

Simulationsstudie zur Leistungsfähigkeit hochselektiver und thermochromer Absorberbeschichtungen für solarthermische Kollektoren

Sebastian Müller¹, Rolf Reineke-Koch¹, Federico Giovannetti¹, Oliver Kastner¹, 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

Zur Bewertung der Leistungsfähigkeit und des Stagnationsverhaltens von Flachkollektoren mit unterschiedlichen Absorberbeschichtungen werden Systemsimulationen einer Solaranlage zur Trinkwassererwärmung sowie zur Raumheizungsunterstützung (Kombianlage) in TRNSYS durchgeführt. Dazu wird zunächst ein Überblick über die derzeit am Markt verfügbaren Absorberbeschichtungen präsentiert. Diese sind durch solare Absorptionsgrade α größer 90 % und Emissionsgrade im Bereich $\varepsilon = 5 \dots 90$ % charakterisiert. Wir unterscheiden zwischen Schwarzchrom-, hochselektiven PVD-Sputter-, Solarlack- und thermochrom-schaltenden Beschichtungen. In einer TWW-Anlage zeigen die Simulationen eine Erhöhung des konventionellen Nachheizenergiebedarfes im Vergleich zur PVD-Beschichtung um 6 % bei Schwarzchromabsorbern, 7 % bei thermochromen Beschichtungen und 21 % bei Solarlacken. In einer Kombianlage erhöht sich der Nachheizenergiebedarf für Schwarzchrom und thermochrome Beschichtungen um 1,4 % und für Solarlacke um bis zu 6,1 %. In Bezug auf die Stagnationsdauer liefern die Simulationen 178 h a^{-1} für PVD-Beschichtung, 118 h a^{-1} für Schwarzchrom, 62 h a^{-1} für thermochrome Beschichtungen und 11 h a^{-1} für Solarlacke. Die maximalen Absorbertemperaturen können von 175 °C für PVD-Beschichtungen auf 165 °C für Schwarzchrom, 145 °C mit thermochromen Schichten und 135 °C mit Solarlacken begrenzt werden.

1. Einleitung

Die hohe Leistungsfähigkeit handelsüblicher solarthermischer Kollektoren wird maßgeblich durch eine effiziente photothermische Wandlung der auf den Kollektor einfallenden Solarstrahlung in thermische innere Energie des Absorberbleches bestimmt. Dabei wird ein Großteil der Solarenergie im Wellenlängenbereich zwischen $300 \dots 2500 \text{ nm}$ absorbiert. Das so erwärmte Absorberblech gibt seinerseits Wärmestrahlung im Spektralbereich oberhalb von 2500 nm an die Umgebung ab. Um die Strahlungswärmeverluste im langwelligen Spektralbereich zu minimieren und gleichzeitig gute Absorption im kurzwelligen Bereich zu erhalten, muss sich die Absorberbeschichtung spektral selektiv verhalten. Ein idealer selektiver Solarabsorber besitzt bei einer Wellenlänge von 2500 nm einen sprunghaften Übergang von niedriger zu hoher Reflektivität, womit eine möglichst hohe spektrale Selektivität erreicht wird, siehe Abb. 1. Neben guten strahlungsphysikalischen Eigenschaften müssen die dünnen Absorberbeschichtungen noch weitere Anforderungen, wie z. B. eine Hochtemperaturbeständigkeit, Feuchteresistenz, Korrosionsbeständigkeit, hohe Haftfestigkeit gegenüber dem Substrat sowie aus ästhetischen Gründen eine gewisse Farbhomogenität, aufweisen. Der Überhitzungsschutz im Solarkreis wird in der aktuellen Forschung und Entwicklung zu solarthermischen Flachkollektoren zunehmend wichtiger, da in ihm ein hohes Potential zur Senkung der spezifischen Systemkosten, wie Installations-, Wartungs- und Instandhaltungskosten, liegt.

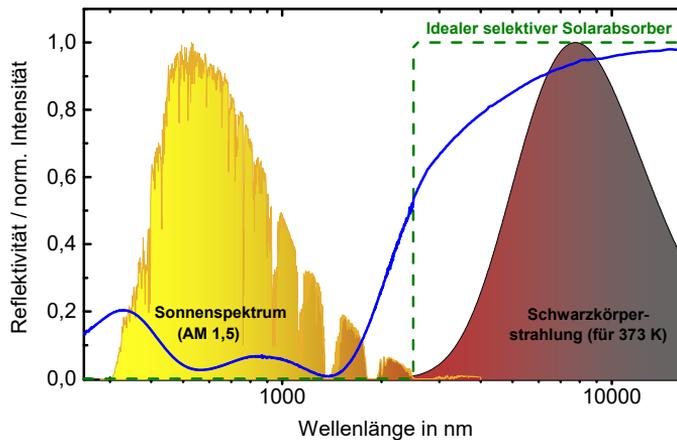


Abb. 1: Reflexionsspektren einer hochselektiven Absorberbeschichtung (blau) und eines idealelektiven Absorbers (grün), normierte Intensität des solaren Spektrums für AM 1,5 nach [1] und der Schwarzkörperstrahlung für 373 K.

Die beiden grundlegenden optischen Eigenschaften von Absorberbeschichtungen sind der solare Absorptionsgrad α und der thermische Emissionsgrad (Emissivität) ϵ . Der Absorptionsgrad der jeweiligen Beschichtung wird bei solarthermischen Anwendungen für eine spektrale Strahlungsdichte der Sonne $S(\lambda)$ bei AM 1,5 (siehe Abb. 1 nach [1]) berechnet. Dabei ist für die photothermische Wandlung der gesamte Spektralbereich der Solarstrahlung in einem Wellenlängenbereich von 300 nm bis 2500 nm von Bedeutung. Der solare Absorptionsgrad wird aus dem spektralen Absorptionsgrad $\alpha(\lambda)$, dem Sonnenspektrum $S(\lambda)$ und dem ausgewählten Wellenlängenintervall $\Delta\lambda$ nach ISO 9050 [2] berechnet zu

$$\alpha = \frac{\int_{300 \text{ nm}}^{2500 \text{ nm}} \alpha(\lambda) \cdot S(\lambda) \, d\lambda}{\int_{300 \text{ nm}}^{2500 \text{ nm}} S(\lambda) \, d\lambda} \quad (\text{Gl. 1})$$

Zur Charakterisierung des Emissionsverhaltens eines Solarabsorbers wird seine Emissivität stets für eine spektrale Strahlungsdichte eines Schwarzkörperstrahlers mit einer Temperatur von 100 °C bzw. 373 K angegeben und kann nach [3] bei bekannten Daten aus dem spektralen Emissionsgrad $\epsilon(\lambda)$, der Planck'schen Schwarzkörperstrahlung $P(\lambda, T)$ und dem ausgewählten Wellenlängenintervall $\Delta\lambda$ zu

$$\epsilon = \frac{\int_{2500 \text{ nm}}^{50000 \text{ nm}} \epsilon(\lambda) \cdot P(\lambda, T) \, d\lambda}{\int_{2500 \text{ nm}}^{50000 \text{ nm}} P(\lambda, T) \, d\lambda} \quad (\text{Gl. 2})$$

berechnet werden. Marktübliche und industriell hergestellte hochselektive Absorberbeschichtungen erreichen einen solaren Absorptionsgrad von $\alpha \approx 95 \%$ und einen niedrigen Emissionsgrad von bis zu $\epsilon \approx 5 \%$.

Anhand einer vergleichenden Simulationsstudie untersucht dieser Beitrag marktübliche Absorberbeschichtungen hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit. Hierzu werden Systemsimulationen einer Solaranlage zur Trinkwarmwasserbereitstellung (TWW) sowie zur Raumheizungsunterstützung (Kombianlage) in TRNSYS durchgeführt. Insbesondere werden thermochrome Absorberbeschichtungen, welche einen stark temperaturabhängigen Emissionsgrad aufweisen, detailliert untersucht. Dabei liegt der Fokus auch auf der Evaluierung des Stagnationsverhaltens in Kombianlagen hinsichtlich des Überhitzungsschutzes im Stagnationsfall.

2. Marktübersicht

Für solarthermische Kollektoren haben sich unterschiedlichste Arten an selektiven Beschichtungen am Markt etabliert, welche sich anhand ihres Beschichtungsverfahrens sowie ihrer optischen Eigenschaften voneinander differenzieren lassen. Eine detaillierte Übersicht über verschiedene hoch selektive Beschichtungen und die dafür eingesetzten Materialien kann [4] entnommen werden.

2.1 Beschichtungsverfahren

Nasschemische Beschichtungsverfahren, wie die Schwarzchrom- oder Schwarznickelbeschichtung, besitzen typischerweise Absorptionsgrade von $\alpha > 95\%$ und Emissionsgrade von 10...20 % (siehe [5]). Hierzu wird im Bandverfahren das Absorbersubstrat kontinuierlich direkt vom Coil durch Lösungs- und Reinigungsmittelbäder geführt und meist mit Chromdioxid elektrolytisch beschichtet. Diese galvanisch aufgetragenen Beschichtungen wurden aufgrund des hohen Rohstoff- und Energieeinsatzes sowie der eingeschränkten Recyclingfähigkeit fast vollständig vom Markt verdrängt.

Hochselektive Absorberbeschichtungen werden überwiegend durch vakuumbasierte Beschichtungsverfahren, auf Grundlage von physikalischer Gasphasenabscheidung (engl. physical vapour deposition, kurz PVD), hergestellt. Eine der wichtigsten Technologien der PVD-Verfahren stellt dabei das Sputtern (Kathodenzerstäubung) dar. Dadurch können effiziente Mehrschichtsysteme auf Basis eines Keramik-Metall-Mischgefüges, sogenannten CERMETs (engl. ceramic-metal compound), mit einer hohen Qualitätskonstanz in industriellen Durchlaufverfahren großflächig auf Kupfer- und Aluminiumsubstraten abgeschieden werden. Der Schichtaufbau ist meist dreigeteilt: Eine metallische Diffusionsbarriere als Korrosionsschutz und Haftvermittler für die folgenden Schichten direkt auf dem Substrat, darüber die funktionale Absorptionsschicht mit einem abnehmenden Metallanteil (Gradient) zur Oberseite hin und eine dielektrische Schutz- und Antireflexionsbeschichtung. Derartige Absorberbeschichtungen erreichen Absorptionsgrade von $\alpha \approx 95\%$ und einen Emissionsgrad von $\varepsilon \approx 5\%$ (siehe [4] und [9]).

Solarlacke sind mit speziellen Pigmenten versehene Lacke, welche eine kostengünstige Alternative zu den eben genannten Herstellungsverfahren darstellen. Durch beigemischte Eisen-, Kupfer- oder Manganoxide können hohe Absorptionsgrade ($\alpha > 90\%$) erreicht werden. Der Emissionsgrad ist vom eingesetzten Bindemittel und mitunter auch von der Schichtdicke (sog. „thickness sensitive spectral selectivity“, kurz TSSS) abhängig. Die erreichbaren Emissionsgrade sind mit 20...35 % daher vergleichsweise hoch (vgl. [6]). Die Applikation des Lackes erfolgt in der Regel per Bandlackierung.

2.2 Absorberbeschichtungen

Anhand einer Marktübersicht wurden die aktuell verfügbaren Absorberbeschichtungen für solarthermische Flachkollektoren mit ihrem jeweiligen Handelsnamen und optischen Eigenschaften zusammengetragen (siehe Tabelle 1). Ein hoher solarer Absorptionsgrad von bis zu 95 % bei gleichzeitig sehr niedrigem Emissionsgrad von 5 % gilt als der derzeitige Stand der Technik bei hochselektiven Absorberbeschichtungen. Diese werden überwiegend durch PVD-Sputter-Verfahren hergestellt, wie die Beschichtung „eta plus Al“, „TiNOX energy Al“ oder „Viessmann-Standard“. Solarlacke weisen generell hohe Absorptionsgrade von über 90 % auf, in Abhängigkeit der beigemischten Pigmente, Schichtdicken und Substrate aber auch eine hohe Bandbreite an Emissionsgraden. So konnten schwach- ($\varepsilon = 65\%$), mittel- ($\varepsilon = 35\%$) und starkselektive ($\varepsilon = 20\%$) Lacke recherchiert werden. Galvanische

Schwarzchrombeschichtungen werden nur noch von der Firma „Energie Solaire SA“ angeboten und weisen bei Absorptionsgraden von 95 % Emissionsgrade von 16 % („AS“) bzw. 5 % („AS+“) auf.

Tabelle 1: Am Markt verfügbare Absorberbeschichtungen mit Angabe ihres Handelsnamens und optischen Eigenschaften mit Herstellungstoleranz nach Hersteller.

Hersteller	Produktname	α [%]	ϵ [%]	Verfahren	Details	Quelle
ALANOD GmbH & Co. KG	eta plus Al	95 ± 2	5 ± 2	PVD		[7], [8], [9] ¹
	mirosol TS	90 ± 2	20 ± 3	Lackierung	Solarlack	[7], [8]
	mirotherm	95 ± 1	5 ± 2	PVD		[7], [8], [9]
Almecco GmbH	TiNOX energy Al	95 ± 2	4 ± 2	PVD		[7], [8], [11]
	TiNOX nano	90 ± 2	5 ± 2	PVD		[7], [8], [11]
Dampney Co., Inc.	Thurmalox 250	96^6	65^2	Lackierung	Solarlack	[12]
Energie Solaire SA	AS	95^6	16^6	Galvanisch	Schwarzchrom	[7], [8]
	AS+	95^6	5^6	Galvanisch	Schwarzchrom	[7], [8]
Nigrin	Lack Schwarz	95^6	90^6	Lackierung	Lack	[13]
Savosolar GmbH	MEMO	96 ± 2	5 ± 2	PVD + PECVD ³		[7], [14]
SOLEC-Solar Energy Corp.	SOLKOTE HI/SORB-II	91 ± 2^4	35 ± 5^5	Lackierung	Solarlack	[7], [15]
Viessmann Werke GmbH & Co. KG	Viessmann-Standard	95 ± 1	5 ± 1	PVD		[10]
	ThermProtect	$92_{25^\circ\text{C}}$ $94,5$	$7_{25^\circ\text{C}}$ 33	PVD	Thermochrom	[7], [16]

¹) Quelle [9] gibt nach eigenen Messungen $\alpha = 96\%$ und $\epsilon = 11\%$ an

²) Abhängig von Schichtdicke und Verdünnungsmittel zwischen $\epsilon = 52 \dots 90\%$

³) Plasmaunterstützte chemische Gasphasenabscheidung (engl. plasma-enhanced physical vapour deposition)

⁴) Abhängig von Schichtdicke und Substrat zwischen $\alpha = 88 \dots 94\%$

⁵) Abhängig von Schichtdicke und Substrat zwischen $\epsilon = 20 \dots 49\%$

⁶) Keine Herstellungstoleranz angegeben

Die thermochrome Absorberbeschichtung mit dem Handelsnamen „ThermProtect“ weist einen stark temperaturabhängigen Emissionsgrad auf, welcher sich ab einer gewissen Schalttemperatur (68 °C Absorbtemperatur) von $\epsilon_{25^\circ\text{C}} \approx 7\%$ bei Raumtemperatur vollständig reversibel auf rund 33 % bei 100 °C erhöht. Gleichzeitig findet eine geringfügige Erhöhung des solaren Absorptionsgrades von anfangs 92 % auf 94,5 % im geschalteten Zustand statt [16]. Durch die Erhöhung der thermischen Verluste mit zunehmender Absorbtemperatur kann dessen Stagnationstemperatur um bis zu 30 K im Vergleich zu einer konventionellen hochselektiven Beschichtung gesenkt werden. Seine Leistungsfähigkeit im typischen Betriebsbereich des Kollektors bleibt dabei nahezu unbeeinflusst [17]. Diese neuartige Absorberbeschichtung reduziert die thermisch-mechanischen Belastungen im Stagnationsfall deutlich und kann dazu beitragen, den Überhitzungsschutz sensibler Solarkreisbauteile zu gewährleisten und die Investitions- sowie Instandhaltungskosten einer Solaranlage zu reduzieren [18].

3. Kollektormodellierung

3.1 Stationäres eindimensionales Kollektormodell

Durch ein am ISFH entwickeltes eindimensionales optisch-thermisches Kollektormodell können aus bekannten Konstruktionsdaten (z. B. Kollektormaße, Dämmstärke), den optischen Eigenschaften der Glasabdeckung und des Absorbers (Transmissions-, Absorptions- und Reflexionsgrad) sowie den Betriebsparametern (z. B. Massenstrom, Bestrahlungsstärke, Neigungswinkel) die zu jedem Beschichtungstyp gehörenden Kollektorwirkungsgradparameter (η_0 , a_1 und a_2) berechnet werden. Mit den Wir-

kungsgradparametern können im Anschluss und unter Verwendung geeigneter Lastprofile zum Trinkwarmwasser- und Raumheizbedarf die Leistungsfähigkeit von Flachkollektoren im System simuliert und analysiert werden. Die gesamte Kollektormodellierung kann in ein optisches und thermisches Modell unterteilt werden. Für eine detaillierte Modellbeschreibung wird auf [19] verwiesen.

3.1.1 Optisches Modell

Das optische Kollektormodell beschreibt den Strahlengang der auf den Kollektor einfallenden Solarstrahlung. Es berücksichtigt hierbei die Absorption, Reflexion und Transmission der Strahlung an der transparenten Abdeckung sowie am Absorber selbst. Zur Berechnung des Strahlenganges werden im Modell lediglich die integralen (effektiven) optischen Kennwerte der Grenzschichten benötigt. Bei üblichen Kollektorabdeckungen führt diese Vereinfachung im Vergleich zu einer spektralen Betrachtung zu vernachlässigbaren Abweichungen. Die am Absorber reflektierte Strahlung wird bis zur zweiten Mehrfachreflexion hin verfolgt. Die absorbierten Anteile in den jeweiligen Ebenen (Abdeckung und Absorber) werden durch dieses Teilmodell ermittelt und dienen als Eingangsgrößen für das thermische Kollektormodell. Die transparente Abdeckung wird für langwellige Wärmestrahlung als opak angenommen.

3.1.2 Thermisches Modell

Das thermische Verhalten wird auf Grundlage eines Mehrknotenmodells simuliert, das die Wärmetransportvorgänge (Leitung, Konvektion und thermische Strahlung) innerhalb des Kollektors anhand von diskreten Temperaturen entlang des Energieflusspfads („Temperaturknoten“) und dazugehörigen thermischen Widerständen modelliert, vergleiche [19]. Im vorliegenden Modell ist der Kollektor durch fünf Temperaturknoten diskretisiert: zwei Knoten für die Rückseitendämmung und jeweils ein Knoten für die transparente Abdeckung, den Absorber und die Fluidtemperatur. Die Berechnung der Knotentemperaturen erfolgt über eine stationäre Bilanzierung der ein- und austretenden Wärmeströme. Die durch das optische Modell effektiv in Glasscheibe und Absorber absorbierten Anteile der Solarstrahlung werden als Wärmequellen in den entsprechenden Temperaturknoten berücksichtigt. Dieser iterative Prozess wird solange fortgeführt, bis die Temperaturdifferenz jedes Knotens zwischen zwei Iterationsschritten $< 0,01$ K beträgt. Das thermische Modell berechnet so für unterschiedliche Betriebsbedingungen (siehe Tabelle 3) die stationären Kollektorzustände. Für jeden dieser Betriebspunkte wird aus der Energiebilanz zwischen Fluidaustritt $T_{F,aus}$ und Fluideintritt $T_{F,ein}$ die über das Fluid abgeführte Nutzleistung \dot{Q}_{Koll} des Kollektors ermittelt und der stationäre Kollektorwirkungsgrad η mit der auf die Bruttokollektorfläche A_G einfallenden Globalstrahlung E_G nach Gl. 3 errechnet.

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{Koll}}{E_G \cdot A_G} = \frac{\dot{m}_{Koll} \cdot c_F \cdot (T_{F,aus} - T_{F,ein})}{E_G \cdot A_G} \quad (Gl. 3)$$

Anhand einer Variation der Fluideintrittstemperatur $T_{F,ein}$ werden über den gesamten Betriebsbereich des Kollektors stationäre Zustände simuliert und als quadratische Ausgleichsfunktion in Abhängigkeit der mittleren Fluidtemperatur T_m mit der Betriebskenngröße $(T_m - T_a)$ nach Gl.4 dargestellt.

$$\eta = \eta_0 - a_1 \cdot \frac{T_m - T_a}{E_G} - a_2 \cdot \frac{(T_m - T_a)^2}{E_G} \quad (Gl. 4)$$

Die Wirkungsgradkennlinie gegenüber der Betriebskenngröße $(T_m - T_a)$ entspricht der Darstellung, welche in der Normung für stationäre Kollektortests nach ISO 9806:2017 [20] üblich ist. Die Kollektorwirkungsgradkoeffizienten η_0 , a_1 und a_2 werden numerisch nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate bestimmt. Der sogenannte Konversionsfaktor η_0 kennzeichnet den Kollektorwirkungsgrad, wenn $T_m = T_a$ gilt.

3.2 Modellabgleich und Definition der Randbedingungen

Das Kollektormodell wird für drei baugleiche Kollektoren experimentell validiert, welche unterschiedliche Absorberbeschichtungen aufweisen: eine hochselektive, eine thermochrom-schaltende sowie eine Solarlackbeschichtung. Die optischen Kennwerte der jeweiligen Absorber sind in Tabelle 2 aufgetragen. Anhand der Kollektordatenblätter wurden die Konstruktionsparameter des Modells, wie z. B. die Kollektoraperturfläche, die Dämmstärke der Rückseitendämmung oder der Dicke der transparenten Abdeckung, gesetzt. Durch interne Messungen am ISFH konnten die optischen Parameter der Abdeckung ermittelt werden. Alle drei Kollektoren wurden einer stationären Kollektorleistungsprüfung nach ISO 9806:2017 [20] in einem Sonnensimulator unterzogen, wodurch ihre Kollektorwirkungsgradparameter, die Kollektornutzleistung und die Norm-Stagnationstemperatur T_{Stag} vorab messtechnisch ermittelt wurden.

Tabelle 2: Wirkungsgradparameter mit Bezug auf die Bruttokollektorfläche, Kollektornutzleistung bei $T_m - T_a = 30 \text{ K}$ und Norm-Stagnationstemperatur von Flachkollektoren mit unterschiedlicher Absorberbeschichtung.

Bezeichnung	α [%]	ϵ [%]		$\eta_{0,G}^1$ [-]	$a_{1,G}^1$ [W m ⁻² K ⁻¹]	$a_{2,G}^1$ [W m ⁻² K ⁻²]	$\dot{Q}_{\text{Koll}}(30 \text{ K})$ [W]	T_{Stag}^2 [°C]
Standard	95	5	Messung	0,733	3,909	0,013	1517	192,1
			Modell	0,737	4,261	0,009	1509	190,1
Thermochrom	92	7	Messung	0,706	3,981	0,006	1458	-
			Modell	0,719	4,192	0,013	1460	-
	94,5	33	Messung	0,774	5,752	0,010	-	167,0
			Modell	0,730	5,234	0,010	-	163,4
Solarlack	95	90	Messung	0,711	6,060	0,025	1273	137,9
			Modell	0,706	6,262	0,015	1267	142,6

¹⁾ Standardunsicherheit der Kollektorleistungsmessung: $\pm 0,0042$ ($\eta_{0,G}$), $\pm 0,085$ ($a_{1,G}$), $a_{2,G}$ wird als fest und fehlerfrei angenommen (die Unsicherheit wird dem Wert $a_{1,G}$ zugeschrieben).

²⁾ Norm-Stagnationstemperatur bei Standard-Referenzbedingungen nach ISO 9806:2017 [20]:

$$E_G = 1000 \text{ W m}^{-2}, T_a = 30 \text{ °C und } v_{\text{Wind}} = 0 \text{ m s}^{-1}$$

Die gemessenen und modellierten Wirkungsgradkennlinien der drei Flachkollektoren sind für die in Tabelle 2 aufgetragenen Betriebsbedingungen in Abb. 2 vergleichend dargestellt. Der Standardkollektor kann im Allgemeinen mit einer hohen Genauigkeit modelliert werden. Dies zeigt sich zum einen in einer geringen Abweichung des Konversionsfaktors η_0 von 0,4 %-Punkten und zum anderen in einer vergleichbar hohen Stagnationstemperatur, welche durch das Modell um nur 2 K geringer simuliert wurde. Innerhalb des Betriebsbereiches bis $(T_m - T_a) < 80 \text{ K}$ beträgt die Abweichung des Kollektorwirkungsgrades maximal 0,4 %-Punkte. Die Kollektornutzleistung bei einer mittleren Fluidtemperatur von $T_m = 50 \text{ °C}$ bzw. bei der Betriebsgröße $(T_m - T_a) = 30 \text{ K}$ ist im Modell um rund 0,5 % geringer. Die Wirkungsgradkennlinie des thermochromen Flachkollektors wird üblicherweise in zwei geteilten Abschnitten dargestellt, wobei der erste Bereich Absorbertemperaturen unterhalb der Schalttemperatur T_s und der zweite Abschnitt den geschalteten Zustand ($T_{\text{Abs}} > T_s$) charakterisiert (vgl. [17]). Der modellierte Konversionsfaktor im nicht geschalteten Bereich weicht vom gemessenen um 1,3 %-Punkte ab und unterscheidet sich im Betriebsbereich bis $(T_m - T_a) < 80 \text{ K}$ um nicht mehr als 2,0 %-Punkte. Die modellierte Stagnationstemperatur ist um rund 3,6 K geringer und die Kollektornutzleistung $\dot{Q}_{\text{Koll}}(30 \text{ K})$ wird korrekt modelliert. Für den Solarlackabsorber zeigen sich ähnliche Abweichungen zwischen Messung und Modell. Der Konversionsfaktor unterscheidet sich um 0,5 %-Punkte. Die modellierte Kollektornutzleistung $\dot{Q}_{\text{Koll}}(30 \text{ K})$ ist gegenüber der gemessenen um 0,5 % niedriger. Die Stagnationstemperatur wird mit 4,7 K zu hoch simuliert.

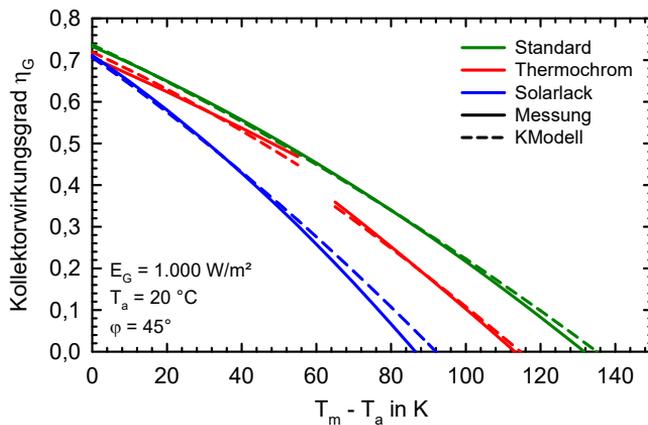


Abb. 2: Gemessene und modellierte Kollektorstufigenwirkungsgradkurven zur Validierung des stationären Kollektormodells.

Im thermischen Kollektormodell werden einige Wärmeverlustmechanismen vereinfacht oder, wie im Falle der Wärmeverluste über die Seitendämmung, nicht berücksichtigt. Ebenso wird mit konstanten optischen Parametern, wie z. B. dem Emissionsgrad der Absorberbeschichtung, simuliert. Dieser weist in der Regel eine gewisse Temperaturabhängigkeit auf, wodurch sich die realen Wärmeverluste an die Umgebung abermals erhöhen. Trotz der Vereinfachungen weist das Modell nur geringe Abweichung zwischen dem gemessenen und modellierten Konversionsfaktor auf. Anhand dessen Definition kann geschlussfolgert werden, dass die optischen Modellparameter und der damit berechnete Strahlengang im optischen Kollektormodell die realen Bedingungen sehr gut abbilden. Der weitere Verlauf der Wirkungsgradkennlinie (siehe Abb. 2) ist durch die thermischen Verluste an die Umgebung und somit durch die beiden Wirkungsgradparameter a_1 und a_2 charakterisiert. Auch hier kann eine hohe Modellgenauigkeit erzielt werden.

Tabelle 3: Ausgewählte Parameter der Kollektormodellierung.

Kollektor	Wert	Einheit	Bezeichnung
A_{Ap}	2,34	m^2	Kollektoraperturfläche
A_G	2,51	m^2	Bruttokollektorfläche
$s_{iso,RSD}$	15	mm	Dicke der Rückseitendämmung
$\lambda_{iso,RSD}$	0,035	$W\ m^{-1}\ K^{-1}$	Wärmeleitfähigkeit der Rückseitendämmung
u_{int}	60	$W\ m^{-2}\ K^{-1}$	Interner Leitwert zwischen Absorber und Fluid
Optische Parameter			
b_0	0,150	-	Koeffizient des Winkelkorrekturfaktors
ϵ_{Glas}	84	%	Emissionsgrad der Verglasungen
α_{Glas}	2	%	Solarer Absorptionsgrad der Verglasungen
ρ_{Glas}	8	%	Solarer Reflexionsgrad der Verglasungen
Betriebsbedingungen			
E_G	1.000	$W\ m^{-2}$	Globalstrahlung in Kollektorebene
T_a	20	$^{\circ}C$	Umgebungstemperatur
v_{Wind}	3	$m\ s^{-2}$	Windgeschwindigkeit
\dot{m}_{Koll}	45	$kg\ h^{-1}\ m^{-2}$	Spezifischer Fluidmassenstrom
β	45	$^{\circ}$	Kollektorneigungswinkel

Für alle nachfolgenden Untersuchungen wurden die Kollektorparameter des Standard-Flachkollektors (Kollektormaße, optische und thermische Eigenschaften) für die Modellparametrisierung ausgewählt, welche in Auszügen in Tabelle 3 aufgetragen sind.

3.3 Modellierung unterschiedlicher Absorberbeschichtungen

Viele der marktüblichen Absorberbeschichtungen weisen ähnliche optische Eigenschaften auf und führen somit zu vergleichbaren Wirkungsgradkennwerten. So zeichnen sich zum Beispiel alle hochselektiven PVD-Beschichtungen durch Absorptionsgrade größer als 90 % und Emissionsgrade kleiner 5 % aus. Für die vergleichende Simulationsstudie wurden die in Tabelle 1 aufgetragenen Absorberbeschichtungen daher vier Kategorien zugeordnet. Wir unterscheiden zwischen hochselektiven PVD-Beschichtungen („Standard“), Beschichtungen auf Basis eines Solarlackes, neuartigen thermochromschaltenden sowie Schwarzchrombeschichtungen. Die dazugehörigen Absorptions- und Emissionsgrade können Tabelle 4 entnommen werden. Als Solarlack wurde ein Produkt ausgewählt, welches einen hohen Emissionsgrad aufweist, um ein möglichst breites Untersuchungsspektrum zu erzielen. Wie in Tabelle 1 ersichtlich, existieren auch mittel- und starkselektive Solarlacke mit einem Emissionsgrad im Bereich von 20...35 %.

Tabelle 4: Kategorien unterschiedlicher Beschichtungstypen mit ihren optischen Eigenschaften und modellierten Kollektorstagnationstemperaturen mit Bezug auf die Bruttokollektorfläche und Norm-Stagnationstemperatur.

Bezeichnung	Verfahren	α [%]	ϵ [%]	$\eta_{0,G}$ [-]	$a_{1,G}$ [W m ⁻² K ⁻¹]	$a_{2,G}$ [W m ⁻² K ⁻²]	T_{Stag} [°C]
Standard	PVD	95	5	0,739	4,267	0,009	190,0
Schwarzchrom	Galvanisch	95	16	0,734	4,598	0,010	176,9
Thermochrom	PVD	92 ^{25°C}	7 ^{25°C}	0,718	4,257	0,011	163,3
		94,5	33	0,728	5,233	0,010	
Solarlack	Lackierung	96	65	0,723	5,734	0,014	150,1

Für die vier Beschichtungstypen wird mit dem vorab parametrisierten Kollektormodell deren Wirkungsgradkennlinien und Stagnationstemperatur simuliert (siehe Tabelle 4). Die entsprechenden Kennlinien sind in Abb. 3.a für eine Globalstrahlung von $E_G = 1000 \text{ W m}^{-2}$ und einer Umgebungstemperatur von $T_a = 20 \text{ °C}$ graphisch dargestellt. In Abb. 3.b ist die Stagnationstemperatur in Abhängigkeit des Absorptions- und Emissionsgrades der Absorberbeschichtung aufgetragen. Die Standard-PVD-Beschichtung weist mit 0,739 den höchsten Konversionsfaktor aller untersuchten Beschichtungen auf. Schwarzchrombasierte Beschichtungen erzielen vergleichbar hohe Werte. Im Vergleich zum Standard ist der Konversionsfaktor von Solarlacken um 1,6 %-Punkte reduziert. Die linearen Wärmeverlustkoeffizienten a_1 spiegeln den jeweiligen Emissionsgrad wieder. So beträgt dieser für die Standardbeschichtung ($\epsilon = 5 \text{ %}$) $4,267 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ und erhöht sich für Solarlack ($\epsilon = 65 \text{ %}$) auf $5,734 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$.

Der thermochrome Absorber weist im nichtgeschalteten Betriebszustand im Vergleich zur Schwarzchrom- und Standardbeschichtung einen um 1,6 %-Punkte bzw. 2,1 %-Punkte geringeren Konversionsfaktor auf. Dagegen ist der lineare Wärmeverlustkoeffizient $a_1 = 4,257 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ vergleichbar mit dem der Standardbeschichtung und um $0,341 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ niedriger als der des Schwarzchromabsorbers. Im geschalteten Zustand steigen dessen Strahlungswärmeverluste signifikant und deshalb auch a_1 auf $5,233 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ an. Dies hat eine deutliche Reduzierung der Stagnationstemperatur auf $163,3 \text{ °C}$ zur Folge und ist im Vergleich zum Standard um bis zu 27 K niedriger. Aufgrund der hohen Emissivität des Solarlackes über den gesamten Betriebsbereich beträgt dessen Stagnationstemperatur lediglich $150,1 \text{ °C}$, was einer Reduzierung von 40 K gegenüber dem Standard entspricht.

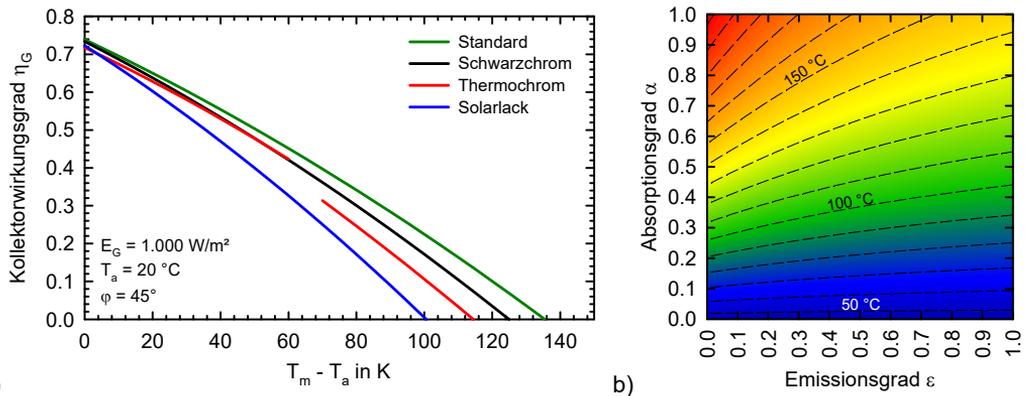


Abb. 3: Modellierte Kollektorwirkungsgradkurven der vier Beschichtungstypen (a) und Stagnationstemperatur in Abhängigkeit des Absorptions- und Emissionsgrades (b).

4. Bruttowärmeerträge

Mit den Kollektorwirkungsgradparametern der vier Beschichtungstypen werden mithilfe des Tools ScenoCalc (siehe [21]) die jährlichen Kollektorbruttowärmeerträge (BWE) berechnet, wodurch ein erster Vergleich der Kollektorleistungsfähigkeit untereinander möglich wird. Die BWE stellen den theoretisch maximalen Kollektorjahresertrag dar, sofern der Kollektor ganzjährig auf einer konstanten mittleren Fluidtemperatur T_m betrieben wird. In Solar-Keymark-Zertifikaten werden die BWE üblicherweise für mittlere Fluidtemperaturen von 25 °C, 50 °C und 75 °C angegeben. Die Bruttowärmeerträge der thermochromen Absorberbeschichtung für mittlere Fluidtemperaturen von 25 °C und 50 °C werden mit den Kennwerten im nichtgeschalteten Bereich ($T_{Abs} < 68 \text{ }^\circ\text{C}$) ermittelt.

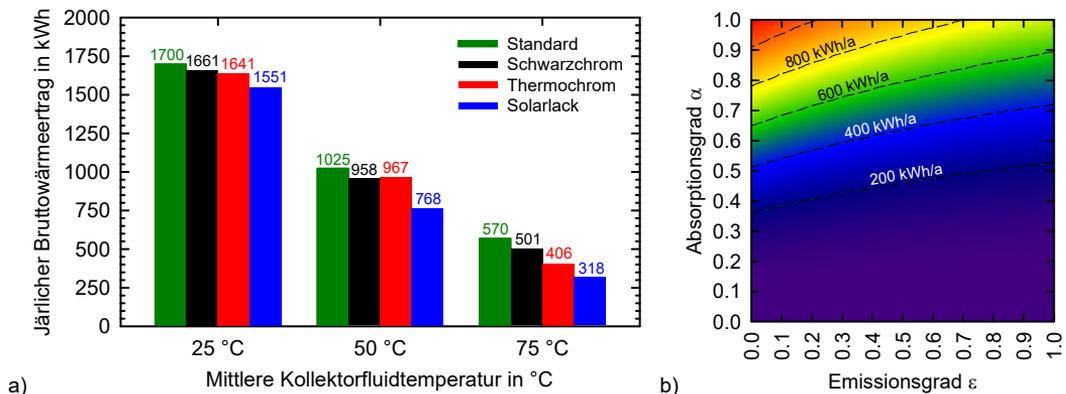


Abb. 4: Bruttowärmeerträge der vier Beschichtungskategorien für drei unterschiedliche mittlere Kollektorfluidtemperaturen (a) und Bruttowärmeerträge für eine mittlere Kollektorfluidtemperatur von 50 °C in Abhängigkeit des Absorptions- und Emissionsgrades (b) am Referenzstandort Würzburg.

Über den gesamten Betriebsbereich weist die Standardbeschichtung die höchsten BWE auf, was direkt aus den stets höheren Kollektorwirkungsgraden resultiert. Für die relevante mittlere Fluidtemperatur $T_m = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ kann ein Flachkollektor mit hochselektiver Beschichtung einen BWE von 1025 kWh a^{-1} erzielen (siehe Abb. 4.a). Im Vergleich dazu reduzieren sich die Erträge der thermochromen Beschichtung um 6 %, die des Schwarzchromes um 7% und die einer Beschichtung auf Basis von Solarlack

um bis zu 25 %. Die schaltende Charakteristik der thermochromen Beschichtung ist ab Fluidtemperaturen von 75 °C deutlich erkennbar. Die Erträge sind im Vergleich zum Schwarzchrom um rund 9 % (95 kWh a⁻¹) niedriger. Für Fluidtemperaturen von 25 °C und 50 °C beträgt der Unterschied lediglich 1 % (20 kWh a⁻¹ bzw. 9 kWh a⁻¹), was die hohe Leistungsfähigkeit bei üblichen Betriebsbedingungen trotz Überhitzungsschutzes bestätigt.

5. Systemsimulationen

Die Leistungsfähigkeit eines Flachkollektors mit unterschiedlichen Absorberbeschichtungen wird durch Systemsimulationen einer realen Solaranlage zur Trinkwarmwassererwärmung als auch zur Raumheizungsunterstützung (Kombianlage) simuliert. Besonders die Leistungseigenschaften der thermochromen Schicht werden detailliert untersucht, da dessen Schalltemperatur im typischen Betriebsbereich des Kollektors liegt. Weiterhin werden die Temperaturbelastungen (Maximaltemperatur und jährliche Häufigkeitsverteilung der Temperaturen) während des Systembetriebs und bei Stagnation diskutiert.

Die Systemsimulationen werden mit geeigneten Lastprofilen für den Trinkwarmwasser- und Raumheizungsbedarf in der Software TRNSYS durchgeführt. Für den Trinkwarmwasserbedarf wurden Zapfprofile mit DHWcalc (siehe [22]) erstellt, welche statistisch verteilte Zapfzeitpunkt und -volumina aufweisen, die im Jahresverlauf nicht konstant sind. Die zugrundeliegenden mittleren täglichen Zapfvolumina der drei definierten Zapfprofile betragen 50, 100 und 200 Liter pro Tag. Den Klimadaten liegt der Referenzstandort Würzburg zugrunde, mit einer jährlichen Globalstrahlungssumme auf die geneigte Kollektorfläche von 1294 kWh m⁻². Die Kollektorfelder sind für alle Simulationen in südlicher Ausrichtung stets um 45° gegen die Horizontale geneigt. Die Auswertung erfolgt anhand des konventionellen Nachheizenergiebedarfes \dot{Q}_{Aux} , welcher zusätzlich vom Anlagenbetreiber aufgebracht werden muss, um den Energiebedarf vollständig zu decken. Dieser sollte aus ökonomischer und ökologischer Sicht so gering wie möglich sein.

5.1 Trinkwarmwassersystem

Betrachtet wird ein Trinkwarmwassersystem in Anlehnung an die Norm EN 12977-2, welches circa 50 % des Warmwasserbedarfes eines Vierpersonenhaushaltes deckt. Das Modell umfasst zwei Flachkollektoren mit einer Bruttokollektorfläche von insgesamt 5,02 m² und einem Trinkwarmwasserspeicher mit einem Volumen von 300 Litern. Die Speichermaximaltemperatur ist auf 90 °C begrenzt und die Bereitstellungstemperatur des Trinkwarmwassers beträgt 45 °C.

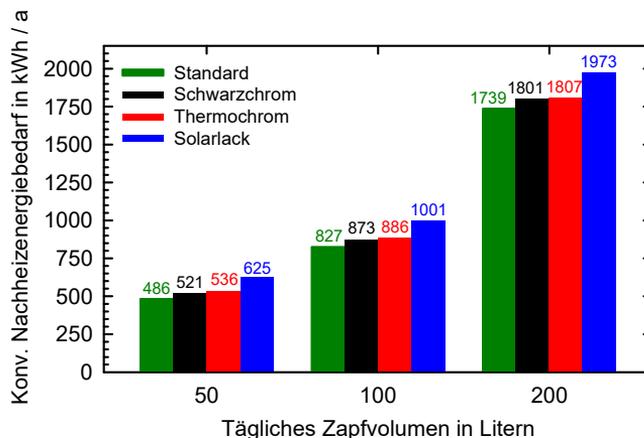


Abb. 5: Konventioneller Nachheizenergiebedarf einer Trinkwarmwasseranlage für drei unterschiedliche tägliche Zapfvolumina am Referenzstandort Würzburg.

Die Bewertung erfolgt anhand der konventionellen Nachheizenergiebedarfe \dot{Q}_{Aux} in Abhängigkeit des täglichen Zapfvolumens, welche in Abb. 5 graphisch dargestellt sind. Bei allen untersuchten Zapfvolumina weist die Standardbeschichtung die geringsten Nachheizenergiebedarfe auf. Bei einem für dieses System typischen täglichen Zapfvolumen von 100 Litern beträgt $\dot{Q}_{Aux} = 827 \text{ kWh a}^{-1}$. Dieser erhöht sich um 6 % für Schwarzchromabsorber, 7 % für thermochrome Beschichtungen und 21 % für Solarlacke.

5.2 Solarunterstütztes Raumheizungssystem

Für die Simulation einer Kombianlage in einem Einfamilienhaus wurde auf ein im TASK 32 des IEA SHC Programms definiertes Simulationsmodell zurückgegriffen (siehe [23]). Dieses Model berücksichtigt den Wärmebedarf eines Einfamilienhauses mit einer beheizten Wohnfläche von 140 m^2 und einem jährlichen Raumheizenergiebedarf von 60 kWh m^{-2} . Das Kollektorfeld umfasst sieben Flachkollektoren mit einer gesamten Bruttokollektorfläche von $17,57 \text{ m}^2$, einem Pufferspeicher von 750 Litern und einer Bereitstellungstemperatur des Trinkwarmwassers von $45 \text{ }^\circ\text{C}$.

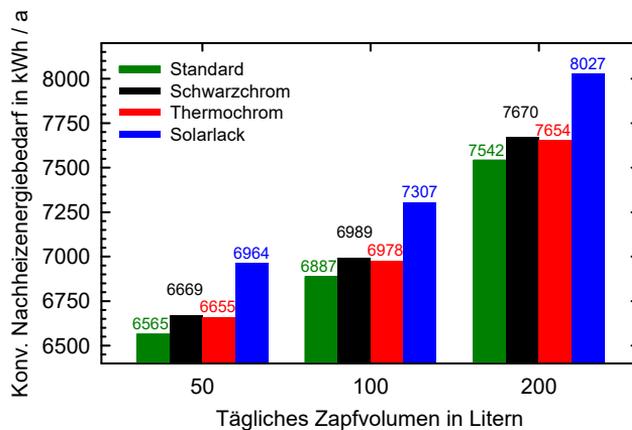


Abb. 6: Konventioneller Nachheizenergiebedarf einer Kombianlage für drei unterschiedliche tägliche Zapfvolumina am Referenzstandort Würzburg.

Der konventionelle Nachheizenergiebedarf \dot{Q}_{Aux} ist für die vier Beschichtungstypen in Abb. 6 dargestellt. Man erkennt, dass für eine tägliche mittlere Zapfrate von 100 Litern der Standardabsorber den geringsten Nachheizenergiebedarf (6887 kWh a^{-1}) aufweist. Für Kollektoren mit Schwarzchrom und thermochromer Beschichtung erhöht sich dieser um je 1,4 % auf 6989 kWh a^{-1} bzw. 6978 kWh a^{-1} . Für Kollektoren mit Solarlackbeschichtung erhöht sich der Nachheizenergiebedarf um bis zu 6,1 % auf 7307 kWh a^{-1} .

5.3 Stagnationsuntersuchungen

Während der Stagnation einer Solaranlage treten hohe thermische Belastungen des Kollektors und sensibler Anlagenkomponenten (z. B. der Solarkreispumpe, des Wärmeträgerfluides oder des Membranausdehnungsgefäßes) auf. Daher müssen in Solarkollektoren temperaturbeständige Materialien eingesetzt und im System zusätzliche Schutz- oder Kühlvorrichtungen installiert werden. Speziell die stagnationsbedingte Verdampfung des Wärmeträgermediums führt zu seiner erhöhten Degradation und häufigeren Wartungsintervallen. Um einen wartungsarmen Betrieb der Solaranlage zu gewährleisten, sollte daher die Stagnationsbelastung so gering wie möglich ausfallen. Vorwiegend Kombianlagen weisen in den Sommermonaten, aufgrund des geringen Heizenergiebedarfes, ein erhöhtes Stagnationspotential auf. Abb. 7 zeigt exemplarisch für ein tägliches Zapfvolumen von 100 Litern die Häufigkeitsverteilung der Absorberrtemperaturen oberhalb von $95 \text{ }^\circ\text{C}$ im Jahresverlauf für das Kombisystem für alle vier untersuchten Beschichtungstypen.

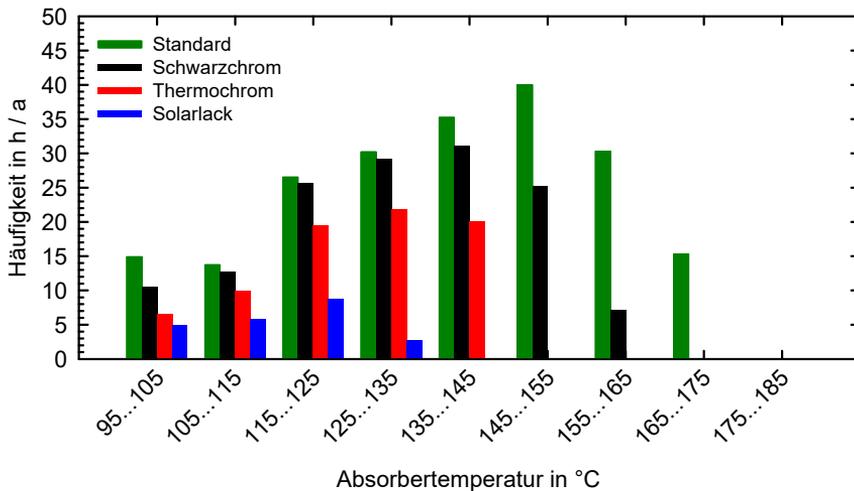


Abb. 7: Häufigkeit von Absorbtemperatur in einer solarunterstützten Heizungsanlage bei einem täglichen Zapfvolumen von 100 Litern am Referenzstandort Würzburg. Andere Zapfraten führen zu vergleichbaren Ergebnissen.

Mit bis zu 175 °C werden die maximalen Absorbtemperatur nur durch die Standardbeschichtung an circa 15 Stunden im Jahr erreicht. Die höhere Emissivität der übrigen Beschichtungstypen führt zu einer allgemeinen Reduzierung der auftretenden Maximaltemperaturen gegenüber dem Standardabsorber: die Schwarzchrombeschichtung erreicht Temperaturen zwischen 155 °C und 165 °C an 7 Stunden im Jahr und der Solarlack zwischen 125 °C und 135 °C an 3 Stunden. Die thermochrome Beschichtung begrenzt die Stagnationstemperatur aufgrund ihres stark temperaturabhängigen Emissionsgrad auf einen Temperaturbereich zwischen 135 °C und 145 °C, welcher an 20 Stunden im Jahr erreicht wird. Dies entspricht einer Reduzierung um ca. 30 K im Vergleich zu einer hochselektiven Standardbeschichtung.

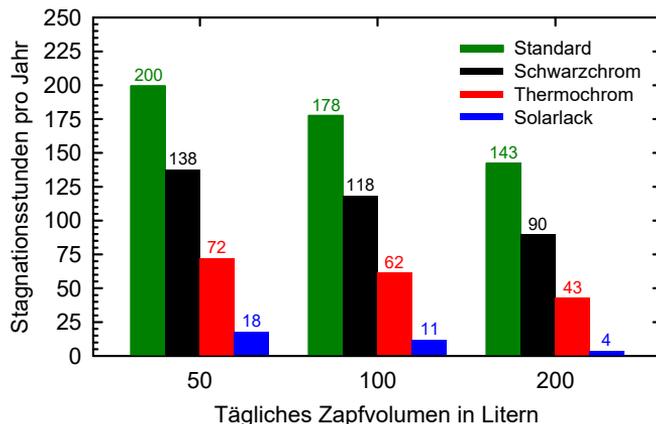


Abb. 8: Stagnationsstunden ($T_{Abs} > 120\text{ °C}$) in einer solarunterstützten Heizungsanlage für drei unterschiedliche tägliche Zapfvolumina am Referenzstandort Würzburg.

Aus der Häufigkeitsverteilung der Absorbtemperatur kann die Stagnationsdauer abgeleitet werden (siehe Abb. 8). Wir definieren diese hier als Zeitdauer mit Absorbtemperatur oberhalb von 120 °C. Bei einem Systemüberdruck von 1 bar am Kollektor im Ruhezustand beginnt im Stagnationsfall ab dieser Temperatur das Wärmeträgerfluid (z. B. TYCOCOR LS) zu verdampfen. Generell sinkt

die Stagnationsdauer mit zunehmenden täglichen Zapfvolumen, da der Pufferspeicher bei höheren Zapfraten tendenziell kühler bleibt und sich dadurch die Betriebszeiten der Solarkreispumpe erhöhen. Bei einem täglichen Zapfvolumen von 100 Litern stagniert das System mit Standardbeschichtung an rund 178 Stunden im Jahr. Dies reduziert sich auf 118 Stunden bei der untersuchten Schwarzchrombeschichtung. Für thermochrome Beschichtungen sinkt die Stagnationsdauer um 65 % auf 62 Stunden im Jahr ab. Eine weitere Reduzierung auf 11 Stunden pro Jahr ist durch Solarlacke erkennbar, wodurch die thermischen Belastungen im Stagnationsfall signifikant gesenkt werden können.

6. Zusammenfassung

In einer vergleichenden Simulationsstudie wurden marktübliche Absorberbeschichtungen für solarthermische Flachkollektoren hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit und ihres Stagnationsverhaltens untersucht. In einer Marktübersicht konnten 13 unterschiedliche Absorberbeschichtungen, welche sich anhand ihres Herstellungsverfahrens in nasschemische Beschichtung (Schwarzchrom), hochselektive Beschichtung auf Basis eines vakuumbasierten Beschichtungsprozesses (PVD-Sputter-Prozess), Solarlackierungen sowie thermochrome Absorberbeschichtungen kategorisieren lassen und Absorptionsgrade α oberhalb von 90 % und Emissionsgrade im Bereich $\epsilon = 5 \dots 90$ % aufweisen.

Durch ein am ISFH entwickeltes optisch-thermisches Kollektormodel können die zu jedem Beschichtungstyp gehörenden Kollektorwirkungsgradparameter (η_0 , a_1 , a_2) simuliert werden. Dabei weist die Standard-PVD-Beschichtung mit $\eta_{0,G} = 0,739$ den höchsten Konversionsfaktor aller untersuchten Beschichtungen auf. Schwarzchrombasierte Beschichtungen erzielen ähnlich hohe Werte. Thermochrome und Solarlackschichten weisen aufgrund der deutlich höheren Emissionsgrade um bis 2,1 %-Punkte niedrigere Konversionsfaktoren auf.

Bei der Simulation der Systemerträge einer Trinkwarmwasseranlage erhöht sich im Vergleich zur Standard-PVD-Beschichtung der konventionelle Nachheizenergiebedarf bei einer täglichen Zapfrate von 100 Litern um 6 % bei Schwarzchrom, 7 % bei thermochromen Beschichtungen und 21 % bei Solarlack. In einer solarunterstützten Heizungsanlage konnte eine Erhöhung des konventionellen Nachheizenergiebedarfes im Vergleich zur Standard-PVD-Beschichtung bei Schwarzchrom und thermochromen Beschichtungen um je 1,4 % und bei Solarlacken um 6,1 % ermittelt werden.

Die Bewertung des Stagnationsverhaltens in einer Kombianlage zeigte für die Standardbeschichtung maximale Absorberrtemperaturen von bis zu 175 °C. Durch die erhöhte Emissivität der anderen Beschichtungen können die Stagnationslasten im Allgemeinen reduziert werden. So erreichen Schwarzchrombeschichtungen maximale Temperaturen von 165 °C und Solarlacke von 135 °C. Durch den stark temperaturabhängigen Emissionsgrad thermochromer Absorberbeschichtungen können die Temperaturen auf unter 145 °C begrenzt werden. Im Vergleich zur hochselektiven Standardbeschichtung entspricht dies einer Reduzierung um bis zu 30 K. Die gesamte Stagnationsdauer (Zeitdauer, während welcher $T_{\text{Abs}} > 120$ °C gilt) reduziert sich von 178 Stunden (Standardbeschichtung) auf 118 Stunden im Jahr bei Schwarzchrombeschichtungen. Eine weitere Reduzierung auf 62 Stunden ist für thermochrome Beschichtungen und auf 11 Stunden für Solarlacke festzustellen.

Die Stagnationsbelastungen reduzieren sich durch den Einsatz von Beschichtungen mit hoher Emissivität (thermochrome und Solarlackbeschichtungen) signifikant. Aufgrund der gesteigerten thermischen Verluste wird aber auch deren Leistungsfähigkeit im normalen Betriebsbereich negativ beeinflusst. Die thermochrome Beschichtung zeichnet sich dennoch durch ihre hohe Leistungsfähigkeit trotz Überhitzungsschutzes aus. So erhöht sich der konventionelle Nachheizenergiebedarfes in einer Kombianlage im Vergleich zur Standardbeschichtung um höchstens 1,5 %. Während die unterschiedlichen Systemerträge eine einfache wirtschaftliche Bewertung, zum Beispiel durch die Menge an eingesparten fossilen Brennstoffen, ermöglichen, lassen sich die konkreten Vorteile der reduzierten Stagnationsbelastung nur schwer quantifizieren. Die geringere thermische Belastung sensibler Anlagenkomponenten oder des Wärmeträgermediums erhöht deren Lebensdauer und senkt die Wartungskosten. Aktuelle

Untersuchungen schätzen die mögliche Reduzierung der gesamten Wartungskosten bei der Vermeidung hoher Solarkreistemperaturen auf bis zu 50 % [24]. Wird die Verdampfung des Wärmeträgermediums grundsätzlich verhindert, zum Beispiel durch leistungsbegrenzenden Kollektoren mit Wärmerohren oder im Falle thermochromer Kollektoren durch eine Erhöhung des Systemdruckes (vgl. [18]), können Anlagenkomponenten kostengünstiger dimensioniert oder auf Kühlvorrichtungen verzichtet werden. Für verdampfungsfreie Solaranlagen mit maximalen Temperaturen im Solarkreis unterhalb 125 °C schätzen die genannten Untersuchungen die Reduzierung der Wärmegestehungskosten auf bis zu 25 % [25]. Unberücksichtigt bleiben weitere Aspekte, wie der Steigerung der Akzeptanz bei Nutzern und Installateuren, die eine wichtige Rolle für die Verbreitung solarthermischer Systeme spielen können.

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] American Society for Testing and Materials: Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface. ASTM-G-173, 2003.
- [2] ISO 9050:2003: Glass in Building – Determination of Light Transmittance, Solar Direct Transmittance, Total Solar Energy Transmittance, Ultraviolet Transmittance and Related Glazing Factors. Beuth Verlag, Berlin, 2003.
- [3] Howell, J. R., Siegel, R., Mengüç, M. P.: Thermal Radiation Heat Transfer. CRC Press, 5th edition, Boca Raton, 2010.
- [4] Kennedy, C. E.: Review of Mid- to High-Temperature Solar Selective Absorber Materials. Technical Report, NREL/TP-520-31267, National Renewable Energy Lab, Golden, CO, 2002. DOI: 10.2172/15000706.
- [5] Kunic, R., Mihelcic, M., Orel, B., Perse, L. S., Bizjak, B., Kovac, J., Brunold, S.: Life Expectancy Prediction and Application of Novel Polyurethane Based Thickness Sensitive and Thickness Insensitive Spectrally Selective Paint Coatings for Solar Absorbers. Solar Energy Materials & Solar Cells 95, S. 2965 – 2975, 2011. DOI: 10.1016/j.solmat.2011.05.014.
- [6] Orel, R., Orel, Z. C.: Thickness Sensitive Spectrally Selective (TSSS) Paint for Solar Collectors Optical Properties, Surface Characterization and Application Properties. Solar Energy Materials 18, S. 97 – 107, Amsterdam, 1988. DOI: 10.1016/0165-1633(88)90050-0.
- [7] Berner, J.: Alle Beschichtungen haben mit Bravour bestanden. Sonne Wind & Wärme, 09/2017, S. 97 – 99, 2017.
- [8] Wesselak, V., Schabbach, T., Link, T., Fischer, J.: Handbuch Regenerative Energietechnik. 3. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, 2017.
- [9] Diamantino, T. C., Nunes, A., Concalves, R., Páscoa, S., Chambino, T., Carvalho, M. J.: Selective Absorber Coatings Qualification – ISO 22975-3:2014 Full Application. EuroSun 2016, ISES Conference Proceedings, Abu Dhabi, 2016. DOI: 10.18086/eurosun.2016.06.01.

- [10] Schmidt, M.: Auf dem Weg zum Nullemissionsgebäude – Grundlagen, Lösungsansätze, Beispiele. Springer-Verlag, Berlin, 2013.
- [11] Almecogroup GmbH: TiNOX energy Produktdatenblatt. 2014.
http://www.almecogroup.com/uploads/1172-ALMECO_TinoxEnergy_ENG_S402_07_2014_mail.pdf (Letzter Zugriff: 06.11.2018).
- [12] Dampney Company, Inc.: Thurmalox 250 Selective Black - Produktdatenblatt.
<http://www.dampney.com/Portals/1/PropertyAgent/456/Files/2/Thurmalox250-SolarCoating.pdf> (Letzter Zugriff: 06.11.2018).
- [13] Interne Messung am ISFH.
- [14] Savosolar GmbH: Savo 15 DG Kollektor - Produktdatenblatt. 2015. <http://savosolar.com/wp-content/uploads/Savo-15-DG-technical-datasheet-2018-09-21-EN.pdf> (Letzter Zugriff: 06.11.2018).
- [15] SOLEC Solar Energy Corporation: SOLKOTE HI/SORB-II - Produktdatenblatt. 2011.
<https://www.solec.org/wp-content/uploads/2014/02/SOLKOTEbrochure.pdf> (Letzter Zugriff: 06.11.2018).
- [16] Föste, S., Pazidis, A., Reineke-Koch, R., Hafner, B., Mercks, D., Delord, C.: Flat plate collectors with thermochromic absorber coatings to reduce loads during stagnation. *Energy Procedia* 91 (2016), S. 42 – 48. DOI: 10.1016/j.egypro.2016.06.169.
- [17] Müller, S., Reineke-Koch, R., Giovannetti, F., Hafner, B.: Flat Plate Collectors with Thermochromic Absorber Coating Under Dynamic System Tests. *Proceedings ISES Solar World Congress 2017*, S. 2062 - 2070, Abu Dhabi, 2017. DOI: 10.18086/swc.2017.31.10.
- [18] Müller, S., Reineke-Koch, R., Giovannetti, F., Hafner, B.: Experimental Investigations on the Stagnation Behavior of Thermochromic Flat Plate Collectors. *EuroSun Conference 2018*.
- [19] Föste, S.: Flachkollektor mit selektiv beschichteter Zweischeibenverglasung. Dissertation, 2013.
- [20] ISO 9806:2017: Solarenergie – Thermische Sonnenkollektoren – Prüfverfahren. Beuth Verlag, Berlin, 2018.
- [21] SP Technical Research Institute of Sweden (RISE): Solar Collector Energy Output Calculator (ScenoCalc). Version 5.01, 2016.
- [22] Jordan, U., Vajen, K.: DHWcalc - Tool for the Generation of Domestic Hot Water (DHW) Profiles on a Statistical Basis. Universität Kassel, Institut für Thermische Energietechnik, Version 1.10, 2003.
- [23] Heimrath, R., Haller, M.: Project Report A2 of Subtask A: The Reference Heating System, the Template Solar System. IEA SHC TASK 32, Solar Heating and Cooling Programme. International Energy Agency (IEA), 2007.
- [24] Schiebler, B., Giovannetti, F., Fischer, S.: Reduction of Maintenance Costs by Preventing Overheating. IEA SHC TASK 54, Info Sheet B03, 2018.
- [25] Schiebler, B., Giovannetti, F., Fischer, S.: Levelized Cost of Heat for Solar Thermal Systems with Overheating Prevention. IEA SHC TASK 54, Info Sheet B05, 2018.