

# MODELLIERUNG VON KUNSTSTOFFKOLLEKTOREN MIT ÜBERHITZUNGSSCHUTZ

Robert Hausner  
AEE-INTEC  
Feldgasse 19, A-8200 Gleisdorf  
Tel.: +43-3112 / 5886, Fax: DW -18  
E-Mail: [r.hausner@aee.at](mailto:r.hausner@aee.at)

Katharina Resch  
Polymer Competence Center Leoben GmbH  
Roseggerstrasse 12, A-8700 Leoben  
Tel.: +43-3842 / 402 - 2107, Fax: DW - 2102  
E-Mail: [resch@pccl.at](mailto:resch@pccl.at)

Gernot Wallner  
Montanuniversität Leoben  
Franz-Josef-Straße 18, A-8700 Leoben  
Tel.: +43-3842 / 402 - 2105, Fax: DW - 2102  
E-Mail: [wallner@unileoben.ac.at](mailto:wallner@unileoben.ac.at)

## Kurzfassung

Das wesentliche Ziel dieser Arbeit war es, das Potenzial thermotroper Schichten für den Überhitzungsschutz von Vollkunststoff-Flachkollektoren mittels theoretischer Modellierung, zu ermitteln. Dafür wurden Berechnungen durchgeführt, die den Einfluss thermotroper Schichten auf die allgemeine Kollektorleistungsfähigkeit aufzeigten und die notwendigen optischen Eigenschaften der thermotropen Schichten wie ihre solare Transmission im klaren und im opaken Zustand und die Schalttemperaturen bzw. Schaltcharakteristiken ableiten ließen. Die Untersuchungen zeigten, dass die maximalen Absorberrtemperaturen mit thermotropen Verglasungssystemen geeignet begrenzt werden können. Allgemein ist der Einfluss der thermotropen Schicht auf den Normalbetrieb eines Kollektors gering, solange ihre Transparenz im klaren Zustand einen Wert von 85% nicht unterschreitet. Kollektoren mit Doppelverglasung und nicht selektiv beschichtetem Absorber sind in Kombination mit einer thermotropen Verglasung am besten geeignet. Für diese Konfiguration ist die Entwicklung und Auslegung der thermotropen Schicht mit einer hemisphärischen solaren Resttransmission im Bereich von 25 bis 60% notwendig um Stagnationstemperaturen des Kollektors im Bereich von 80 bis 130 °C zu erreichen. Für einen guten Wirkungsgrad des Kollektors im Normalbetriebszustand ist ein rascher und steil verlaufender Schaltprozess notwendig. Um z. B. eine Stagnationstemperatur von etwa 80 °C zu erreichen, muss für die angeführte Kollektorkonfiguration das Schaltintervall bei etwa 50 – 60 °C liegen, für höhere zulässige Stagnationstemperaturen sollte es entsprechend höher liegen.

## 1 Einleitung

Polymermaterialien haben für solarthermische Kollektoren das Potential gegenüber den üblicherweise verwendeten Materialien wie z. B. Metalle, Glas und mineralische

Dämmstoffe, eine deutliche Kostenreduktion zu erreichen. Insbesondere bei den für die Solartechnik wichtigen Metallen wie Kupfer sind derzeit sehr starke Preissteigerungen zu beobachten. Mit Polymermaterialien könnte damit ein wesentlicher Beitrag zur weiteren Verbreitung der Verwendung der Solarenergie für verschiedene Heizungszwecke erreicht werden.

Andererseits sind aber besonders Absorber, wenn sie aus kostengünstigen Polymeren hergestellt sind, gefährdet irreversible Schäden durch Deformationen und Degradationen zu erleiden, wenn sie über längere Zeit höheren Temperaturen, wie sie im häufiger auftretenden Systemstillstand auftreten, ausgesetzt werden. Es ist deshalb notwendig geeignete Überhitzungsschutzmaßnahmen zu ergreifen.

Thermotrope Schichten erlauben den Energiefluss in Flachkollektoren zu steuern (Wallner et al., 2006). Thermotrope Verglasungen ändern ihr Transmissionsverhalten für Licht reversibel bei einer bestimmten Temperatur indem sie von einem transparenten in einen lichtstreuenden Zustand schalten (Nitz et al., 2005).

In der vorliegenden Studie wird das Potential thermotroper Schichten zum Überhitzungsschutz von Vollkunststoffkollektoren mittels theoretischer Modellierung ausgeleuchtet. Besonders werden dabei die thermische Leistungsfähigkeit des Kollektors und die für ein geeignetes Schaltverhalten der thermotropen Schicht notwendigen Materialeigenschaften wie Schalttemperatur, solare Transparenz im klaren bzw. opaken Zustand betrachtet. Die Absorbertemperatur sollte dabei auf maximal etwa 80 °C beschränkt bleiben. Diese Temperatur ist einerseits eine Grenztemperatur für die Langzeitbelastung sehr preisgünstiger Polymermaterialien und andererseits passt sie recht gut zum Anforderungsprofil der solaren Warmwasserbereitung bzw. Heizungsunterstützung.

## **2 Modellparameter**

### **2.1 Software**

Die zur Modellierung notwendige Software zur mathematischen Beschreibung der Leistungsfähigkeit von Flachkollektoren wurde von der AEE-INTEC auf der Basis bekannter theoretischer Beschreibungen (Duffie et al., 1991) entwickelt und den Erfordernissen dieser Aufgabenstellung, insbesondere betreffend thermotroper Schichten, angepasst (SOLAR, 2007).

Im wesentlichen berücksichtigt das Programm die direkte, diffuse und gestreute solare Strahlung, die Transmission, Absorption und Reflexion an Mehrfachverglasungen inklusive thermotroper Schichten, die Absorption, Reflexion und thermische Emission von Absorberbeschichtungen, den Wärmetransport vom Absorber zum Fluid und die thermischen Verluste durch Konvektion, Strahlung und Leitung durch die Kollektorverglasung und das Kollektorgehäuse (Wallner et al., 2006).

### **2.2 Kollektor Konfiguration**

Für den Absorber des Modellkollektors wurde eine spezielle 10 mm starke Dreifachstegplatte, wie sie auch in einem kommerziellem Produkt angewendet wird (Meir et al. 2003), nachgebildet, wobei die oberen Kanäle für den Wärmeträger Wasser verwendet wurden und die unteren Kanäle luftgefüllt waren. Als Absorberbeschichtung wurde sowohl eine nichtselektive schwarze Beschichtung mit einer solaren Absorption  $\alpha$  von 0,95 und einer thermischen Emission  $\varepsilon$  von 0,9, als auch eine selektive Beschichtung

mit einem  $\alpha$  von 0,95 und einem  $\varepsilon$  von 0,05 berücksichtigt. Die spezifische Durchflussmenge für den Wärmeträger Wasser betrug  $50 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{h})$ .

Zwei verschiedene Kollektorabdeckungen wurden betrachtet: Eine 4mm starke Einfachplatte aus Polycarbonat wurde verglichen mit einer 10 mm starken Doppelstegplatte aus dem gleichen Polymer mit luftgefüllten Kanälen (Breite 9,5 mm, Dicke der Stege und Platten 0,5 mm).

Die thermotrope Schicht wurde an der Innenseite der Kollektorabdeckung angebracht. Für diese Schicht wurden konstante solare Transmissions- und Reflexionswerte für den klaren als auch opaken Zustand angenommen. Im relativ engen Schalttemperaturbereich (5K) wurden lineare Übergänge in den Kennwerten verwendet. Im transparenten Zustand wurde eine solare Transmission von 85 bzw. 90% gewählt, im opaken Zustand Beträge von 10 bis 60%. Eine eventuelle Absorption in dieser Schicht wurde vernachlässigt.

Der Luftspalt zwischen Absorber und Kollektorabdeckung wurde 10 mm gewählt. Die Kollektorrückseite wurde mit einer 50 mm dicken Dämmung versehen und die seitlichen Ränder wurden 30 mm gedämmt.

Der Kollektor wurde in südlicher Richtung mit  $45^\circ$  Neigung aufgestellt. Die Umgebungslufttemperaturen und Himmelsstrahlungstemperaturen wurden jeweils gleich mit 0, 20 und  $30^\circ\text{C}$  gewählt. Die globalen Strahlungsleistungen in der Kollektorebene wurden mit  $1000$ ,  $1100$  und  $1200 \text{ W}/\text{m}^2$  mit einem jeweiligen Diffusanteil von 10, 15 und 25 % (horizontal gemessen) gewählt.

### **3 Ergebnisse und Diskussion**

#### **3.1 Einfluss der thermotropen Verglasung auf den Kollektorwirkungsgrad**

In Abb. 1 wird der Wirkungsgrad eines Kollektors mit Einfachverglasung und schwarzem Absorber bei einer solaren Einstrahlung von  $1200 \text{ W}/\text{m}^2$  bei Umgebungstemperaturen von 0 und  $30^\circ\text{C}$  verglichen. Es ist erkennbar, dass eine thermotrope Schicht mit einer Transparenz von 10% im opaken Zustand einen geeigneten Überhitzungsschutz für diese Kollektorkonfiguration ergibt. Um maximale Absorberrtemperaturen bei niedrigen Umgebungstemperaturen von  $90^\circ\text{C}$  nicht zu überschreiten, ist ein Schalttemperaturintervall von etwa  $45 - 50^\circ\text{C}$  notwendig. Bei höheren Umgebungstemperaturen wird allerdings der nutzbare Arbeitsbereich des Kollektors auf etwa  $55 - 60^\circ\text{C}$  reduziert.

In Abb. 2 hingegen wird gezeigt, dass bei Verwendung einer Doppelstegplattenverglasung mit einer vergleichbaren thermotropen Schicht (Schalttemperaturintervall jedoch  $55 - 60^\circ\text{C}$ ) eine deutlich geringere Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur gegeben ist. Im gerechneten Beispiel übersteigt der nutzbare Arbeitsbereich des Kollektors bei der hohen Umgebungstemperatur  $60^\circ\text{C}$  deutlich. Das zeigt, dass für Anwendungen zur solaren Warmwasserbereitung Kollektoren mit Doppelstegplattenverglasungen und thermotropen Schichten geeigneter sind. Thermotrope Materialien mit ausgezeichnetem Schaltverhalten können die maximalen Absorberrtemperaturen auf etwa  $90^\circ\text{C}$  limitieren. Das entspricht etwa den benötigten Maximaltemperaturen von solaren Warmwasserbereitungs- bzw. Heizungssystemen. Für solche Kollektorkonfigurationen sind thermotrope Schichten mit einem Schalttemperaturintervall von  $55 - 60^\circ\text{C}$  notwendig.

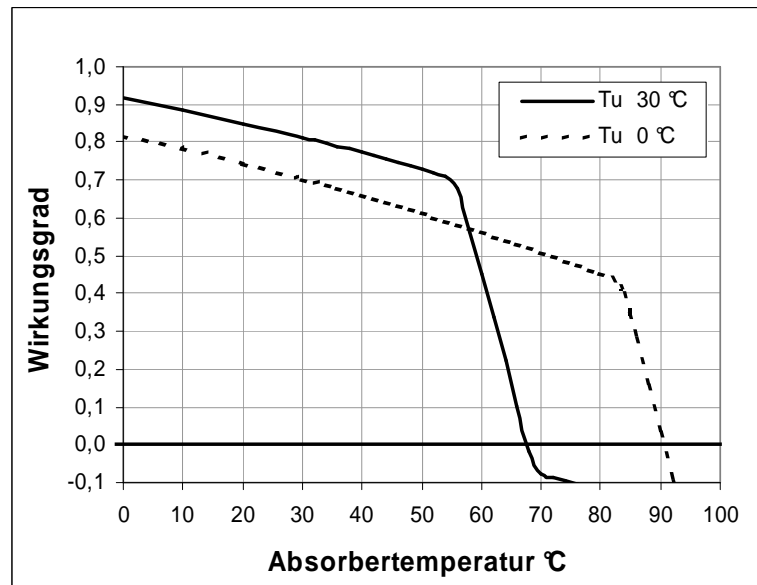


Abb. 1 – Wirkungsgrad eines Kollektors mit Einfachverglasung und schwarzem Absorber ( $\alpha=0,95$ ,  $\epsilon=0,90$ ), bei einer solaren Einstrahlung von  $1200 \text{ W/m}^2$  und Umgebungstemperaturen von 0 und  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ . Transmission der thermotropen Schicht: 90% im klaren und 10% im opaken Zustand, Schalttemperaturintervall:  $45 - 50 \text{ }^\circ\text{C}$ .

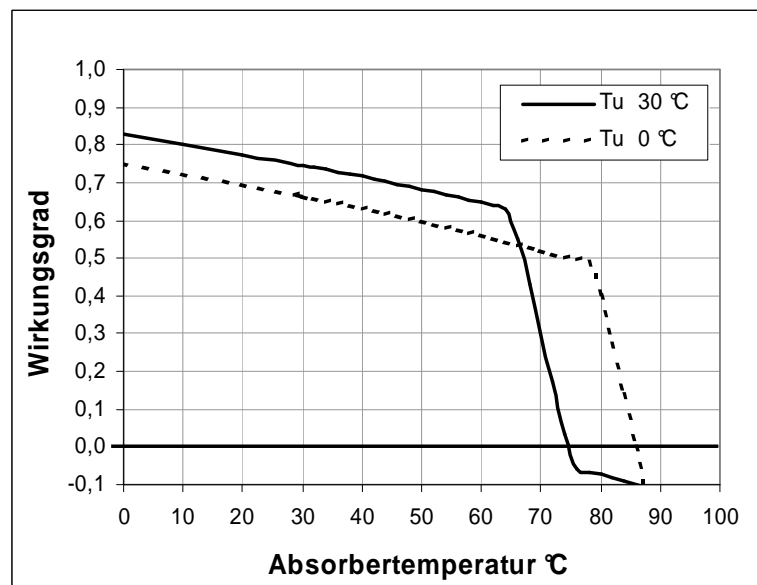


Abb. 2 – Wirkungsgrad eines Kollektors mit Doppelstegplattenverglasung und schwarzem Absorber ( $\alpha=0,95$ ,  $\epsilon=0,90$ ), bei einer solaren Einstrahlung von  $1200 \text{ W/m}^2$  und Umgebungstemperaturen von 0 und  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ . Transmission der thermotropen Schicht: 90% im klaren und 10% im opaken Zustand, Schalttemperaturintervall:  $55 - 60 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Der Einfluss der Absorberbeschichtung ist aus dem Vergleich der Abb. 3 mit Abb. 2 ersichtlich. In Abb. 3 wurden die Kennlinien eines Kollektors dargestellt, der sich in der Absorberbeschichtung unterscheidet; sie ist selektiv ( $\alpha=0,95$ ,  $\epsilon=0,05$ ). Das notwendige Schalttemperaturintervall würde hier  $35 - 40 \text{ }^\circ\text{C}$  betragen. Es ist ersichtlich, dass bei höheren Umgebungstemperaturen der nutzbare Arbeitsbereich des Kollektors auf etwa

40 °C eingeschränkt wird. Diese Konfiguration ist somit für die solare Warmwasserbereitung und Raumheizung ungeeignet.

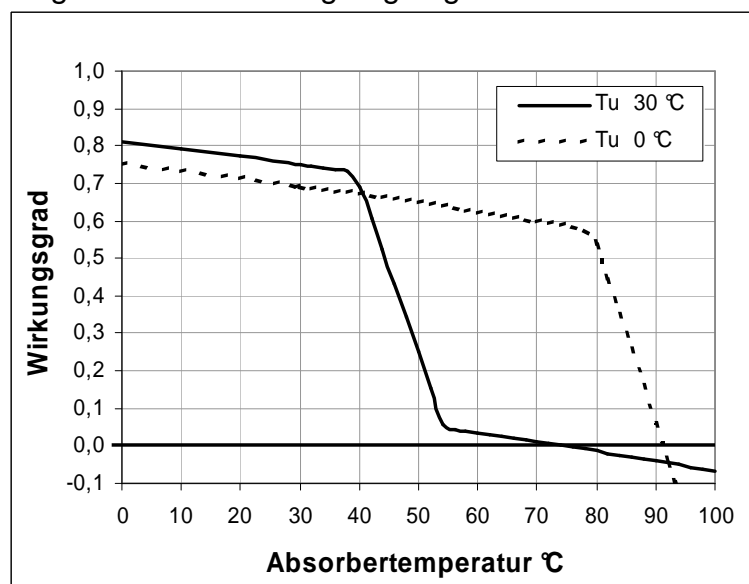


Abb. 3 – Wirkungsgrad eines Kollektors mit Doppelstegplattenverglasung und selektivem Absorber ( $\alpha=0,95$ ,  $\epsilon=0,05$ ), bei einer solaren Einstrahlung von  $1200 \text{ W/m}^2$  und Umgebungstemperaturen von 0 und  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ . Transmission der thermotropen Schicht: 90% im klaren und 10% im opaken Zustand, Schalttemperaturintervall:  $35 - 40 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Aus diesen Darstellungen kann somit geschlossen werden, dass thermotrope Materialien für einen Überhitzungsschutz von Vollkunststoffkollektoren geeignet sind. Allerdings ist das notwendige Schalttemperaturintervall abhängig von der Kollektorkonfiguration und muss daher an eine spezifische Anwendung angepasst werden.

### 3.2 Einfluss des Schalthubes auf die maximalen Absorbtemperatur – Auslegung der Kollektorabdeckung

In Abb. 4 werden Wirkungsgradkennlinien für einen Kollektor mit Doppelstegplattenverglasung, einem schwarzem Absorber und thermotropen Schichten mit unterschiedlicher solarer Transparenz im opaken Zustand bei einer Umgebungstemperatur von  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  gezeigt. Man erkennt, wenn die solare Transparenz im opaken Zustand 30 % übersteigt, dass maximale Absorbtemperaturen von etwa  $95 \text{ }^\circ\text{C}$  und mehr erreicht werden auch bei den häufig auftretenden Strahlungsintensitäten von  $1000 \text{ W/m}^2$ . Mit thermotropen Schichten, die eine Transparenz von etwa 25% im opaken Zustand erreichen, können die maximalen Absorbtemperaturen der betrachteten Kollektorkonfiguration auf etwa  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  bei Strahlungsleistungen von  $1000 \text{ W/m}^2$  begrenzt werden. Selbst bei sehr hohen solaren Strahlungsleistungen von  $1200 \text{ W/m}^2$  werden dann nur Maximaltemperaturen von etwa  $90 \text{ }^\circ\text{C}$  erreicht. Die Entwicklung und Auslegung von thermotropen Materialien mit einer restlichen solarer Transparenz von maximal etwa 25 % im opaken Zustand ist erforderlich um eine optimale Temperaturkontrolle zu erreichen, d. h. die Stagnationstemperatur liegt dann nahe der maximalen Betriebstemperatur des Kollektors.

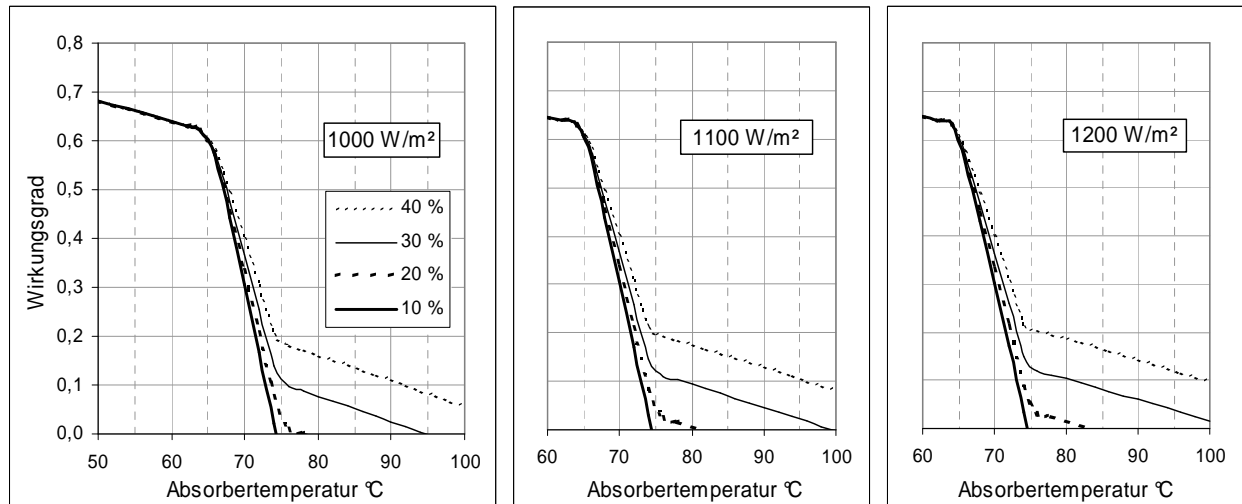


Abb. 4 – Wirkungsgrad eines Kollektors mit Doppelstegplattenverglasung und schwarzem Absorber ( $\alpha=0,95$ ,  $\varepsilon=0,9$ ), bei unterschiedlichen solaren Einstrahlungen (1000, 1100 und 1200 W/m<sup>2</sup>) und einer Umgebungstemperatur von 30 °C. Transmission der thermotropen Schicht: 90% im klaren und 10, 20, 30 und 40% im opaken Zustand, Schalttemperaturintervall: 55 – 60 °C.

### 3.3 Zusammenhang zwischen Schalhub und maximaler Absorbtemperatur

In Abb. 5 wird der Einfluss des Schalhubes auf die maximale Absorbtemperatur für einen Kollektor mit Doppelstegplattenverglasung, schwarzem Absorber ( $\alpha=0,95$ ,  $\varepsilon=0,90$ ) bei einer solaren Strahlungsleistung von 1000 W/m<sup>2</sup> und einer Umgebungstemperatur von 20 °C gezeigt. Dabei werden Resttransmissionswerte im geschalteten Zustand von 30, 35, 40, 45, 50, 55 und 60% verglichen. Die Transmission im klaren Zustand ist konstant bei 85%. Im Vergleich zu thermotropen Schichten mit 90% Transparenz im klaren Zustand (Abb. 2 und 4) ist die Wirkungsgradkennlinie etwas abgesunken. Als Entwicklungsziel sollte angestrebt werden, dass die Transparenz im klaren Zustand 85% deutlich überschreitet. Abb. 5 zeigt, dass bei Resttransparenzen im opaken Zustand von etwa 30 bis 35% und für die hier verwendeten Klimawerte die Absorbtemperaturen 90°C nicht übersteigen. Schichten mit höherer Resttransparenz führen zu einem zunehmenden Anstieg bis zu Temperaturen von 130 °C. Wie an anderer Stelle beschrieben, sind kostengünstige Polymere wie z.B. Polyolefine verfügbar, welche für solche Stagnationstemperaturen geeignet sind (Kahlen et al., 2006). Für derart hohe zulässige Stagnationstemperaturen wäre es auch besser das Schalttemperaturintervall entsprechend bei höheren Temperaturen zu wählen.

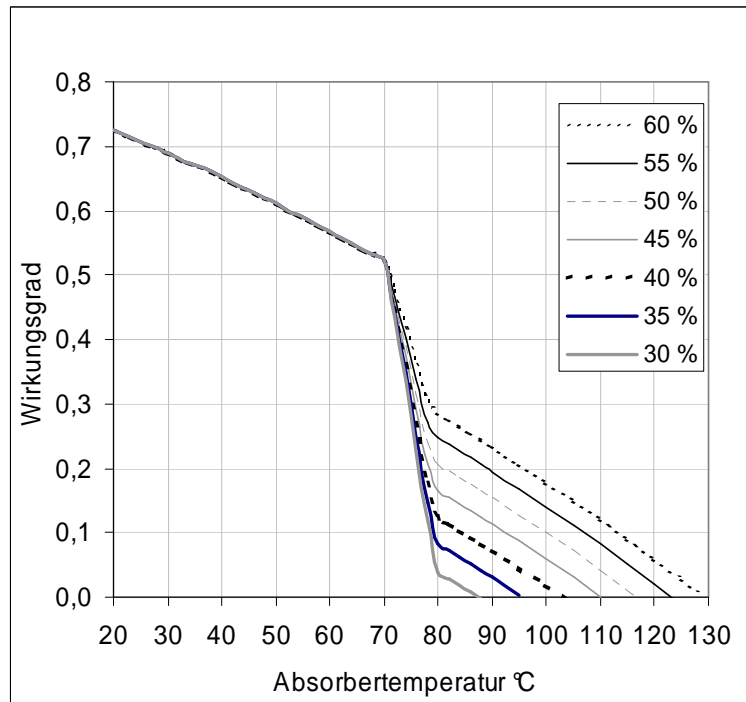


Abb. 5 – Wirkungsgrad eines Kollektors mit Doppelstegplattenverglasung und schwarzem Absorber ( $\alpha=0,95$ ,  $\varepsilon=0,9$ ), bei einer solaren Einstrahlung von  $1000 \text{ W/m}^2$  und einer Umgebungstemperatur von  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Transmission der thermotropen Schicht: 85% im klaren und 30 bis 60% im opaken Zustand, Schalttemperaturintervall:  $55 - 60 \text{ }^\circ\text{C}$ .

#### 4 Zusammenfassung, Schlussfolgerungen

Mit den vorgestellten Untersuchungen wurde mittels theoretischer Modellierung das Potenzial thermotroper Schichten zum Überhitzungsschutz von Vollkunststoff-Flachkollektoren ausgelotet. Das Augenmerk lag sowohl auf der Kollektorleistungsfähigkeit für den Normalbetriebszustand als auch auf der solaren Transmission und den Schalttemperaturen von thermotropen Schichten für den stagnierenden Kollektor.

Es wurde gezeigt, dass Stagnationstemperaturen bis herab zu  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  mit geeigneten thermotropen Schichten an der Kollektorabdeckung erreichbar sind. Für eine effiziente solare Warmwasserbereitung sind solche überhitzungsgeschützte Kollektoren mit Doppelstegverglasung und schwarzem Absorber wesentlich besser geeignet als Kollektoren mit Einfachverglasung und / oder selektiver Beschichtung. Allgemein ist der Einfluss der thermotropen Schicht auf die Kollektorleistungsfähigkeit im Normalbetriebszustand gering, wenn die Transparenz im klaren Zustand  $85\%$  übersteigt. Um eine sichere Begrenzung der Stagnationstemperatur auf  $85 \text{ }^\circ\text{C}$  zu erreichen, ist eine Resttransmission im opaken Zustand von maximal  $25\%$  für einen Kollektor mit Doppelstegplattenverglasung und schwarzem Absorber notwendig. Die notwendige Schalttemperatur der thermotropen Schicht ist stark von der Kollektorkonfiguration abhängig. Für einen Kollektor mit Doppelstegplattenverglasung und schwarzem Absorber sollte diese zwischen  $55$  und  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  liegen und möglichst steil verlaufen um maximale Stillstandstemperaturen von etwa  $85 \text{ }^\circ\text{C}$  sicherzustellen. Die Entwicklung und Auslegung von thermotropen Schichten mit solch engen Schaltcharakteristiken und solaren

Transmissionen von mindestens 85% im klaren Zustand und 30 bis 60% im opaken Zustand und dementsprechend angepassten Schalttemperaturintervallen erlauben für Absorbermaterialien auch den Einsatz von kostengünstigen Polymeren mit Dauergebrauchstemperaturen bis hinauf zu 130°C.

## 5 Danksagung

Dieses Forschungsprojekt wird in dankenswerter Weise durch das Land Steiermark, Amt der Stmk. Landesregierung, Abteilung 3 Wissenschaft und Forschung, Geschäftsstelle Zukunftsfonds (Projektnummer 2118) unterstützt und finanziert.



## 6 Literatur

- [ 1 ] **Wallner G.M., Resch K., Hausner R.** (2006), "Solarthermische Kunststoffkollektoren mit integriertem Überhitzungsschutz", Proceedings Gleisdorf Solar 2006, September 6-8, S. 105-114.
- [ 2 ] **Nitz P., Hartwig H.** (2005), "Solar control with thermotropic layers", Solar Energy 79, S. 573-582.
- [ 3 ] **Duffie J. A., Beckman W. A.** (1991), "Solar Engineering of Thermal Processes", Verlag John Wiley & Sons, Inc. 1991.
- [ 4 ] **SOLAR,** (2007), "Wärme-und strömungstechnische Berechnungen - Unterprogramm: Theoretischer Kollektor", AEE INTEC, Gleisdorf (1997-2007).
- [ 5 ] **Meir M., Rekstad J.** (2003), "Der Solarnor Kunststoffkollektor – The development of a polymer collector with glazing", in Proceedings 1. Leobner Symposium Polymeric Solar Materials, November 6-7, S II-1–II-8.
- [ 6 ] **Kahlen S., Wallner G.M., Meir M., Rekstad J.** (2006), "Ageing behavior of polymeric materials for solar thermal applications – Effect on ultimate mechanical properties" in Proceedings EuroSun 2006, Juni 27-30, S. 150.