

# **Überhitzungsschutz mit thermochromen Solarabsorberschichten**

Heinz Marty, Stefan Brunold, Peter Vogelsanger  
SPF Institut für Solartechnik, Hochschule für Technik Rapperswil HSR  
Oberseestr. 10, CH-8640 Rapperswil, Schweiz  
+41 (55) 222 4829, fax +41 (55) 222 4844  
heinz.marty@solarenergy.ch  
www.solarenergy.ch

## **Einleitung**

Moderne Sonnenkollektoren für die solare Wasseraufbereitung sind mittlerweile sehr effiziente Strahlungswandler. Die dazu verwendeten Absorberschichten sind bezüglich Absorption  $\alpha$  und Emission  $\varepsilon$  hochselektiv, was in Zeiten von guten Solarstrahlungskonditionen und geringem Warmwasserverbrauch zu hohen Temperaturen und starken thermischen Belastungen der eingesetzten Materialien führt. Insbesondere bei Stagnation kann das eingesetzte Wasser-Glykol Wärmeträgermedium durch die hohen Temperaturen Schaden nehmen. Thermochrome Absorberschichten, die ihre optischen Eigenschaften in Abhängigkeit von der Temperatur ändern (schalten), könnten allenfalls als effektive Überhitzungsschutzmassnahme dienen.

Solare Warmwassersysteme und Kombisysteme, ausgerüstet mit Kollektoren mit thermochromer Absorberschicht, wurden mit Polysun4 [2] simuliert und eingehend studiert. Aus den Resultaten konnten Anforderungen an die optischen Eigenschaften der Schicht im energiewandelnden, ungeschalteten Zustand, sowie im überhitzungsschützenden, geschalteten Zustand definiert werden [1]. Sie garantieren gute solare Erträge und deutlich geringere thermische Belastung des Wärmeträgermediums verglichen mit Solarkollektoren mit normalen, nicht schaltenden Schichten.

## **Anlagedetails**

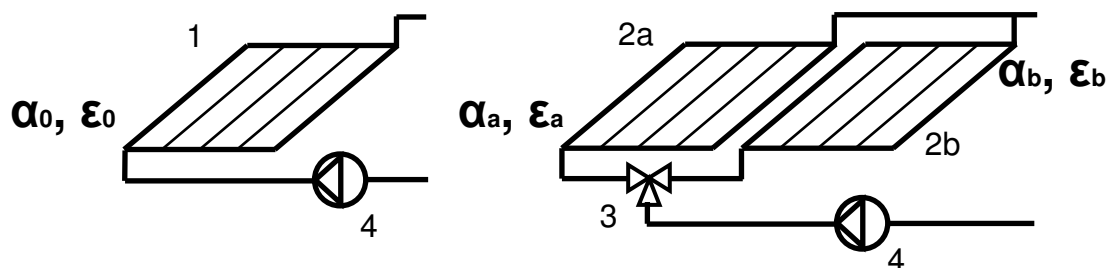
Zur Qualitätsbewertung und Sensitivitätsanalyse der thermochromen Solarabsorberschichten wurden Referenzanlagen definiert, je zwei Anlagen für den Typ Warmwasser (WW) und Raumheizung (RH). Die Anlagen sind ausgelegt für Einfamilienhäuser mit mittlerer und hoher solaren Deckung. Das Benutzerprofil beinhaltet eine drei Wochen lange Ferienperiode im August. Bei allen Anlagen ist dadurch eine Stagnationsphase garantiert und die Funktion des thermochromen Kollektors ist beobachtbar.

**Tabelle 1:** Charakteristische Kenngrößen der vier betrachteten Anlagen.

	<i>WWGross</i>	<i>WWKlein</i>	<i>RHGross</i>	<i>RHKlein</i>
Solare Deckung	74%	55%	27%	16%
Energiebedarf	760kWh	2380kWh	8640kWh	19720kWh
WW pro Tag	50l/Tag	150l/Tag	50l/Tag	150l/Tag
Kollektorfläche	7m <sup>2</sup>	5m <sup>2</sup>	25m <sup>2</sup>	16m <sup>2</sup>
Speichergrosse	400l	400l	1300l	1300l
Monate mit über 95% solare Deckung	7 Monate	1 Monat	4 Monate	2 Monate

## Kollektoren

Das verwendete Kollektormodell der Referenzanlage entspricht einem, im Vergleich mit dem SPF Kollektorkatalog, knapp überdurchschnittlich guten Kollektor. Es wurde bewusst kein Spitzenprodukt verwendet. Die Daten der Wirkungsgradkennlinie sind in Tabelle 2 zusammengefasst.



**Abbildung 1:** Kollektormodelle für die Simulation. Links: Kollektor der Referenzanlage, Rechts: das Modell des thermochromen Kollektors. 1:Kollektor mit  $\alpha_0$  und  $\epsilon_0$ , 2a:Kollektor mit gleich guten Eigenschaften wie Kollektor 1, 2b:Kollektor mit geschalteten optischen Eigenschaften  $\alpha_b$ ,  $\epsilon_b$ , 3:Mischventil bei Austrittstemperaturen unter 120° wird Kollektor 2a durchströmt sonst Kollektor 2b, 4:Pumpe im Solarkreis.

Der thermochrome Kollektor ist für die Simulation durch zwei Kollektoren mit verschiedenen Wirkungsgradkennlinien modelliert, siehe Abbildung 1, rechts. Die Wirkungsgradkennlinie des Kollektors 2a entspricht derjenigen des Referenzkollektors in Tabelle 2. Für den Kollektor mit geschalteter Schicht gelten Wirkungsgradparameter aus Tabelle 3. Der Absorptions- und Emissionsgrad der Schichten wurde variiert um deren Auswirkungen auf die Kollektortemperaturen und Wirkungsgradeinbussen zu betrachten.

Die Parameter der Kollektorstoffkennlinie für die verschiedenen optischen Eigenschaften des Absorbers (Absorptions- und Emissionsgrad) sind mit Co-DePro [3] berechnet.

**Tabelle 2:** Parameter der Wirkungsgradkennlinie des verwendeten Referenz-Kollektors

$\eta_0$	0.7808	-
$a_1$	-3.946	$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$
$a_2$	-5.817E-03	$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-2}$

**Tabelle 3:** Parameter der Wirkungsgradkennlinien für verschiedene optische Werte. Absorptionsgrad  $\alpha$  variiert von 0.95 bis 0.65 und Emissionsgrad  $\varepsilon$  von 0.05 bis 0.35.

<i>Emissionsgrade</i>		<i>Absorptionsgrade</i>				<i>Einheit</i>
		$\alpha = 0.65$	$\alpha = 0.75$	$\alpha = 0.85$	$\alpha = 0.95$	
$\varepsilon = 0.35$	$\eta_0$	0.5435	0.6188	0.6917	0.7623	-
	$a_1$	-4.685	-4.718	-4.749	-4.779	$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$
	$a_2$	-10.99 E-03	-10.82 E-03	-10.67 E-03	-10.53 E-03	$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-2}$
$\varepsilon = 0.25$	$\eta_0$	0.548	0.6237	0.6969	0.7678	-
	$a_1$	-4.437	-4.469	-4.5	-4.528	$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$
	$a_2$	-9.718 E-03	-9.517 E-03	-9.337 E-03	-9.19 E-03	$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-2}$
$\varepsilon = 0.15$	$\eta_0$	0.553	0.6291	0.7027	0.774	-
	$a_1$	-4.164	-4.196	-4.227	-4.253	$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$
	$a_2$	-8.243 E-03	-8.007 E-03	-7.791 E-03	-7.611 E-03	$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-2}$
$\varepsilon = 0.05$	$\eta_0$	0.5585	0.6351	0.7091	0.7808	-
	$a_1$	-3.864	-3.896	-3.923	-3.946	$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$
	$a_2$	-6.528 E-03	-6.248 E-03	-6.014 E-03	-5.817 E-03	$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-2}$

## Ergebnisse

In den folgenden Diagrammen und Tabellen wird dargestellt, welche optischen Eigenschaften die Schicht des thermochromen Kollektors haben sollte, damit er rentabel und funktional bleibt. Gewährleistet wird dies mit folgenden Kriterien. Zum einen das „switching criterion“ und zum andern das „performance criterion“.

Das „switching criterion“ (Gl. 1) besagt wie, gross die Änderungen von  $\alpha$  und  $\varepsilon$  im geschalteten Zustand bezogen auf den Referenzkollektor sein müssen, um im Solarkreis unter der kritischen Fluidtemperatur zu bleiben. Da mit einer Zersetzung der Glykole bei Temperaturen oberhalb ca. 160°C zu rechnen ist, sind für unten aufgeführte „switching criterion“ eine kritische Fluidtemperatur von 160°C angenommen.

$$sc = -\Delta\alpha + a \cdot \Delta\varepsilon \geq b \quad (1)$$

Aufgrund grösserer Kollektorflächen stellen Kombisysteme höheren Anspruch auf den Schaltheub, verglichen mit Warmwassersystemen. Dies wurde durch Simulationen bestätigt und ist in Tabelle 4 ersichtlich.

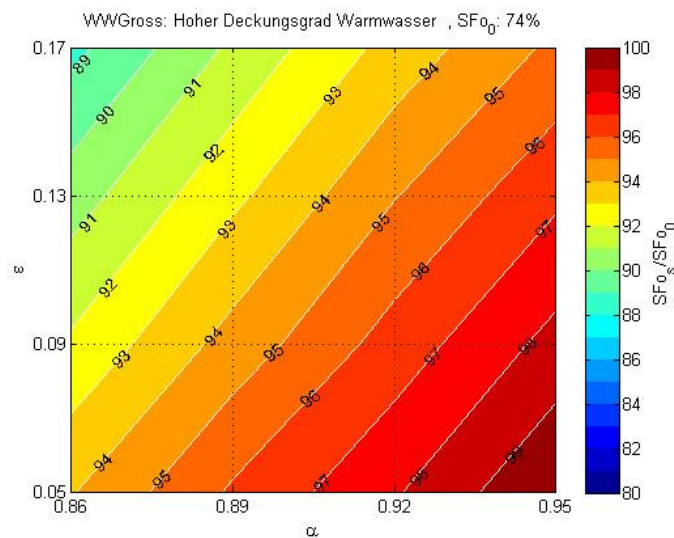
**Tabelle 4:** Mindestanforderungen an die optischen Eigenschaften im geschalteten Zustand für Fluidgrenztemperaturen von 160°C.

System	sc(160°C)
<i>WW</i>	$-\Delta\alpha + \Delta\varepsilon > 0.20$
<i>RH</i>	$-\Delta\alpha + 0.8 \cdot \Delta\varepsilon > 0.25$

Das andere Kriterium, das „performance criterion“ (Gl. 2), definiert wie klein die Änderung von  $\alpha$  und  $\varepsilon$  der ungeschalteten Schicht bezogen auf den Referenzkollektor höchstens sein darf, damit der solare Deckungsgrad nicht mehr als um eine Prozentzahl sinkt. Eine Minderung ist aufgrund der komplexen thermochromen Absorberschicht anzunehmen. Die dadurch verursachten (verdeckten) Kosten, müssen den Mehrkosten für den Überhitzungsschutz zugeschlagen werden.

$$pc = -\Delta\alpha + a \cdot \Delta\varepsilon \leq b \quad (2)$$

Der Einfluss der optischen Eigenschaften auf den solaren Deckungsgrad, ist, beispielhaft für Warmwassersysteme mit hoher solarer Deckung, in Abbildung 2 dargestellt. Daraus sind die „performance criteria“ von 1% und 5% für entsprechendes System direkt ablesbar. In Abbildung 2 sind dies die 99% resp. die 95% Geraden.



**Abbildung 2:** Einfluss der optischen Schichteigenschaften auf den solaren Deckungsgrad  $SF_o$ , bezogen auf einen  $SF_{o_0}$  von 74% bei  $\alpha = 0.95$  und  $\varepsilon = 0.05$

Für alle vier definierten Systeme wurden entsprechend die „performance criteria“ bestimmt. Da die Kollektoren der Raumheizungssysteme länger im ungeschalteten Zustand arbeiten, stellen diese offensichtlich auch höhere Ansprüche an die optischen Eigenschaften dieser Schicht, verglichen mit Warmwassersystemen (siehe Tabelle 5).

**Tabelle 5:** Mindestanforderung an die optischen Eigenschaften im ungeschalteten Zustand (bei einer Verringerung des solaren Deckungsgrades um 1% und 5%)

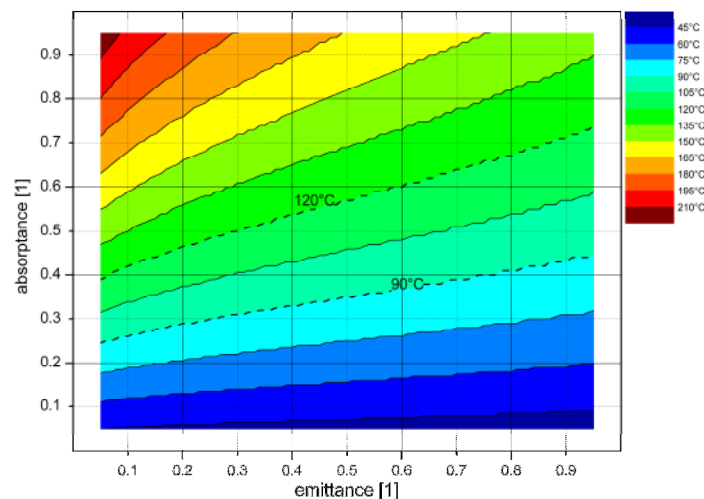
System	$SF_{o_0}$	pc(1%)	pc(5%)
<b>WWGross</b>	<b>74%</b>	$-\Delta\alpha + 0.66 \cdot \Delta\varepsilon < 0.014$	$-\Delta\alpha + 0.58 \cdot \Delta\varepsilon < 0.075$
<b>WWKlein</b>	<b>55%</b>	$-\Delta\alpha + 0.50 \cdot \Delta\varepsilon < 0.011$	$-\Delta\alpha + 0.46 \cdot \Delta\varepsilon < 0.060$
<b>RHGross</b>	<b>27%</b>	$-\Delta\alpha + 0.66 \cdot \Delta\varepsilon < 0.008$	$-\Delta\alpha + 0.64 \cdot \Delta\varepsilon < 0.045$
<b>RHKlein</b>	<b>17%</b>	$-\Delta\alpha + 0.53 \cdot \Delta\varepsilon < 0.007$	$-\Delta\alpha + 0.50 \cdot \Delta\varepsilon < 0.040$

Summiert man die anfallenden verdeckten Kosten über eine Betriebsdauer von 25 Jahren für ein pc von 1% resp. 5% (Tabelle 6), wird ersichtlich, dass diese bereits in der Größenordnung von anderen, regelungs- und systemtechnischen, Überhitzungsschutzmassnahmen liegen. Hinzu kommt, dass neben diesen verdeckten Kosten noch mit direkten Mehrkosten für die aufwändigere Absorberschicht zu rechnen ist.

**Tabelle 6:** Mehrkosten für die, durch suboptimale Absorberschichteigenschaften verursachten, Ertragseinbussen, während einer Betriebsdauer von 25 Jahren

	SFo <sub>0</sub>	pc (5%)		pc (1%)	
System	%	Energiepreis 0.15 CHF/kWh	Energiepreis 0.30 CHF/kWh	Energiepreis 0.15 CHF/kWh	Energiepreis 0.15 CHF/kWh
<i>WWKlein</i>	<b>55</b>	245 CHF	490 CHF	49 CHF	98 CHF
<i>RHKlein</i>	<b>17</b>	608 CHF	1216 CHF	122 CHF	244 CHF

Für tiefere Grenztemperaturen im Kollektor, wie zum Beispiel 90°C oder 120°C, können jedoch zukunftsweisende Vorteile entstehen. Es bestünde, zusätzlich zum Fluidschutz und Kosteneinsparungen im hydraulischen Kreislauf, die Möglichkeit der Materialeinsparung und Einsatz neuer Materialien im Kollektor. Im speziellen wird da an den Absorber, sowie die rückseitigen und seitlichen Wärmedämmungen gedacht. Je tiefer diese Grenztemperatur gewählt wird, je höher sind jedoch die Anforderungen an das „switching criterion“. Dieses kann nur noch durch Anpassung von Absorptionsgrad und Emissionsgrad erreicht werden. Das Schalten nur des Emissionsgrades reicht dazu nicht mehr aus.



**Abbildung 3:** Stagnationstemperatur als Funktion von absorptance  $\alpha$  und emittance  $\epsilon$  nach S. A. Klein [4] für einen sehr guten Flachkollektor bei einer Einstrahlung von 1100 W/m<sup>2</sup> und 30°C Umgebungstemperatur. Transmission des Glas von 0.91 und Wärmeverlustkoeffizient für Gehäuse (ohne Front) von 0.9 W\*m<sup>-2</sup>\*K<sup>-1</sup>.

## Schlussfolgerungen

Ein thermochromer Kollektor kann als Überhitzungsschutz dienen. Der Überhitzungsschutz von 160°C, erreicht durch eine  $\alpha$ ,  $\varepsilon$  schaltende Schicht, hat jedoch auch seinen Preis. Wegen dem komplexeren Aufbau ist anzunehmen, dass die ungeschaltete Schicht suboptimal sein wird. Die dadurch entstehenden Mehrkosten sind nicht sehr hoch, jedoch in der Grössenordnung von anderen Überhitzungsschutztechnischen Massnahmen.

Interessant wird es für Grenztemperaturen kleiner als 120°C. Ab dann können für den Kollektorbau neue Materialien eingesetzt werden sei es für den Absorber oder auch die Wärmedämmung. Für diese tiefen Grenztemperaturen muss die Schicht mit  $\alpha$  und  $\varepsilon$  geschaltet werden das alleinige Schalten von  $\varepsilon$  reicht nicht mehr aus.

## Danksagung

Das SPF dankt dem Bundesamt für Energie für die Unterstützung der dargestellten Forschungsaktivitäten.

## Literatur

- [1] Brunold, S.; Vogelsanger, P.; Marty, H. (2007). Beurteilung der Möglichkeiten von thermochromen Schichten als potenzielle Überhitzungsschutzmassnahme für solarthermische Kollektoren – Eine Studie im Auftrag des Bundesamts für Energie
- [2] Polysun 4, Simulationsprogramm zur Dimensionierung thermischer Solaranlagen, Vela Solaris AG, CH-8640 Rapperswil, [www.velasolaris.ch](http://www.velasolaris.ch)
- [3] CoDePro, Software zur Berechnung von Kollektorwirkungsgradparameter, University of Wisconsin, Madison, WI 53706-1481, <http://sel.me.wisc.edu>
- [4] S. A. Klein; Calculation of flat-plate collector loss coefficients; Solar Energy 17 (1975), 79-80
- [5] Solar Engineering of Thermal Processes, John A. Duffie and William A. Beckman, Wiley-Interscience, Second Edition