind. Zur besseren Bestimmung der Parameter wären zusätzliche Leistungsmessungen bei höheren Temperaturen wünschenswert. Diese wurden zwar durchgeführt, erziel-

ten aber keine auswertbaren Daten, die die Anforderungen an quasi-stationäre Auswertung erfüllen.

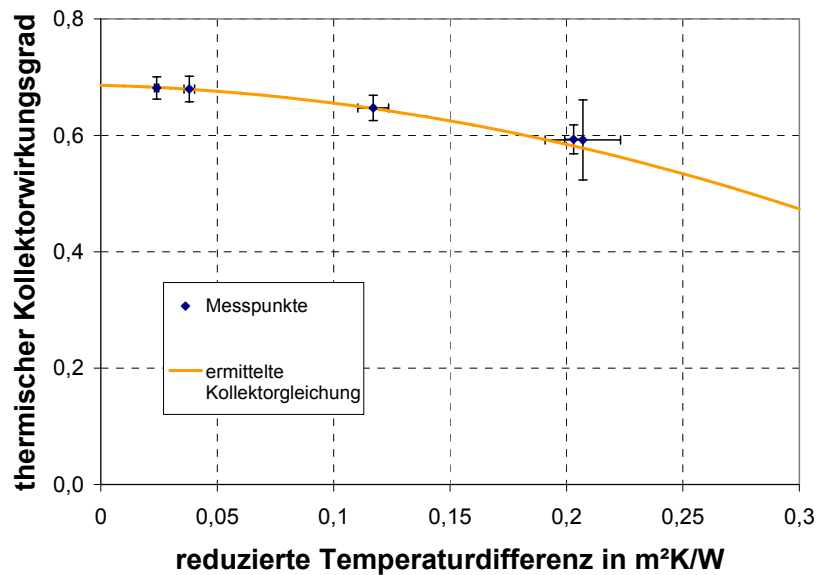


Abbildung 2: Messpunkte und Kollektorwirkungsgradlinie

Der Einfallswinkelkorrekturfaktor $K_b(\theta)$ kann ebenfalls als geschlossene Funktion oder alternativ mit Hilfe zu interpolierender Stützstellen dargestellt werden. Um dem speziellen Verhalten des PTC1800 mit seinen frontseitigen Verstrebungen gerecht zu werden, wurde ein Polynom dritter Ordnung gewählt:

$$K_b(\theta) = b_0 + b_1 \cdot \theta + b_2 \cdot \theta^2 + b_3 \cdot \theta^3.$$

Tabelle 4: Ergebnisse der Kennwertbestimmung des Einfallswinkelkorrekturfaktors

	b_0 [-]	b_1 [° ⁻¹]	b_2 [° ⁻²]	b_3 [° ⁻³]
Wert	1	$-5,782 \cdot 10^{-3}$	$1,485 \cdot 10^{-4}$	$-2,955 \cdot 10^{-6}$
Standardabweichung	0,0012	$1,88 \cdot 10^{-4}$	$8,05 \cdot 10^{-6}$	$9,76 \cdot 10^{-8}$

Abbildung 3 vergleicht den Verlauf der aufgenommenen Daten mit den Ergebnissen der Einfallswinkelkorrekturfaktor-Gleichung. Die alternative Darstellung über Stützstellen (siehe Tabelle 5) ist universell anwendbar und erleichtert eine flexible Implementierung in Simulationssoftware. Zugleich vermeidet sie durch mögliche Unzulänglichkeiten der Regressionsfunktion entstehende weitere Unsicherheiten insbesondere bei Winkeln außerhalb des bei der Messung vorliegenden Winkelbereichs. Je nach Charakteristik und erwünschter Genauigkeit kann die Anzahl der Stützstellen angepasst werden.

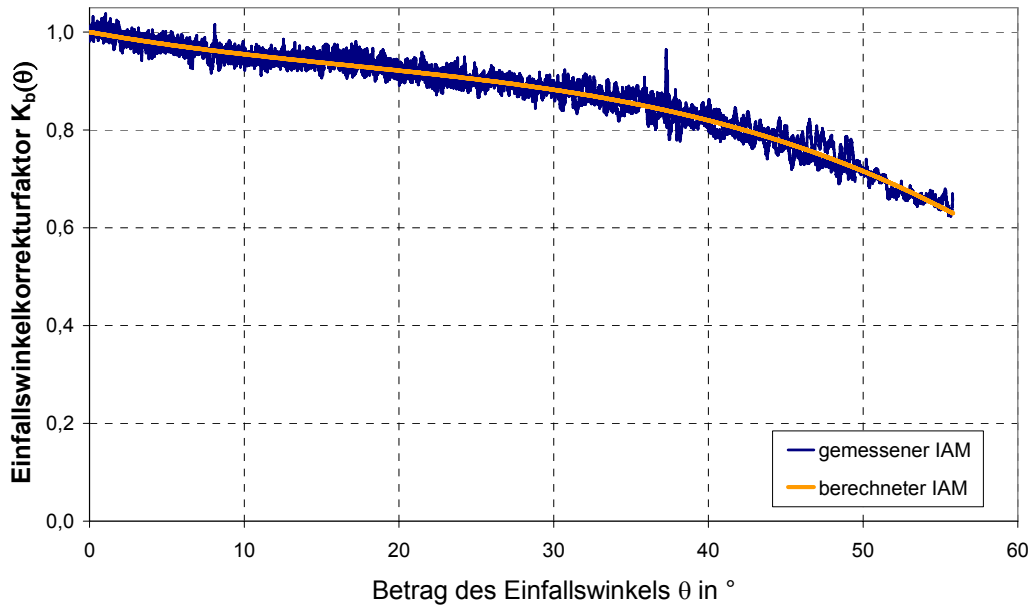


Abbildung 3: Verlauf des Einfallswinkelkorrekturfaktors $K_b(\theta)$ ($T_{\text{ein}}=40^\circ\text{C}$)

Tabelle 5: Ergebnisse der Einfallswinkelkorrekturfaktor-Auswertung an Stützstellen

	$K_b(\theta=0^\circ)$	$K_b(\theta=20^\circ)$	$K_b(\theta=40^\circ)$	$K_b(\theta=60^\circ)$	$K_b(\theta=90^\circ)$
	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
Wert	1	0,924	0,830	0,586	0
Standardabweichung	-	0,031	0,031	0,031	-

Zusammenfassung und Ausblick

Der PTC 1800 erreicht im thermischen Test die mit den eingesetzten Materialien und Komponenten zu erwartenden Leistungen. Durch Optimierung der Verstreibungsgeometrie, eine Anti-Reflex-Beschichtung des Glashüllrohres oder leistungsfähigere Spiegel könnte der optische Wirkungsgrad weiter gesteigert werden. Eine Verminderung der thermischen Verluste wäre durch evakuierte Absorberrohre denkbar, diese sind allerdings derzeit auf dem Markt nicht in entsprechenden Dimensionen erhältlich.

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit für die Förderung der zugrunde liegenden Arbeiten im Rahmen des P3-Projektes, das mit den Partnern Aluminium-Veredlung GmbH & Co. KG, Solitem GmbH, ITW an der Universität Stuttgart, Solarinstitut Jülich und Prof. Quaschnig mit Begleitung der ZFS – Rationelle Energietechnik GmbH durchgeführt wird.

Nomenklatur

$A_{\text{netto}}, A_{\text{brutto}}$	m^2	Netto-/Bruttokollektoraperturfläche
a_1	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$	Wärmeverlustkoeffizient
a_2	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K}^2)$	Wärmeverlustkoeffizient
b_1, b_2, b_3	$0^{-1}, 0^{-2}, 0^{-3}$	Koeffizienten der Einfallswinkelkorrekturfaktorfunktion
\bar{c}_p	$\text{W}/(\text{kgK})$	spezifische Wärmekapazität von Wasser bei der mittleren Fluidtemperatur
G_b	W/m^2	Direktstrahlung in der Aperturebene ($G_b = \text{DNI} \cdot \cos \theta$)
T_a	$^\circ\text{C}$	Umgebungstemperatur
T_{aus}	$^\circ\text{C}$	Kollektoraustrittstemperatur
T_{ein}	$^\circ\text{C}$	Kollektoreintrittstemperatur
T^*_m	Km^2/W	reduzierte Temperaturdifferenz
η_0	-	optischer Wirkungsgrad bei senkrechtem Strahlungseinfall
η^*_{th}	-	thermischer Wirkungsgrad ($\chi=1$)
θ	$^\circ$	Einfallswinkel
χ	-	Reflektorsauberkeit
ρ_{test}	-	Reflektionsgrad im Test
ρ_{sauber}	-	Reflektionsgrad des sauberen Reflektors

Literatur

¹ Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN12975-2 Thermische Solaranlagen und ihre Bauteile - Kollektoren - Teil2: Prüfverfahren, 2004.

² International Organisation for Standardisation: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, 2. Auflage, 1995.