

Ein Kollektor, der nicht in die Prüfnorm passt: Leistungsgrenzen eines Vakuumröhrenkollektors mit Wärmerohr

Daniel Eggert, Carsten Lampe, Steffen Jack und Nils Katenbrink

Institut für Solarenergieforschung GmbH Hameln (ISFH)

Am Ohrberg 1, 31860 Emmerthal, Tel.: 05151/999-522, Fax: 05151/999-500

E-Mail: d.eggert@isfh.de, Internet: <http://www.isfh.de>

Einleitung

Kollektoren mit Wärmerohren (engl. heat pipes), in der Regel als Vakuumröhrenkollektoren vertrieben, gehören zu den Standardprodukten im solarthermischen Markt und sind bereits vielfach nach der [EN 12975] geprüft und tragen die Solar Keymark als europäisches Zertifizierungszeichen. Jedoch kann die Leistungsbestimmung bei dieser Bauart von Kollektoren im Zuge der Normprüfung zu unerwarteten Hindernissen führen. Dies ist der Fall, wenn die Leistung des Kollektors in bestimmten Betriebsbereichen nicht von der nach Norm angegebenen treibenden Temperaturdifferenz zwischen Umgebung und dem Wärmeträger, sondern nur von der Fluidtemperatur abhängt.

In dem Beitrag werden zunächst die Ergebnisse einer Normprüfung dargestellt sowie die Problematik der Abbildungsmöglichkeiten dieses speziellen thermischen Kollektorverhaltens mittels der Wirkungsgradkennwerte nach [EN 12975] diskutiert. Des Weiteren werden die experimentellen Ergebnisse der Bestimmung der Leistungsgrenze eines Einzelwärmerohres dieses Kollektors dargestellt und somit das untypische thermische Verhalten des Kollektors begründet.

Kollektorleistungsbestimmung

Am Institut für Solarenergieforschung Hameln (ISFH) ist in der Prüfstelle für solarthermische Komponenten und Systeme ein Vakuumröhrenkollektor mit 30 Wärmerohren in einem Zertifizierungsverfahren nach [EN 12975] auf dessen Leistungsfähigkeit untersucht worden. Dazu wird der Wirkungsgrad η bei mehreren Temperaturdifferenzen ΔT aus mittlerer Fluidtemperatur t_m zu Umgebungstemperatur t_a bestimmt. Der Wirkungsgrad η ist das Verhältnis aus abgeführter Leistung Q_{Nutz} und zugeführter Strahlungsleistung $G \cdot A$. In Abbildung 1 ist die abgeführte Leistung der Kollektorfläche A über der Temperaturdifferenz ΔT dargestellt.

Das Serienprodukt weist mit sinkender Temperaturdifferenz ΔT ein extrem untypisches Leistungsverhalten auf: Abbildung 1 zeigt, dass bei Temperaturdifferenzen unterhalb von 30 K die Kollektorleistung niedriger ist als bei 30 K, wobei gleichzeitig die Streuung der Messpunkte ansteigt. Diese Leistungskurve ist reproduziert worden, und auch ein weiterer Kollektor dieses Typs zeigt ein identisches Verhalten.

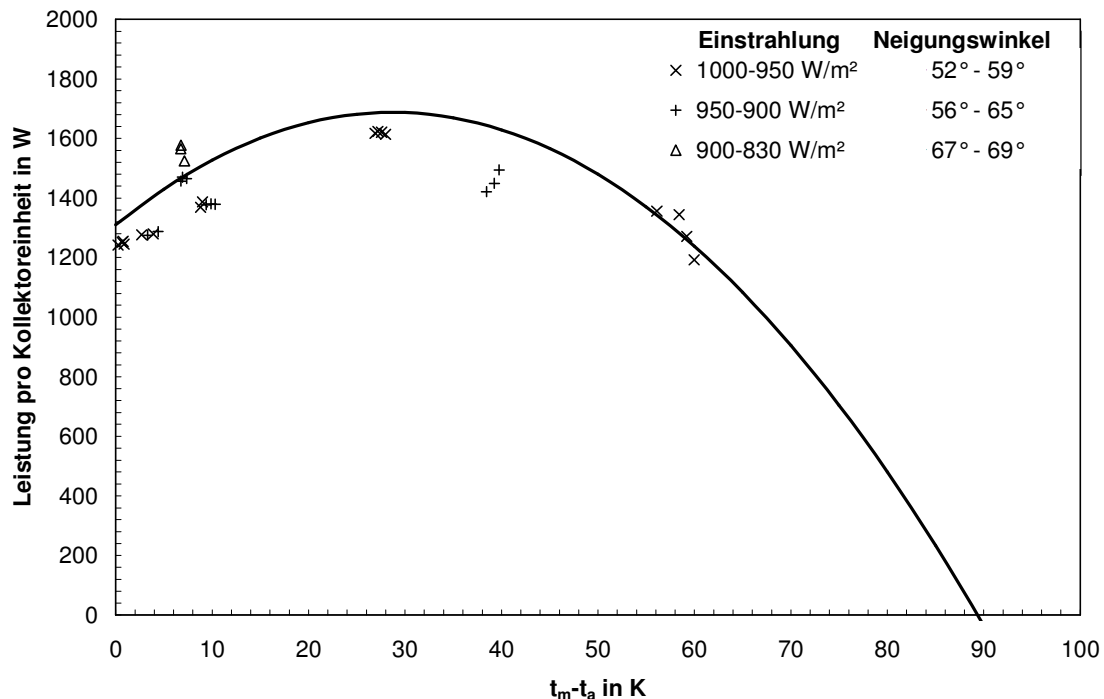


Abbildung 1: Leistungskurve nach [EN 12975] bezogen auf 1000 W/m² mit den zugehörigen Messpunkten in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz ΔT

Die Wärmedämmung kann bei erhöhter Temperatur nicht zunehmen und auch sonst lässt sich dieser Effekt nicht mit den Wärmeverlusten (Koeffizienten a_1 und a_2 in Gleichung 1) eines Kollektors erklären.

$$A \cdot G \cdot \eta = A(G \cdot \eta_0 - a_1 \cdot \Delta T - a_2 \cdot \Delta T^2) \quad (\text{Gl. 1})$$

Bei näherer Betrachtung des Konversionsfaktors η_0 kommt nach Gleichung 2 als Ursache dieses untypischen Leistungsverhaltens nur das Wärmetransportvermögen des Kollektors zwischen Absorber und Fluid (interner Leitwert U_{int}) in Frage.

$$\eta_0 = (\tau\alpha)_{\text{eff}} \cdot F' = (\tau\alpha)_{\text{eff}} \cdot \frac{U_{\text{int}}}{U_{\text{int}} + U_{\text{Verlust}}} \quad (\text{Gl. 2})$$

Der absorberbezogene Wärmeverlustkoeffizient des Kollektors U_{Verlust} ändert sich nur geringfügig mit der Temperatur (er nimmt mit steigender Temperatur zu) und das effektive Transmissions/Absorptions-Produkt $(\tau\alpha)_{\text{eff}}$, das die optischen Verluste eines Kollektors beschreibt, ist über der Temperaturdifferenz konstant. Für einen direkt durchströmten Kollektor ist auch der Gesamtwärmedurchgangskoeffizient oder interne Leitwert U_{int} näherungsweise konstant (ein geringfügiger Anstieg bei höherer Temperatur ist typisch), vorausgesetzt, die Strömungsverhältnisse vom Solarkreislauf sind nahezu gleichbleibend. Für einen Kollektor mit Wärmerohren gilt dies jedoch nicht generell.

Wärmetransporteigenschaften von Wärmerohren

Der interne Leitwert U_{int} eines Kollektors mit Wärmerohren setzt sich aus dem thermischen Leitwert U_{Abs} vom Absorber auf das Wärmerohr, dem Leitwert U_{HP} des Wärmerohres und dem Leitwert U_{Sammler} vom Wärmerohrkondensator auf das

Kollektorfluid im Sammler zusammen. In Abbildung 2 ist die Summe der Kehrwerte der Leitwerte – auch als thermische Widerstände bezeichnet – in einem Knoten-Modell dargestellt. Zusammen ergeben sie den thermischen Gesamtwiderstand im Nutzwärmepfad des Kollektors. Der Leitwert des Absorbers U_{Abs} ist genauso wie der Leitwert des Sammlers U_{Sammler} näherungsweise konstant, vorausgesetzt, der Massenstrom des Solarkreises variiert nicht und es findet kein Laminar-turbulent-Übergang aufgrund höherer Fluidtemperatur statt. Lediglich der Leitwert des Wärmerohres U_{HP} des Kollektors variiert mit dem zugeführten Wärmestrom \dot{Q}_{zu} , der Fluidtemperatur T_{Fluid} bezogen auf den Kollektor (bzw. der Kondensatortemperatur bezogen auf ein Wärmerohr) sowie dem Neigungswinkel.

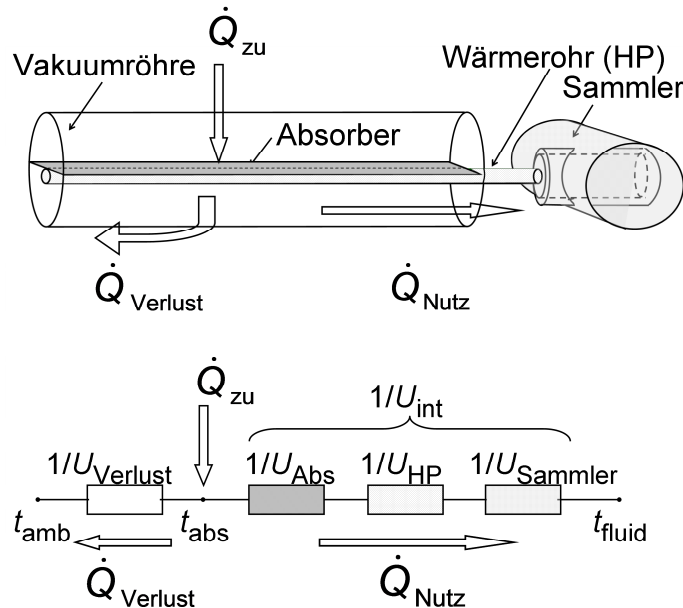


Abbildung 2: Ersatzschaltbild und Knoten-Modell eines Wärmerohr-Kollektors

Wärmerohre in Sonnenkollektoren arbeiten nach dem Schwerkraftprinzip. Das Arbeitsmedium im Wärmerohr wird im unteren Teil, dem Verdampfer, durch Wärmezufuhr verdampft. Über eine verhältnismäßig kurze Transportzone, in der keine Wärmezufuhr stattfindet, wird der Dampf in den ebenso kurzen Kondensator getrieben. Dem Kondensator wird über einen Sekundärkreislauf, dem eigentlichen Solarkreislauf, die Nutzwärme entzogen, und das dadurch kondensierende Arbeitsmedium läuft in dem Wärmerohr als Kondensat an der Rohrwand zurück in den Verdampfer. Über die Temperaturdifferenz zwischen Verdampfer und Kondensator wird dieser Kreisprozess aufrecht erhalten. Jedoch ist die übertragbare thermische Leistung eines Wärmerohres limitiert. Die Leistungsübertragungsgrenzen eines Wärmerohres werden für verschiedene Temperaturbereiche durch unterschiedliche Effekte hervorgerufen. Hier werden nur die für den Betrieb und die Prüfung eines Sonnenkollektors relevanten Leistungsgrenzen vorgestellt (Abbildung 3).

Austrocknungsgrenze

Die Austrocknungsgrenze wird bei hohen Betriebstemperaturen erreicht. Dabei wird soviel Leistung vom Wärmerohr übertragen, dass die gesamte Masse an Arbeitsmedium im Wärmerohr am Kreisprozess beteiligt ist. Dies führt dazu, dass der Flüssigkeitssumpf am Boden des Verdampfers vollständig aufgebraucht ist.

Folglich beginnt das Wärmerohr am Verdampferende auszutrocknen und zu überhitzen. Die Leistungsübertragungsgrenze ist erreicht.

Wenn gleichzeitig das Temperaturniveau im Wärmerohr so weit ansteigt, dass der Verlustwärmestrom des Kollektors genauso hoch ist wie der an das Wärmerohr übertragene Wärmestrom, so wird keine Nutzwärme mehr übertragen und die Stagnationstemperatur ist erreicht. So ist es möglich, dass durch die Austrocknungsgrenze die Stagnationstemperatur eines Kollektors gesenkt wird [Mie10].

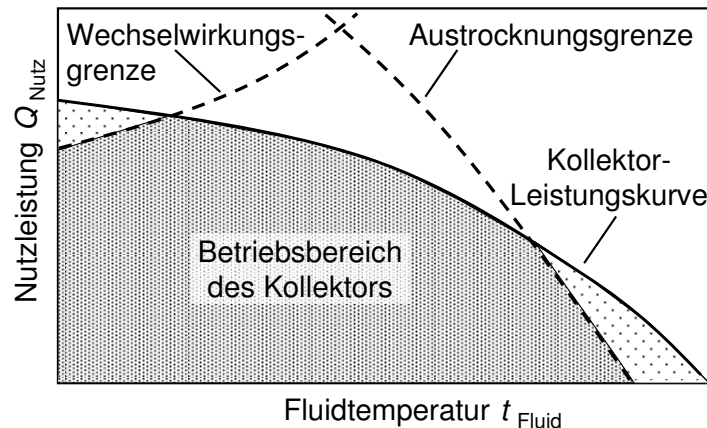


Abbildung 3: Einflussbereich der verschiedenen Leistungsgrenzen von Wärmerohren auf die Kollektorleistungsfähigkeit

Wechselwirkungsgrenze

Die Wechselwirkungsgrenze wird bei niedrigen Betriebstemperaturen erreicht. Für steigende übertragene thermische Leistung steigt die Strömungsgeschwindigkeit des aufsteigenden Dampfes im Wärmerohr ebenfalls. Ab einer bestimmten Geschwindigkeitsdifferenz des Gegenstroms aus Dampf und Kondensat werden die Scherkräfte an der Phasengrenze so groß, dass der Dampf das Kondensat in der Transportzone aufstaut und mit in den Kondensator reißt. Somit findet eine Minderung des zurückfließenden Kondensatstroms statt. Bei weiterer Wärmezufuhr trocknet der Verdampfer unten durch den fehlenden Kondensatfilm aus. Somit kann das Wärmerohr aufgrund der Wechselwirkungsgrenze keine weitere zugeführte Leistung übertragen.

Bestimmung der Wechselwirkungsgrenze eines Wärmerohres

Anhand der Messung des Wärmetransportvermögens eines Einzelwärmerohres vom leistungsauffälligen Kollektor in einem speziell dafür erstellten Wärmerohrprüfstand¹ (siehe [Ja11]) wird untersucht, ob das untypische Leistungsverhalten des Kollektors auf eine zu geringe Leistungsübertragungsgrenze des Wärmerohres zurückzuführen ist. Im Prüfstand wird dem Wärmerohr die Wärme mittels elektrischen Heizers als Wärmequelle auf dem Verdampfer zugeführt. Ein Fluidkreis auf der Kondensator-

¹ Der in diesem Beitrag verwendete Prüfstand und das Prüfverfahren zur Bestimmung der Leistungsgrenze von Wärmerohren wurden im Rahmen des Projekts „Wärmerohre in Sonnenkollektoren – Wärmetechnische Grundlagen, Bewertung und neue Ansätze für die Integration; Kurzbezeichnung HP-Opt“ entwickelt. Das Projekt wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert (Förderkennzeichen 0325962A) und von den Partnern NARVA Lichtquellen GmbH & Co. KG und KBB Kollektorbau GmbH unterstützt.

seite dient als Wärmesenke. Die sich einstellenden Temperaturen werden über dem gesamten Wärmerohr aufgenommen und die übertragene Leistung fluidseitig an der Wärmesenke gemessen. Durch die Vergrößerung der Temperaturdifferenz zwischen Verdampfer und Kondensator erhöht sich die Leistung, welche vom Wärmerohr übertragen wird. Somit kann die übertragene Leistung bis hin zur Leistungsübertragungsgrenze des Wärmerohres erhöht werden. Der Beginn der Wechselwirkung ist an schwankenden Verdampfertemperaturen und durch ein Sinken des thermischen Leitwertes des Wärmerohres U_{HP} zu erkennen. Jedoch steigt die übertragene Leistung weiterhin bei einer Erhöhung der Temperaturdifferenz zwischen Verdampfer und Kondensator. Die Leistungsgrenze ist erreicht, wenn keine zusätzliche Leistung mehr übertragen werden kann. Der Leitwert U_{HP} sinkt dadurch auf ein sehr niedriges Niveau, da der Verdampfer beginnt, von unten beginnend auszutrocknen. Dabei sind die unteren Verdampfertemperaturen aufgrund des fehlenden Kondensatfilms und damit der fehlenden Wärmeabfuhr konstant hoch. Die übrigen Verdampfertemperaturen schwanken sehr stark, da die Wechselwirkung, also das Aufstauen und Mitreißen des Kondensates durch den Dampf, eine über der Zeit variierende Intensität aufweist.

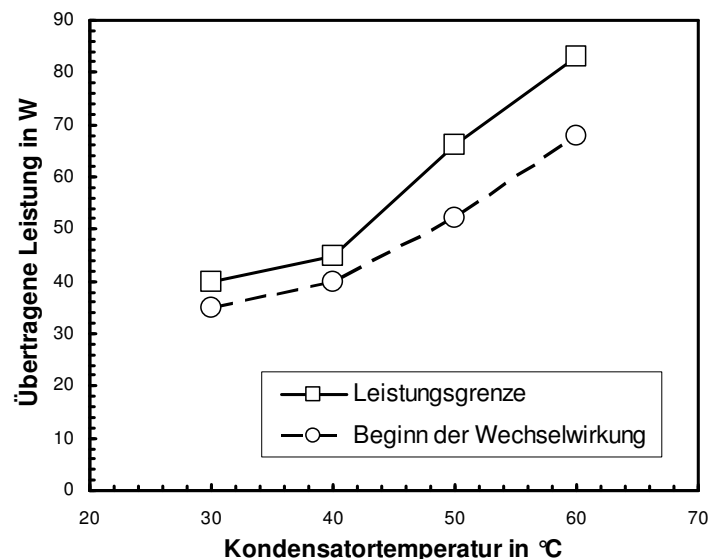


Abbildung 3: Leistungsübertragungsgrenze eines Einzelwärmerohrs durch Wechselwirkung in Abhängigkeit der Kondensatortemperatur

In Abbildung 3 sind die von dem Wärmerohr maximalen Übertragungsleistungen für 4 verschiedene Kondensatortemperaturen dargestellt. Die Werte sind im Vergleich zu anderen Wärmerohren als sehr niedrig einzustufen und deuten an, dass die Wechselwirkungsgrenze als Ursache für den sinkenden Kollektorwirkungsgrad verantwortlich ist. Das Wärmerohr besitzt eine Standardgeometrie, wie sie von vielen Kollektorherstellern verwendet wird. Bisher wurde jedoch eine derart geringe Leistungsgrenze bei anderen Wärmerohren gleicher Geometrie nicht festgestellt. Die geringen Leistungswerte könnten aber zum Beispiel mit dem Vorhandensein von nichtkondensierbaren Gasen im Innenraum oder der Zusammensetzung des Arbeitsmediums wie beispielsweise Wasser mit einem hohen Frostschutzmittelanteil erklärt werden.

Auswirkungen der Leistungsgrenzen von Wärmerohren auf die Kollektorleistung

Um die Ergebnisse der Wärmerohrmessung mit der Kollektormessung vergleichen zu können, muss eine gleiche Bezugsgröße für die Leistungsübertragung gefunden werden. Die Wechselwirkungsgrenze und der Beginn der Wechselwirkung im Wärmerohr sind abhängig von der Kondensatortemperatur und können mit Hilfe einer Annahme für den Leitwert des Sammlers auf die Fluidtemperatur bezogen werden. Für die Bauart der vorliegenden Sammlerkonstruktion ist bereits ein thermischer Leitwert U_{Sammler} von ca. 3.5 W/K experimentell ermittelt worden [Ja11]. Außerdem wird für die Darstellung berücksichtigt, dass der Kollektor aus einer Reihenschaltung von 30 Wärmerohren besteht, und dementsprechend die Bezugsfluidtemperaturen der Einzelwärmerohre sich maximal um den halben Temperaturhub über die Sammlerstrecke von der mittleren Kollektorfluidtemperatur unterscheiden. Daher werden die Leistungsgrenze und der Beginn der Wechselwirkung entsprechend um 3 Kelvin gegeneinander verschoben.

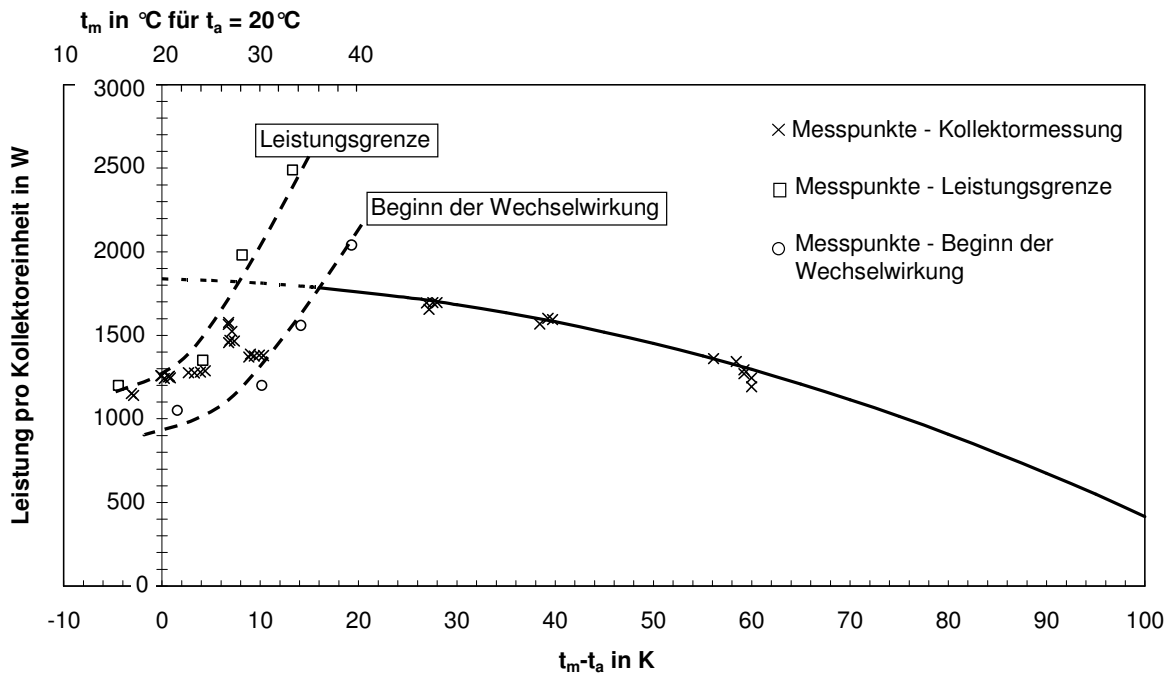


Abbildung 4: Leistungskurve bezogen auf 1000 W/m^2 angelehnt an [EN 12975] mit Leistungsgrenzen für eine Umgebungstemperatur von 20 °C und Messpunkten aus Kollektormessung und Wärmerohrmessung

Die Kollektorleistungskurve nach [EN 12975] und die Messpunkte außerhalb des Wärmerohrgrenzbetriebes sind bezogen auf eine Einstrahlung von 1000 W/m^2 und in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz aus mittlerer Fluidtemperatur t_m und Umgebungstemperatur t_a dargestellt. Diese Abhängigkeit ist jedoch nicht mehr zutreffend, wenn im Betriebsbereich des Kollektors die Leistungsgrenze des Wärmerohres erreicht wird. Daher wird in der Darstellung der Kollektorleistung für den relevanten Bereich der Leistungsgrenze eine zusätzliche Abhängigkeit ausschließlich von der Fluidtemperatur angegeben. In Abbildung 4 wird ersichtlich,

wie sich der Bereich vom Beginn der Wechselwirkung und der Leistungsgrenze des Wärmerohres mit den Messwerten der abfallenden Kollektorleistung decken. Somit bestätigt Abbildung 4 die Überlegungen, dass die Kollektorleistung von Wärmerohrkollektoren in Einzelfällen durch die Leistungsübertragungsgrenze der Wärmerohre teilweise begrenzt werden kann.

Die in Abbildung 3 dargestellten Einflussbereiche der Leistungsgrenzen zeigen, dass die Wechselwirkungsgrenze für den Kollektorbetrieb bei geringen Fluidtemperaturen relevant sein kann, wie Abbildung 4 zeigt. Die ebenfalls in Abbildung 3 dargestellte Austrocknungsgrenze kann sich auf die Stillstandstemperatur eines Wärmerohrkollektors auswirken. Für den Fall, dass der Kollektor für die Prozesswärme, also bei sehr hohen Betriebstemperaturen, eingesetzt wird, kann auch hier die Austrocknungsgrenze einen negativen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit haben, insbesondere bei Wärmerohren, bei denen als Arbeitsmedium nicht Wasser verwendet wird.

Außerdem sollte beachtet werden, dass es eine Neigungswinkelabhängigkeit der Leistungsgrenzen gibt. So wird die Leistungsfähigkeit durch die Austrocknungsgrenze bei circa 60° Neigung am geringsten beeinträchtigt und die Wechselwirkungsgrenze bei circa 75° Neigung. Die vorliegenden Messergebnisse sind bei einer Neigung von circa 60° durchgeführt worden. Somit können die Leistungsübertragungsgrenzen bei geringem Kollektoraufstellwinkel die Kollektorleistung mindern, ohne dass dieser Effekt in Normprüfungen nach [EN 12975] festgestellt wurde. Genauso kann eine Messung des Konversionsfaktors bei hohen Umgebungstemperaturen verhindern, dass eine für den Kollektorbetrieb relevante Wechselwirkungsgrenze erkannt wird.

Danksagung

Die Detailuntersuchungen an dem Wärmerohrkollektor wurden im Rahmen des IEE-Projektes „QAiST - Quality Assurance in Solar Heating and Cooling Technologies“ durchgeführt und finanziert.

Literatur

- [EN 12975] DIN EN 12975-2. (2006). Thermische Solaranlagen und ihre Bauteile – Kollektoren – Teil 2: Prüfverfahren. CEN Europäisches Institut für Normung
- [Ja11] Jack, S., Katenbrink, N., Schubert, F.: Evaluation Methods for Heat Pipes in Solar Thermal Collectors – Test Equipment and First Results. in: Proceedings of ISES SWC 2011, Kassel, 2011
- [Mie11] Mientkewitz, G.: Möglichkeiten eines Heatpipe-Kollektors ohne Stagnationsprobleme. in: Tagungsband 20. Symposium Thermische Solarenergie 2010, Staffelstein, 2010