

Thermochrome Absorberbeschichtungen für solarthermische Kollektoren - Stand der Technik, Schichtentwicklung und Systembewertung -

Sebastian Müller¹, Arne Ditttrich¹, Rolf Reineke-Koch¹, Federico Giovannetti¹, Bernd Hafner²

¹ Institut für Solarenergieforschung Hameln (ISFH), Am Ohrberg 1, D-31860 Emmerthal

² Viessmann Werke GmbH & Co. KG, Viessmannstraße 1, D-35108 Allendorf (Eder)

Abstract

Thermochrome Absorberbeschichtungen weisen einen für langwellige Wärmestrahlung stark temperaturabhängigen Emissionsgrad auf. Im Allgemeinen beschreibt der Begriff „Thermochromie“ eine temperaturgesteuerte Änderung von optischen Eigenschaften eines Materials. Die hier untersuchten auf Vanadiumdioxid basierenden Schichtsysteme besitzen unterhalb einer gewissen Schalttemperatur (Absorbtemperatur) von $T_s \approx 68 \text{ °C}$ einen für hochselektive Beschichtungen üblichen Emissionsgrad ($\varepsilon_{20^\circ\text{C}} \approx 5 \%$), welcher sich bei höherer Absorbtemperatur auf bis zu $\varepsilon_{100^\circ\text{C}} \approx 35 \%$ erhöht. Die Strahlungswärmeverluste über die transparente Abdeckung an die Umgebung erhöhen sich dadurch signifikant, wodurch die Stagnationstemperatur um bis zu 30 K reduziert und eine Verdampfung des Wärmeträgers verhindert werden kann. Es wurden stationäre Kollektorleistungsmessungen nach ISO 9806:2013 an ersten Prototypen und industriell gefertigten Flachkollektoren durchgeführt, um die Leistungsfähigkeit des Kollektors und die „Schaltung“ der Emissivität zu bewerten. In dynamischen Systemtests nach ISO 9459-5 wurde die Systemleistung eines Trinkwarmwassersystems mit thermochromen Flachkollektoren gegen die mit Standard-Flachkollektoren verglichen. Mit einer Reduzierung des solaren Deckungsgrades um 1 Prozentpunkt und einer maximalen Erhöhung des konventionellen Nachheizenergiebedarfes von 2,5 % konnte die hohe Leistungsfähigkeit der neuartigen Beschichtung bestätigt werden. Das Stagnationsverhalten wurde hinsichtlich der Dampfreichweite und der Maximaltemperaturen im Solarkreislauf experimentell bewertet. Die Stagnationszeit konnte bei üblichen Systemüberdrücken um 60 % reduziert und die Stagnationstemperatur unter Umgebungsbedingungen auf 145 °C begrenzt werden.

1. Einleitung

Solarthermische Anlagen stellen durch ihre stetige Weiterentwicklung immer effizienter regenerativ erzeugte Wärme in Form von Trinkwarmwasser oder für die Raumheizungsunterstützung zur Verfügung. Mit der Erhöhung der Leistungsfähigkeit der Kollektoren steigt nicht nur ihre Betriebstemperatur sondern auch ihre Stagnationstemperatur deutlich an. Vorwiegend in den Sommermonaten, mit hoher solarer Einstrahlung und sehr geringem Warmwasserverbrauch, gerät eine Solaranlage in Stagnation und kann bei handelsüblichen Solarkollektoren mit hochselektiven Absorbern (Absorptionsgrad $\alpha > 94 \%$, Emissionsgrad $\varepsilon \approx 5 \%$) Stagnationstemperaturen von über 200 °C erreichen. Die thermische Belastung des Kollektors, der Solaranschlussleitungen samt Dämmung und weiterer sensibler Solarkreislaufkomponenten (Solarkreislaufpumpe, Membranausdehnungsgefäß) ist enorm, weshalb temperaturbeständige Systemkomponenten verbaut werden müssen. Speziell für große solarthermische Systeme zur Raumheizungsunterstützung müssen zusätzliche Schutzeinrichtungen installiert werden, um thermische Schäden am Solarkreislauf oder die beschleunigte Degradation des Wärmeträgerfluides (vgl. [1]) vollständig auszuschließen.

Die Leistungssteigerung des Kollektors verursacht deshalb einen deutlichen Mehraufwand im Solarkreislauf, welcher sich hauptsächlich durch die Vermeidung von hohen thermischen Belastungen und der Dampfbildung reduzieren lässt. Die spezifischen Systemkosten können durch den Einsatz kostengünstigerer Materialien und geringerem Installations- und Wartungsaufwand gesenkt werden. Hierzu

untersuchte [2] detailliert das Stagnationsverhalten und charakterisierte unterschiedliche Kollektortypen anhand ihrer Dampfproduktionsleistung. Um eine Überhitzung im Kollektor vollständig zu vermeiden, wurden von [3] und [4] Schutzeinrichtungen oder Regelstrategien vorgeschlagen. Eine Begrenzung der Stagnationstemperatur in Vakuumröhrenkollektoren kann durch den Einsatz von Heatpipes erreicht werden (siehe [5] und [6]). Drain-Back-Systeme verhindern die Verdampfung der Wärmeträgerflüssigkeit durch die automatische Entleerung des Kollektors bei Pumpenstillstand, wie in [7] zusammengefasst wird. Zur Reduzierung der Stagnationsbelastungen schlug [8] thermochrome Absorberbeschichtungen vor, welche die Stagnationstemperatur in Flachkollektoren reduzieren könnten. Industriell gefertigte thermochrome Flachkollektoren wurden hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit und ihres Schaltverhaltens erstmals in [9] experimentell untersucht.

2. Thermochrome Absorberbeschichtungen

Zur Reduzierung der thermischen Belastungen im Stagnationsfall werden am Institut für Solarenergieforschung Hameln (ISFH) in Kooperation mit der Fa. Viessmann Werke GmbH thermochrome Absorberbeschichtungen für solarthermische Flachkollektoren entwickelt, welche die Stagnationstemperatur drastisch reduzieren und die spezifischen Systemkosten senken können.

Allgemein beschreibt der Begriff „Thermochromie“ eine temperaturgesteuerte Änderung der optischen Eigenschaften eines Materials. Bei diesem physikalischen Effekt spielen freie Ladungsträger im Material eine zentrale Rolle. Freie Ladungsträger sind in der Lage mit einem elektrischen Feld zu interagieren. Beschrieben wurde dies von P. Drude durch das sogenannte „Drude-Modell“ [10]. Diese Wechselwirkung reagiert besonders sensitiv auf das Wechselfeld von elektromagnetischen Wellen im infraroten Spektralbereich. Wird also durch die Einwirkung einer Temperaturänderung die Anzahl der freien Ladungsträger eines Materials verändert, so kommt es gleichzeitig zu einer Änderung der optischen Eigenschaft des Materials, die beispielsweise in Form einer farblichen Veränderung für das menschliche Auge sichtbar werden kann.

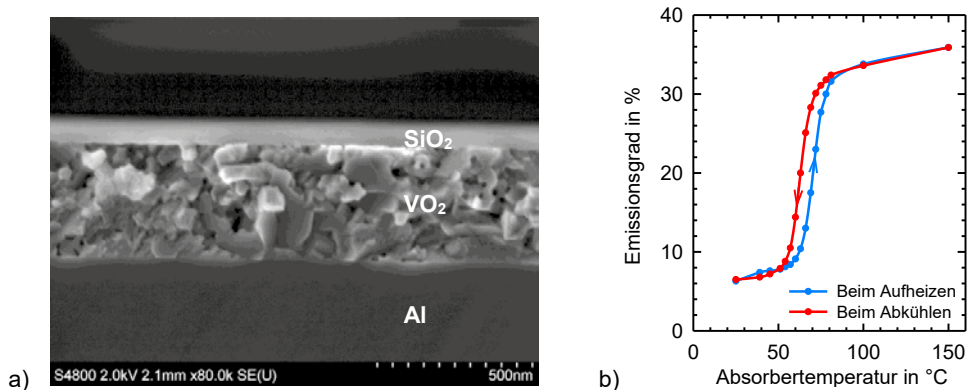


Abb. 1: REM Aufnahme des thermochromen Schichtaufbaus im Querschnitt (a) und Schaltung des temperaturabhängigen Emissionsgrades der Absorberbeschichtung (b) [14]

Materialien, die ein thermochromes Verhalten im Arbeitstemperaturbereich von Solarkollektoren zeigen, haben prinzipiell ein hohes Potential für den Einsatz als Maßnahme gegen eine Überhitzung im Kollektor und Solarkreislauf. Hierbei könnte der thermochrome Effekt einerseits genutzt werden, um den Wärmeeintrag über eine Reduzierung der solaren Absorption zu senken oder andererseits um einen kühlenden Effekt durch die Erhöhung der Emissivität im Spektralbereich der Wärmestrahlung zu erzielen.

In der Wissenschaft wurde bereits eine Vielzahl an thermochromen Materialien untersucht. Von besonderem Interesse sind hierbei Vanadiumdioxid (VO₂) oder auch Titan(III)-oxid (Ti₂O₃), die ein

Schaltverhalten der elektrischen Leitfähigkeit zwischen Raumtemperatur und etwa 150 °C aufweisen [11]. Diese Materialien bieten eine ideale Einsatzmöglichkeit als Basismaterial für eine funktionale Schicht in Solarkollektoren oder können auch als intelligentes Fenstermaterial zum Einsatz kommen (siehe [12] und [13]). Die hier verwendeten thermochromen Schichten, die aus VO₂ als funktionale Schicht bestehen, zeichnen sich durch ihren temperaturabhängigen Emissionsgrad aus. Die innovative Beschichtung weist bei normalen Betriebstemperaturen einen für handelsübliche hochselektive Absorber üblichen Emissionsgrad von $\epsilon \approx 5\%$ und gleichzeitig hohe Leistungsfähigkeit auf. Steigt die Absorbtemperatur über eine gewisse „Schalttemperatur“ T_s an, erhöht sich der Emissionsgrad auf bis zu 35 %, wodurch die Strahlungswärmeverluste an die Umgebung signifikant ansteigen.

Die thermochrome Absorberbeschichtung besteht aus einem dreiteiligen Aufbau (siehe Abb. 1.a): ein Aluminiumsubstrat, eine funktionale Schicht aus VO₂ und eine Deck- bzw. Antireflexschicht aus Siliziumdioxid (SiO₂). Die Schaltung der Emissivität ist auf einen Phasenübergang 1. Ordnung bei einer Absorbtemperatur von circa 70 °C zurückzuführen, der eine Änderung der Kristallstruktur hervorruft. Hierbei ändert sich die Bandstruktur von einem halbleitenden zu einem metallischen Zustand, wodurch die Leitfähigkeit erhöht und die Emissivität beeinflusst wird ([11]). Die Änderung des Emissionsgrades erfolgt dabei vollständig reversibel (siehe Abb. 1.b). Die Langzeitstabilität konnte mit beschleunigten Alterungstests in [14] erfolgreich nachgewiesen werden.

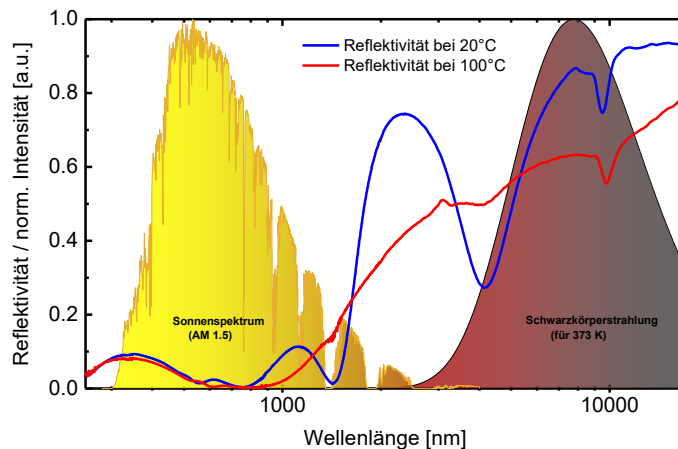


Abb. 2: Gemessener Verlauf der Reflektivität einer thermochromen Absorberbeschichtung vom solaren bis zum infraroten Spektralbereich bei 20 °C (blaue Kurve) und bei 100 °C (rote Kurve).

In Abb. 2 ist das Verhalten der Reflektivität einer thermochromen Absorberbeschichtung vom solaren bis zum infraroten Spektralbereich bei 20 °C (blaue Kurve) und bei 100 °C (rote Kurve) dargestellt. Im solaren Spektralbereich ist bei beiden Temperaturen des Absorbers eine beinahe unverändert niedrige Reflektivität zu erkennen. Hieraus resultiert eine gleichbleibend hohe solare Absorption in Abhängigkeit der Absorbtemperatur. Im Bereich der Schwarzkörperstrahlung eines idealen schwarzen Strahlers bei 100 °C ist im Gegensatz dazu eine erhebliche Änderung der Reflektivität zu beobachten. Die 20 °C warme Absorberbeschichtung zeigt in diesem Bereich eine sehr hohe Reflektivität, was zu einer sehr niedrigen Emissivität führt. Umgekehrt zeigt die 100 °C heiße Absorberbeschichtung in diesem Bereich eine deutlich reduzierte Reflektivität, die eine erhöhte Emissivität zur Folge hat. Mit dieser temperaturgesteuerten Schaltung der Emissivität kann die selbstkühlende Wirkung des Kollektors realisiert werden.

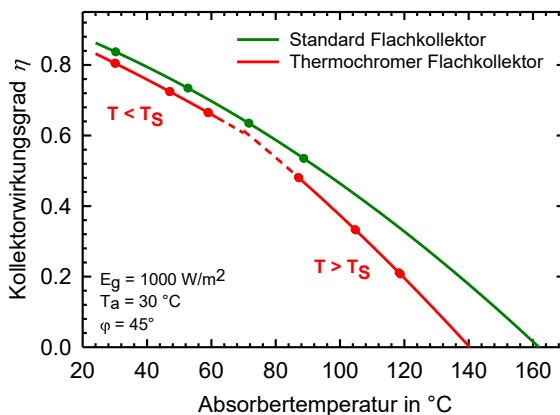
Zur Verbesserung der optischen Eigenschaften wird die Absorberbeschichtung evolutionär weiterentwickelt, um den Absorptionsgrad auf marktübliche Werte ($\alpha > 95\%$), den Emissionsgrad im geschalte-

ten Bereich auf 60 % und die Schalttemperatur auf rund 80 °C zu erhöhen. Damit ist eine weitere Angleichung der Leistungsfähigkeit des thermochromen Kollektors an den eines Standard-Flachkollektors im Normalbetrieb zu erwarten.

3. Kollektorleistungsmessungen

Auf Grundlage des beschriebenen Schichtaufbaues wurden im Laufe der Kollektorentwicklung insgesamt drei Prototypen mit unterschiedlichen Entwicklungsstufen der Absorberbeschichtung hergestellt und experimentellen Untersuchungen unterzogen. Der Beschichtungsprozess wurde dabei schrittweise in einen seriennahen Prozessablauf überführt, sodass Absorberbleche direkt vom Coil mit mehreren hundert Metern Länge durchgängig beschichtet werden konnten. In diesen grundlegenden Voruntersuchungen konnte bereits eine Reduzierung der Stagnationstemperatur um bis zu 30 K ermittelt und die Schaltung der Emissivität hinsichtlich der Kollektorleistung im geschalteten Bereich untersucht werden (vgl. [14]). Die Wirkungsgradkennlinie im nicht-geschalteten Bereich konnte als identisch mit der eines baugleichen Standard-Flachkollektors (Referenzkollektor) mit hochselektiver Beschichtung identifiziert werden.

In einem aktuellen Forschungsvorhaben wurden an seriengefertigten thermochromen Flachkollektoren Kollektorleistungsmessungen nach ISO 9806:2013 ([15]) durchgeführt. Aufgrund des Schaltverhaltens der neuartigen selektiven Beschichtung ändert der Kollektor bei übersteigen der Temperatur T_s seine Charakteristik. Die Kollektorwirkungsgradkennlinie wird daher in zwei geteilten Abschnitten dargestellt. Dabei beschreibt der erste Abschnitt den Kollektorwirkungsgrad unterhalb T_s und der zweite Bereich charakterisiert den geschalteten Zustand des Absorbers. Jeder Abschnitt besitzt seine eindeutig definierten Wirkungsgradparameter η_0 , a_1 sowie a_2 . Zur Ermittlung der Wirkungsgradkennlinie wurden jeweils drei stationäre Messpunkte pro Abschnitt bei unterschiedlichen Absorberrtemperen ermittelt (siehe Abb. 3).



	$\eta_{0,Ap}$	$a_{1,Ap}$	$a_{2,Ap}$
	-	$Wm^{-2}K^{-1}$	$Wm^{-2}K^{-2}$
Standard-Kollektor	0,786	4,19	0,0135
$T < T_s$	0,757	4,27	0,0065
$T > T_s$	0,830	6,17	0,0103

Abb. 3: Kollektorwirkungsgradkennlinien eines industriell gefertigten thermochromen und eines Standard-Flachkollektors bezogen auf ihre Absorberrtemperatur

Die thermochrome Beschichtung weist bei Raumtemperatur einen geringfügig niedrigeren Absorptionsgrad von $\alpha_{20^\circ C} \approx 92,5 \%$ auf, weshalb sich der Konversionsfaktor im Vergleich zu einem Standard-Flachkollektor mit hochselektiver Beschichtung um rund drei Prozentpunkte unterscheidet. Die Steigung der Kennlinie im nicht-geschalteten Bereich ist vergleichbar mit der des Standard-Kollektors. Die hohe Emissivität und gesteigerten Wärmeverluste im geschalteten Bereich ($T > T_s$) reduzieren sichtlich den Kollektorwirkungsgrad und somit auch die Kollektorleistung. Der lineare Wärmeverlustkoeffizient a_1 steigt von 4,27 auf 6,17 $W m^{-2} K^{-1}$ an. Die Stagnationstemperatur konnte auf 167 °C unter Referenzbedingungen (Einstrahlung 1000 $W m^{-2}$, Umgebungstemperatur 30 °C, kein Wind) begrenzt

und somit um 25 K gegenüber des Standard-Flachkollektors ($T_{\text{Stag}} = 192 \text{ }^\circ\text{C}$) reduziert werden.

Die Darstellung der Kollektorwirkungsgradkennlinie in geteilter (abschnittsweise definierter) Form repräsentiert die Charakteristik des Kollektors hinreichend genau. In Systemsimulationen (z. B. mit TRNSYS) „schalten“ die Wirkungsgradparameter unmittelbar nach dem Überschreiten der Schalttemperatur T_s auf die Werte für hohe Emissivität um. Dabei wird das Hystereseverhalten, wie in Abb. 1.b dargestellt, mit berücksichtigt. In aktuellen Solar-Keymark-Zertifikaten sind für den thermochromen Kollektor beide Kurvenabschnitte sowie eine gemittelte Wirkungsgradkennlinie hinterlegt, welche alle bei der Kollektorleistungsmessung ermittelten stationären Arbeitspunkte beinhaltet. Die Bruttowärmeerträge für mittlere Fluidtemperaturen von 25 °C und 50 °C werden mit der Kurve im nicht-geschalteten Bereich ($T < T_s$) ermittelt.

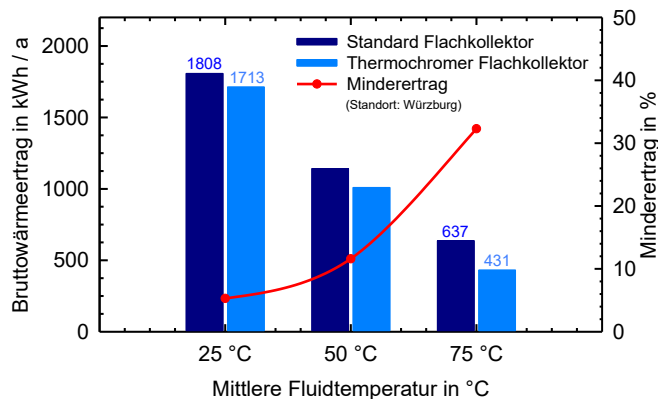


Abb. 4: Bruttowärmeerträge des thermochromen Kollektors (Typ: Vitosol 200-FM SV2F, Zert.-Nr.: 011-7S2668 F) und eines baugleichen Standard-Flachkollektors (Vitosol 200-F SV2C, 011-7S2374 F) nach Solar-Keymark-Zertifikat

Ein Vergleich zweier Kollektoren kann zusätzlich mit ihren Bruttowärmeerträgen stattfinden, welche den theoretisch maximalen Kollektorertrag angibt, sofern der Kollektor ganzjährig auf einer konstanten mittleren Fluidtemperatur betrieben wird. Für die Darstellung im Solar-Keymark-Zertifikat werden die Bruttowärmeerträge bei mittleren Fluidtemperaturen von 25 °C, 50 °C und 75 °C angegeben (siehe Abb. 4). Die Bruttowärmeerträge wurden mit den Wirkungsgradparametern der zertifizierten Kollektorprüfung errechnet und weichen leicht von den in Abb. 3 aufgetragenen ab. Im Vergleich zu einem Standard-Flachkollektor erzielt ein Kollektor mit thermochromer Absorberbeschichtung bei 25 °C mittlerer Fluidtemperatur 5 % und bei 50 °C um rund 12 % geringere Bruttowärmeerträge, was erneut auf die leicht niedrigeren optischen Eigenschaften der Beschichtung zurückzuführen ist. Bei höheren mittleren Fluidtemperaturen von 75 °C und somit bei Absorberrtemperaturen, welche sich über der Schalttemperatur befinden, verringert sich der Wärmeertrag um bis zu 32 % aufgrund der signifikant höheren Strahlungswärmeverluste.

4. Leistungsfähigkeit im System

In Voruntersuchungen wurde das Systemverhalten anhand der ermittelten Kollektorkennlinien in [14] simulativ untersucht. In TRNSYS wurde dazu ein System zur Trinkwarmwasserbereitung abgebildet, welches den in der Norm EN 12977-2 definierten Bedingungen entspricht. Das Kollektorfeld hat eine Aperturfläche von 4,64 m² und der verwendete Speicher fasst ein Volumen von 300 Liter. Um den Einfluss von unterschiedlichem Nutzerverhalten mit zu berücksichtigen, wurde der tägliche Warmwasserbedarf zwischen 50 und 200 Liter in unterschiedlichen klimatischen Bedingungen variiert. Für den Standort Potsdam konnte eine Erhöhung des konventionellen Nachheizenergiebedarfes zwischen 3 % und 10 % bei der Installation thermochromer anstatt Standard-Flachkollektoren ermittelt werden. Für

Carcassonne (Süd-Frankreich) liegt der Mehraufwand zwischen 8 % und 26 %. Wie [14] schlussfolgerte, wird die Leistungsfähigkeit thermochromer Flachkollektoren in einem Trinkwarmwassersystem nicht entscheidend durch die relativ niedrige Schalttemperatur beeinflusst, obwohl diese im normalen Betriebsbereich des Kollektors liegt.

Die Leistungsfähigkeit soll nun auch in geeigneten experimentellen Untersuchungen bewertet werden, wozu ein Trinkwarmwassersystem (TWW) mit thermochromen Kollektoren in Betrieb genommen wurde. Ein weiteres TWW-System mit Standard-Flachkollektoren der Firma Viessmann dient als Referenzanlage, welches zeitgleich mit dem identischen Messverfahren bewertet wurde (siehe Abbildung 5). Beide Solaranlagen besitzen eine Bruttokollektorfläche von je 5,02 m² und einen bivalenten TWW-Speicher mit einem Volumen von 300 Litern. Die Kollektoren sind um 38° gegen die Horizontale geneigt und in Richtung Süden ausgerichtet. Der konventionelle Nachheizenergiebedarf wird durch ein im Speicher eingetauchtes elektrisches Heizelement mit einer Nennleistung von 6 kW bereitgestellt.

4.1 Dynamischer Systemtest

Zur experimentellen Untersuchung der Leistungsfähigkeit der innovativen selektiven Absorberbeschichtung, wurde ein dynamischer Systemtest (DST) nach ISO 9459-5 (vgl. [16]) an beiden TWW-Systemen zeitgleich durchgeführt. Das DST-Verfahren beschreibt eine dynamische Kurzzeitmessmethode zur Bewertung von vorgefertigten solarthermischen Anlagen innerhalb weniger Wochen. Hierfür sind keine Einzelkomponentenprüfungen und während der Messung keine stationären Messwerte erforderlich. Um das thermische Verhalten der Anlage zu charakterisieren, wird das gesamte System in drei Testsequenzen betrieben, welche durch die Norm definiert sind. Die Solaranlage operiert dabei in allen relevanten Betriebszuständen. Zur späteren Evaluierung der Leistungsfähigkeit müssen acht äußere Systemgrößen (z. B. Globalstrahlung E_G , Speicherumgebungstemperatur T_{SU} oder Temperatur des Trinkwarmwassers T_{TWW} , siehe Abb. 5) messtechnisch erfasst werden. Da keine inneren Systemgrößen zeitlich erfasst werden müssen, wird dieses Verfahren auch als „Black Box“-Prinzip bezeichnet.

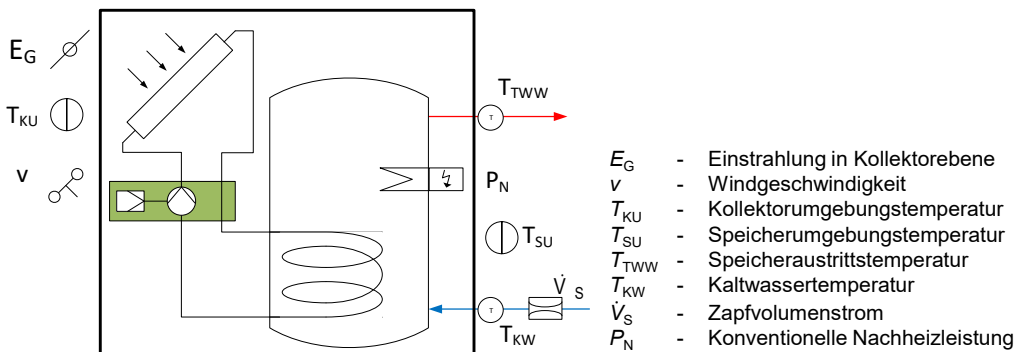


Abb. 5: Schematischer Aufbau einer vorgefertigten solarthermischen Anlage und der aufzunehmenden acht äußeren Systemgrößen für das DST-Verfahren

Mathematisch wird das Modell zur Langzeitertragsprognose durch sieben anlagenspezifische Parameter beschrieben, welche mittels der Messdaten der drei Testsequenzen durch den „Dynamic Fitting“-Algorithmus (DF) identifiziert werden müssen. Dieses Softwaretool minimiert eine Zielfunktion welche die gemessene Systemleistung der modellierten gegenüberstellt. Das physikalisch mathematische Anlagenmodell sowie die Software DF werden in [17] und [18] detailliert beschrieben.

4.2 Auswertung und Langzeitertragsprognose

Die durch DF identifizierten Anlagenparameter repräsentieren grundsätzlich eine Kombination aus mehreren physikalischen Phänomenen, Wechselwirkungen zwischen Anlagenkomponenten aber

auch für das Modell vernachlässigbare Effekte. Nach [19] ist es dennoch möglich, den sieben Anlagenparametern eine physikalische Bedeutung zuzuschreiben, welche einen direkten Bezug auf eine Anlagenkomponente haben können. Die Parameter U_s , C_s und f_{Aux} beschreiben die effektive Wärmeverlustrate, die Wärmekapazität sowie den Anteil des Nachheizvolumens am Gesamtvolumen (Bereitschaftsvolumen) des Speichers. Die effektive Kollektorfläche A_c^* und ihr effektiver Wärmeverlustkoeffizient u_c^* charakterisieren den gesamten Solarkreislauf. Die beiden Hilfsgrößen D_L sowie S_c beschreiben einen möglichen Entmischungsvorgang während einer Warmwasserzapfung bzw. die Schichtung des Speichers während des Beladevorganges.

Alle identifizierten Anlagenparameter sind in Tabelle 1 aufgetragen. Aufgrund des oben erwähnten physikalischen Bezugs können die beiden Systeme anhand ihrer Parameter gegeneinander verglichen und bewertet werden. Die effektiven Kollektorflächen A_c^* beider Systeme sind vergleichbar und unterscheiden sich um $0,1 \text{ m}^2$. Der höhere effektive Wärmeverlustkoeffizient des thermochromen Systems könnte auf die höheren Wärmeverluste im geschalteten Bereich zurückzuführen sein. Die Wärmeverlustrate des Speichers wurde vorab messtechnisch auf $2,2 \text{ W K}^{-1}$ ermittelt und entspricht nahezu dem identifizierten Parameter U_s . Die Wärmekapazität C_s leitet sich vom Speicherinhalt (300 Liter) ab und errechnet sich zu $1,25 \text{ MJ K}^{-1}$, welche durch DF sehr exakt ermittelt werden konnte. Laut Herstellerangaben beträgt das Bereitschaftsvolumen 44 % des Speichervolumens. Durch vertikale Wärmeleitung in der Speicherwandung könnte sich das effektive Bereitschaftsvolumen vergrößern und so zu den erhöhten Werten für f_{Aux} in der Parameteridentifikation führen.

Tabelle 1: Durch DF ermittelte anlagenspezifische Parameter

Parameter	A_c^* m ²	u_c^* W m ⁻² K ⁻¹	U_s W K ⁻¹	C_s MJ K ⁻¹	f_{Aux} -	D_L ¹⁾ -	S_c ²⁾ -
System mit Standard-Kollektoren	2,96 (± 0,045)	10,16 (± 0,432)	2,44 (± 0,179)	1,27 (± 0,014)	0,54 (± 0,011)	0,018 (± 0,004)	0,042 (± 0,012)
System mit thermochromen Kollektoren	2,86 (± 0,058)	10,55 (± 0,522)	2,33 (± 0,180)	1,28 (± 0,014)	0,55 (± 0,012)	0,017 (± 0,004)	0,034 (± 0,015)

¹⁾ $D_L = 0$ entspricht keiner Entmischung der Speicherschichtung während einer Warmwasserzapfung

²⁾ $S_c = 0$ entspricht einem bis zum Speicherboden eingetauchten Solarkreis-Wärmetauscher

Auf Grundlage der Systemparameter kann im Anschluss eine Langzeitprognose des solaren Ertrages oder des konventionellen Nachheizenergiebedarfes für beliebige Standorte und Umgebungsbedingungen durchgeführt werden. Für die Langzeitprognose wurden die in der Norm vordefinierten Randbedingungen herangezogen. Die Temperatur des angeforderten Trinkwarmwassers beträgt 45 °C , die Solltemperatur der elektrischen Nachheizung 60 °C , die Umgebungstemperatur des Speichers 15 °C und der Zapfvolumenstrom konstant $10 \text{ Liter pro Minute}$ bei einer einmaligen abendlichen Zapfung von 100 % der Tageslast. Die Wetterdatensätze der vier Referenzstandorte (Athen, Davos, Stockholm, Würzburg) wurden durch aktuelle Daten aus Meteororm 7 ersetzt (vgl. [20]).

Die Leistungsfähigkeit der untersuchten TWW-Anlagen wird im Folgenden mit dem konventionellen Nachheizenergiebedarf Q_{Aux} bewertet, welcher über das elektrische Heizelement zusätzlich zum solaren Ertrag Q_{Sol} in den Speicher eingebracht werden muss, um den Trinkwarmwasserbedarf Q_{DHW} ganzjährig zu decken. Da ein erhöhter konventioneller Nachheizenergiebedarf bei der Installation thermochromer anstatt Standard-Flachkollektoren zu höheren jährlichen Betriebskosten für den Anlagenbetreiber führen würde, sollte dieser so gering wie möglich ausfallen. Für den Referenzstandort Würzburg ist die Erhöhung von Q_{Aux} stets kleiner als $2,5 \text{ %}$ für tägliche Zapfraten zwischen 50 und 200 Litern (siehe Abbildung 6). Dies entspricht einer Steigerung um 33 kWh a^{-1} bei einer täglichen Zapfung von 200 Litern Warmwasser. Für die drei weiteren Standorte können maximale Erhöhungen von $5,1 \text{ %}$

(Athen), 5,6 % (Davos) und 1,7 % (Stockholm) ermittelt werden.

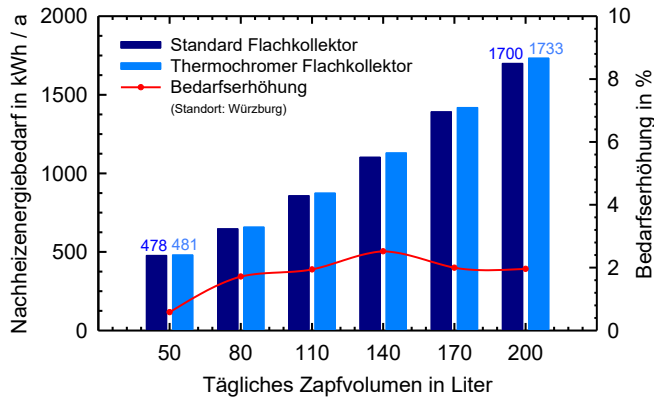


Abb. 6: Konventioneller Nachheizenergiebedarf der Systeme mit thermochromen und Standard-Flachkollektoren am Referenzstandort Würzburg

Der solare Deckungsanteil f_{sol} beschreibt den Anteil am solaren Ertrag in den TWW-Speicher bezogen auf den gesamten Trinkwarmwasserbedarf. Das Standard-System erreicht am Standort Würzburg bei täglichen Zapfraten von 110 Litern einen solaren Deckungsanteil von 47,5 %, welcher bei niedrigeren und höheren Zapfraten zunehmend sinkt. Für die Anlage mit thermochromen Kollektoren sind die solaren Deckungsanteile für tägliche Zapfraten zwischen 50 bis 600 Litern nahezu konstant 1 Prozentpunkt niedriger. Ähnliche Ergebnisse konnten für die weiteren Standorte erzielt werden. Eine detaillierte Darstellung der Leistungsfähigkeit thermochromer Flachkollektoren in einem TWW-System ist [21] zu entnehmen.

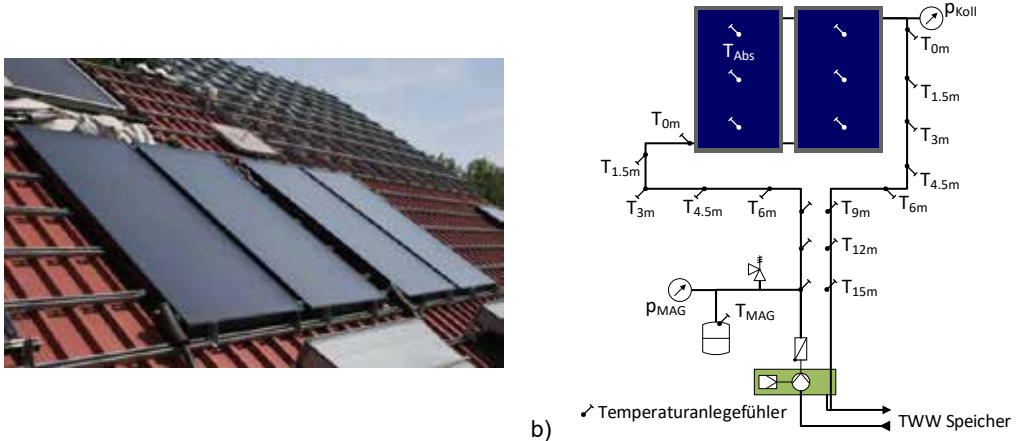
5. Stagnationsuntersuchungen

Das Stagnationsverhalten thermochromer Flachkollektoren wurde in simulativen Vorstudien in [9] detailliert untersucht. Es konnte eine jährliche Reduzierung der Stagnationsdauer (hier: Zeitspanne, in welcher die Absorbentemperatur über 120 °C beträgt) beim Einsatz der neuartigen Absorberbeschichtung von mehr als 70 % gezeigt werden. Laut der Simulationsergebnisse konnte die Stagnationstemperatur unter natürlichen Umgebungsbedingungen auf 145 °C begrenzt werden. Um die Simulationsergebnisse zu bestätigen und das Stagnationsverhalten auch experimentell zu bestimmen, wurden weitere Untersuchungen an den oben beschriebenen TWW-Anlagen durchgeführt und diese kontrolliert in Stagnation betrieben. Die Dampfausbreitung in die Solaranschlussleitungen in Folge der Verdampfung des Wärmeträgerfluides stellt ein maßgebliches Bewertungskriterium der Stagnationsbelastung dar. Diese kann hohe thermische Belastungen am Kollektor und an sensiblen Anlagekomponenten, wie dem Membranausdehnungsgefäß oder der Solarkreispumpe, hervorrufen. Eine vollständige Vermeidung der Dampfbildung durch die Erhöhung des Systemüberdruckes wird detailliert untersucht.

5.1 Experimentalanlagen

Für die Stagnationsuntersuchungen wurden erneut die beiden TWW-Anlagen mit den Spezifikationen aus Kapitel 4 herangezogen und auf dem ISFH-Testdach untersucht. Beide Anlagen sind mit einer 30 m langen Solaranschlussleitung versehen, um die Dampfausbreitung in dieser bestimmen zu können. Hierfür wurden Temperaturanlegefühler (Pt1000) direkt auf dem Edelstahlwellrohr im Abstand von 1,5 m beginnend an den beiden Kollektoranlässen angebracht. Die Temperaturbelastungen im Kollektorfeld werden über mehrere Temperatursensoren direkt auf dem Absorberblech jedes einzelnen Kollektors messtechnisch erfasst. Zusätzlich sind das Membranausdehnungsgefäß (MAG) und die Solarkreispumpe als thermisch sensible Bauteile temperaturüberwacht. Der Systemdruck wird am

Kollektoraustritt an höchster Stelle im Kollektorfeld aufgenommen, um die Stagnationsdynamik und eventuelle Druckschläge durch plötzliche Verdampfung zu untersuchen. Alle Sensoren und deren Position im Solarkreislauf sind im hydraulischen Schema in Abbildung 7.b ersichtlich.



a)

b)

Abb. 7: Untersuchte Trinkwarmwasseranlagen auf dem ISFH-Testdach (a) und hydraulisches Schalt- und Sensorikschema (b)

Die Stagnationsuntersuchungen des Jahres 2016 wurden synchron und unter identischen Umgebungsbedingungen durchgeführt, indem beide Anlagen in kontrollierten Stagnationszuständen betrieben wurden. Es konnten mehrere Stagnationsereignisse an wolkenlosen Sommertagen detektiert werden. Die Solaranlagen wurden dabei auf drei unterschiedlichen Systemüberdrücken betrieben (2,0 bar_ü, 2,2 bar_ü, 3,2 bar_ü) und zusätzlich eine sogenannte „Mittagsstagnation“ hervorgerufen, bei welcher die Solarkreispumpe gegen 12 Uhr mittags manuell deaktiviert wurde.

5.2 Auswertung repräsentativer Stagnationstage

Die höchsten Absorberrtemperaturen können auf 2/3 der Kollektorlänge gemessen werden. In Abb. 8.a sind diese Temperaturen für das thermochrome und Standard-System für unterschiedliche Systemüberdrücke dargestellt. Die Stagnationstemperatur, welche bei höchster Einstrahlung zwischen 12 und 13 Uhr erreicht wird, ist unabhängig vom gewählten Systemdruck. Aufgrund der erhöhten Wärmeverluste im geschalteten Bereich kann die Stagnationstemperatur des thermochromen Kollektors unter natürlichen Umgebungsbedingungen ($E_G = 960 \text{ W m}^{-2}$, $T_{KU} = 31 \text{ °C}$, $v = 1,9 \text{ m s}^{-1}$) auf 145 °C begrenzt werden. Dies entspricht einer Reduktion um 30 K im Vergleich zum Standard-Kollektor und bestätigt somit die bisherigen Erfahrungen.

Steigt die Absorberrtemperatur an einer Stelle im Kollektorfeld auf die Sattdampf-temperatur der eingesetzten Wärmeträgerflüssigkeit (TYFOCOR LS) auf dem derzeit eingestellten Systemdruck an, beginnt die Flüssigkeit zu siedeln bzw. zu verdampfen. Die Sattdampf-temperaturen für die drei untersuchten Systemüberdrücke beträgt 139 °C (2,0 bar_ü), 141 °C (2,2 bar_ü) und 150 °C (3,2 bar_ü). Mit zunehmendem Dampfvolumen im Kollektorfeld dringt dieser bis in die Solaranschlussleitungen vor. Die so entstehende Dampffront kann durch die Temperaturanlegefühler auf dem Wellrohr detektiert werden, indem die gemessene Rohrtemperatur mit der aktuellen Sattdampf-temperatur verglichen wird. Die Dampfreichweite erstreckt sich somit mindestens bis zu dem Anlegefühler, bei welchem eine Temperatur größer oder gleich der Sattdampf-temperatur erreicht wird. Der Beginn der Verdampfung ist mit einem enormen Anstieg der Kollektoraustrittstemperatur verbunden (siehe Abb. 8.b), da der Kollektorinhalt zunächst über die Anschlüsse leer gedrückt wird und im weiteren Verlauf sich der Dampf in die Anschlussleitung ausbreitet. Die Restflüssigkeitsmenge im Kollektorfeld verdampft während der Stagnationszeit allmählich, sodass mitunter überhitzter Dampf in die Rohrleitungen vordringen

kann. Fällt die Kollektoraustrittstemperatur unter die Sattdampf­temperatur, ist der Dampf in den Rohr­leitungen vollständig kondensiert und die Dampf­front hat sich bis in den Kollektor zurückgezogen. Die Wiederbefüllung des Kollektorfeldes beginnt und die Anschlussleitungen kühlen sich stetig aus.

Der Zeitraum zwischen der ersten Verdampfung und der Zeit, an welcher das gesamte System wieder vollständig dampffrei ist, wird hier als Stagnationsdauer bezeichnet. Diese reduziert sich bei einem Systemüberdruck von 2,2 bar_a von 4:34 h für das Referenzsystem auf nunmehr 1:51 h beim Einsatz thermochromer Flachkollektoren. Dies entspricht einer Verkürzung um rund 60 %. Mit 2,0 bar_a kann die Stagnationsdauer halbiert werden. Die Dampf­bildung kann mit einem Systemüberdruck von 3,2 bar_a (siehe Abb. 8.b) vollständig vermieden werden. Da sich kein Dampf in die Anschlussleitungen ausbreitet, wird die thermische Belastung des Solarkreislaufes signifikant reduziert. Die maximalen Kollektoraus­trittstemperaturen können von 155 °C im Standard-System auf rund 100 °C begrenzt werden.

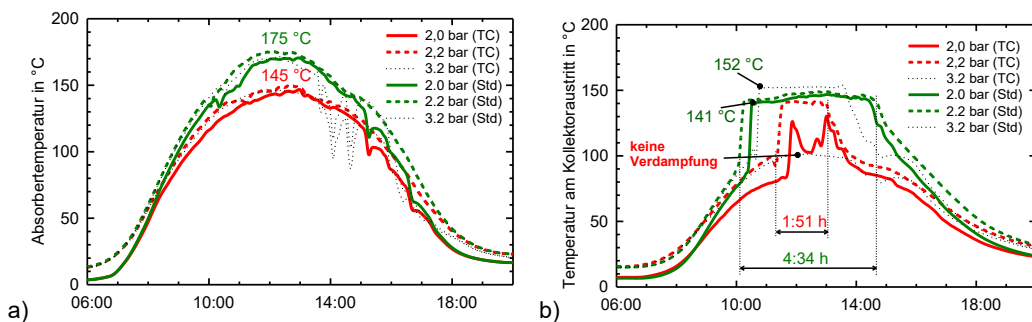


Abb. 8: Gemessene Absorb­ertemperatur des thermochromen (TC) und Standard- (Std) Kollektors auf 2/3 der Kollektorlänge (a) und Kollektoraus­trittstemperaturen (b) für unterschiedliche Systemüberdrücke auf Höhe des Kollektoraus­trittes

Aufgrund der unzureichenden Datengrundlage der bisherigen Stagnations­untersuchungen, mit nur wenigen aussagekräftigen Stagnationsereignissen, konnte das Stagnations­verhalten beider TWW-Anlagen noch nicht im Detail dargelegt werden. Die Messungen werden fortgeführt und das Kollektorfeld verdoppelt. Zur Untersuchung der Stagnations­dynamik sind hochfrequente Druckmessungen geplant. Zur Bestimmung des gesamten Dampf­volumens im Kollektor­kreislauf wurden beide Membranausdehnungs­gefäße kalibriert. Es genügt die Messung der Fluideintritts­temperatur und des System­druckes am MAG, um das Dampf­volumen abzuschätzen. Diese Methode wurde erstmals durch [22] vorgeschlagen. Mit dem Dampf­volumen und der Abschätzung der Dampf­reichweite über Temperatur­an­lege­fühler kann die Rest­flüssig­keits­menge im Kollektor­feld errechnet und dadurch das Entleerungsverhalten bewertet werden.

6. Zusammenfassung

Thermochrome Absorber­beschichtungen weisen einen stark temperatur­abhängigen Emissions­grad für lang­wellige Wärmestrahlung auf. Das Schicht­system, bestehend aus Vanadium­dioxid, besitzt im Betriebs­bereich derzeit einen Emissions­grad von $\epsilon_{20^\circ\text{C}} \approx 5\%$ auf, welcher sich im geschalteten Zustand auf bis zu $\epsilon_{100^\circ\text{C}} \approx 35\%$ erhöht. Aufgrund eines niedrigeren Absorptions­grades ist der Konversions­faktor des thermochromen Flach­kollektors um drei Prozent­punkte geringer als der eines hoch­selektiven Standard-Absorbers. Trotz der leicht verringerten optischen Eigenschaften der thermochromen Beschichtung konnte gezeigt werden, dass diese die eigentliche System­leistung nicht entscheidend beeinflussen. Die Beschichtung wird in einem aktuellen Forschungs­vorhaben stetig weiter­entwickelt. Ziel ist die Verbesserung der optischen Eigenschaften und die Erweiterung des Betriebs­bereiches. Dazu sollen der solare Absorptions­grad auf Werte marktüblicher hoch­selektiver Beschichtungen ($\alpha > 95\%$), die Emissivität im geschalteten Bereich auf bis zu 60 % sowie die

Schalttemperatur T_s auf 80 °C erhöht werden. Dadurch können eine weitere Leistungssteigerung im Betriebsbereich des Kollektors und eine zusätzliche Reduzierung der Stagnationstemperatur erwartet werden.

Die Leistungsfähigkeit von solarthermischen Flachkollektoren mit thermochromer Absorberbeschichtung konnte in dynamischen Systemtests nach ISO 9459-5 experimentell bestimmt werden. Es bestätigte sich die hohe Kollektor- und Systemleistung in einer Trinkwarmwasseranlage im Vergleich zu einem System mit Standard-Kollektoren. Der konventionelle Nachheizenergiebedarf erhöht sich bei der Installation thermochromer anstatt Standard-Kollektoren um weniger als 2,5 % für tägliche Zapfraten von 50 bis 600 Litern am Referenzstandort Würzburg. Für den deutlich wärmeren Standort Athen erhöht sich der Nachheizenergiebedarf um nicht mehr als 5,1 %. Der solare Deckungsanteil der beiden Systeme unterscheidet sich mit einem Prozentpunkt nur geringfügig voneinander. Die Erhöhung des konventionellen Nachheizenergiebedarfes und der marginale Unterschied im solaren Deckungsanteil zeigen, dass die leicht niedrigeren optischen Eigenschaften der thermochromen Beschichtung die Systemleistung stärker beeinflussen, als die erhöhten Wärmeverluste im geschalteten Zustand.

Das Stagnationsverhalten wurde detailliert in einem Trinkwarmwassersystem mit thermochromen und Standard-Kollektoren untersucht. Die Stagnationstemperatur thermochromer Kollektoren konnte unter natürlichen Umgebungsbedingungen auf 145 °C begrenzt werden, was einer Reduzierung um 30 K gegenüber einem Standard-Kollektor entspricht. Die Stagnationsdauer – die Zeitspanne, in welcher sich Dampf im System befindet – konnte mit thermochromen Flachkollektoren unter üblichen Systemdrücken an mehreren repräsentativen Tagen um 60 % reduziert werden. Die vollständige Vermeidung der Dampfbildung ist mit einer leichten Erhöhung des Systemdruckes möglich, woraus sich weitere Möglichkeiten zur Senkung der Systemkosten ergeben. Es wird eine deutliche Reduzierung der Installations- und Wartungskosten oder der Einsatz kostengünstigerer (nicht temperaturbeständiger) Solarkreislaufmaterialien durch die Vermeidung der Dampfbildung und der geringeren thermischen Belastungen im Solarkreis erwartet.

7. Danksagung

Das dieser Veröffentlichung zugrunde liegende Verbundprojekt „Prozesstechnik, Qualitätssicherung und Systemlösungen für thermochrome Absorber in solarthermischen Kollektoren (ProTASK)“ wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter den Förderkennzeichen 0325858 A und 0325858 B aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages gefördert. Die Arbeiten erfolgen in Kooperation mit Viessmann Werke GmbH & Co. KG.

Die Autoren danken für die Unterstützung. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt ausschließlich bei den Autoren.

8. Literaturverzeichnis

- [1] Scheuren, J.: Reduction of Stagnation Load of Large-Scale Collector Arrays. Proceedings Eurosun 2006, International Solar Energy Society (ISES), Freiburg.
- [2] Hausner, R., Fink, C., Wagner, W., Riva, R., Hillerns, F.: Entwicklung von thermischen Solarsystemen mit unproblematischem Stagnationsverhalten. Berichte aus Energie- und Umweltforschung, 9/2003, Wien (2003).
- [3] Harrison, S., Cruickshank, C. A.: A review of strategies for the control of high temperature stagnation in solar collectors and systems. Energy Procedia 30 (2012), pp. 793 – 804.
- [4] Frank, E., Mauthner, F., Fischer, S.: Overheating prevention and stagnation handling in solar process heat applications. IEA SHC Task 49, Technical Report A.1.2 (2015).
- [5] Föste, S., Schiebler, B., Giovannetti, F., Rockendorf, G., Jack, S.: Butane heat pipes for

- stagnations temperature reduction of solar thermal collectors. *Energy Procedia* 91 (2016), pp. 35 – 41.
- [6] Schiebler, B., Weiland, F., Giovannetti, F.: Experimentelle Systembewertung von Vakuumröhrenkollektoren mit Wärmerohren zur Begrenzung der Stagnationstemperatur in einer Trinkwarmwasseranlage. 27. OTTI Symposium Thermische Solarenergie, Bad Staffelstein (Mai 2017).
- [7] Botpaev, R., Louvet, Y., Perers, B., Furbo, S., Vajen, K.: Drainback solar thermal systems: A review. *Solar Energy* 128 (2016), pp. 41 – 60.
- [8] Brunold, S., Vogelsanger, P., Marty, H.: Beurteilung der Möglichkeiten von thermochromen Schichten als potenzielle Überhitzungsschutzmaßnahmen für solarthermische Kollektoren. Institut für Solartechnik SPF, Rapperswil (2007).
- [9] Föste, S., Pazidis, A., Reineke-Koch, R., Hafner, B., Merics, D., Delord, C.: Flat plate collectors with thermochromic absorber coatings to reduce loads during stagnation. *Energy Procedia* 91 (2016), pp. 42 – 48.
- [10] Drude, P.: Zur Elektronentheorie der Metalle, *Annalen der Physik* 306 (3) (1900), pp. 566-613.
- [11] Morin, F. J.: Oxides which show a metal-to-insulator transition at the Néel temperature, *Phys. Rev. Letter* 3, 34, (1959).
- [12] Marty, H., Brunold, S., Vogelsanger, P.: Überhitzungsschutz mit thermochromen Solarabsorberschichten, Tagungsband 18. Symposium „Thermische Solarenergie“, Bad Staffelstein, Deutschland, 23. –25. April 2008, herausgegeben von OTTI e.V., Regensburg, 2008, pp. 80–85.
- [13] Granqvist, C. G.: *Appl. Phys. A* 52 (1991), pp. 83-93.
- [14] Pazidis, A., Föste, S., Reineke-Koch, S., Hafner, B., Merics, D.: Entwicklung eines Absorbers für thermische Solarkollektoren mit Stagnationstemperaturen unter 140 °C und hoher Effizienz. Abschlussbericht zum Vorhaben „TASK“, FKZ 0325988A und B, Hameln / Allendorf (Eder) (September 2015).
- [15] ISO 9806: Solar energy – Solar thermal collectors – Test methods. Beuth Verlag, Berlin (2013).
- [16] ISO 9459-5: System performance characterization by means of whole-system tests and computer simulation. Beuth Verlag, Berlin (2007).
- [17] Visser, H., Pauschinger, T.: Dynamic Testing of Active Solar Heating Systems. IEA SHC Task 14, Final report (1997).
- [18] Spirkl, W.: Dynamic System Testing Program Manual Version 2.7. InSitu Scientific Software, Germering (1997).
- [19] Spirkl, W., Muschaweck, J.: General model for testing solar domestic hot water systems. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 28, pp. 93 – 102, North-Holland (1992).
- [20] *Meteonorm 7: Handbook, Parts I and II.* Bern, www.meteotest.com (2012).
- [21] Müller, S., Reineke-Koch, R., Giovannetti, F., Hafner, B.: Experimentelle Systembewertung von thermochromen Flachkollektoren zur Begrenzung der Stagnationstemperatur in einer Trinkwarmwasseranlage. 27. OTTI Symposium Thermische Solarenergie, Bad Staffelstein (Mai 2017).
- [22] Scheuren, J.: Untersuchung zum Stagnationsverhalten solarthermischer Kollektorfelder. Kassel University Press (2008).