

Mathematische Modellierung verschiedener Bauteiltemperaturen von Flachkollektoren

Philipp Kofler, Beate Vetter, Stephan Fischer, Harald Drück

Universität Stuttgart, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW)

Forschungs- und Testzentrum für Solaranlagen (TZS)

Pfaffenwaldring 6, 70550 Stuttgart

Tel.: +49 (0) 711 / 685-63577, Fax: +49 (0) 711 / 685-63242

E-Mail: kofler@itw.uni-stuttgart.de

Internet: www.itw.uni-stuttgart.de

1. Einleitung

Im Forschungsprojekt „Entwicklung beschleunigter Alterungstestverfahren für solarthermische Kollektoren und deren Komponenten“, mit dem Akronym *SpeedColl*, werden mehrere Flachkollektoren verschiedener Bauart an sechs unterschiedlichen Standorten über drei Jahre exponiert. Ein Großteil dieser Sonnenkollektoren wird während der Exposition nicht mit einem Wärmeträger durchströmt und folglich nicht gekühlt. Bei vorhandener Sonneneinstrahlung befinden sich diese Kollektoren in Stagnation und die thermische Belastung ist daher maximal. Die sechs Expositionsstandorte sind weltweit verteilt und befinden sich in unterschiedlichen Klimazonen. Während der Exposition werden die Umgebungsbedingungen, wie hemisphärische und UV Bestrahlungsstärke, Umgebungstemperatur und Windgeschwindigkeit, sowie die Temperaturen einiger Kollektorbauteile messtechnisch erfasst. Bei den erfassten Bauteiltemperaturen handelt es sich um die Absorbtemperatur und um die Temperatur in der Klebefuge zwischen Rahmen und transparenter Abdeckung sowie zwischen Rückwand und Rahmen. Abbildung 1 veranschaulicht die Stellen, an denen die Temperatur in der Klebefuge zwischen Glasabdeckung und Rahmen (zwei Messstellen) bzw. zwischen Rahmen und Rückwand (eine Messstelle) gemessen wird. Die Absorbtemperatur wird in der Mitte des Absorbers, auf zwei Drittel der Höhe gemessen. Eine detaillierte Beschreibung der verschiedenen Messstellen, der eingesetzten Messtechnik und weiterführende Informationen zu den Expositionsstandorten sind in /1/ enthalten.

Die beschleunigten Alterungsprüfverfahren für Sonnenkollektoren, die im Rahmen des laufenden Projekts *SpeedColl* entwickelt werden, berücksichtigen klima- und betriebsabhängige Randbedingungen. Hierfür sind die aus der Exposition gewonnenen Daten allerdings nicht ausreichend. Für die Ermittlung betriebs- und standortabhängiger Belastungsprofile ist es zusätzlich erforderlich Absorber- und

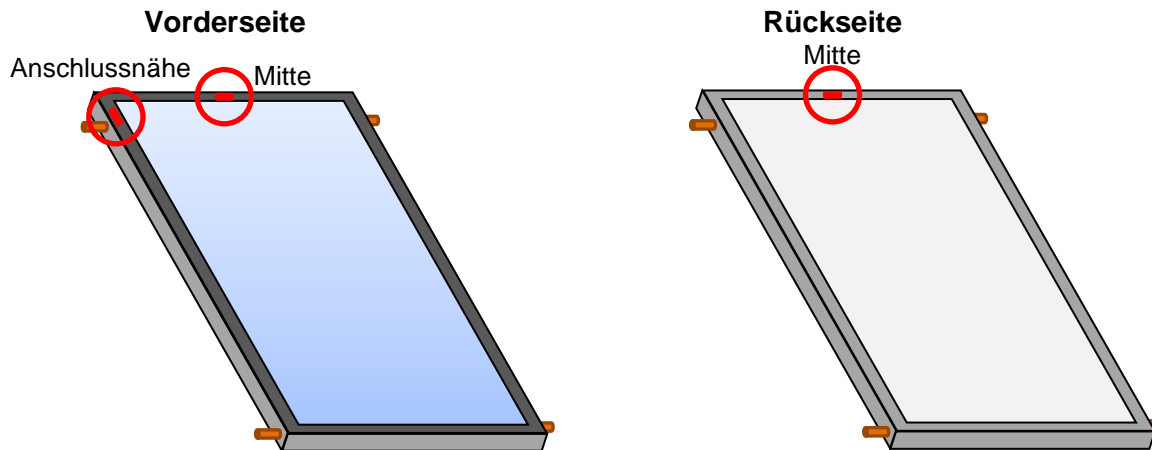


Abbildung 1: Positionen der Temperatursensoren in den Klebefugen der Sonnenkollektoren; links: Ansicht Vorderseite; rechts: Ansicht Rückseite

Klebefugentemperaturen für beliebige Wetterdaten und Betriebsbedingungen, d.h. mit und ohne Durchströmung, berechnen zu können. Aus diesem Grund wurden mathematische Modelle zur Berechnung der verschiedenen Bauteiltemperaturen erstellt und entsprechende Parameter für die unterschiedlichen im Projekt vorhandenen Kollektorbauarten ermittelt. Für die Modellierung wird unterschieden ob die Sonnenkollektoren durchströmt werden oder nicht. Für durchströmte Sonnenkollektoren wurden am Forschungs- und Testzentrum für Solaranlagen (TZS) des Instituts für Thermodynamik und Wärmetechnik Messungen durchgeführt und der Zusammenhang zwischen Fluid- und Absorbertemperatur untersucht. Zur Modellierung der Bauteiltemperaturen im nicht durchströmten, d.h. ungekühlten Fall wurden Messdaten aus der in *SpeedColl* durchgeführten Exposition analysiert und zur Parameteridentifikation und Modellvalidierung verwendet.

2. Mathematische Modellierung der Absorbertemperatur ohne Durchströmung des Sonnenkollektors

Die mathematische Modellierung der Absorbertemperatur für den nicht durchströmten Sonnenkollektor wurde in Anlehnung an das Kollektormodell in ISO EN 9806:2013, Abschnitt 25.1.4 /2/ durchgeführt und wird durch Gleichung (1) beschrieben.

$$c_{abs} \frac{d\vartheta_{abs}}{dt} = C_1 \cdot G \cdot K_{b,abs}(\theta) - C_2(\beta) \cdot (\vartheta_{abs} - \vartheta_{amb}) - C_3 \cdot (\vartheta_{abs} - \vartheta_{amb})^2 \quad (1)$$

Mit:

G	Hemisphärische Bestrahlungsstärke in Kollektorebene	[W/m ²]
$K_{b,abs}(\theta)$	Einfallswinkelkorrekturvermögen der hemisphärischen Bestrahlungsstärke	[-]
C_1	Modellparameter	[-]
$C_2(\beta)$	Modellparameter	[W/(m ² K)]
C_3	Modellparameter	[W/(m ² K ²)]
c_{abs}	flächenspezifische Wärmekapazität des Absorbers	[J/(m ² K)]
t	Zeit	[s]
ϑ_{amb}	Umgebungstemperatur	[°C]
ϑ_{abs}	Absorbertemperatur	[°C]
β	Neigungswinkel der Sonnenkollektoren	[°]
θ	Einfallswinkel der Sonnenstrahlung in die Kollektorebene	[°]

Das Einfallswinkelkorrekturvermögen $K_{b,abs}(\theta)$ wird mit dem modifizierten b_0 -Ansatz nach Gleichung (2) /3/ beschrieben.

$$K_{b,abs}(\theta) = \begin{cases} 0^\circ \leq \theta \leq 60^\circ & 1 - b_{0,abs} \cdot \left(\frac{1}{\cos\theta} - 1 \right) \\ 60^\circ \leq \theta \leq 90^\circ & (1 - b_{0,abs}) \cdot \left(1 - \frac{\theta - 60}{30} \right) \\ 90^\circ \leq \theta & 0 \end{cases} \quad (2)$$

Mit:

$b_{0,abs}$	Modellparameter	[-]
-------------	-----------------	-----

Die Datenanalyse der Messdaten aus der Exposition hat gezeigt, dass die Sonnenkollektoren bei vergleichbaren Umgebungsbedingungen am Standort Stuttgart höhere Absorbertemperaturen erreichen als am Standort Kochi, der sich im Süden Indiens befindet und an dem ein tropisches Klima herrscht. Diese Beobachtung wird primär auf den unterschiedlichen Neigungswinkel β der Sonnenkollektoren zurückgeführt, welcher am Expositionsstandort Stuttgart (Deutschland) 45° beträgt, während am Expositionsstandort Kochi (Indien) aufgrund der Nähe zum Äquator nur 25° gewählt wurden um eine höhere Jahreseinstrahlungssumme in der Kollektorebene zu erreichen. Der Unterschied im Neigungswinkel resultiert allerdings in unterschiedlichen Konvektionsströmungen zwischen Glasscheibe und Absorber und auf der Außenseite der Glasscheibe sowie

in einem veränderten Strahlungsaustausch zwischen Glasscheibe und Umgebung und dadurch in höheren thermischen Verlusten bei kleineren Neigungswinkeln. Aus diesem Grund wurde der Modellparameter $C_2(\beta)$ als Funktion des Neigungswinkels der Sonnenkollektoren modelliert. Die Berechnung des Modellparameters $C_2(\beta)$ erfolgt nach Gleichung (3). Abbildung 2 zeigt prinzipiell den linearen Zusammenhang zwischen den beiden Größen C_2 und β .

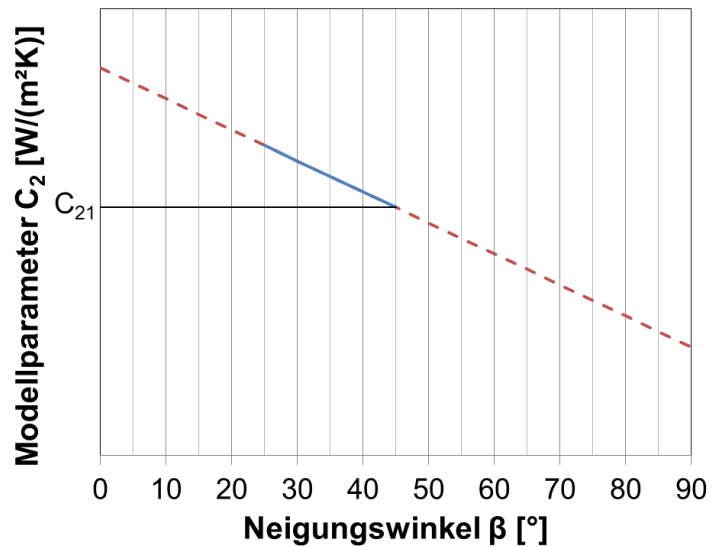


Abbildung 2: Zusammenhang zwischen Modellparameter C_2 und Neigungswinkel β

$$C_2(\beta) = C_{21} \cdot \left(1 + \frac{45 - \beta}{C_{22}}\right) \quad (3)$$

Mit:

C_{21}	Modellparameter	$[W/(m^2K)]$
C_{22}	Modellparameter	$[-]$

Zur Bestimmung der Modellparameter in den Gleichungen (1), (2) und (3) wurden aus den Messdaten der Expositionsstandorte Stuttgart und Kochi je drei Tage ausgewählt, welche zueinander deutlich unterschiedliche Verläufe von hemisphärischer Bestrahlungsstärke und Umgebungstemperatur aufweisen und folglich unterschiedliche Verläufe der Absorbtemperatur der exponierten Sonnenkollektoren. Anschließend wurden die Modellparameter mittels Parameteridentifikation für die fünf unterschiedlichen, im Projekt *SpeedColl* vertretenen Flachkollektorbauformen bestimmt. Am Beispiel eines Sonnenkollektors wird nachfolgend die Güte des erstellten Modells und der bauartspezifischen Modellparameter diskutiert. Abbildung 3 zeigt die Verläufe der hemisphärischen Bestrahlungsstärke in der Kollektorebene und der Umgebungstemperatur an den für die Parameteridentifikation ausgewählten Tagen. Abbildung 4 zeigt den gemessenen und den mittels Gleichung (1) berechneten Verlauf der Absorbtemperatur. Ebenfalls dargestellt ist die Abweichung zwischen den gemessenen und modellierten

bzw. berechneten Temperaturen. Tabelle 1 listet die, für diese Kollektorbauform, ermittelten Modellparameter auf.

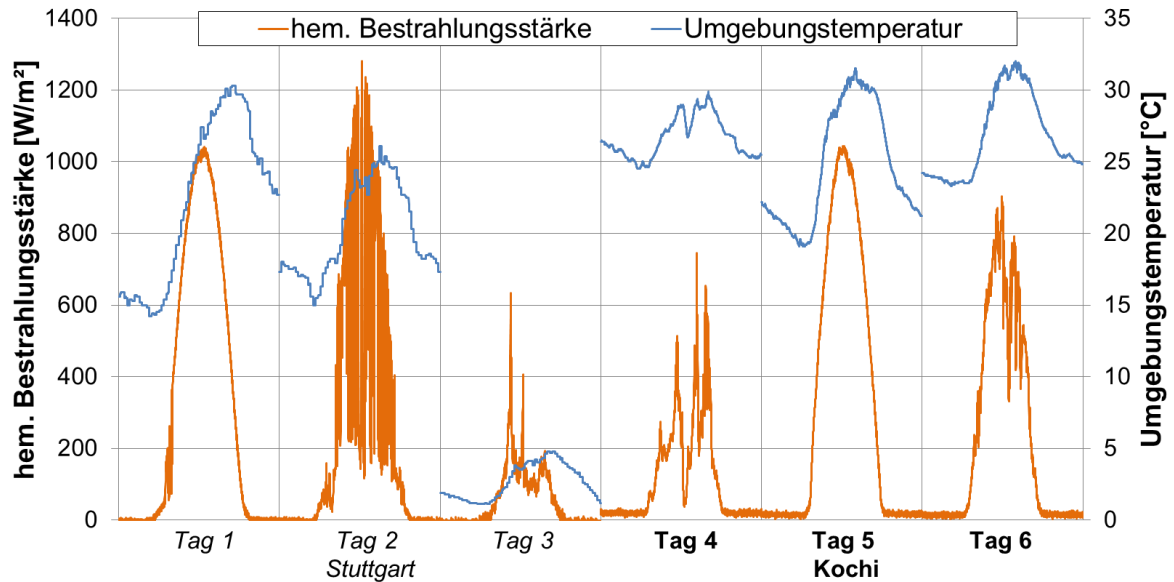


Abbildung 3: Verlauf der hemisphärischen Bestrahlungsstärke und der Umgebungstemperatur an den zur Parameteridentifikation ausgewählten Tagen; Tag 1 bis Tag 3 vom Standort Stuttgart; Tag 4 bis Tag 6 vom Standort Kochi

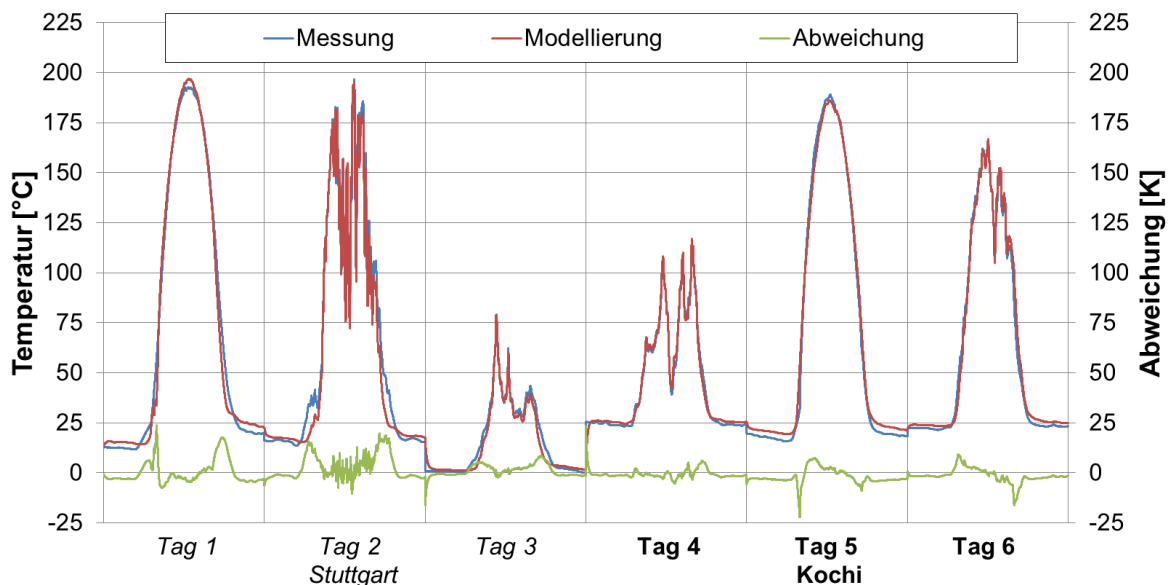


Abbildung 4: Verlauf der gemessenen und modellierten Absorbertemperatur eines ohne Durchströmung exponierten Sonnenkollektors und Verlauf der Abweichung zwischen den beiden Größen

Tabelle 1: Modellparameter zur Berechnung der in Abbildung 4 dargestellten Absorbertemperaturen ohne Durchströmung

$b_{0,abs}$	0,153	C_1	0,132	C_{22}	90,5
C_{abs}	432 J/(m ² K)	C_{21}	0,481 W/(m ² K)	C_3	0,0018 W/(m ² K ²)

Abbildung 4 zeigt, dass mit Hilfe des entwickelten Modells und der für die Bauart des Flachkollektors spezifischen Parameter der Verlauf der Absorbertemperatur sehr gut nachgebildet werden kann. Die Abweichung zwischen Messwert und Modell bewegt sich über die sechs abgebildeten Tage in einem Bereich von nur ± 25 K. Besonders während der Mittagsstunden, d.h. bei relativ hohen Absorbertemperaturen, bildet das Modell die Messwerte gut ab. Nur „Tag 2“ weist aufgrund der wechselhaften Einstrahlungsbedingungen vergleichsweise etwas höhere Abweichungen auf. Da es im Rahmen des Forschungsprojekts *SpeedColl* wichtig ist die maximalen thermischen Belastungen der Absorber mit hoher Genauigkeit abzubilden, erweist sich das entwickelte mathematische Modell jedoch als geeignet. Die größten Abweichungen treten während Sonnenaufgang und -untergang auf. In den übrigen Tag- und Nachtstunden ist die Abweichung zwischen Modell und Messung wiederum mit ca. ± 10 K gering.

2.1 Validierungen des mathematischen Modells der Absorbertemperatur

Zur Validierung des erstellten Modells zur Berechnung der Absorbertemperatur ohne Durchströmung wurden die ermittelten Parametersätze auf Messdaten des Expositionsstandorts Sede Boqer (Negev Wüste, Israel) angewendet. Diese Messdaten wurden dem ITW/TZS vom Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme Freiburg (ISE) zur Verfügung gestellt, welches den Expositionsstandort im Rahmen des laufenden Projekts *SpeedColl* betreut. In Sede Boqer werden die Sonnenkollektoren unter einem Anstellwinkel β von 23° exponiert. Damit wird das gewählte Modell hinsichtlich der Übertragbarkeit auf beliebige Standorte überprüft. Abbildung 5 zeigt für drei Tage den gemessenen und modellierten Verlauf der Absorbertemperatur eines ausgewählten Sonnenkollektors.

Es zeigt sich, dass die Berechnung der Absorbertemperatur eines nicht durchströmten Sonnenkollektors mit dem erstellten Modell und den aus Messdaten von Stuttgart und Kochi bestimmten Modellparametern auch eine sehr gute Übereinstimmung mit den in Sede Boqer gemessenen Absorbertemperaturen liefert. Die Abweichung zwischen Messung und Modell bewegt sich im Laufe der drei ausgewählten Tage in einem Bereich von ± 15 K. Die Genauigkeit der berechneten maximalen Absorbertemperaturen ist auch hier größtenteils höher. Die größten Abweichungen treten auch hier im Bereich des Sonnenaufgangs und -untergangs auf. Sie sind darauf zurück zu führen, dass das Modell das Verhalten der Sonnenkollektoren bei Einfallswinkeln der Sonnenstrahlung zwischen 70° und 90°

nicht optimal abbildet. Am „Tag 3“ treten in den Nachtstunden darüber hinaus größere Abweichungen auf als an den restlichen beiden Tagen. Die berechneten Temperaturen liegen dabei über den gemessenen. Dies ist auf den thermischen Strahlungsaustausch zwischen Sonnenkollektor und Himmel in wolkenlosen Nächten zurückzuführen, an denen eine Abkühlung der Absorber unter die Umgebungstemperatur erfolgt. Dieses Phänomen wird von den Modellen nicht abgebildet. Da das Augenmerk bei der hier vorgestellten Modellierung auf eine gute Abbildung der maximalen thermischen Belastung der Absorber liegt, sind derartige Abweichungen in den Nachtstunden allerdings von untergeordneter Bedeutung.

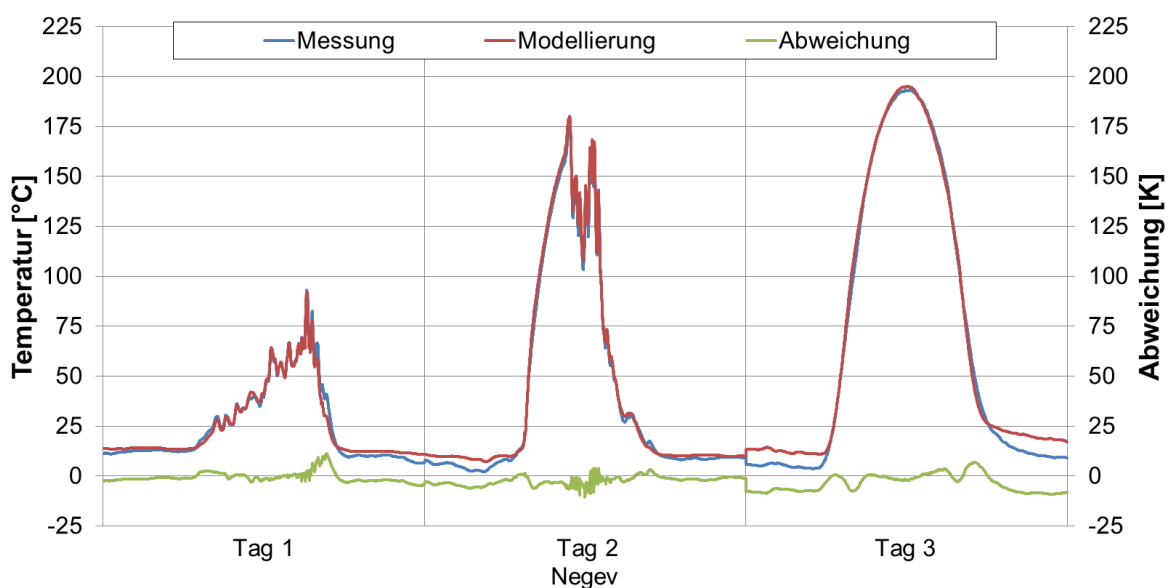


Abbildung 5: Verlauf der gemessenen und modellierten Absorbertemperatur eines ohne Durchströmung exponierten Sonnenkollektors am Standort Sede Boqer (Negev Wüste, Israel) und Verlauf der Abweichung zwischen den beiden Größen

Eine weitere Validierung des Modells erfolgte anhand von Messdaten des Expositionsstandorts Stuttgart. Dafür wurden aus den gemessenen Wetterdaten eines gesamten Jahres die entsprechenden Absorbertemperaturen berechnet. Indem die Häufigkeitsverteilung der berechneten Absorbertemperaturen mit der gemessenen Verteilung verglichen wird, kann die Güte des erstellten Modells in Verbindung mit den bestimmten Modellparametern bewertet werden. Abbildung 6 zeigt das Ergebnis dieser Validierung. Abgebildet sind die Auftrittshäufigkeit der gemessenen und modellierten Absorbertemperatur und die Abweichung zwischen der Häufigkeitsverteilung beider Größen. Für diese Validierung wurden Messdaten aus dem Zeitraum vom 02.05.2013 bis 01.05.2014 herangezogen.

Die Validierung anhand der Messdaten eines kompletten Jahres zeigt, dass die Absorbertemperaturen auch über einen längeren Zeitraum gut modelliert werden können. Die Häufigkeit bzw. Zeitdauer der Abweichung zwischen gemessenen und berechneten Absorbertemperaturen über 40 °C liegt innerhalb ± 50 h pro Jahr. Die Abweichungen steigen für niedrigere Temperaturbereiche aufgrund der bereits erwähnten Grenzen des Modells in der Abbildung der nächtlichen Unterkühlung der Absorber durch Wärmeabstrahlung an die Umgebung und aufgrund des Verhaltens während Sonnenaufgang bzw. -untergang. Die für eine Alterung relevanten hohen Temperaturen werden jedoch in ihrer Häufigkeit und Betrag sehr genau abgebildet.

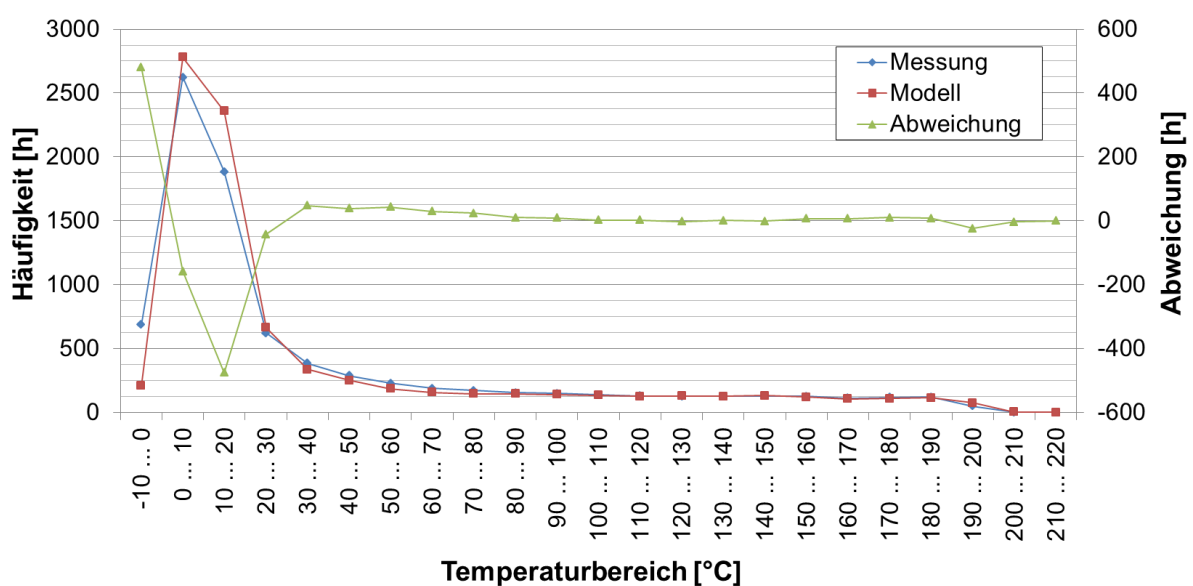


Abbildung 6: Häufigkeitsverteilung der gemessenen und modellierten Absorbertemperatur eines ohne Durchströmung exponierten Sonnenkollektors am Standort Stuttgart im Laufe eines gesamten Jahres und Zeitdauer der jeweiligen Abweichungen zwischen den beiden Größen

Entsprechend der geschilderten Vorgehensweise wurde für jede der insgesamt fünf im Projekt *SpeedColl* untersuchten Kollektorbauarten ein individueller Parametersatz ermittelt und eine Validierung durchgeführt. Diese lieferte für alle Kollektorbauarten vergleichbar gute Ergebnisse. Das vorgestellte mathematische Modell eignet sich somit sehr gut für die Ermittlung der thermischen Belastung von Absorbern in nicht durchströmten Sonnenkollektoren.

3. Modellierung der Absorbtemperatur von durchströmten Sonnenkollektoren

Die im vorangegangenen Kapitel vorgestellte mathematische Modellierung der Absorbtemperatur ermöglicht es die thermische Belastung der Absorber für die im Projekt *SpeedColl* exponierten Kollektorbauformen während der Stagnation, d.h. für den Fall ohne Durchströmung, zu berechnen. Diese Art der Exposition stellt die maximale thermische Belastung der Sonnenkollektoren dar und ist für die Untersuchung der Alterung dieser Produkte von Interesse. Allerdings spiegelt diese Art der Exposition nicht die Bedingungen und Belastungen wider, denen Sonnenkollektoren während des Betriebs in solarthermischen Anlagen ausgesetzt sind. Durch das Abführen eines Nutzwärmestroms werden die Absorber bzw. die Sonnenkollektoren im Betrieb gekühlt. Die thermische Belastung der Sonnenkollektoren wird somit neben der Sonneneinstrahlung und Umgebungstemperatur, maßgeblich von der Temperatur des eintretenden Fluids und dessen Massenstrom beeinflusst. Diese Randbedingungen sind u.a. vom jeweiligen solarthermischen System abhängig. Dies führt schließlich dazu, dass beispielsweise die Häufigkeitsverteilung der Absorbtemperatur sich deutlich von jener unterscheiden kann, die in Abbildung 6 für einen Sonnenkollektor ohne Durchströmung dargestellt wurde.

Derartige, vom Anlagentyp abhängige Randbedingungen sind für die Alterung von Sonnenkollektoren im Betrieb entsprechend von Bedeutung und werden bei der Entwicklung beschleunigter Alterungsprüfungen im Forschungsprojekt *SpeedColl* berücksichtigt. Für die im Projekt *SpeedColl* vertretenen Kollektorbauformen wurde deshalb der Zusammenhang zwischen Fluid- und Absorbtemperatur im dynamischen Sonnensimulator des ITW/TZS messtechnisch untersucht. Dabei wurden die Sonnenkollektoren einer künstlichen Bestrahlung ausgesetzt und mit Wasser als Wärmeträgermedium durchströmt. Durch Variation der Eintrittstemperatur wurden unterschiedliche Betriebspunkte eingestellt. Neben der Absorbtemperatur wurde dabei auch die Ein- und Austrittstemperatur, die Bestrahlungsstärke in der Kollektorebene, die Umgebungstemperatur und die Windgeschwindigkeit in der Kollektorebene gemessen. Die Absorbtemperatur wurde an derselben Stelle gemessen wie dies auch an den ohne Durchströmung exponierten Sonnenkollektoren geschieht. Für die Untersuchung wurde der Massenstrom nicht variiert. Er betrug während der gesamten Messreihe etwa $72 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{h})$. Aus den gemessenen Ein- und Austrittstemperaturen wurde die mittlere Fluidtemperatur als arithmetischer Mittelwert errechnet und in Bezug zur gleichzeitig herrschenden Absorbtemperatur gesetzt. Abbildung 7 zeigt das Ergebnis dieser Untersuchung beispielhaft für eine der fünf untersuchten Kollektorbauformen aus dem Projekt *SpeedColl*. Es zeigt sich, dass in einem Bereich von etwa 25 bis 100 °C ein linearer Zusammenhang zwischen Absorbtemperatur und mittlerer Fluidtemperatur besteht. Dies ist gleichzeitig jener Temperaturbereich, in welchem Sonnenkollektoren

typischerweise betrieben werden. Ein individueller, linearer Zusammenhang zwischen Fluid- und Absorbertemperatur wurde für alle fünf untersuchten Kollektorbauarten beobachtet. Gleichung (4) gibt die lineare Funktion zur Berechnung der Absorbertemperatur für das in Abbildung 7 dargestellte Beispiel wieder. Eine entsprechende numerische Beziehung in Form von Gleichung (4) wurde für alle untersuchten Kollektorbauformen ermittelt.

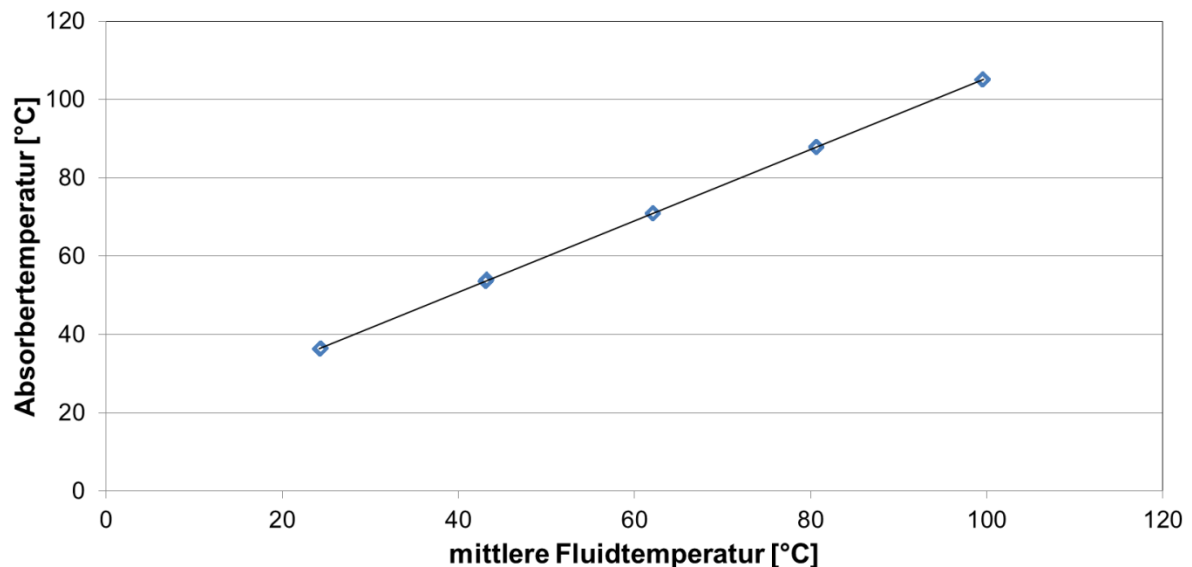


Abbildung 7: Zusammenhang zwischen mittlerer Fluidtemperatur und Absorbertemperatur für einen der fünf untersuchten Bauformen von Flachkollektoren

$$\vartheta_{abs} = 14,2 \text{ }^{\circ}\text{C} + 0,913 \cdot \vartheta_{fl,m} \quad (4)$$

Mit:

$\vartheta_{fl,m}$ Mittlere Fluidtemperatur als arithmetischer Mittelwert aus Ein- und Austrittstemperatur [°C]

Mit Hilfe dieses linearen Zusammenhangs kann die Absorbertemperatur des Sonnenkollektors bei vorhandener Bestrahlung und Durchströmung näherungsweise aus der sich ergebenden Fluidtemperatur berechnet werden. Daraus ergibt sich die Möglichkeit die thermische Belastung eines Absorbers für beliebige Betriebsbedingungen aus dynamischen Jahressimulationen mittels TRNSYS

abzuleiten. Diese ermöglichen für beliebige solarthermische Systeme und frei wählbare Wetterdatensätze, die Berechnung der Ein- und Austrittstemperaturen am Sonnenkollektor. Basierend darauf kann dann mit Hilfe der Gleichungen (1) und (4) sowie der entsprechenden kollektorspezifischen Modellparameter die thermische Belastung der Absorber bei vorhandener und abwesender Durchströmung der Sonnenkollektoren bestimmt werden.

4. Mathematische Modellierung der Klebefugentemperatur

Bei der mathematischen Modellierung der Klebefugentemperaturen entsprechend Gleichung (5) wurde berücksichtigt, dass diese neben der Sonneneinstrahlung und Umgebungstemperatur auch von der Temperatur des Absorbers abhängen.

$$c_{KF} \frac{d\vartheta_{KF}}{dt} = C_4 \cdot G - C_5 \cdot (\vartheta_{KF} - \vartheta_{amb}) - C_6 \cdot (\vartheta_{KF} - \vartheta_{abs}) \quad (5)$$

Mit:

C_4	Modellparameter	[-]
C_5	Modellparameter	[W/(m²K)]
C_6	Modellparameter	[W/(m²K)]
c_{KF}	flächenspezifische Wärmekapazität der Klebefuge	[J/(m²K)]
ϑ_{amb}	Umgebungstemperatur	[°C]
ϑ_{abs}	Absorbertemperatur	[°C]
ϑ_{KF}	Klebefugentemperatur	[°C]

Das Modell beschreibt die zeitliche Änderung der Klebefugentemperatur vereinfacht als eine Bilanz aus drei Wärmeströmen. Zum einen den Wärmestrom durch die Sonneneinstrahlung und zum anderen zwei Wärmeverlustströme, angetrieben durch eine Temperaturdifferenz zwischen Klebefugen- und Umgebungstemperatur bzw. zwischen Klebefugen- und Absorbertemperatur. Im Gegensatz zur Modellierung der Absorbertemperatur wurde für die Klebefugentemperaturen keine Abhängigkeit vom Neigungswinkel der Sonnenkollektoren beobachtet. Entsprechend wurde der Neigungswinkel nicht in das mathematische Modell zur Berechnung der Klebefugentemperaturen aufgenommen.

Analog zur Absorbertemperatur wurden auch für die Bestimmung der Modellparameter zur Berechnung der Klebefugentemperaturen je drei Tagessätze mit unterschiedlichen Verläufen der Klebefugentemperaturen von den Standorten Stuttgart und Kochi ausgewählt. Abbildung 8 zeigt am Beispiel einer Klebefuge den Verlauf der gemessenen und der modellierten Bauteiltemperatur sowie die Abweichung beider Größen. Es handelt sich um die Klebefugenposition mittig, am

oberen Rand der Kollektorvorderseite (vgl. Abbildung 1). Tabelle 2 listet die ermittelten Modellparameter zur Berechnung der dargestellten Klebefugentemperatur.

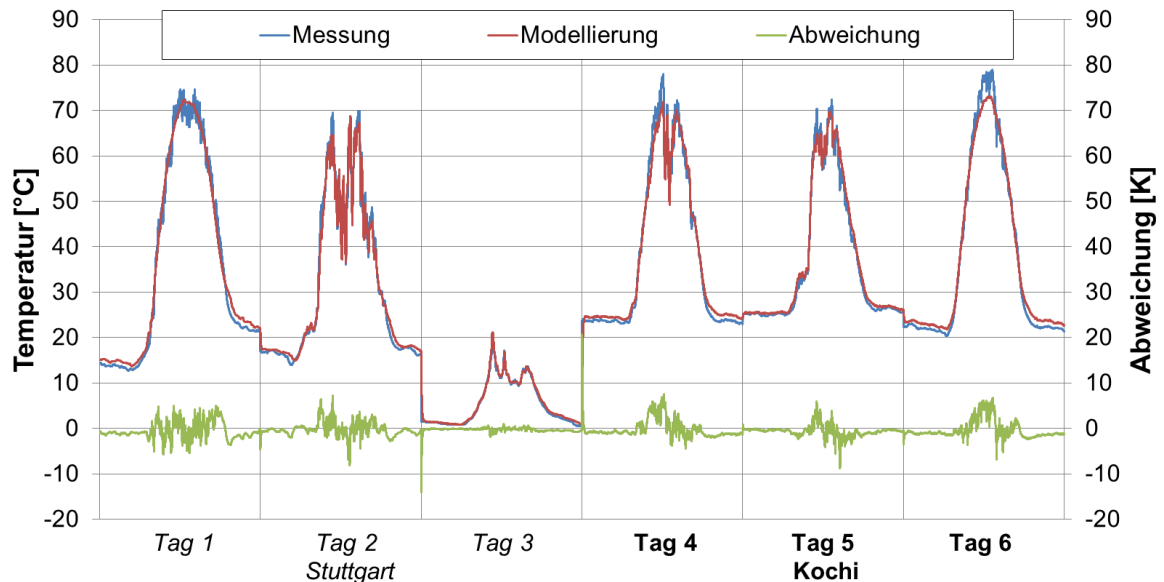


Abbildung 8: Verlauf der gemessenen und modellierten Klebefugentemperatur an der Vorderseite, mittig, am oberen Rand eines ohne Durchströmung exponierten Sonnenkollektors und Verlauf der Abweichung zwischen den beiden Größen.

Tabelle 2: Modellparameter zur Berechnung der in Abbildung 8 dargestellten Klebefugentemperatur

C_4	0,073	C_6	0,828 W/(m ² K)
C_5	3,88 W/(m ² K)	C_{KF}	1451 J/(m ² K)

Es zeigt sich, dass das erstellte Modell zusammen mit den ermittelten, von der Bauart des Flachkollektors und der Messstelle in der Klebefuge abhängigen, Parametern geeignet ist den gemessenen Verlauf der Klebefugentemperatur nachzubilden. Die Abweichung zwischen Messung und Modell liegt im dargestellten Beispiel über den gesamten Zeitraum unter ± 10 K.

4.1 Validierungen des mathematischen Modells der Klebefugentemperatur

Zur Validierung des Modells und der ermittelten Parametersätze zur Berechnung der Klebefugentemperaturen wurden ebenfalls zwei Untersuchungen durchgeführt. Abbildung 9 zeigt das Ergebnis der Validierung des Modells anhand von Messdaten

des Expositionsstandorts Sede Boqer (Negev Wüste, Israel) am Beispiel des Temperaturverlaufs einer ausgewählten Messstelle in der Klebefuge.

Der Verlauf der Abweichung zwischen den beiden Größen während der drei Tage zeigt im Vergleich zu Abbildung 8 vor allem für „Tag 2“ größere Auslenkungen, wobei die berechneten Werte über den gemessenen liegen. Der Grund für diese Überschätzung der thermischen Belastung der Klebefugen ist der in den Modellen nicht berücksichtigte Einfluss des Windes, welcher zur Abkühlung der Klebefugen beiträgt. Da es im Rahmen des laufenden Forschungsprojekts *SpeedColl* vor allem wichtig ist die maximale thermische Belastung der Bauteile rechnerisch ermitteln zu können, wird der Einfluss des Windes auf die Klebefugentemperatur nicht abgebildet. Gleichzeitig wird dadurch die Komplexität des Modells verringert. Die Folge ist jedoch eine tendenzielle Überschätzung der thermischen Belastung der Klebefugen bzw. die Annahme der ungünstigsten Randbedingungen bezüglich Windeinfluss („worst-case“-Szenario).

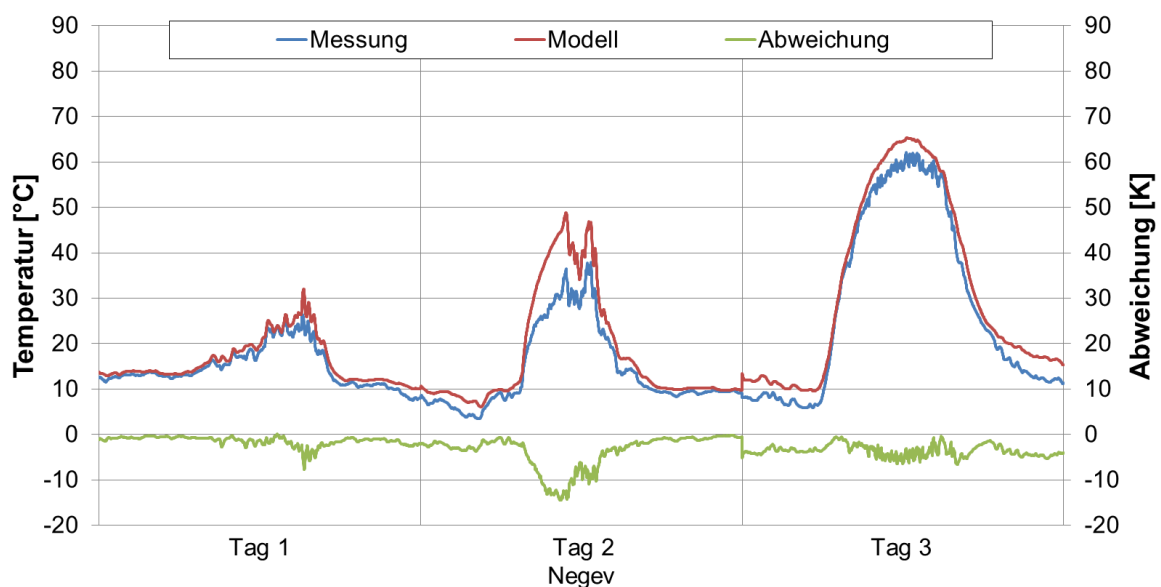


Abbildung 9: Verlauf der gemessenen und modellierten Klebefugentemperatur eines ohne Durchströmung exponierten Sonnenkollektors am Standort Sede Boqer (Negev Wüste, Israel) und Verlauf der Abweichung zwischen den beiden Größen.

Neben der Validierung des Modells anhand von Messdaten eines dritten Standortes, wurde, wie zur Validierung des Modells für die Berechnung der Absorbertemperatur, die Häufigkeitsverteilung der Klebefugentemperaturen während eines gesamten

Jahres berechnet bzw. modelliert und mit jener der Messdaten aus demselben Zeitraum verglichen (siehe Abbildung 10).

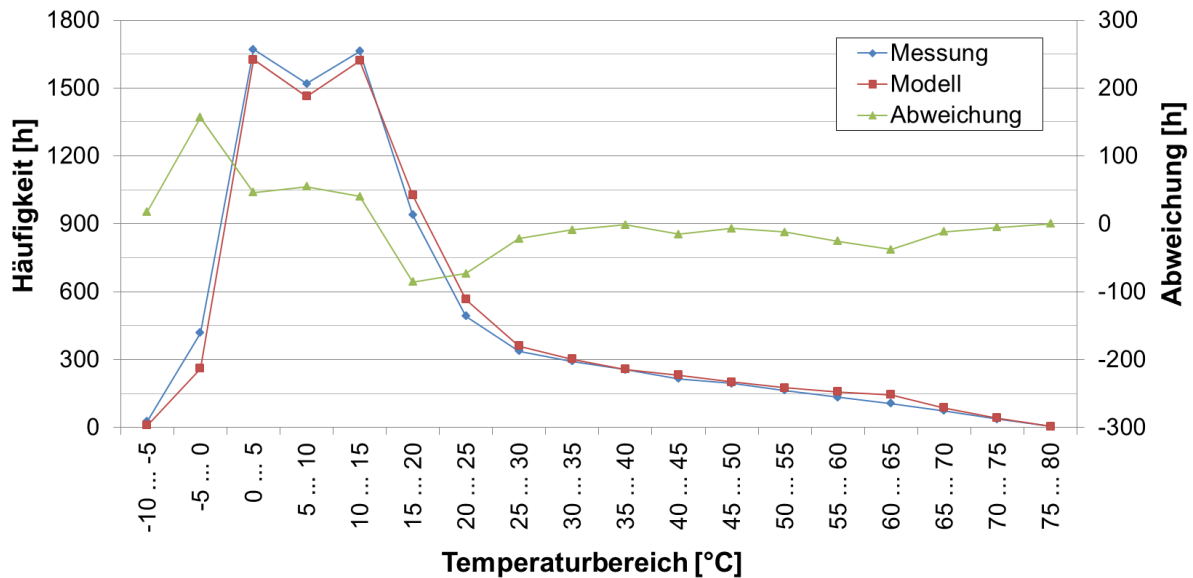


Abbildung 10: Häufigkeitsverteilung der gemessenen und modellierten Klebefugentemperatur eines ohne Durchströmung exponierten Sonnenkollektors am Standort Stuttgart im Laufe eines Jahres und Verlauf der Abweichung zwischen den beiden Größen.

Die Häufigkeitsverteilung der berechneten Werte zeigt einen sehr ähnlichen Verlauf wie jene der gemessenen und unterstreicht, dass das erstellte Modell in Verbindung mit den ermittelten kollektor- und messstellenspezifischen Parametern eine relativ genaue Berechnung der thermischen Belastung der Klebefugen erlaubt. Die maximalen Belastungen werden sowohl in Betrag als auch Häufigkeit gut abgebildet. Ähnlich wie die Modellierung der Absorbertemperatur zeigen sich größere Abweichungen bei relativ niedrigeren Temperaturen, d. h. während der Nachtstunden bzw. Zeiten mit geringer Einstrahlung. Für die Untersuchungen im Rahmen von *SpeedColl* sind diese jedoch von untergeordneter Wichtigkeit.

Mit der hier vorgestellten Methodik wurden für drei Kollektorbauarten Parametersätze zur Berechnung der Klebefugentemperatur an den drei in Abbildung 1 dargestellten Positionen ermittelt. Die Validierung der somit insgesamt neun Parametersätze lieferte durchgehend vergleichbar gute Ergebnisse zu den hier beispielhaft vorgestellten.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Durch eine, im Rahmen des Verbundforschungsprojekts *SpeedColl* durchgeführten, Exposition fünf verschiedener Bauformen von Flachkollektoren an unterschiedlichen Standorten liegen u. a. umfangreiche standortabhängige Messdaten der Umgebungsbedingungen und Bauteiltemperaturen vor. Ein Großteil der Sonnenkollektoren wird während dieser Exposition nicht mit einem Wärmeträger durchströmt und gekühlt. Auf Basis der vorhandenen Messdaten wurde ein mathematisches Modell zur Berechnung der Absorbertemperatur im nicht durchströmten Betrieb erstellt und Parameter für die unterschiedlichen Kollektortypen ermittelt. Um die Absorbertemperatur auch im durchströmten Betrieb berechnen zu können wurden zusätzliche Untersuchungen am ITW/TZS durchgeführt und eine Korrelation zwischen Absorber- und Fluidtemperatur ermittelt.

Zur Bestimmung der Klebefugentemperatur wurde ein weiteres mathematisches Modell erstellt und ebenfalls Parameter in Abhängigkeit von der Kollektorbauart und der konkreten Messstelle bestimmt. Es wurde gezeigt wie die Modelle und die bauartabhängigen Parameter mit Hilfe von Messdaten aus der Exposition validiert wurden.

Somit liegen mathematische Modelle und Parametersätze für die im Projekt *SpeedColl* behandelten Bauarten von Sonnenkollektoren vor, welche es erlauben die bauartspezifische Absorber- und Klebefugentemperatur für beliebige Wetterdatensätze und Betriebsbedingungen zu berechnen. Im Rahmen des Projekts *SpeedColl* kann nun die thermische Bauteilbelastung für verschiedene Systemvarianten und Standorte auf Basis von dynamischen Jahressimulationen mit der Software TRNSYS ermittelt werden. Diese Belastungsprofile fließen in die Entwicklung von beschleunigten Alterungsprüfverfahren für Sonnenkollektoren ein. Sie können ebenfalls für die Entwicklung von Komponentenprüfverfahren eingesetzt werden. Übergeordnetes Ziel der Prüfverfahren ist die Abschätzung der zu erwartenden Lebensdauer von Sonnenkollektoren unter Berücksichtigung der jeweiligen Betriebsbedingungen und der klimatischen Randbedingungen am Einsatzort.

6. Danksagung

Das Forschungsprojekt „Entwicklung beschleunigter Alterungstestverfahren für solarthermische Kollektoren und deren Komponenten“, Akronym „*SpeedColl*“, wird aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie über den Projektträger Jülich (PTJ) unter dem Förderkennzeichen 0325969B gefördert. Die Autoren danken für die gewährte Unterstützung und übernehmen die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung.

7. Literatur

- /1/ Kofler, P., Traub, B., Fischer, S., Drück, H.: Alterungseinflüsse auf Sonnenkollektoren in gemäßigten und tropischen Klimazonen. In: 23. Symposium Thermische Solarenergie. 24. bis 26. April 2013, Kloster Banz, Bad Staffelstein, Seite 138 – 139 (Kurzfassung). Regensburg 2013. ISBN: 9783943891102
- /2/ DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Solarenergie – Thermische Sonnenkollektoren – Prüfverfahren (ISO 9806:2013) DIN EN ISO 9806. Berlin 2013
- /3/ Isakson, P.: Solar collector model for testing and simulation, Final report for BFR project 900280-1. Building Services Engineering, Royal Institute of Technology. Stockholm 1995