

# Sonnenkollektoren \*)

Von Dipl.-Phys. Wolfgang Schölkopf, München

Die prinzipiell möglichen Umwandlungen von Sonnenenergie sind in Tabelle 1 mit dem heute erreichbaren Wirkungsgrad zusammengestellt.

Durch die Anwendung in der Raumfahrt ist die Solarzelle heute zu einem sehr effektiven Konversionssystem entwickelt, mit dem Sonnenenergie bis zu 20 % in elektrische Energie umgewandelt werden kann. Überboten wird dieser Wirkungsgrad jedoch von thermischen Sonnenkollektoren, bei denen Wirkungsgrade von 60 %, im Fall von Schwimmbadbeheizungen sogar von bis zu 80 %, erreichbar sind. Wir wollen uns in diesem Beitrag auf diese, die sog. photothermische Umwandlung beschränken.

Da Sonnenenergie überall mehr oder minder zur Verfügung steht, bietet sich die dezentrale Nutzung im Bereich der Haushaltungen an. Man spart dabei die teuren Verteilungsnetze, wie sie bei Fernwärme, elektrischer Energie und Heizöl notwendig sind. Das mit Sonnenenergie erzeugte Warmwasser kann zur Schwimmbadbeheizung, als Warmwasser im Haushalt und als Zusatz zur Hausheizung verwendet werden. Die Umwandlung der erzeugten Wärme in elektrische Energie ist zwar prinzipiell möglich, jedoch in unseren Breiten wohl nicht wirtschaftlich durchzuführen. Grundsätzlich kann man sagen: je niedriger das geforderte Temperaturniveau, desto billiger und einfacher die dazu notwendigen Kollektoren. Wollen wir Sonnenenergie zur Hausbeheizung verwenden, sollte das Heizsystem für entsprechend niedrigere Vorlauftemperaturen ausgelegt sein.

\*) Vortrag, gehalten beim Kolloquium der DGS am 3. April 1976 in Nürnberg

## Eigenschaften der Strahlungsenergie

Sonnenlicht ist ebenso wie Röntgenstrahlung, die Wärmestrahlung eines Heizkörpers oder Radiowellen elektromagnetische Strahlung. Diese in ihrer Wirkung und Verwendung sehr unterschiedlichen Strahlungen unterscheiden sich einzig und allein durch ihre Frequenz bzw. ihre Wellenlänge. Ungefähr 90 % der solaren Strahlung liegen im Wellenbereich  $0,4 \mu\text{m}$  bis  $2,5 \mu\text{m}$ . Ein Grundgesetz der Physik ist nun, daß jeder Körper gemäß seiner Temperatur elektromagnetische Strahlung aussendet. Die emittierte Strahlungsleistung pro Flächeneinheit ist dabei umso größer, je höher die Temperatur ist. Neben der Temperatur spielt das Absorptionsvermögen des Körpers eine entscheidende Rolle. Je schwärzer der Körper ist, d.h., je mehr Strahlung er absorbiert, desto besser emittiert er auch Strahlung. Diese Beziehung gilt jedoch nur für die sich entsprechenden Wellenlängenbereiche.

Im sichtbaren Bereich der elektromagnetischen Strahlung, also bei Wellenlängen von  $0,4$  bis  $0,8 \mu\text{m}$ , können wir anhand der Farbe des Materials sehr leicht beurteilen, wie "schwarz" ein Körper ist. Doch schon im Bereich der Wärmestrahlung, dem sog. infraroten Bereich, versagt unser Wahrnehmungsvermögen. So ist ein mit weissem Heizkörperlack gestrichener Radiator ein nahezu ideal "schwarzer" Strahler für Wärmestrahlung von  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ . Ein ebenso guter "schwarzer" Strahler in diesem Bereich ist Fensterglas, das Sonnenlicht fast ungeschwächt durchläßt. Wir müssen uns also von der Vorstellung freimachen, von den Eigenschaften eines Stoffes

im sichtbaren Bereich Aussagen über seine Eigenschaften im Bereich der Wärmestrahlung machen zu können.

## Die Solarkonstante

Die Sonne kann als ideal "schwarzer" Strahler von ca.  $5500 \text{ }^\circ\text{C}$  betrachtet werden. Aufgrund ihrer großen Entfernung zur Erde strahlt sie zwar mit unveränderter Wellenlängenverteilung auf die Atmosphäre, jedoch nur mit der geringen Leistung von  $1,35 \text{ kW/m}^2$ , das entspricht  $1160 \text{ kcal/m}^2\text{h}$ . Man nennt diese Leistungsdichte die extraterrestrische Solarkonstante. Durch Absorption und Streuung in der Erdatmosphäre geschwächt, sinkt die Leistungsdichte in Meereshöhe auf ca.  $1 \text{ kW/m}^2$  oder  $860 \text{ kcal/m}^2\text{h}$  ab. Absorption bedeutet dabei, daß Strahlungsenergie in den Wärmeinhalt der Atmosphäre übergeht und Streuung, daß die Sonnenstrahlen nur ihre Richtung ändern. Diese gestreute Strahlung nennen wir diffuse Sonnenstrahlung oder Himmelsstrahlung.

Die Atmosphäre wiederum strahlt entsprechend ihrer Temperatur langwellige Infrarotstrahlung auf die Erde. Wir haben also zwei grundsätzlich verschiedene Strahlungsströme, die auf den Kollektor fallen, einmal den kurzwelligen Strom der direkten und diffusen Sonnenstrahlung und zum anderen den langwelligen Strom der atmosphärischen Gegenstrahlung. Dieser langwellige Strom ist zeitlich annähernd konstant und hat eine Strahlungsleistungsdichte von ungefähr  $300 \text{ W/m}^2$ . Im Gegensatz dazu weist der kurzwellige Strom einen Tages- und Jahresgang auf, seine Leistungsdichte schwankt zwischen  $0$  und  $1000 \text{ W/m}^2$ , je nach Zeit und Witterungsbedingungen.

angebotene Energieform	erzeugte Energieform	Prozeß	Umwandlungssystem	Wirkungsgrad
elektromagn. Strahlung $0,4 \leq \lambda \leq 2 \mu$	Elektrizität	photovoltaisch	Solarzelle	20%
			Halbleiter-Elektrolyt	$\leq 1\%$
		thermoelektrisch	Thermoelement	$\leq 4\%$
		photothermisch-mechanisch-elektrisch	Sonnenkollektor-Turbine	6%
	chemische Energie	photochemisch	Halbleiter-Elektrolyt	$\leq 1\%$
		Photosynthese	Pflanzen	1%
	Wärmeenergie	photothermische	Sonnenkollektor	60%

Tabelle 1: Umwandlungsmöglichkeiten für Sonnenenergie

### Der Kollektor

Die Funktionsweise des Sonnenkollektors wird an einem einfach abgedeckten Flachkollektor (Bild 1) mit Wasser als Wärmeträgermedium demonstriert.

Wie in *Sonnenenergie 1/76* schematisch dargestellt und erläutert, wird die langwellige Strahlung vollständig von der Glasabdeckung absorbiert, während die kurzwellige Strahlung diese mit geringen Reflexionsverlusten (ca. 10% bei senkrechtem Einfall auf den Kollektor) passiert.

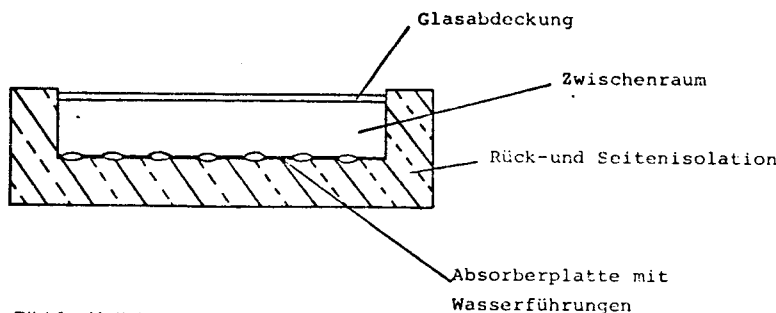


Bild 1: Kollektoraufbau

Vom Absorber werden 90 bis 95% der transmittierten kurzwelligen Strahlung in Wärme umgesetzt und an das Wärmeträgermedium als Nutzenergie weitergegeben. Die besten Flachkollektoren liefern heute unter günstigsten Bedingungen ( $1 \text{ kW/m}^2$  Einstrahlung, niedrigerem erzeugtem Temperaturniveau)  $750 \text{ kcal/m}^2\text{h}$  oder  $880 \text{ W/m}^2$ .

### Ein häufiger Denkfehler

In dem Zusammenhang sei noch auf einen Denkfehler hingewiesen, nämlich, daß durch Faltung des Absorbers, also Vergrößerung der Übergangsfläche, die Leistung des Sonnenkollektors über diese  $880 \text{ W/m}^2$  hinaus gesteigert werden kann. Was im Fall eines wärmeabgebenden Radiators sicher zutrifft, daß durch die vergrößerte Übergangsfläche seine Leistung heraufgesetzt werden kann, ist im Fall des Sonnenkollektors falsch. Durch die Faltung des Absorbers trifft die Sonnenstrahlung schief oder gar nicht auf einzelne Flächen. Dadurch wird einmal ihre Leistungsdichte verringert, zum anderen der reflektierte Anteil erhöht. Im Endeffekt erreicht man also dadurch eine geringere Ausbeute an Nutzenergie.

Neben Reflexionsverlusten, die die einfallende Sonnenstrahlung reduzieren, hat der Kollektor noch zusätzliche Verluste an seine Umgebung, wie bereits in *Sonnenenergie 1/76* erläutert. Da die Kollektorplatte eine höhere Temperatur als die den Kollektor umgebende Luft hat, treten Verluste durch Wärmeleitung, Konvektion und Abstrahlung auf. Diese Verluste sind vom Temperaturunterschied zwischen Absorberplatte und umgebender Luft abhängig. Rückwand und Seitenwand des Kollektors

lassen sich so isolieren, daß der Wärmeleitungsverlust im Verhältnis zum Gesamtverlust des Kollektors klein ist. Abstrahlungs- und Konvektionsverluste können hier vernachlässigt werden. Die Verluste durch die Glasabdeckung sind meist mehr als 90% der Gesamtverluste.

### Verlustströme

Bei schwarzen Absorbern werden ungefähr 70 bis 80% des Verluststroms von der Absorberplatte auf die Abdeckung durch Strahlung übertragen. Durch sog. selektive Absorberschichten

(sie absorbieren die Sonnenstrahlung sehr gut, emittieren jedoch sehr wenig infrarote Strahlung), läßt sich der auf Strahlung beruhende Verlustanteil drastisch reduzieren. Die Konvektions- und Wärmeleitungsverluste können wir nur durch schwere Gase oder durch Erzeugen eines Vakuums im Raum zwischen Absorberplatte und Abdeckung vermindern bzw. vermeiden. Alle drei Anteile heizen die Abdeckplatte auf eine Temperatur, die über der Umgebungstemperatur liegt, so daß nun diese durch die oben angesprochenen Mechanismen Energie an die umgebende Luft abgibt.

Aus dem Ziel, den Verlust durch die Abdeckung möglichst klein zu halten, ergeben sich die verschiedenen Bauformen für Sonnenkollektoren. In Bild 2 ist eine Auswahl verschiedener Bauformen mit ungefährem K-Wert für den Verlust durch die Abdeckung zusammengestellt.

Aus dem K-Wert der Abdeckung läßt sich einfach der Gesamtverlust des Kollektors für eine bestimmte mittlere Absorberplattenrempertur abschätzen: K-Wert der Abdeckung mit 10 bis 20% Zuschlag (Verluste durch Rückwand und Seitenwände), multipliziert mit der Temperaturdifferenz zwischen mittlerer Absorberplattenrempertur und Umgebungstemperatur ergibt den Gesamtverlust des Kollektors. In der Zusammenstellung ist für den Fall des einfachen abgedeckten, bzw. zweifach abgedeckten Kollektors noch ein K-Wert bei Verwendung einer selektiven Absorberschicht angegeben. Wie oben schon erwähnt, erreichen wir dabei einen wesentlich niedrigeren K-Wert. Leider liegen diese selektiven Schichten im Preis deutlich über den einfachen schwarzen

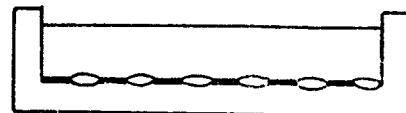
Lacken und müssen außerdem nach einigen Jahren Betriebsdauer erneuert werden.

### Beschichtung der Abdeckung

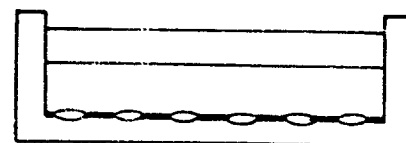
Eine zweite Möglichkeit, den K-Wert durch die Abdeckung zu reduzieren, ist, die Glasplatte mit einem Belag zu beschichten, der eine hohe Durchlässigkeit im Bereich der Sonnenstrahlung hat, jedoch die infrarote Strahlung der Absorberschicht reflektiert. Diese in Indiumoxyd oder Zinnoxyd beschichteten glasabgedeckten Kollektoren erreichen etwa dieselben K-Werte wie solche mit selektivem Absorber. Allerdings ist die Durchlässigkeit dieser beschichteten Glasscheiben um 3 - 6% geringer.

Konvektion und Wärmeleitung treten nur in gasgefüllten Zwischenräumen auf. Evakuieren wir den Raum zwischen Absorber und Abdeckung, so sind beide Effekte verschwunden. Allerdings ist die Durchlässigkeit dieser beschichteten Glasscheiben um 3 - 6% geringer. Konvektion und Wärmeleitung treten nur in gasgefüllten Zwischenräumen auf. Evakuieren wir den Raum zwischen Absorber und Abdeckung, so sind beide Effekte verschwunden.

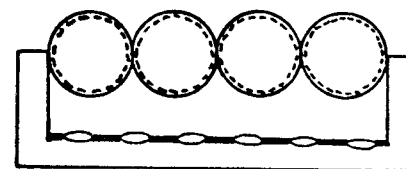
Beim Typ III in Bild 2 wird die Ab-



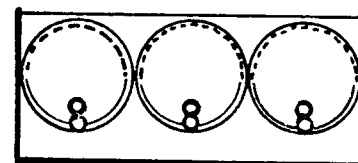
einfach abgedeckter Flachkollektor  
K-Wert der Frontabdeckung  
schwarzer Absorber  $7 \text{ W/m}^2\text{K}$   
selektiver Absorber  $3,5 \text{ W/m}^2\text{K}$



zweifach abgedeckter Flachkollektor  
schwarzer Absorber  $3,8 \text{ W/m}^2\text{K}$   
selektiver Absorber  $2,3 \text{ W/m}^2\text{K}$



Flachkollektor vakuumisoliert  
selektiv abgedeckt  $1,2 \text{ W/m}^2\text{K}$



hocheffizienter Kollektor der Firma Philips  
 $0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$

Bild 2: Kollektorbauformen

Die angegebenen Werte gelten für  $60^\circ\text{C}$  der Absorberplatte und  $10^\circ\text{C}$  Umgebungstemperatur bei einer Windgeschwindigkeit von  $5 \text{ m/s}$ .

sorberschicht mit evakuierten Glasröhren, die innen mit Indiumoxyd beschichtet sind, abgedeckt. Die damit erreichten K-Werte sind ungefähr halb so groß, wie die des doppelt abgedeckten Kollektors mit selektivem Absorber. Beim hocheffizienten Kollektor von Philips (Typ IV) wird das Wärmeträgermedium in den zwei dünnen Röhren innerhalb des evakuierten großen Glasrohres geführt. Die obere Hälfte des großen Rohres ist

**Kenndaten von Kollektoren**

Als erstes der Kenndaten für Kollektoren ist der Wirkungsgrad zu nennen.

Sonneneinstrahlung 800 W/m <sup>2</sup> entspricht 688 kcal/h m <sup>2</sup>	
1. Temperaturniveau 50K über Umgebungstemperatur	Wirkungsgrad = 49%
2. Temperaturniveau 15K über Umgebungstemperatur	Wirkungsgrad = 71%
Sonneneinstrahlung 400 W/m <sup>2</sup> entspricht 344 kcal/h m <sup>2</sup>	
1. Temperaturniveau 50K über Umgebungstemperatur	Wirkungsgrad = 18%
2. Temperaturniveau 15K über Umgebungstemperatur	Wirkungsgrad = 61%

Tabelle 2: Kollektorwirkungsgrade für verschiedene Einstrahlungen

Wirkungsgrad ist dabei das Verhältnis aus Nutzenergie zu eingestrahler Sonnenenergie. Sehr oft werden Wirkungsgrade von Sonnenkollektoren angegeben, ohne Angabe der Sonneneinstrahlung, Umgebungstemperatur, Windgeschwindigkeit, Ein- und Auslaufemperatur des Wärmeträgermediums. Wie wenig ein Wirkungsgrad ohne diese Angaben aussagt, sei an einem einfachen Beispiel demonstriert: In Tabelle 2 wurde der Wirkungsgrad für ein und denselben Kollektor (K-Wert 5W/m<sup>2</sup> °C) abgeschätzt, und zwar für 800 W/m<sup>2</sup> und 400 W/m<sup>2</sup> Sonneneinstrahlung und für zwei verschiedene Auslaufemperaturen.

Im Fall dieses Kollektors könnte man mit derselben Berechtigung 18 % wie 71 % Wirkungsgrad angeben. Wir sehen also, der Wirkungsgrad allein sagt nicht viel aus. Nur wenn die meteorologischen Größen und die Kollektorbetriebsdaten übereinstimmen, lassen sich die Wirkungsgrade zweier Kollektoren vergleichen.

**Ansprechzeiten**

Eine weitere Größe ist die Ansprechzeit des Kollektors. Sie ist ein Maß dafür, wie schnell ein Kollektor auf veränderliche Bestrahlung reagiert. Da wir in unseren Breiten oft teilbewölkten Himmel haben, also veränderliche Sonneneinstrahlung, ist die Ansprechzeit eine wichtige Größe bei der Abschätzung der erzielbaren Nutzenergie. Maßgebend für diese Größe ist in erster Linie der Wasserinhalt pro Flächeninhalt (l/m<sup>2</sup>). Natürlich ist diese Größe von den meteorologischen Verhältnissen, den Kollektorbetriebsdaten und den Kollektoreigenschaften abhängig. Tabelle 3 zeigt, wie stark die Ansprechzeit vom Wasserinhalt und der Betriebstemperatur abhängt. Die Sonnenstrahlung beträgt dabei

800 W/m<sup>2</sup>, und der K-Wert der verschiedenen Kollektoren wurde gleich dem in Tabelle 2 betrachteten Kollektor angenommen.

In Spalte 1 der Tabelle 3 ist für den jeweiligen Kollektor der Wasserinhalt und die wirksame Wärmekapazität in kJ/°C angegeben. Wie wir aus den sich ergebenden Ansprechzeiten ersehen, sollte man für unsere Sonneneinstrahlung neben geringen Verlusten auch einen kleinen Wasserinhalt anstreben.

auf der Innenseite mit Indiumoxyd beschichtet, die untere mit Silber ver-

spiegelt. Die von oben eintretende Sonnenstrahlung wird durch die verspiegelte untere Rohrhälfte auf die mit schwarzem Emalje beschichteten

Wasserinhalt in l	Ansprechzeit(50°C) in min	Wassermenge in l	Ansprechzeit(15°C) in min	Wassermenge in l
1 (12,7 kJ/K)	16	51 pro 1h 121 pro 2h	4,3	301 pro 1h 631 pro 2h
10 (52,2 kJ/K)	66	61 pro 2h	17	281 pro 1h 601 pro 2h
50 (225 kJ/K)	282	-	73	- 251 pro 2h

Tabelle 3: Ansprechzeiten und Warmwassererzeugung für Sonnenkollektoren mit verschiedenen Wasserinhalten. Alle Werte beziehen sich auf einen 1 m<sup>2</sup> Kollektor bei einer Einstrahlung von 800 W/m<sup>2</sup>

Wasserführungen konzentriert und dort absorbiert. Der in diesem System, in dem Vakuumisolierung und selektive Abdeckung kombiniert sind, erreichbare K-Wert liegt für 60 °C Auslaufemperatur und 10°C Umgebungstemperatur bei ungefähr 0.95 W/m<sup>2</sup> °C. Mit diesem, im Aachener Sonnenhaus installierten Kollektortyp läßt sich selbst bei völlig bedecktem Himmel noch nutzbare Wärme gewinnen. Als Richtwert für unsere Breiten sind 1 bis 3 l Wasser pro m<sup>2</sup> Kollektorfläche anzusehen. Für den mit dem Sonnenkollektor gekoppelten Wasserspeicher kann man als Richtwert 50 bis 100 l/m<sup>2</sup> angeben.

Sehr oft wird von Leuten, die – aus welchen Gründen auch immer – die Nutzung der Sonnenenergie ablehnen, behauptet: Die Sonne schiene bei uns zu wenig, sie könne also auch keinen Beitrag zur Energieversorgung leisten! Sicher werden wir nie unseren gesamten Energiebedarf mit Sonnenenergie decken wollen, obwohl die Behauptung, man müsse dazu zwei Drittel der

Fläche der Bundesrepublik mit Energieanlagen zu bauen, absolut falsch ist. Man würde wohl mit wenigen Prozent der Gesamtfläche, also ungefähr 6000 bis 9000 km<sup>2</sup>, auskommen.

Doch wenden wir uns dem viel naheliegenderen zu: Nutzen wir einen Teil unserer ungenutzten Dach- und Fassadenflächen zur Erzeugung von Warmwasser und Zusatzheizung.

**60 % des Energiebedarfs durch Sonnenenergie**

An der Universität in München wurde im Rahmen einer Zulassungsarbeit die Möglichkeit, den Energiebedarf eines Einfamilienhauses im Raum München, mit einem 50 m<sup>2</sup> großen Kollektor zu decken, untersucht. Das Haus hatte 160 m<sup>2</sup> Wohnfläche, war nach DIN 4108 isoliert und hatte 45 m<sup>2</sup> Fensterfläche. Es wurden die besten heute herstellbaren Fenster angenommen. Ergebnis der Abschätzungen war, daß 60 % durch Sonnenenergie gedeckt werden können. Die noch notwendige Zusatzheizung kann, da ein Speichertank im System integriert, ist, mit einem einfachen Gasdurchlauferhitzer bewerkstelligt werden.

Will man nur die Warmwasserbereitung mit Sonnenenergie machen, so genügen 1 bis 2 m<sup>2</sup> Kollektorfläche in Verbindung mit 50 bis 100 l Speichervolumen pro Person.

**75 % des Warmwassers**

Die Firma BBC hat seit Juli 1974 Testanlagen in Bregenz, Heidelberg, Walldorf und Essen zur solaren Warmwasserbereitung in Betrieb. Im Jahresmittel wurden 1 kWh/m<sup>2</sup> pro Tag erzielt, eine Steigerung um 50 % ist mit verbesserten Kollektoren ohne Schwierigkeiten möglich. Bei einer Pilotanlage war mit 3 m<sup>2</sup> Kollektorfläche ein Verbraucher von 100 l Warmwasser pro Tag zusammengesammelt. Im Fall mangelnder Sonne wurde das benötigte Warmwasser mit einer zusätzlichen konventionellen Warmwasseranlage erzeugt. Im System war ein 150-l-Tank als Speicher eingebaut. In diesem konkreten Fall konnten 75 % des Warmwassers durch Sonnenenergie erzeugt werden. Rechnet man sich anhand der experimentellen Daten unter Berücksichtigung der Ölheizungswirkungsgrade eine Ölersparnis aus, so scheinen 150 l Öleinsparung pro Jahr und Quadratmeter Kollektorfläche in unseren Breiten durchaus möglich zu sein.