

Neue Technologien für leistungsfähige und kostengünstige thermische Kollektoren am Beispiel des Absorbers

U.Frei, R. Frey
Solarenergie Prüf- und Forschungsstelle SPF-ITR
Oberseestr. 10
CH-8640 Rapperswil
Tel.: +41 55 234 622, Fax.: +41 55 276 131

Zusammenfassung:

Der Einsatz thermischer Kollektoren nimmt insbesondere in Mitteleuropa stark zu. Damit müssen sich mittelfristig auch die Produktionstechnologien verändern. Die bisherigen handwerklichen Methoden werden durch industrielle Techniken abgelöst.

Die derzeitig eingesetzten selektiven Beschichtungen in Flachkollektoren werden überwiegend durch umweltbelastende galvanische Prozesse aufgebracht. Im Rahmen des Forschungsprojekts „Absorber 2000“ entstanden neue selektive Schichten, welche die Anforderungen an ein zukunftsorientiertes Produkt erfüllen. Die Vorteile der neuen Beschichtungen liegen in der ökologischen Herstellung. Es entstehen keinerlei umweltbelastende Abfälle und der Energiebedarf lässt sich wesentlich reduzieren.

Auch bei der Herstellung von flüssigkeitsführenden Absorberstreifen zeichnen sich neue Entwicklungen ab. Der omegaförmige Streifen, bei dem das Rohr aus dem beschichteten Blech geformt wird, ist weniger materialaufwendig aber dennoch leistungsfähig. Auch die Produktionsflexibilität wie unterschiedlichste Rohrdurchmesser und beliebige Längen, ist grosse Vorteile. Die Kombination eines neuen Durchlauf-Beschichtungsverfahrens mit einem leistungsfähigen Absorberstreifen wird den Anforderungen an eine industrielle, leistungsfähige und kostengünstige Produktionstechnik gerecht.

Abstract

In Europe, the use of solar thermal collectors is growing significantly. This means production technology needs to be further developed in the next few years. Craftsman like production methods have to be replaced by industrial techniques.

The currently produced selective absorber coatings for flat plate collectors are all plated by galvanic processes. This environmentally unfriendly technology will be replaced by techniques such as physical deposition. Within the research project „Absorber 2000“ new selective absorber coatings has been found. The advantage of the new coatings are: no critical waste and very low energy requirements for production.

New and interesting developments, regarding liquid carrying absorbers, are taking place. For example the „omega“-type absorber, where the tube is formed by selectively coated copper strip. This production technique needs less raw material and is very flexible regarding tube diameter, fin width or length.

The combination of new technique of selective coil coating together with efficient liquid carrying substrates will meet the requirements of industrial cost-effective large scale production.

1. Einleitung

Die Verkaufszahlen thermischer Kollektoren, d.h. Flach- und evakuierte Röhrenkollektoren, nehmen zur Zeit stark zu. Europaweit wurden 1994 ca. 0.5 Millionen Quadratmeter Absorberfläche installiert. Die Nachfrage nach geeigneten selektiv beschichteten, flüssigkeitsführenden Absorbern nimmt dementsprechend zu. Die meisten Kollektorbauer sind kleinere bis mittelständische Unternehmen. Diese kaufen in der Regel den fertig beschichteten Absorber zu. Davon bestehen mehr als 90 % der Streifenabsorber aus Kupferblech und -Rohr. Ein kleinerer Teil der Absorber besteht aus Aluminiumblech und Kupferrohr. Die Leistungsfähigkeit des Absorbers hängt entscheidend von den optischen Eigenschaften der Beschichtung, der Materialwahl, der Geometrie und der Strömungsart des Wärmeträgerfluids ab und beeinflusst den Wirkungsgrad des Kollektors wesentlich.

Sowohl die Beschichtungstechnologie als auch die Streifenbauform unterliegen zur Zeit grösseren Veränderungen. Die bisherigen Beschichtungstechnologien sind elektrochemische Prozesse, die neben erheblichen Energieaufwendungen für das Abscheiden, den grossen Nachteil haben, dass sie umweltbelastenden Abfälle produzieren. Neue Technologien, wie z.B. Sputterprozesse, führen zu leistungsfähigen selektiven Beschichtungen mit geringstem Energiebedarf und ohne irgendwelche Abfälle.

Dem Einfluss des Absorbermaterials und der Geometrie auf die thermischen Eigenschaften des Absorberstreifens wurde bislang zu wenig Beachtung geschenkt. Optimierungen von bestehenden Produkten und einige neue Lösungsmöglichkeiten werden zur Zeit an der SPF diskutiert.

2. Grundlagen

2.1 Nomenklatur

F'	[-]	Kollektorwirkungsgradfaktor
G_K	[W/m ²]	Globale Bestrahlungsstärke in die Kollektorebene
$I_E(\lambda)$	[W/m ² nm]	Spektrale Intensität der Sonne (AM1.5)
T_a	[K]	Umgebungstemperatur
U_L	[W/m ² K]	Wärmeverlustfaktor
$(\tau_s \cdot \alpha_s)_e$	[-]	Effektives Absorption-Transmissionsprodukt
α_s	[-]	Solarer Absorptionskoeffizient gewichtet mit dem Solarspektrum
		AM 1.5
$\alpha_{Abs}(\lambda)$	[-]	Spektrales Absorptionsvermögen der Absorberbeschichtung
η	[-]	Kollektorwirkungsgrad
η_0	[-]	Optischer Wirkungsgrad
τ_s	[-]	Solarer Transmissionskoeffizient gewichtet mit dem Solarspektrum AM 1.5
$P_\lambda(T)$	[W/m ² nm]	Abgestrahlte Leistung eines Schwarzkörpers ($\epsilon = 1$) einer vorgegebenen Temperatur, üblicherweise 373 K

2.2 Beurteilung flüssigkeitsführender Absorber

Die Beurteilung von flüssigkeitsführenden Absorbern erfolgt auf Grund der optischen und thermischen Eigenschaften sowie der Menge und der Art der verwendeten Materialien. Die optischen Eigenschaften lassen sich anhand des solaren Absorptionsgrades (α_s) und des Emissionsgrades (ϵ_{373K}) für eine bestimmte Plattentemperatur (373 K) darstellen.

$$\alpha_s = \frac{\int_{0.35\mu m}^{3.7\mu m} I_E(\lambda)\alpha(\lambda)d\lambda}{\int_{0.35\mu m}^{3.7\mu m} I_E(\lambda)d\lambda} \quad (1)$$

$$\epsilon(T) = \frac{\int_{2.0\mu m}^{50\mu m} P_\lambda(T)\epsilon(\lambda)d\lambda}{\int_{2.0\mu m}^{50\mu m} P_\lambda(T)d\lambda} \quad (2)$$

Die Absorptionsgrade guter selektiver Schichten liegen in der Grössenordnung von $\alpha_s = 0.92 - 0.96$ während der Emissionsgrad $\epsilon_{373K} = 0.08 - 0.20$ beträgt. Je nach Anwendung kann einer der beiden Werte optimiert werden. Für den Einsatz in thermischen Flachkollektoren wird eher ein höherer Absorptionsgrad angestrebt; in evakuierten Röhrenkollektoren ist ein möglichst tiefer Emissionsgrad von Vorteil.

Gemessen werden diese physikalischen Grössen mittels optischer Spektroskopie /1,2/.

Die thermische Eigenschaft des flüssigkeitsführenden Streifens wird mit dem Kollektorwirkungsfaktor F' /3/ charakterisiert.

F' kann physikalisch folgendermassen definiert werden:

An einer beliebigen Position des Absorbers ist F' das Verhältnis des momentan nutzbaren Energiegewinnes zu demjenigen Energiegewinn, der auftreten würde, wenn die Absorberplattentemperatur identisch mit der lokalen Fluidtemperatur wäre.

Auch F' lässt sich messtechnisch erfassen. Zu diesem Zweck wurde an der SPF eine spezielle Infrastruktur erstellt /4/.

Kurzbeschreibung der Messmethode:

Mittels eines Solarsimulators wird eine homogene Strahlung auf eine Fläche von 0.25 m · 1.2 m erzeugt. Zwei Filter korrigieren das NIR-lastige (NIR: nahes Infrarot) Spektrum. Der Raum zwischen den beiden Filtern wird mit Luft gekühlt. Dadurch wird ein thermischer Strahlungsaustausch zwischen Absorber und Glasabdeckung erzeugt, welcher mit der Situation im Kollektor vergleichbar ist. Mittels Pyranometer und Scanner wird die aktuelle Einstrahlung an vorgegebenen Positionen im Probenraum gemessen. Zur Bestimmung der absorbierten Strahlungsleistung wird der Absorptionsgrad der Probe, bezogen auf das aktuelle Spektrum im Solarsimulator, bestimmt. Die Homogenität der Absorberbeschichtung wird dabei vorausgesetzt. Durch die exakte Erfassung der abgeführten Wärmeleistung lässt sich der Kollektorwirkungsfaktor nun bestimmen.

Die Messungen werden mit dem Wärmeträgerfluid Wasser bei der Bedingung - mittlere Absorbentemperatur gleich der Umgebungstemperatur des Prüflings - durchgeführt. Die

Prüfung der Absorberstreifen bei unterschiedlichen Durchflussraten ermöglicht zudem, den Einfluss des Wärmeübergangs Rohr / Fluid auf den Kollektorwirkungsgradfaktor zu zeigen.

2.3 Einfluss der Absorbereigenschaften auf den Kollektorwirkungsgrad

Mit den vorgängig beschriebenen physikalischen Grössen lässt sich der Einfluss des Absorbers auf den Kollektorwirkungsgrad, zumindest was den optischen Wirkungsgrad an-betrifft, einfach darstellen:

$$\eta = F' \cdot (\tau \cdot \alpha)_e - F' \cdot U_L \cdot \frac{T_m - T_a}{G_K} \quad (3)$$

Daraus ergibt sich der maximale (optische) Wirkungsgrad:

$$\eta_0 = F' \cdot (\tau_s \cdot \alpha_s)_e \quad (4)$$

Der Einfluss des Emissionsgrades auf die Kollektorverluste lässt sich auf Grund der Gleichung 3 nicht erkennen. Um aber trotzdem eine Grössenordnung des Einflusses wiederzugeben, wurde in Figur 1 anhand eines gerechneten Beispiels die Kollektor-kennlinie in Abhängigkeit des Emissionsgrades aufzeichnet /5/.

Fig.1 Abhängigkeit des Kollektorwirkungsgrades vom Emissionsgrad der Beschichtung (Annahmen: Einstrahlung 1000 W/m^2 , $\eta_0 = 0.81$, a: $\varepsilon = 0$ (ideal), b: $\varepsilon = 0.2$, c: $\varepsilon = 0.5$, d: $\varepsilon = 1$)

3. Marktübersicht

Die Herstellung von thermischen Absorbern teilt sich in zwei Schritte auf: in die Applikation der Beschichtung und in die Blechverarbeitung zum flüssigkeitsführenden Streifen. Der Ablauf der Herstellung ist je nach Fabrikat unterschiedlich: zuerst Applikation der Beschichtung, anschliessend Verarbeitung zum Streifen oder umgekehrt.

3.1 Absorberbeschichtungen

Den gesamten Markt teilen sich weltweit zur Zeit 3 - 4 nennenswerte Hersteller. Der Marktführer hat eine Produktionskapazität von ca. 0.35 Mio. Quadratmeter pro Jahr. Die Restlichen haben Produktionskapazitäten unter 0.1 Mio. Quadratmeter pro Jahr. Die folgenden 2 prinzipiell unterschiedlichen Schichttypen werden hergestellt:

- „Schwarz-Chrom“: dauerhaft, energieintensiv und umweltbelastend in der Herstellung, aber leistungsfähig.
- „Nickel-pigmentiertes-Aluminiumoxid“: Lebensdauer wird durch erhöhte Feuchtebelastung beschränkt (!), weniger energieintensiv und umweltbelastend in der Herstellung, bescheidene Leistungsfähigkeit.

Beschichtungstyp / Produkte	Absorptionsgrad α_s	Emissionsgrad ϵ_{373K}	Produktions-Variation Δ_α	Produktions-Variation Δ_ϵ
Schwarzchrom:				
MTI	0.96	0.12	0.02	0.04
Gibo	0.96	0.10	0.02	0.03
Energie Solaire	0.95	0.15	0.03	0.05
Nickelpigmentiertes-Aluminiumoxid:				
Sunstrip	0.94	0.12	0.04	0.05
Showa	0.94	0.12	0.02	0.04
Thermosolar	0.94	0.12	0.04	0.05
Solarox III*	0.96	0.30	0.02	0.05
Thermo-Dynamics [◇]	0.89	0.14	0.03	0.03

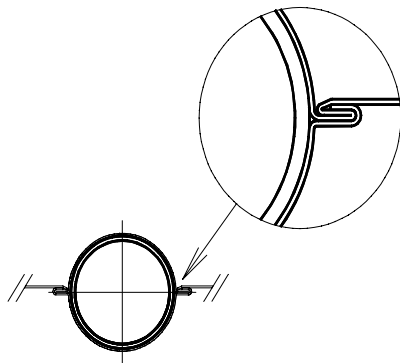
* Nickelpigmentiertes Aluminiumoxid mit Deckschicht zur Verbesserung der Feuchtestabilität (teileselektiv).

◇ Kobaltpigmentierung anstelle der Nickelpigmentierung; die Empfindlichkeit gegenüber Feuchte ist ähnlich wie für Schichten mit Nickelpigmentierung.

Tab. 1 Optische Eigenschaften von Absorberbeschichtungen mit typischen Produktionstoleranzen

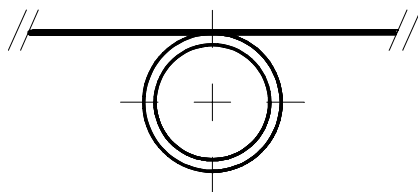
3.2 Flüssigkeitsführende Streifen

Eine Vielzahl von unterschiedlichen Streifen sind im Handel. Bei Versionen, die ganz in Kupfer hergestellt sind, wird die Rohr-Blech Verbindung einerseits mittels Rollverformung (Fig. 2) oder andererseits mittels Ultraschallschweissung (Fig. 3) erstellt. Andere Fabrikate verwenden Aluminiumblech oder Aluminium-Strangpressprofile mit eingeklemmten oder eingewalztem Kupferrohr (Fig. 4).



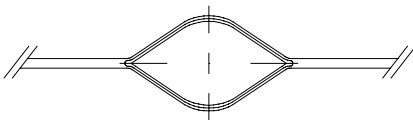
- Streifenbreite : 112 mm
- Streifendicke : 0.21 mm
- Streifenmaterial : Kupfer
- Rohrdurchmesser : 11.7 mm / 12.7 mm
- Rohrmaterial : Kupfer
- Beschichtung : Schwarzchrom/Nickel
- Verbindung : Rohr kalt eingerollt

Fig. 2 Absorberstreifen aus Kupferblech mit eingerolltem Kupferrohr



- Streifenbreite : 120 mm
- Streifendicke : 0.21 mm
- Streifenmaterial : Kupfer
- Rohrdurchmesser : 7.2 mm / 8.0 mm
- Rohrmaterial : Kupfer
- Beschichtung : Schwarzchrom/Nickel

Fig. 3 Absorberstreifen mit Ultraschallschweissnahtverbindung Blech-Rohr



- Streifenbreite : 143 mm
- Streifendicke : 0.55 mm
- Streifenmaterial : Aluminium
- Rohrdurchmesser : Rhomboider Querschnitt
- Rohrmaterial : Kupfer
- Beschichtung : Nickelpigmentiertes Aluminiumoxid

Fig. 4 Absorberstreifen mit eingewalztem Kupferrohr

Typische F' -Werte am Beispiel der Steifen dargestellt in den Figuren 2, 3 und 4:
 (Wärmeträger: Wasser, Einstrahlung: 1000 W/m^2)

Streifen nach Figur:	F' bei 20 l/h	F' bei 40 l/h	F' bei 60 l/h
2	0.89	0.91	0.92
3	0.87	0.91	0.93
4	0.88	0.89	0.92

Tab. 2 Typische F' -Werte eingesetzter Absorberstreifen

4. Neue Absorberbeschichtungen

In Zusammenarbeit mit der Universität Basel, Institut für Physik, wurde 1993 das Projekt „Absorber 2000“ im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft (BEW) lanciert. Das Ziel lautete: Entwicklung neuer selektiver Absorberbeschichtungen mit flüchtigkeitsführenden Substraten. Die Randbedingungen waren:

- Keine galvanische Beschichtung sondern ein PVD- („Physical Vapor Deposition“) oder ein CVD-Prozess („Chemical Vapor Deposition“).
- Minimale Leistungsfähigkeit der Absorberbeschichtung von: $\alpha_s > 0.95$; $\epsilon_{373K} < 0.1$ für Flachkollektoren; $\alpha_s > 0.93$; $\epsilon_{373K} < 0.06$ für evakuierte Röhrenkollektoren.
- Langzeitbeständigkeit > 25 Jahre.

Das Projekt wurde in 2 Phasen unterteilt: In der Phase 1 sollen neue Lösungsmöglichkeiten für effiziente und dauerhafte Absorberbeschichtungen gefunden werden. Die Grösse der Proben beträgt in etwa $4 \text{ cm} * 4 \text{ cm}$. Anschliessend in der Phase 2 „Upscaling“ zum industriell herstellbaren Produkt mittels einer Vorproduktionsanlage. Die so gefundene Lösung soll in die Industrie transferiert werden. Die Phase 1 ist beinahe abgeschlossen. Potentielle Kandidaten wurden gefunden und insbesondere wurde ein für die industrielle Fertigung gut geeigneter Abscheidungsprozess patentiert. Als Abschluss der Phase 1 wird die aussichtsreichste Variante bezüglich deren optischen Eigenschaften optimiert. Den Stand der Arbeiten zeigt Figur 5. Als Vergleich ist eine handelsübliche Schwarzchrombeschichtung eingezeichnet.

Die Beschichtung ist, ähnlich wie Schwarzchrom, eine Cermet-Beschichtung. Das Dielektrikum ist amorpher Kohlenstoff, die eingelagerten Metallpartikel bestehen aus Chrom. Die Vorteile der Beschichtung liegen klar in den wesentlich tieferen erreichbaren Emissionsgraden. Der Absorptionsgrad liegt zur Zeit knapp bei 90 %, ohne eine gezielte Optimierung. Generell scheinen tiefe Emissionsgrade bei gleichzeitig vergleichsweise tieferen Absorptionsgraden mit PVD/CVD Prozessen einfacher erreichbar, als hohe Absorptionsgrade mit etwas erhöhten Emissionsgraden. Dies liegt daran, dass die bei der galvanischen Abscheidung von Schwarzchrom auftretende absorptionsgradsteigernde Oberflächenrauigkeit bei PVD/CVD -Prozessen nicht auftritt. Die Langzeitbeständigkeit, insbesondere bezüglich hoher Feuchtebelastung, ist sehr gut. Dies ist beim Einsatz in belüfteten Flachkollektoren von grösster Bedeutung.

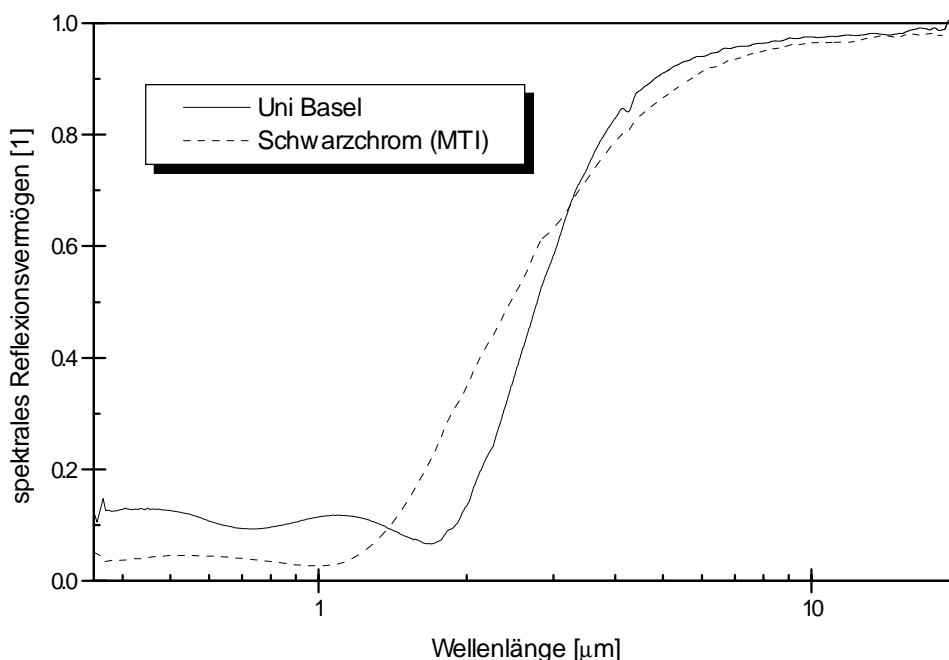


Fig. 5 Spektraler Reflexionsgrad von einer neuartigen Absorberbeschichtung im Vergleich zu Schwarzschrom

Kosten der Beschichtung

Die Kosten der Beschichtung hängen wesentlich von der jährlichen Produktionsmenge ab. Es ist, zumindest in der Anfangsphase, beinahe unmöglich mit den heutigen Preisen von Schwarzschrom von Fr. 17.-- pro Quadratmeter (nur Beschichtung ohne Substrat) zu konkurrieren. Bei einem jährlichen Absatz von 100'000 m² scheint in etwa Fr. 20 bis 30.-realistisch zu sein. Abschliessend kann diese Frage noch nicht geklärt werden. Die Technologie ist neu, die Erfahrung und insbesondere die voraussichtlich steigenden Produktionszahlen werden die Kosten im Laufe der Zeit reduzieren. Vergleichbare Oberflächen zur Architekturglasveredelung (Low-ε) kosten in der Grössenordnung von Fr. 8 bis 12.-- pro Quadratmeter. Vor 10 Jahren kostete ein Quadratmeter derselben Low-ε Beschichtung mehr als das Doppelte.

5. Das flüssigkeitsführende Substrat und seine Eigenschaften

Ebenfalls im Rahmen des Forschungsprojekts „Absorber 2000“ sollten die bestehenden flüssigkeitsführenden Streifen untersucht und Vorschläge für neue leistungsfähigere gemacht werden. Folgende Ziele wurden für die Anwendung in Flachkollektoren formuliert:

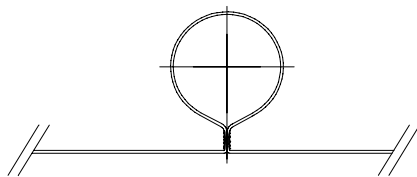
- $F' > 0.97$,
- Gewicht: 2 kg/m²

Als erster Schritt wurde für die schlüssige Beurteilung der Streifen eine Methode zur rationellen Bestimmung des Kollektorwirkungsgradfaktors F' entwickelt. Die zugehöri-

ge Messinfrastruktur ist aufgebaut und wurde für die Messung der meisten auf dem Markt erhältlichen Streifenabsorber eingesetzt /4/. Die Übereinstimmung mit den von Duffie-Beckmann /3/ angegebenen Werten sind in einigen Fällen schlecht. Einer der Gründe liegt in der grossen Unsicherheit der Beurteilung der Schweissnahtverbindung zwischen Blech und Rohr.

Noch vor Beginn des Projekts wurde der SPF von privater Seite eine interessante Idee präsentiert. Sie bestand darin einen Streifenabsorber zu entwickeln, bei dem das Rohr durch eine entsprechende Verformung des Absorberblechs ersetzt wird. Die Geometrie (siehe Fig. 6) gleicht dabei einem Omega. Die klaren Vorteile dieser Geometrie sind:

- kein Rohr mehr notwendig und damit niedrigere Kosten
- flexible Produktion unterschiedlichster Rohrdurchmesser und beliebiger Längen
- Gewichtsreduktion
- guter Wärmeübergang vom Flügel in den Rohrbereich



- Streifenbreite : 120 mm
- Streifendicke : 0.21 mm
- Streifenmaterial : Kupfer
- Rohrdurchmesser : 8.0 mm / 8.42 mm
- Rohrmaterial : Kupfer
- Beschichtung : Schwarzchrom/Nickel
- Verbindung : Rohr geklemmt

Fig. 6 Omegaförmiger Absorberstreifen ohne zusätzliches Rohr

Voraussetzung für die Realisierung dieser Idee ist eine Reihe von Randbedingungen:

- Da das beschichtete Blech zum Omega verarbeitet wird, muss die Beschichtung eine gute Adhäsion aufweisen, zudem muss sie während des Umformprozesses durch eine Folie vor Beschädigungen durch das Walzwerk geschützt werden.
- Das Schweissverfahren muss für die Dichtigkeit des geformten Rohres eine hohe Qualitätskonstanz aufweisen.
- Das Kupferblech muss einen konstanten Härtegrad aufweisen. Da auch der Beschichtungsprozess Änderungen im Härtegrad bewirkt, ist die gute Qualitätskonstanz der Beschichtung ebenfalls Voraussetzung für die Weiterverarbeitung zum Absorberstreifen.

Mit diesem Konzept können die geforderten Ziele des Projekts in etwa erreicht werden. Die maximale Streifenbreite beträgt dabei ca. 90 mm, damit steigt der Kollektorwirkungsgradfaktor F' auf den gewünschten Wert an.

In Figur 7 ist die Abhängigkeit der Kollektorwirkungsgradfaktors von der Streifenbreite aufgezeichnet.

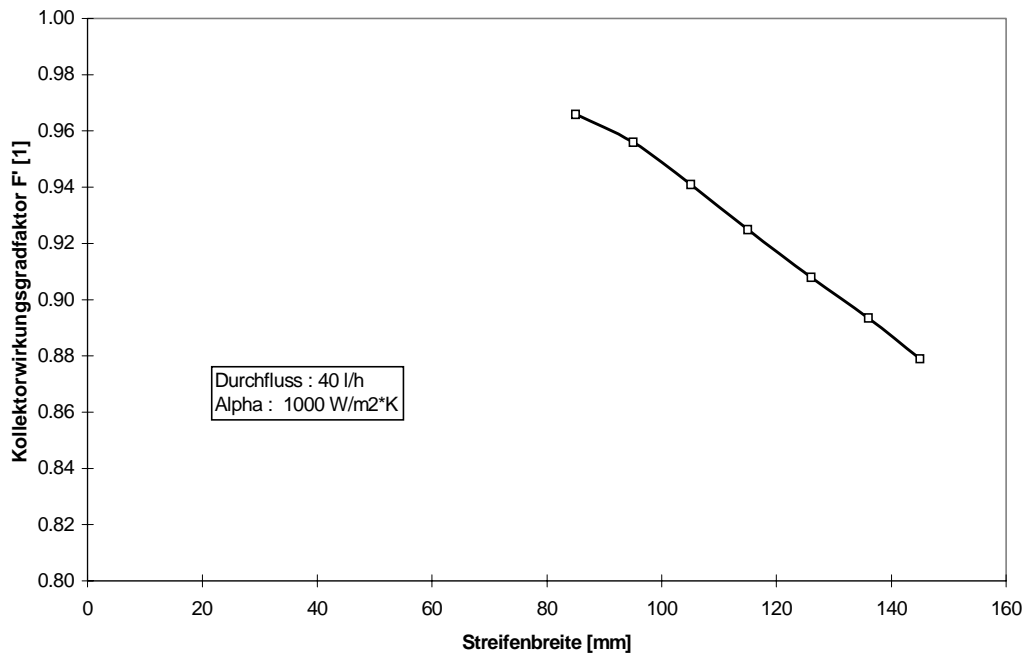


Fig. 7 F' bei verschiedenen Streifenbreiten und einer Durchflussrate von 40 l/h.

Das Gewicht des Streifens beträgt mit einem Rohrdurchmesser von 8 mm und einer Kupferblechdicke von 0.21 mm ca. 2.5 kg. Der Berstdruck des so erstellten Rohres beträgt ca. 50 bar. Das Problem liegt demnach nicht bei der Druckfestigkeit sondern allenfalls bei der Druckwechselfestigkeit. Untersuchungen haben allerdings gezeigt, dass in konventionellen Anlagen die Druckschwankungen minimal sind und die Eigenschaften des omegaförmigen Streifenabsorbers genügen. In 10 Versuchsanlagen steht dieser Absorberstreifen mit Erfolg in Betrieb.

Der omegaförmige Absorberstreifen wird durch eine kleine innovative Firma hergestellt. Allerdings muss mangels qualitativ hochwertigem Ausgangsmaterial (selektiv beschichtetes Kupferblech) zur Zeit ein zusätzliches Rohr eingesetzt werden. Neue Herstellverfahren, wie vorgängig beschrieben, werden zu geeigneten Substraten führen, welche die Produktion des Streifens ohne Zusatzrohr ermöglichen wird.

6. Diskussion und Schlussfolgerungen

Absorberbeschichtung

Die derzeitig galvanisch hergestellten selektiven Absorberbeschichtungen werden durch neuartige Beschichtungen abgelöst. Die im Rahmen des Forschungsprojekts „Absorber 2000“ entstandenen neuen selektiven Schichten erfüllen die gestellten Anforderungen. Deren Vorteile sind:

- keine Umweltbelastung
- weniger energieaufwendig in der Herstellung
- bessere Qualitätskonstanz
- ausgezeichnete Feuchtestabilität
- längerfristig billiger

Die vorgeschlagene Bandbeschichtungstechnologie hat bei genügender Produktionsmenge das Potential, die Herstellkosten unter diejenigen der heute eingesetzten Techniken zu senken. Das grösste Hemmnis für eine rasche Umsetzung der neuen Erkenntnisse sind die hohen Anfangsinvestitionen.

Flüssigkeitsführende Absorberstreifen

Die durchgeführte Messkampagne an flüssigkeitsführenden Absorberstreifen hat die Vor- und Nachteile der verschiedenen Lösungsmöglichkeiten aufgezeigt. Ein Konzept erfüllt die gestellten Anforderungen. Die Vorteile des omegaförmigen Streifens sind:

- deutlich reduzierter Materialaufwand
- flexiblere Produktion, d.h. beliebige Rohrdurchmesser und Streifenlängen
- vergleichsweise leistungsfähig

Produktion, Kosten

Die Kombination eines neuen physikalischen Beschichtungsverfahrens mit einem leistungsfähigen Absorberstreifen wird den Anforderungen an eine industrielle Produktionstechnik gerecht. Die Kosten werden entscheidend von den Produktionsmengen beeinflusst. Bei günstiger Marktentwicklung wird der Preis pro Quadratmeter selektiv beschichteter Absorberstreifen zukünftig deutlich unter den bisherigen Preisen liegen.

Referenzen:

- /1/ U. Frei, M. Köhl, Optical and Thermal Evaluation of Transparent Materials and Surfaces by FTIR and Integrating Spheres, Solarenergie Prüf- und Forschungsstelle SPF-ITR, Bundesamt für Energiewirtschaft BEW, 1991
- /2/ Bo Carlsson, U. Frei, M. Köhl, K. Möller, Accelerated Life Testing of Solar Energy Materials, Case study of some selective solar absorber coating materials for DHW-systems, IEA-SHACP, Task X, 1994
- /3/ John A. Duffie, William A. Beckmann, Solar Engineering of Solar Processes, Second Edition, 1991
- /4/ R. Frey, U. Frei, S. Brunold, Bestimmung des Kollektorwirkungsgradfaktors F' an flüssigkeitsführenden Solarabsorbern, Solarenergie Prüf- und Forschungsstelle SPF-ITR, Bundesamt für Energiewirtschaft BEW, 1995
- /5/ U. Frei, J.Keller, Beständigkeit von Absorberbeschichtungen, Bundesamt für Energiewirtschaft, 1983