

Abgedeckter PVT-Kollektor mit Low-e-Beschichtung und Belüftung als Überhitzungsschutz

Dipl.-Ing. Manuel Lämmle, M.Sc. Clemens Panzer, Dr.-Ing. Michael Hermann
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
Heidenhofstraße 2, 79110 Freiburg
Tel.: +49 (0) 761 / 4588-5744, Fax: +49 (0) 761 / 4588-9847
manuel.laemle@ise.fraunhofer.de, <http://www.ise.fraunhofer.de>

1. Einleitung

Photovoltaisch-thermische Kollektoren stellen eine vielversprechende Möglichkeit dar, auf begrenzter Fläche Solarenergie effizient in Elektrizität und Wärme zu wandeln. Für klassische solarthermische Anwendungen sind PVT-Kollektoren mit guter Wärmedämmung notwendig, um ganzjährig solare Wärmeerträge zu ermöglichen.

Niedrig-emittierende und hoch-transparente Low-e-Beschichtungen reduzieren die Strahlungsverluste von PVT-Kollektoren signifikant, während sie die elektrische Effizienz nur geringfügig beeinträchtigen. Somit erzielen abgedeckte PVT-Kollektoren mit Low-e-Beschichtung einen optimierten Gesamtwirkungsgrad und höchste Jahresenergieerträge.

Die verbesserte Wärmedämmung hat allerdings ebenfalls höhere Stagnationstemperaturen oberhalb von $T_{\text{stag}} = 160 \text{ °C}$ zur Folge. Diese beeinträchtigen die Dauerbeständigkeit und die elektrische Leistung. Materialuntersuchungen an kommerziellen PV-Modulen mit EVA-Einkapselung zeigten, dass dauerhafte Modultemperaturen von $T > 135 \text{ °C}$ vermieden werden sollten um Degradation und Zerstörung des PVT-Kollektors zu vermeiden.

Mit einer variablen Wärmedämmung als Überhitzungsschutz können Stagnationstemperaturen begrenzt werden. Kollektoren mit Belüftung stellen einen bereits intensiv erforschten Ansatz dar, mit dem kritische Temperaturen vor allem in Polymerkollektoren vermieden werden können (Meir et al., 2008; Harrison, S. J., 2014; Kessentini et al., 2014; Hussain and Harrison, 2015; Ramschak et al., 2016). Im Stagnationsfall öffnen sich hierbei in das Kollektorgehäuse integrierten Belüftungsklappen, sodass kühle Umgebungsluft in den Kollektor einströmt und die Absorbertemperaturen absenkt.

2. Beschreibung des Kollektorkonzepts

Das PVT-Funktionsmuster wurde mit dem Ziel entwickelt, eine möglichst hohe Gesamteffizienz für typische solarthermische Anwendungen zu ermöglichen. Dafür

ist eine gute Balance zwischen hoher elektrischer und hoher thermischer Effizienz notwendig. Im folgenden Kapitel werden die konstruktiven Ansätze des Kollektorkonzepts erläutert.

2.1. PVT-Absorber

Als Zelltechnologie kommen monokristalline PV-Zellen zum Einsatz. Diese sind für einen optimierten Wärmeübergang zwischen den PV-Zellen und dem Wärmeübertragungsfluid direkt auf ein Aluminium-Absorberblech mit angeschweißten Kupferrohren laminiert.

Der PVT-Absorber befindet sich in einem Kollektorgehäuse mit rückseitigem Dämmmaterial und einer Glasabdeckung aus zweifach antireflexbeschichtetem Solarglas.

Die resultierende elektrische Gesamteffizienz des PVT-Kollektors beträgt $\eta_{el,STC} = 12.9 \%$ bei Standardprüfbedingungen.

2.2. Low-e-Beschichtung

Zur Minimierung der radiativen Wärmeverluste wird eine niedrig-emittierende und hoch-transparente Low-e-Beschichtung eingesetzt, welche auf der Oberseite der Glasscheibe des PV-Moduls appliziert ist.

Strahlungsverluste sind in abgedeckten PVT-Flachkollektoren für bis zu 60 % der Gesamtwärmeverluste verantwortlich. Dies liegt an dem hohen Emissionsgrad von unbeschichtetem Glas. Der Einsatz von Low-e-Beschichtungen senkt den Emissionsgrad der strahlenden Glasoberfläche und damit die Wärmeverluste des Kollektors (Lämmle et al., 2016).

Gerade für die Anwendung in PVT-Kollektoren ist neben einem niedrigen Emissionsgrad ein hoher Transmissionsgrad besonders wichtig, da dieser sowohl die elektrische als auch die thermische Effizienz beeinflusst. Im PVT-Kollektor kommt daher eine Low-e-Beschichtung des Herstellers Euroglas mit einem Emissionsgrad von $\varepsilon = 0.30$ zum Einsatz (Ehrmann and Reineke-Koch, 2012).

2.3. Überhitzungsschutz

Durch die verbesserte Wärmedämmung werden zwangsweise hohe Absorbertemperaturen von über $T_{stag} = 160 \text{ °C}$ während Stagnation erreicht. Um den PVT-Absorber vor Überhitzung zu schützen sind Belüftungsschlitze in das Kollektorgehäuse integriert, die bei Überhitzung geöffnet werden können. Bei dem PVT-Funktionsmuster erfolgt dies manuell; in einem realen Kollektor kann dies beispielsweise über passive Thermoaktoren erfolgen, sodass die Gehäuseklappen

automatisch bei Überschreitung einer Grenztemperatur öffnen (Harrison, S. J., 2014).

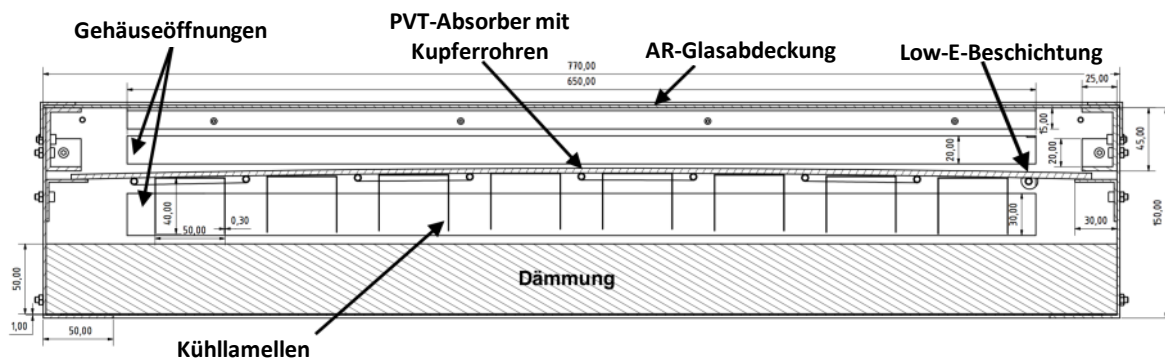


Abbildung 1: Konstruktionsskizze des PVT-Kollektors mit vorder- und rückseitigen Belüftungskanälen.

Abbildung 1 zeigt die Konstruktionsskizze des PVT-Kollektors. Dabei besteht die Möglichkeit, sowohl die Vorderseite als auch Rückseite des PVT-Absorbers zu belüften. Zur Verbesserung des Wärmeübergangs wurden an der Rückseite des PVT-Absorbers zusätzlich dünne Kühllamellen aus Aluminium angebracht.

3. Experimentelle Ergebnisse

3.1. U_{Loss} bei unterschiedlichen Konstruktionsvarianten

Zunächst wurde der Wärmeverlustkoeffizient U_{Loss} bei den unterschiedlichen Belüftungsvarianten bestimmt. Dafür wurde der Kollektor ohne Bestrahlung mit heißem Fluid durchströmt. Über eine Bilanzierung der Ein- und Austrittstemperaturen und Messung der Oberflächentemperatur lässt sich der Wärmeverlustkoeffizient U_{Loss} bestimmen:

$$U_{Loss} = \frac{\dot{q}_{Loss}}{\Delta T} = \frac{\dot{m} c_p (T_{Koll,ein} - T_{Koll,aus})}{T_{Absorber} - T_{Umgebung}} \quad (1)$$

Abbildung 2 zeigt die Ergebnisse für fünf unterschiedliche Belüftungsvarianten:

- Geschlossene Klappen (Normalbetrieb)
- Belüftung nur vorderseitig
- Belüftung nur rückseitig, ohne Kühllamellen
- Belüftung nur rückseitig, mit Kühllamellen
- Belüftung vorder- und rückseitig, mit Kühllamellen

Je nach Belüftungsvariante stellt sich ein unterschiedlicher Wärmeverlustkoeffizient U_{Loss} ein.

Aus den gemessenen Verlustkoeffizienten wurde zusätzlich die Stagnationstemperatur für die „worst-case“ Bedingungen OC-Modus (also keine Stromabnahme) und Windstille abgeschätzt. Demnach werden bei geschlossenen Klappen maximale Absorberrtemperatures bis zu $T_{\text{stag}} = 166 \text{ °C}$ erreicht. Durch vorderseitige Belüftung können diese auf 132 °C reduziert werden, durch rückseitige Belüftung ohne Lamellen auf 123 °C , durch rückseitige Belüftung mit Lamellen auf 99 °C und durch eine beidseitige Belüftung mit rückseitigen Lamellen auf 95 °C . Diese Ergebnisse stehen in Einklang mit den in der Fachliteratur beschriebenen Experimenten an belüfteten Kollektoren.

Unter diesen Randbedingungen scheint eine reine Belüftung der Vorderseite nicht ausreichend um kritische Temperaturen sicher zu vermeiden. Die rückseitige Belüftungsvariante mit angebrachten Kühllamellen hingegen erreicht das Ziel.

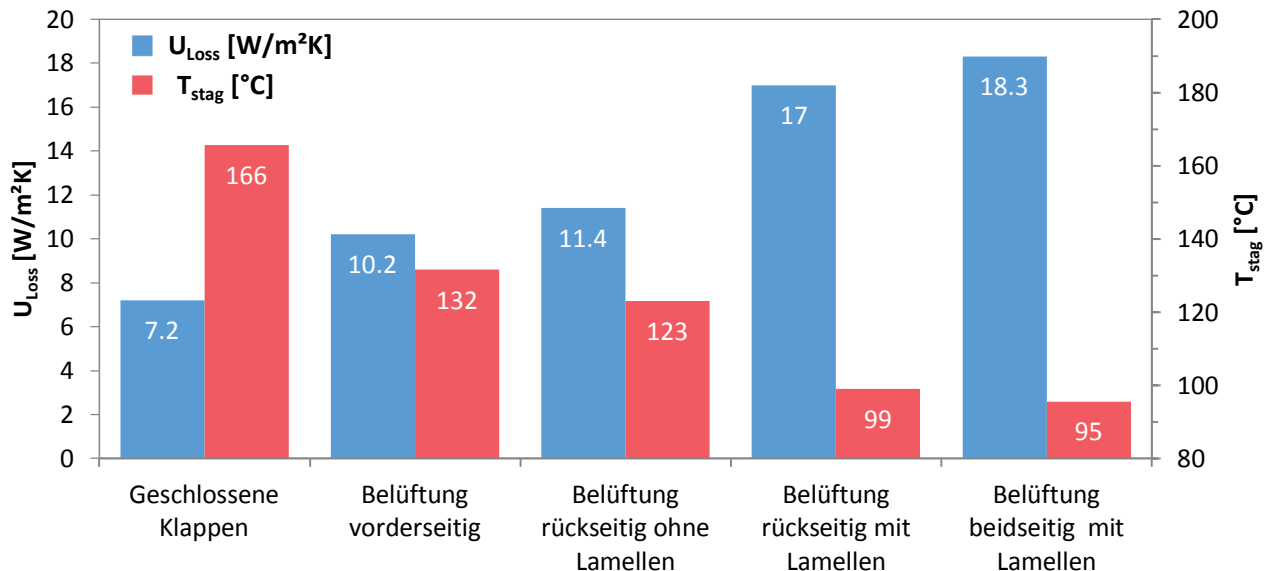


Abbildung 2: Wärmeverlustwert U_{Loss} (gemessen) und Stagnationstemperatur T_{stag} (berechnet) des belüfteten PVT-Kollektors in unterschiedlichen Konstruktionsvarianten.

3.2. Wirkungsgradkennlinien

Die Leistung des PVT-Kollektors wurde angelehnt an ISO 9806 charakterisiert. Dies erfolgte im Hybridbetrieb (MPP-Modus) bei synchroner elektrischer und thermischer Energieerzeugung. Die Wirkungsgradkennlinie wurde dabei in zwei Betriebsmodi bestimmt (Abbildung 3):

- Im Normalbetrieb mit geschlossenen Belüftungsschlitzen.
- Im überhitzungsgeschützten Betrieb mit geöffneten Belüftungsschlitzen und Kühllamellen an der Rückseite des Absorbers (Variante 4).

Durch Öffnen und Schließen der Belüftungsklappen kann dynamisch im Betrieb zwischen den beiden Betriebsmodi gewechselt werden, sodass eine „abknickende Wirkungsgradkennlinie (WKL)“ erreicht wird.

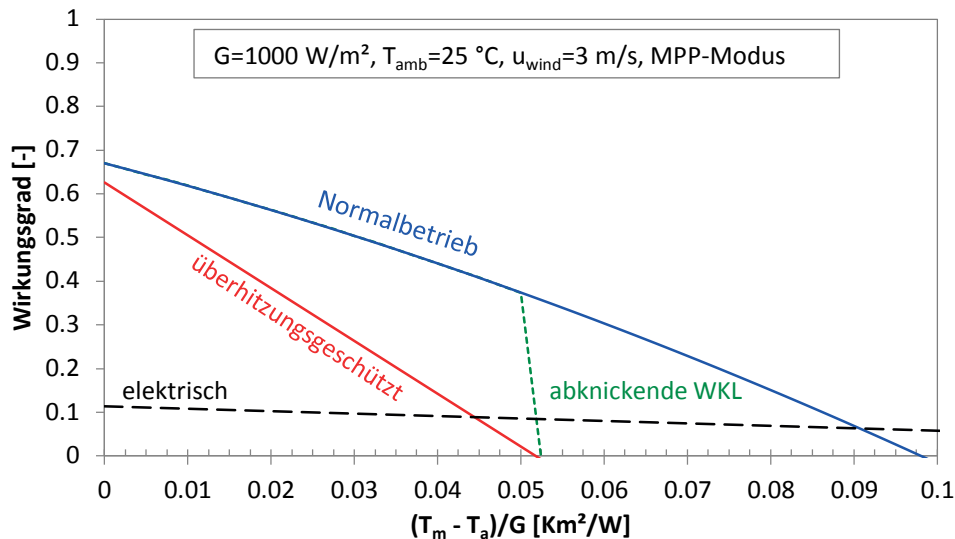


Abbildung 3: Wirkungsgradkennlinie des PVT-Kollektors mit geschlossenen und geöffneten Belüftungsklappen.

Im Betrieb erzielt der PVT-Kollektor eine hohe thermische Effizienz mit geringen Wärmeverlusten. Im Vergleich zu einem konventionellen Flachkollektor fällt die thermische Leistung etwas geringer aus. Dies ist zum einen auf die synchrone elektrische Leistungsabnahme zurückzuführen. Zum anderen ist die Emissivität des PVT-Absorbers mit Low-e ($\varepsilon = 0.30$) immer noch deutlich höher als die eines spektral-selektiven Absorbers des Flachkollektors ($\varepsilon = 0.05$). Zusätzlich ist der Absorptionsgrad des PVT-Absorbers (ca. $\alpha = 0.90$) ebenfalls geringer als die des spektral-selektiven Absorbers ($\alpha = 0.95$). Durch eine optische Optimierung der Low-e-Beschichtung kann die thermische Leistung weiter verbessert werden.

Gleichzeitig kann der PVT-Kollektor bei Stagnation oder bei geringem Wärmebedarf in den überhitzungsgeschützten Betriebsmodus versetzt werden. Dabei zeichnet sich der Kollektor durch geringe Stagnationstemperaturen ($T_{\text{stag}} = 101.8 \text{ °C}$) aus. Durch die geringeren Temperaturen steigt die elektrische Effizienz in Stagnation von $\eta_{\text{el}} = 6.5 \text{ %}$ bei geschlossenen Klappen auf $\eta_{\text{el}} = 8.9 \text{ %}$ bei geöffneten Klappen an (vgl. Tabelle 1).

Tabelle 1: Messwerte des PVT-Kollektors mit geschlossen und geöffneten Belüftungsklappen. Thermische Effizienz: Bezug auf die Aperturfläche ($A_a = 0.97 \text{ m}^2$), Elektrische Effizienz: Bezug auf die PV-Modulfläche ($A_{PV} = 0.89 \text{ m}^2$).

		Normalbetrieb	Überhitzungsgeschützt
$\eta_{th,0}$	[-]	0.67	0.63
a_1	[W/m ² K]	4.973	12.09
a_2	[W/m ² K ²]	0.019	0
T_{stag}	[°C]	148.9	101.8
$\eta_{el,STC}$	[-]	12.9%	12.9%
η_{el} bei Stagnation	[-]	6.5 %	8.9 %

3.3. Dynamische Messung bei Stagnation

Der Überhitzungsschutz wurde unter realen Bedingungen am Außenteststand des Fraunhofer ISE getestet. Der Kollektor wurde dafür künstlich in Stagnation versetzt, während die Kollektorleistung und Absorberrtemperaturen gemonitort wurden.

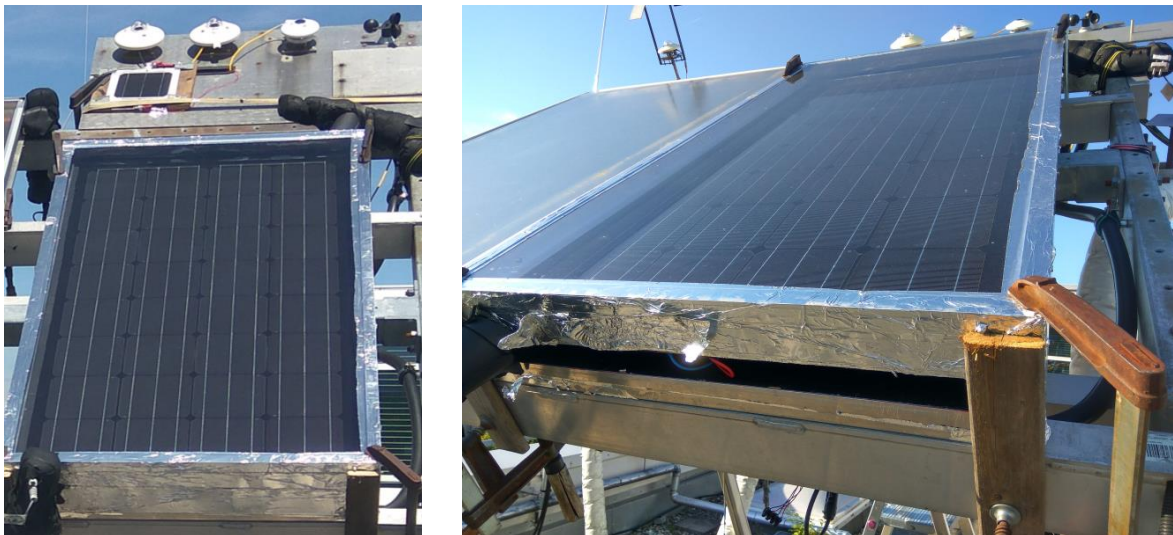


Abbildung 4: Foto des PVT-Kollektors während der dynamischen Messung im TestLab Solar Thermal Systems des Fraunhofer ISE. Links: Betrieb mit geschlossenen Klappen, rechts: Betrieb mit geöffneten Klappen.

Abbildung 5 zeigt den Temperaturverlauf des PVT-Kollektors an einem sonnigen, heißen Tag.

Zunächst befindet sich der Kollektor im Hybridbetrieb mit elektrischer und thermischer Leistungserzeugung. Um 10:40 Uhr wurde der PVT-Kollektor in Stagnation versetzt, indem die Kollektorkreispumpe ausgeschaltet wurde. Durch die fehlende Wärmeabfuhr begann der Kollektor, sich stark aufzuheizen. Nach ca. einer

halben Stunde überschritt die Absorbtemperatur $T_{\text{abs}} = 95 \text{ }^\circ\text{C}$. Daraufhin wurde der Überhitzungsschutz durch Öffnen der Belüftungsklappen aktiviert.

Der sich daraufhin einstellende Luftstrom kühlt den Kollektor ab, sodass sich die Absorbtemperatur auf $T_{\text{abs}} = 75 \text{ }^\circ\text{C}$ stabilisieren (dunkelrote Linie). Vergleichende Simulationsergebnisse zeigen, dass ohne Belüftung Temperaturen über $140 \text{ }^\circ\text{C}$ erreicht worden wären (hellrote Linie).

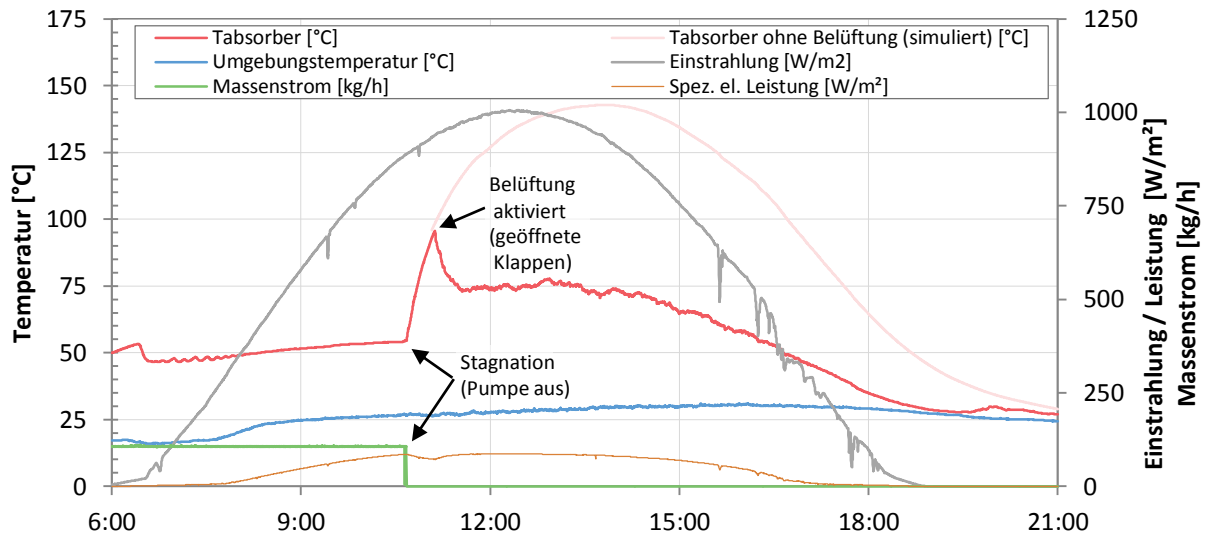


Abbildung 5: Verlauf der Absorbtemperatur in Stagnation mit Belüftung (dunkelrot) im Vergleich zu der simulierten Absorbtemperatur ohne Belüftung (hellrot).

Die Auswirkung auf die elektrische Leistung ist am orangenen Kurvenverlauf erkennbar. Direkt nach Einsetzen der Stagnation sinkt der elektrische Wirkungsgrad von $\eta_{\text{el}} = 10.0 \text{ } \%$ auf $\eta_{\text{el}} = 7.9 \text{ } \%$ ab. Nach Öffnen der Belüftungsklappen steigt der Wirkungsgrad wieder und stabilisiert sich bei $\eta_{\text{el}} = 9.3 \text{ } \%$.

4. Zusammenfassung und Fazit

Ein Überhitzungsschutz im Allgemeinen und die Hinterlüftung im Speziellen stellen eine geeignete Möglichkeit dar, um bei gutgedämmten PVT-Kollektoren kritische Stagnationstemperaturen zu vermeiden. An einem abgedeckten PVT-Kollektor mit Low-e-Beschichtung wurde erfolgreich demonstriert, dass die Kollektorbeflüftung eine wirkungsvolle Maßnahme zur Reduktion der Temperaturbelastung darstellt, die gleichzeitig ein flexibles Betriebsverhalten zur Steigerung der elektrischen Erträge durch gezielte Absenkung der Kollektortemperatur ermöglicht.

Danksagung

Das diesem Beitrag zugrundeliegende Vorhaben wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 0325538B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Literaturverzeichnis

- Ehrmann, N., Reineke-Koch, R., 2012. Selectively coated high efficiency glazing for solar-thermal flat-plate collectors. *Thin Solid Films* 520 (12), 4214–4218.
- Harrison, S. J., 2014. Field Evaluation of a High Performance Flat-plate Solar Collector Equipped with Integral Stagnation Control. *Proceedings of Eurosun 2014, Aix-Les-Bains*.
- Hussain, S., Harrison, S.J., 2015. Experimental and numerical investigations of passive air cooling of a residential flat-plate solar collector under stagnation conditions. *Solar Energy* 122, 1023–1036.
- Kessentini, H., Castro, J., Capdevila, R., Oliva, A., 2014. Development of flat plate collector with plastic transparent insulation and low-cost overheating protection system. *Applied Energy* 133, 206–223.
- Lämmle, M., Kroyer, T., Fortuin, S., Wiese, M., Hermann, M., 2016. Development and modelling of highly-efficient PVT collectors with low-emissivity coatings. *Solar Energy* 130, 161–173.
- Meir, M., Gjessing, J., Rekstad, J., Rumler, N., 2008. Overheating Protection Of Polymeric Solar Collectors By Triggered Ventilation. *Proceedings of Eurosun, Lisbon, Portugal*.
- Ramschak, T., Hausner, R., Fink, C., 2016. Temperaturbegrenzung für Kunststoffkollektoren durch Durchlüftung - Zusammenfassung. *Tagungsband 26. Symposium Thermische Solarenergie 2016. Bad Staffelsein: OTTI-Kolleg*.