

Angepasste Kollektoren für Kombianlagen - Der *IAM* macht's möglich

H. Kerskes, S. Asenbeck, W. Heidemann, H. Müller-Steinhagen
Universität Stuttgart, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW)
Pfaffenwaldring 6, D-70550 Stuttgart
Tel.: 0711/685-3536, Fax: 0711/685-3503
email: kerskes@itw.uni-stuttgart.de

Der Wunsch, die solaren Raumheizung in neue Dimensionen zu führen (50 % Deckungsanteil und mehr) macht eine intensive Arbeit auf allen technischen Gebieten der Solartechnik nötig. Solange ohne saisonale Wärmespeicherung gearbeitet wird, führen hohe Deckungsanteile bei der Raumheizung zwangsläufig zu einer starken Überdimensionierung des Kollektorfeldes im Sommer. Besonders in Verbindung mit Hochleistungskollektoren, wie z.B. CPC-Vakuurröhrenkollektoren, die auch in den Wintermonaten nennenswerte Beiträge leisten können, resultiert in den Sommermonaten eine erhebliche Zunahme der Stagnationszeit. Bei Stillstandstemperaturen von 300°C und mehr führt dies zu einer erhöhten Werkstoffbelastung, beschleunigter Alterung und größerem sicherheitstechnischen Aufwand für die gesamte Anlage.

Eine Lösung für dieses Problem können Kollektoren sein, deren Wärmeertrag an das jährliche Wärmebedarfsprofil angepasst ist. Das bedeutet, der Kollektorertrag soll im Sommer, bei hohen Sonnenständen, so gering sein, dass er gerade für die Trinkwassererwärmung ausreichend ist und dafür im Winter, bei niedrigen Sonnenständen, die Strahlung optimal ausnutzen und so eine hohe solare Heizungsunterstützung ermöglichen. Eine Möglichkeit dies zu erreichen, liegt in einer gezielten Beeinflussung der winkelabhängigen Nutzung der Strahlung, also im Design eines angepassten *Incident angle modifier (IAM)*. Diese Anpassung des *IAM* wiederum kann durch spezielle Reflektoren erreicht werden.

Ziel der Arbeit war es, auf zwei Fragen generelle Antworten zu finden:

1. In welchem Maß kann durch einen angepassten *IAM* der Output des Kollektors an den saisonalen Wärmebedarf angepasst werden? Gelingt dies, so bedeutet das nicht nur eine höhere Effizienz und damit niedrigere Anlagenkosten (sicherheitstechnischer Aufwand, evtl. kleinere Speicher) sondern auch das Ungleichgewicht zwischen Einstrahlung und Wärmebedarf auszugleichen.
2. Ist es möglich durch einen angepassten *IAM* auch die erzielbare Energieeinsparung bei gleicher Brutto-Kollektorfläche zu erhöhen?

Um generelle Aussagen treffen zu können, wurden bei diesen theoretischen Betrachtungen keinerlei Einschränkungen bezüglich Produktionskosten der benötigten Reflektoren vorgegeben.

Während klassische Untersuchungen zur Reflektorgeometrie meist die Optimierung der eingesammelten Strahlen zum Ziel hatten [?] und uns eine hervorragende Kenntnis von den geometrischen und physikalischen Grenzwerten lieferten, wurde bei dieser Arbeit ein anderer Weg beschritten.

Es geht nun nicht mehr darum, ein absolutes Maximum an Strahlung einzufangen, sondern eine maximale Übereinstimmung zwischen Kollektorsertrag und Wärmebedarf zu erzielen. Dieser Gedanke wurde bereits 1995 von *Mills et.al.* [?] verfolgt. Dabei wurde gezeigt, dass für das australische Klima durch geeignete Reflektorgeometrien ein für die Trinkwassererwärmung benötigter, über das ganze Jahr konstanter Wärmeertrag des Kollektors erzielt werden kann.

Bei dem hier vorgestellten Ansatz wird zuerst ein idealer *IAM* berechnet. Anschließend werden in einem zweiten Schritt in TRNSYS-Simulationen die Auswirkungen dieses *IAM* in Form eines *virtuellen Kollektors* auf die Stagnationszeit und den Jahresertrag untersucht. Im dritten Schritt wird eine Reflektorgeometrie konstruiert, die dem gewünschten *IAM*-Verlauf möglichst nahe kommt.

1 Berechnung des idealen *IAM*

Die Betrachtung der jährlichen Verteilung der Strahlungsintensität als Funktion des longitudinalen Einstrahlungswinkels θ_L für eine nach Süd orientierte Fläche zeigt, dass bei einer Kollektorneigung von 45° die Einstrahlungsmaxima in einem Winkelbereich von 40° bis -40° zur Kollektornormalen auftreten. Zur Vermeidung von Stagnation muss die Strahlung für Winkel $\theta_L < 0$ weitgehend ausgeblendet werden, während die Strahlung für Winkel $\theta_L > 0$ für hohe Beiträge zur Heizungsunterstützung optimal genutzt

werden muss. Der *IAM* ist eine Funktion der Strahlungs-Einfallrichtung, welche hier durch die kollektorbezogenen Einfallswinkel, den Longitudinalwinkel θ_L und den Transversalwinkel θ_T festgelegt wird. Die physikalische Größe des optischen Wirkungsgrads und der *IAM* sind über den Normierungsfaktor η_0 miteinander verknüpft:

$$\eta(\theta_L, \theta_T) = \eta_0 \cdot IAM(\theta_L, \theta_T) \quad (1)$$

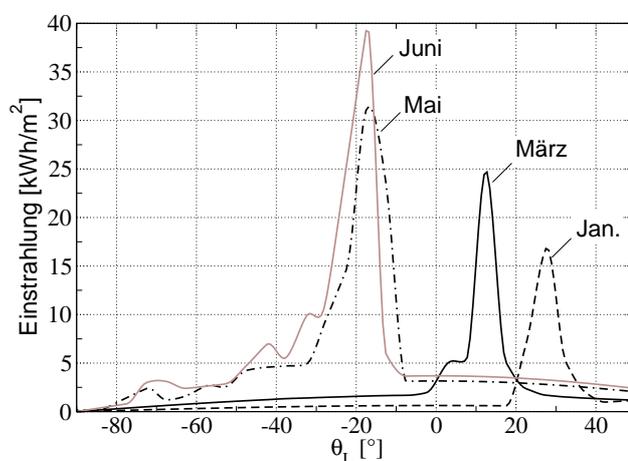


Abb. 1: Strahlungsintensität auf eine 45° geneigte Fläche in Würzburg

Die weiteren Ausführungen beziehen sich auf Kollektoren mit horizontal angeordneten Vakuumröhren mit zylindrischem Absorber und externem Reflektor. Der IAM in Längsrichtung des Reflektors wird im Wesentlichen von den optischen Eigenschaften der Vakuumröhre bestimmt und ist nahezu unabhängig von der Ausführung des Reflektordesigns. Deshalb kann der einmal für einen Referenzkollektor durch Messung bestimmte $IAM_T(\theta_T)$ für die Simulation von neu entwickelten Reflektorgeometrien übernommen werden.

In einer Optimierungsroutine wird mit Hilfe eines Gradientenverfahrens in einem iterativen Prozess die Annäherung des Kollektorertrags an das Wärmebedarfsprofil für ein vorgegebenes Einstrahlungsprofil vorgenommen. Dies geschieht durch gezielte Variation des longitudinalen IAM. Über diesen Prozess wird ein idealer $IAM_L(\theta_L)$ -Verlauf für die gegebenen Randbedingungen bestimmt. Zusammen mit den Kollektorparametern des Referenzkollektors, von dem auch der $IAM_T(\theta_T)$ übernommen wurde, wird so das thermische Verhalten eines *virtuellen Kollektors* beschrieben.

2 Optimierungsstrategien

Zunächst wurden der Ertrag und die Stagnationszeit dieses *virtuellen Kollektors* mittels TRNSYS-Simulationen für eine Kombianlage berechnet. Bei der untersuchten Kombianlage wurde ein großes Verhältnis von Kollektorfläche (35 m^2) zu Speichervolumen (2000 l) gewählt. Durch die starke Überdimensionierung und die daraus resultierenden extremen Bedingungen kann gezeigt werden, ob durch die zeitlich angepasste Wärmeabgabe des Kollektors die Stagnation wirkungsvoll unterdrückt und gleichzeitig auf größere Speichervolumen verzichtet werden kann. Die Ergebnisse werden mit einer Anlagensimulation verglichen, bei der ein sehr guter kommerzieller CPC-Vakuumröhrenkollektor als Referenz verwendet wurde.

Die folgenden zwei Optimierungsstrategien sind möglich: Entweder wird die konsequente Unterdrückung der Stagnation verfolgt, oder es wird die Maximierung des solaren Ertrags angestrebt. Eine drastische Reduzierung der Stagnationszeit bei gleichzeitiger Ertragssteigerung ist nicht möglich. Abbildung ?? zeigt IAM-Verläufe für beide Optimierungsstrategien. Die Variante 1 beschreibt maximalen Ertrag und Variante 2 minimale Stagnationszeit.

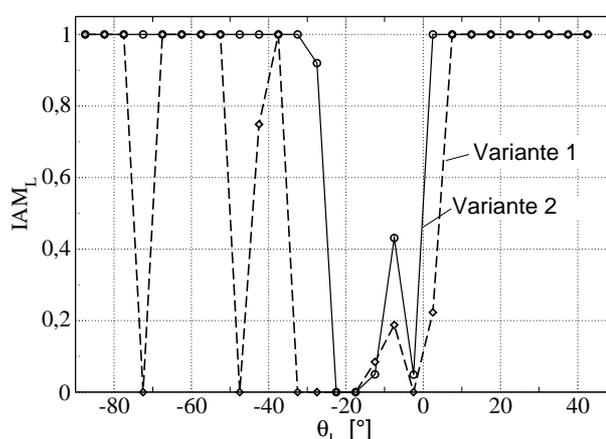


Abb. 2: IAM-Verläufe

3 Berechnung der Stagnationszeit und der jährlichen Energieeinsparung

Mittels Anlagensimulationen wurden die Auswirkungen unterschiedlicher *IAM* auf die jährliche Energieeinsparung f_{sav} und die Stagnationszeit ermittelt.

In nebenstehender Tabelle sind die Ergebnisse für die in Abbildung ?? gezeigten *IAM*-Varianten sowie für eine weitere Variante dargestellt und mit der Referenzanlage verglichen. Die dritte Variante ist ebenfalls wie die Variante 2 auf minimale Stagnation ausgelegt, unterscheidet sich jedoch durch eine kleinere Reflektorfläche gegenüber Variante 2.

| Varianten | Stagnation | f_{sav} |
|------------|------------|-----------|
| Referenz | 1312 | 49,1 |
| Variante 1 | 932 | 49,6 |
| Variante 2 | 72 | 44,8 |
| Variante 3 | 392 | 44,9 |

4 Konstruktion des Reflektors

Um die Frage zu klären, wie der zu einem bestimmten *IAM* gehörige Reflektor aus aussieht, wurde eine numerische Methode entwickelt, die aus einem vorgegebenen *IAM*-Verlauf eine Reflektorgeometrie für einen zylindrischen Absorber berechnet.

Abbildung ?? zeigt den aus der Optimierung berechneten *IAM*-Verlauf als gestrichelte Linie. Mit dieser Vorgabe wird die zugehörige Reflektorgeometrie numerisch berechnet. Zur Überprüfung wird die ermittelte Reflektorgeometrie in einem Raytracer (Strahlenverfolgungsprogramm) abgebildet und der tatsächliche *IAM* der konstruierten Geometrie bestimmt. Der vom Raytracer berechnete Verlauf ist in Abbildung ?? als durchgezogene Linie dargestellt. Es zeigt sich, dass mit dem angewendeten Verfahren eine Reflektorgeometrie konstruiert werden kann, die den vorgegebenen *IAM*-Verlauf gut wieder gibt.

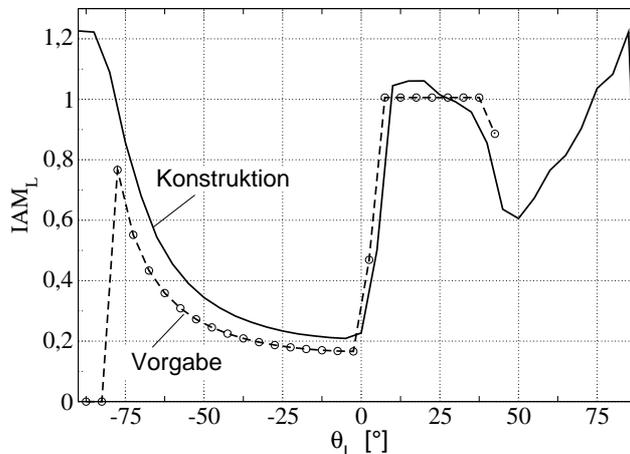


Abb. 3: Vorgabe und realisierter IAM

In Abbildung ?? ist die resultierende Reflektorgeometrie der Optimierungsvariante 3 gezeigt.

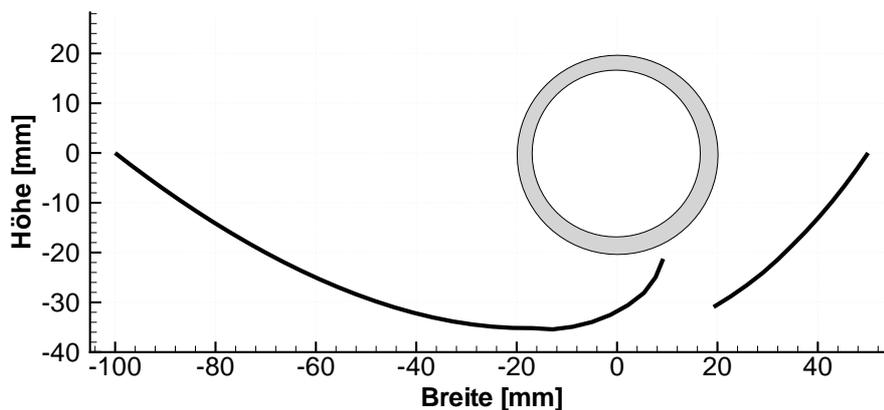


Abb. 4: Reflektorgeometrie der Variante 3

Mit dieser Reflektorgeometrie, die sich in Breite und Höhe nur unwesentlich von der Form des Referenzkollektors unterscheidet, kann eine Verminderung der Stagnationszeit um 70 % bei einer Ertragverminderung von lediglich 8,5 % (relativ) erreicht werden.

Literatur

- [1] W.T. Welfort und R. Winston. *The optics of nonimaging Concentrators*. Academic Press, New York, 1978
- [2] D.R. Mills, A. Monger und G.L. Morrison. *Comparison of fixed asymmetrical and symmetrical reflectors for evacuated tube solar receivers*. Solar Energy, Vol. 53, No. 1, pp. 91-104, 1994
- [3] H. Kerskes, W. Heidemann und H. Müller-Steinhagen. *Kombianlagen - Ein nationales Projekt für Solaranlagen zur kombinierten Trinkwassererwärmung und Raumheizung*. Tagungsband zum elften Symposium Thermische Solarenergie, S. 242 – 246, 2001. Otti-Technologie-Kolleg, Regensburg, ISBN 3-934681-14-X.