

Herleitung der Kollektorgleichung

Teil V

# Physikalische Grundlagen zur Berechnung von Flachkollektoren

Von Dr. Ulf Bossel, Göttingen

Fortsetzung des Beitrags aus den Heften 4, 5 und 6/76 sowie 1/77.

## Herleitung der allgemeinen Kollektorgleichung

Auf die durch die Außenmaße Länge und Breite des Kollektors bestimmte Kollektorfläche  $A_k$  fällt die globale Strahlungsmenge  $P_{ein}$ , die man sich als Summe eines direkten Strahlungsanteils  $P_{dir}$  und eines diffusen Strahlungsanteils  $P_{dif}$  denken kann:

$$(43) A_k (P_{dir} + P_{dif}) = A_k P_{ein} = Q_{ein}$$

Diese Strahlungsleistung stellt also die theoretisch verfügbare Leistung dar.

Die von der Platine aufgenommene Strahlungsleistung ist jedoch geringer, da

- die Platinenfläche  $A_p$  kleiner ist als die Kollektorfläche  $A_k$ ,
- die Platine nur den durch den Absorptionskoeffizienten  $\alpha$  bestimmten Anteil der auf die Platine auftreffenden Strahlungsleistung absorbieren kann,
- die Abdeckung des Kollektors nur den durch den Transmissionskoeffizienten  $\tau$  bestimmten Anteil des einfallenden Lichts zur Platine durchdringen läßt,
- wegen der optischen Flächenverkleinerung bei Schrägstrahlung nur der Anteil  $R$  der einfallenden Strahlung für eine Umwandlung zur Verfügung steht. Der Anteil  $R$  kann für direkte und diffuse Strahlung unterschiedliche Werte annehmen.

Die Platine nimmt also die folgende Leistung auf:

$$(44) A_p ((\alpha \tau R P)_{dir} + (\alpha \tau R P)_{dif}) = Q_p$$

Diese Leistung läßt sich auf drei Anteile aufteilen:

- eine Nutzleistung  $Q_n$ , die vom Wärmeträgermedium abgeführt wird,
- eine Verlustleistung  $Q_v$ , die durch alle Außenflächen des Kollektors entweicht und
- eine instationäre Aufwärmleistung  $Q_i$ , die bei unterschiedlichen Einstrahlungsbedingungen aufgrund von Temperaturveränderungen im Kollektor eingespeichert wird.

Die Energiebilanz des Kollektors lautet demzufolge

$$(45) Q_p = Q_n + Q_v + Q_i.$$

Die Division dieser Gleichung durch die Einstrahlleistung  $Q_{ein}$  ergibt einen dimensionslosen Ausdruck

$$(46) Q_p/Q_{ein} = Q_n/Q_{ein} + Q_v/Q_{ein} + Q_i/Q_{ein}$$

bei dem der erste Term rechts vom Gleichheitszeichen per Definition der Kollektorwirkungsgrad  $\eta$  ist. Nach diesem aufgelöst lautet die Gleichung

$$(47) \eta = Q_p/Q_{ein} - Q_v/Q_{ein} - Q_i/Q_{ein}$$

oder ausgeschrieben

$$(48) \eta = \frac{A_p (\alpha \tau R P)_{dir} + (\alpha \tau R P)_{dif}}{A_k P_{ein}} - \frac{Q_v}{A_k P_{ein}} - \frac{Q_i}{A_k P_{ein}}$$

Hier empfiehlt sich die Einführung eines mittleren Absorptions-Transmissions-Produkts  $\bar{\alpha \tau}$ , das durch die Gleichung

$$(49) \bar{\alpha \tau} = \frac{(\alpha \tau R P)_{dir} + (\alpha \tau R P)_{dif}}{P_{ein}}$$

definiert ist. Auch das Verhältnis von Absorber- zu Kollektorfläche soll abgekürzt werden:

$$(50) a_p = A_p/A_k$$

so daß sich für den Wirkungsgrad der folgende Ausdruck ergibt:

$$(51) \eta = a_p \bar{\alpha \tau} - \frac{Q_v}{A_k P_{ein}} - \frac{Q_i}{A_k P_{ein}}$$

Der Wirkungsgrad errechnet sich also als Differenz aus einem konstanten Term und zwei dimensionslosen Ausdrücken für die Kollektorverluste und für die instationäre Energiespeicherung im Gerät. In den folgenden Abschnitten sollen diese beiden Glieder genauer betrachtet werden.

## Kollektorverluste infolge Wärmeleitung durch die Außenwände

Drei Verlustarten, die von der Wärmeübergangslehre hinreichend bekannt sind, tragen Wärme vom Absorber zur Umgebung. Es sind dies Wärmeleitung, Wärme Konvektion und Wärmestrahlung, die nun im einzelnen behandelt werden sollen.

Für die Verlustleistung infolge Wärmeleitung durch die Außenflächen wird der übliche Ansatz

$$(52) Q_{v,L} = k_L (T_p - T_u) A_k$$

gewählt, in dem die Kollektorfläche als Bezugsfläche dient. Als wärmetreibendes Potentialgefälle soll die Temperaturdifferenz zwischen Absorberplatine und Umgebung dienen. Der mittlere  $k_L$ -Wert muß demzufolge nach folgendem Schema gebildet werden:

$$(53) k_L = \frac{k_1 A_1 + k_2 A_2 + k_3 A_3}{A_k}$$

Der mittlere  $k$ -Wert für Wärmeleitung ist also durch Mittelung über alle Außenflächen (vordere Abdeckung, Kollektorrahmen, Seitenwände, Rückwand) entstanden, wobei bei den durchsichtigen Flächen nur der Wärmeleitungsanteil zu berücksichtigen ist. Die einzelnen  $k$ -Werte werden nach dem bekannten Schema

$$(54) k = \frac{1}{1/a_1 + \sum_i (s_i/\lambda_i) + 1/a_2}$$

(W m<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup>)

gebildet, wobei die  $i$ -Schichten der Außenwände als fest miteinander verbunden angenommen worden sind. In diesem Ausdruck bedeuten  $a$  die Wärmeübergangszahl in (W m<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup>),  $s_i$  die Dicke der jeweiligen Isolierschicht in (m) und  $\lambda_i$  die für die  $i$ -te Schicht maßgebliche Wärmeleitfähigkeit in (W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>).

Für die gebräuchlichsten Wärmedämmstoffe sind in Tabelle 9 die  $k$ -Werte für unterschiedliche Schichtdicken angegeben.

	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )			Materialdicke $s$ in Metern		
Glaswolle	0,055	0,072	0,100	0,050	0,075	0,100
Styropor	0,040	0,730	0,501	0,972	0,674	0,516
PU-Schaum	0,030	0,560	0,382	0,730	0,501	0,382
				0,560	0,382	0,290

Tabelle 9 Wärmedurchgangszahlen ( $k$ -Werte) in W m<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup>

Auch wenn es sich bei diesen Zahlen lediglich um Werte für eine wärmege-dämmte Platte handelt, so kann man sich mit Hilfe der Gleichung (53) leicht den mittleren k-Wert für Wärme-leitung  $k_L$  errechnen. Dieser wird ge-genüber den anderen beiden Verlust-werten immer relativ niedrig ausfallen. Für den Sommerkollektor auf dem Dach ist deshalb eine Wärmedämm-schicht von 50 mm Stärke ausrei-chend, da dickere Schichten im Ver-gleich zu den Mehrkosten nur unwes-entliche energetische Vorteile brin-gen.

Für den Leitungsverlust-Term ergibt sich als dimensionsloser Ausdruck ge-mäß Gleichung (51):

$$(55) \frac{Q_{v,L}}{A_k P_{ein}} = \frac{A_k k_L (T_p - T_u)}{A_k P_{ein}} = \frac{k_L (T_p - T_u)}{P_{ein}}$$

der durch Einführung eines Bezugs-k-Werts  $k_0 = 1 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$  und durch Einführung der mit dem Symbol  $\psi$  bezeichneten dimensionslosen Be-triebstemperatur die Gleichung

$$(56) \psi = \frac{k_0 (T_p - T_u)}{P_{ein}}$$

die in folgende handhabbare Form überführt werden kann:

$$(57) \frac{Q_{v,L}}{A_k P_{ein}} = \frac{k_L}{k_0} \psi,$$

wobei  $k_0 = 1,0 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$   
 $= 860 \text{ cal m}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ C}^{-1} = 0,176 \text{ BTU}$   
 $\text{ft}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ }^\circ\text{F}^{-1}$  ist.

### Kollektorverluste infolge Kon-vektion

Aufgrund der unterschiedlichen Tem-peraturen innerhalb des Kollektors kommt es zu einer Zirkulation der ein-geschlossenen Luft, bei der warmes Gas vom Absorber zur kälteren Abdek-kung transportiert wird. Hier wird die-se Wärme abgegeben und gelangt über Leitungsmechanismen nach draußen. Bei mehrschichtigen Abdeckungen können solche Luftwälvungen in al-len geschlossenen Kammern entstehen, also zwischen Platine und innerster Scheibe, zwischen der innersten und der nächstfolgenden Scheibe usw.

Der Wärmetransport durch die freie Konvektion ist durch eine Reihe von physikalischen Größen bestimmt, die in den beiden dimensionslosen Parame-tern zusammengefaßt sind:

$$(58) \text{ Nusseltsche Zahl } Nu = \frac{\alpha_K d}{\lambda}$$

$$(59) \text{ Grashof'sche Zahl } Gr = \frac{g \beta d^3 \Delta T}{\gamma^2}$$

mit  $\alpha_K$  = Wärmeübergangszahl  
 $(\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1})$

- $d$  = Abstand zwischen den beiden parallelen Platten (m)
- $\lambda$  = Wärmeleitzahl des einge-schlossenen Mediums  
 $(\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1})$
- $g$  =  $9,81 \text{ m s}^{-2}$  Erdbeschleuni-gung
- $\beta$  = volumetrischer Ausdeh-nungskoeffizient des einge-schlossenen Mediums.  $(1/T$  für ein ideales Glas)  $(\text{K}^{-1})$
- $\Delta T$  = Temperaturdifferenz zwi-schen den beiden parallelen Platten (K)
- $\gamma$  = kinematische Zähigkeit des eingeschlossenen Mediums  
 $(\text{m}^2 \text{ s}^{-1})$ .

Die in der Literatur angegebenen For-meln zur Berechnung des konvektiven Wärmetransports zwischen zwei Plat-ten sind zum Teil sehr kompliziert, da sie empirische Ergebnisse beschreiben, die für unterschiedliche Gase und in weiten Temperaturbereichen ermittelt worden sind. Außerdem spielt die Nei-gung  $s$  der Platten zur Horizontalen eine nicht zu unterschätzende Rolle. Es soll deshalb hier eine relativ ein-fache Gleichung angeführt werden, die dem Text von *Duffie* und *Beckman* 1) entnommen worden ist. Sie lautet

$$(60) Nu = (0,060 - 0,017 (s/90)) Gr^{1/3},$$

wobei der Neigungswinkel  $s$  in Grad anzugeben ist.

Hieraus läßt sich mit der in Gleichung (58) angeführten Definition der Nus-seltschen Zahl  $Nu$  die Wärmeüber-gangszahl  $\alpha$  ermitteln:

$$(61) \alpha_K = Nu \lambda / d$$

Für Luft, das Medium, das sich in fast allen Kollektoren zwischen Platine und hinterer Scheibe, bzw. zwischen den beiden Scheiben einer Doppelverglasung befindet, sind die Stoffwerte in Tabelle 10 zusammengetragen:

Temperatur °C	$\lambda$ m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	$m \gamma 2s^{-1}$	$\beta$ K <sup>-1</sup>
0	273	0,026	$13,3 \cdot 10^{-6}$
20	293		3,66 $10^{-3}$
40	313		3,41
60	333		3,19
80	353		3,00
100	373		2,83
			2,68

Tabelle 10: Stoffwerte von Luft

Mit den angegebenen Werten lassen sich Wärmeübergangszahlen errechnen, die zwischen 2 und  $3 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$  liegen. Konvektive Verluste sind also etwa doppelt so groß wie die durch Wärmeleitung bedingten. Ferner ist festzuhalten, daß die Wärmeübergangszahl  $\alpha_K$  eine Funktion der Temperaturdifferenz ist. Die Abhängigkeit ent-steht über die Grashof'sche Zahl  $Gr$ , die mit Hilfe der Temperaturdifferenz zu bilden ist. Der konvektive Wärme-übergang ist deshalb nicht linear mit der Temperaturdifferenz, sondern

folgt dem Temperaturunterschied hoch 4/3. Dennoch soll die folgende li-nearisierte Relation für die weiteren Betrachtungen benutzt werden:

$$(62) \frac{Q_{v,K}}{A_k P_{ein}} = \frac{A_f \alpha_K (T_p - T_u) (T_p - T_u)}{A_k P_{ein}} = \frac{A_f \alpha_K (T_p - T_u)}{A_k} \frac{k_0 (T_p - T_u)}{P_{ein}} = a_f \frac{\alpha_K (T_p - T_u)}{k_0} \psi$$

In dieser Gleichung wurde die Fenster-fläche  $A_f$  eingeführt, durch die die Wärme konvektiv verloren geht. Die re-lative Fensterfläche  $a_f$  ist durch das Verhältnis von Fenster- zu Kollektor-fläche bestimmt. Wiederum ist es mög-lich, mit Hilfe des Bezugs-k-Wertes  $k_0$  die dimensionslose Betriebstemperatur  $\psi$  einzuführen. Zu bemerken ist ferner, daß es sich bei dem Wert  $\alpha_K$  nicht um den Absorptionskoeffizienten, son-dern um die Wärmeübergangszahl han-delt. Diese ist, wie oben beschrieben, an die Temperaturdifferenz, wenn auch nur schwach, gekoppelt.

### Kollektorverluste infolge Strah-lung

Nach dem Kirchhoff'schen Gesetz emittiert jeder Strahlungsabsorber bei einer bestimmten Wellenlänge die ab-sorbierte Leistung. In der Solartechnik wird jedoch kurzwellige Sonnenstrah-lung empfangen und langwellige Wär-mestrahlung emittiert, die im Gegen-satz zur einfallenden Strahlung in der "durchsichtigen" Abdeckung aus Glas absorbiert wird. Gewisse Kunststoff-folien sind für langwelliges Infrarot ganz oder teilweise durchlässig. Glas ist jedoch "schwarz" für Infrarot. Die ab-sorbierende Scheibe heizt sich durch Wärmeaufnahme auf und beginnt ih-rerseits zu strahlen. Ein Teil dieser Strahlung fällt zurück auf den Absor-ber, während der andere Teil zur näch-sten Scheibe, oder bei einfacher Ab-deckung, nach draußen dringt.

So müßte man bei der Berücksichti-gung der abgegebenen Verluststrahlung eigentlich die Beschaffenheit und den Aufbau der Abdeckung berücksichti-gen, was die Darstellung unnötig kom-plizieren würde. Hier soll deshalb nur der einfachste Fall untersucht werden.

In der dimensionslosen Darstellung der Gleichung (51) läßt sich für die Strah-lungsverluste  $Q_{v,S}$  schreiben:

$$(63) \frac{Q_{v,S}}{A_k P_{ein}} = \frac{A_p \epsilon \sigma (T_p^4 - T_u^4)}{A_k P_{ein}} = \frac{A_p \epsilon \sigma (T_p^2 + T_u^2) (T_p + T_u)}{A_k} \frac{k_0 (T_p - T_u)}{P_{ein}} = a_p \frac{4 \epsilon \sigma T_u^3}{k_0} (1 + 1,5r + 1,0r^2 + 0,25r^3) \psi$$

mit  $r = \frac{T_p}{T_u} - 1$ .

Wiederum läßt sich die dimensionslose Betriebstemperatur  $\psi$  einführen. Die Linearisierung ist für kleine  $r$  zulässig, d. h., wenn die Platinentemperatur in Nähe der Umgebungstemperatur liegt. Aber bereits bei einer Platinentemperatur von 330 K (57 °C) und einer Umgebungstemperatur von 300 K (27 °C) ist der Klammerausdruck auf 1,16 angewachsen. Die Symbole  $\epsilon$  und  $\sigma$  bezeichnen die Emissivität der strahlenden Oberfläche und die Stephan-Boltzmann'sche Konstante  $\sigma = 5,6697 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-4}$ .

Für  $T_u = 300 \text{ K}$  und  $\epsilon = 0,9$  errechnet man für den Ausdruck vor der Klammer in der Gleichung (63) einen Wert von 5,5. Dies bedeutet, daß die Strahlungsverluste etwa doppelt so groß sind wie die Konvektionsverluste und mehr als fünfmal so groß wie die Leitungsverluste durch die Wände des Kollektors.

Die Linearisierung der Strahlungsgleichung ist, wie Tabelle 11 zeigt, nur für sehr kleine Abweichungen der Platinentemperatur von der Außentemperatur, d. h. für kleine Werte von  $r$  zulässig. Aus Gleichung (63) geht auch hervor, daß kleine Emissivitäten  $\epsilon$  wünschenswert sind. Für ein  $\epsilon$  von 0,09 vermindern sich die Strahlungs-

$r =$	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,40	0,50
$( ) =$	1,00	1,078	1,160	1,248	1,342	1,441	1,547	1,776	2,031

Tabelle 11: Klammerausdruck in Gleichung (63)

verluste auf ein Zehntel des für  $\epsilon = 0,9$  errechneten Wertes. Der Ausdruck vor der Klammer wird dann nur 0,55 statt 5,5 sein.

**Instationäre Energiespeicherung im Kollektor**

In Gleichung (45) wurde die instationäre "Verlustleistung" eingeführt, die sich durch die Aufwärmung des Kollektors am Morgen, bzw. bei Änderung der Einstrahlung ergibt. Ein Teil der vom Absorber aufgenommenen Energie wird zum Aufheizen des Kollektors (und der Rohrleitungen) benötigt. Diese Energie ist streng genommen nicht verloren gegangen. Da sie aber nicht genutzt werden kann, soll sie dennoch als Verlust betrachtet werden.

Der in Gleichung (51) angegebene Ausdruck für die instationäre Aufwärmleistung  $Q_j$  läßt sich ebenfalls durch die Variable  $\psi$  ausdrücken:

$$(64) \frac{Q_j}{A_k P_{\text{ein}}} = \frac{A_k c d T_p / dt}{A_k P_{\text{ein}}} = \frac{c / t_o d(T_p - T_u) / dt^*}{P_{\text{ein}}} = \frac{c / t_o d(k_o (T_p - T_u) / P_{\text{ein}})}{k_o dt^*} = \frac{c}{k_o t_o} \frac{d(\psi)}{dt^*}$$

Durch Einführung einer Bezugszeit  $t_o = 1 \text{ s}$  ist sowohl der Differenzialausdruck für die zeitliche Veränderung der dimensionslosen Verlustleistung  $\psi$ , als auch der davorstehende Faktor dimensionslos gemacht worden. Das Symbol  $c$  stellt die Wärmekapazität des Kollektors dar und ist auf die Kollektorfläche bezogen. Die Einheiten von  $c$  sind  $\text{J m}^{-2} \text{K}^{-2}$ . Die dimensionslose Zeit  $t^*$  ist durch den Quotienten

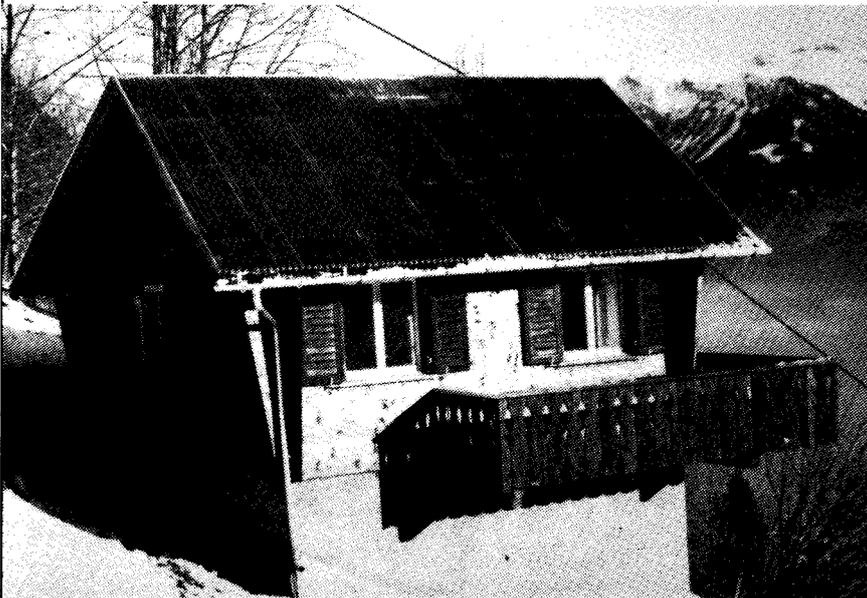
Material	Wandstärke			
	2 x 0,3 mm	2 x 0,5 mm	2 x 1,0 mm	2 x 1,5 mm
Stahl	2 177	3 628	7 256	10 884
Aluminium	1 439	2 398	4 796	7 188

Tabelle 12: Dimensionlose thermische Trägheit von Absorberplatinen



**Aktiengesellschaft für Sonnen-Wärmetechnik**

Vertretungen  
Schwindenmann Metallbau  
7630 Lahr, Almenweg  
Solerwa GmbH  
7101 Untergruppenbach  
Kappishalde 27, Postfach



Forschung, Fabrikation und Verkauf von Apparaturen zur Nutzung von Sonnenergie und allen anderen umweltfreundlichen Energieformen, wie:

- Flachkollektoren aus Aluminium für Schrägdacheinbau und Flachdachaufbau,
- Solar-Zellenspeicher im Baukastensystem auf jede Speichergröße erweiterungsfähig,
- Spezialsteuerungen für Solarspeicher und Sonnenkollektoranlagen,
- Wärmeträgermedium für Sonnenkollektoren,
- Wärmeaustauscher für Sonnenkollektoren, Wärmepumpen, Warmwasseraufbereitung direkt in den Zellenspeichern integriert,
- Projektierung von Sonnenergieanlagen,
- Elektrospeicherheizungen kombiniert mit Solarspeicheranlagen,
- Warmwasseraufbereitung und Zentralheizungs-Sonnenergieanlagen.

AG für Sonnenwärmetechnik, SOLCALOR, Im Bretscha 22

FL-9494 Schaan

Tel. 075/2 68 22/23  
Telex 77760 solca

aus der wirklichen Zeit  $t$  und der Bezugszeit  $t_0$  gebildet:  $t^* = t/t_0$ . Der dimensionslose Faktor  $c/(k_0 t_0)$  ist in Tabelle 12 für Stahl- und Aluminiumabsorberplatinen im Leerzustand dargestellt.

Man erkennt aus dieser Aufstellung, daß die Stahlplatine bei gleicher Wandstärke eine höhere thermische Trägheit besitzt als die Aluminiumplatine. Wegen der unterschiedlichen Festigkeits- und Korrosionseigenschaften kann bei der Verwendung von Stahl jedoch mit dünneren Wandstärken gearbeitet werden, so daß sich der materialbedingte Vorteil des Aluminiums wieder aufhebt.

### Die dimensionslose Kollektorgleichung

Gleichung (51) kann nun mit Hilfe der für die drei Verlustarten und für die stationäre Wärmespeicherung hergeleiteten Ausdrücke vervollständigt werden. Man erhält den folgenden allgemeinen Ausdruck

$$(65) \eta = a_p \bar{a} \bar{\tau} \cdot \frac{Q_{v,L}}{A_k P_{\text{ein}}} - \frac{Q_{v,K}}{A_k P_{\text{ein}}} - \frac{Q_{v,S}}{A_k P_{\text{ein}}} \cdot \frac{Q_i}{A_k P_{\text{ein}}}$$

der mit Hilfe der Gleichungen (57), (62), (63) und (64) wie folgt geschrieben werden kann:

$$(66) \eta = a_p \bar{a} \bar{\tau} - \frac{k_L}{k_0} \psi - a_f \frac{a(r)}{k_0} \psi - a_p \frac{4\epsilon \sigma T_u^3 (1+1,5r+r^2+0,25r^3)}{k_0} \psi - \frac{c}{k_0 t_0} \frac{d(\psi)}{dt^*}$$

Die Abhängigkeit des konvektiven Wärmeübergangs  $a_K$  von der Temperaturdifferenz  $(T_p - T_u)$  kann auch als Abhängigkeit von  $r$  geschrieben werden, da nach Gleichung (62) per Definition  $T_p - T_u = r T_u$  ist.

Gleichung (66) läßt sich noch besser interpretieren, wenn sie in folgender Form dargestellt wird:

$$(67) \eta = a_p \bar{a} \bar{\tau} (1 - (C_L + C_K(r) + C_S(r)) \psi) - C_4 \frac{d\psi}{dt^*} = a_p \bar{a} \bar{\tau} (1 - C(r) \psi) - C_1 \frac{d\psi}{dt^*}$$

mit (68)  $C_L = \frac{k_L}{k_0} \frac{1}{a_p \bar{a} \bar{\tau}}$

$$(69) C_K = \frac{a_f}{a_p} \frac{a_K(r)}{k_0 \bar{a} \bar{\tau}}$$

$$(70) C_S = \frac{\epsilon}{\bar{a}} \frac{4\sigma T_u^3 (1+1,5r+r^2+0,25r^3)}{k_0 \bar{\tau}}$$

wobei das mittlere Produkt  $\bar{a} \bar{\tau}$  gleich dem Produkt der Mittelwerte  $\bar{a}$  ·  $\bar{\tau}$  gesetzt worden ist, und

$$(71) C_1 = \frac{c}{k_0 a_p \bar{a} \bar{\tau}}$$

Im stationären Fall ist der Wirkungsgrad also durch die Gleichung

$$(72) \eta = a_p \bar{a} \bar{\tau} (1 - C(r) \psi)$$

bestimmt. Diese Gleichung soll nun näher betrachtet werden:

- a) Der Wirkungsgrad kann nicht besser sein als das Produkt aus der relativen Platinenfläche  $a_p = A_p/A_k$  und dem über alle Wellenlängen gemittelten Produkt aus Absorptionsvermögen der Platine und dem Transmissionsvermögen der Abdeckung. Verbesserungen ergeben sich also durch Verminderung der Totfläche (Rahmenteile, Abstützungen usw.), durch bessere Schwärzung der absorbierenden Schicht und durch Verbesserung der Transmission der Abdeckung.
- b) Die eigentlichen Kollektorverluste sind in guter Näherung linear von der dimensionslosen Betriebstemperatur  $\psi$  abhängig, die auch als dimensionslose Verlustleistung bezeichnet werden könnte. Die Verluste werden vermindert, wenn die Zahl  $\psi$  möglichst klein gehalten wird. Auch bei hoher Einstrahllei-

- Sonnenenergieausnutzung
- für Gebrauchswarmwasser
- für Schwimmbadheizung
- wie auch zur Unterstützung der Raumheizung



Weil wir für die Zukunft planen, bauen wir heute Arbonia-Multisol, das zuverlässige Sonnenenergie-Nutzungssystem

**arbonia multisol**®

ARBONIA AG  
CH - 9320 ARBON

Vertrieb in Deutschland:  
VMH Multibeton  
Postfach 102320  
5090 Leverkusen 1

Senden Sie mir unverbindlich:  
 Fragebogen zum Einsatz von  
Arbonia-Sonnenkollektoren

(Absender nicht vergessen)

stung ist ein Absorberbetrieb in der Nähe der Umgebungstemperatur wünschenswert.

- c) Die Verluste sind ferner bestimmt durch die Funktion  $C(r)$ , die für kleine Werte von  $r = T_p/T_u - 1$  nahezu unabhängig von  $r$  und somit eine Konstante wird. Zur Optimierung des Kollektorwirkungsgrades ist  $C(r)$  so klein wie möglich zu machen.
- d)  $C(r)$  setzt sich aus drei Anteilen zusammen, welche die drei Verlustarten Leitung, Konvektion und Strahlung quantifizieren. Hierbei ist die Wärmeleitung  $C_L$  unabhängig von  $r$ , bzw. von der Platinen- und Umgebungstemperatur. Die Konvektionsverluste  $C_K$  sind nur schwach mit der Temperaturdifferenz verknüpft, während die Strahlungsverluste  $C_S$  gemäß der in Tabelle 11 dargestellten Form von  $r$  abhängt. Hier ist die Abhängigkeit für kleine  $r$  ( $0 < r < 0,1$ ) schwach, steigt dann aber wegen der Abhängigkeit der Strahlungsverluste von der Differenz der vierten Potenzen der Temperaturen stark an.
- e) Im Strahlungsterm  $C_S$  ist die Selektivität der Absorberbeschichtung explizit aufgeführt. Je kleiner das Verhältnis von Emissionsvermögen  $\epsilon$  im Bereich der Wärmerückstrahlung zum gemittelten Absorptionsvermögen im Bereich der einfallenden Solarstrahlung ist, desto gerin-

ger werden auch die Strahlungsverluste des Kollektors. Ein möglichst kleines  $\epsilon/a$ , bzw. ein möglichst hohes  $a/\epsilon$ -Verhältnis ist also anzustreben, zumal die Strahlungsverluste ohnehin den dominierenden Verlustanteil ausmachen können, wenn der Kollektor bei höheren Temperaturen betrieben werden soll.

Die tabellarische Aufstellung in Tabelle 13 soll über die relativen Beiträge der einzelnen Verlustgrößen Aufschluß geben. Hierfür sind die folgenden Annahmen getroffen worden:

Kollektorgröße	1 m <sup>2</sup>
Absorbergröße	0,8 m <sup>2</sup> ( $a_p = 0,8$ )
Fenstergröße	0,9 m <sup>2</sup> ( $a_f = 0,9$ )
Bauhöhe	0,1 m
Wärmedämmung	0,05 m PU-Hartschaum, $\lambda = 0,03$ W/m·K
Transmission der Abdeckung	$\tau = 0,9$
Absorptionsvermögen des Absorbers $a$	0,95
Absorbertemperatur	70 °C = 353 K und 40 °C = 313 K
Umgebungstemperatur	20 °C = 293 K
Emissionsvermögen der Platine	0,95, $a/\epsilon = 1,00$ 0,095, $a/\epsilon = 0,10$
Abstand zwischen Platine u. Scheibe	0,025 m

Kollektorneigung  
Einscheibenkollektor

Bei einem einfach verglasten, nicht selektiv beschichteten Kollektor gehen also etwa 2/3 der Verluste durch Strahlung verloren, während näherungsweise 22 % durch Konvektion und 11 % durch Wärmeleitung nach außen gelangen. Beim selektiv beschichteten Absorber ist der Anteil der Strahlungsverluste (16 %) kleiner als der für Leitung (25 bis 30 %) und Konvektion (54 bis 58 %). Zur Verbesserung von Kollektoren ist also die Selektivität zu erhöhen. Das bringt wesentlich mehr als die Verminderung der konvektiven und der konduktiven Wärmeverluste. Bei einer normalen, schwarz lackierten Platine hat es wenig Sinn, den Wirkungsgrad durch dicke Wärmedämmungen verbessern zu wollen, bzw. durch wabenförmige Elemente die Konvektion zu vermindern. Bei der Verwendung von selektiv beschichteten Absorbern ist jedoch die Unterbindung der Konvektionsverluste das vorrangigste Problem. Auch die Verbesserung der Wärmeisolation bringt in diesem Fall Vorteile.

Absorptionsvermögen $a$	0,95		0,95	
Emissionsvermögen $\epsilon$	0,95		0,095	
Absorbertemperatur (K)	313	353	313	353
Verlustkoeffizient $C_L$	1,32	1,32	1,32	1,32
$C_K(r)$	2,37	3,05	2,37	3,05
$C_S(r)$	7,02	8,57	0,70	0,86
$C(r)$	10,71	12,94	4,39	5,23

Tabelle 13: Vergleich der dimensionslosen Verlustkoeffizienten



WIED-Solar

das Sonnenenergie-System mit über 20-jähriger Erfahrung. Nützen auch Sie die kostenlose Sonnenwärme für Ihr Brauchwasser, Schwimmbad, Bade- und Duschwasser.

Senden Sie nebenstehenden Coupon an WIED-Solar GmbH, Postfach 155, 7907 Langenau.

MIROMIT-Kollektoren von WIED-Solar sind ohne großen Aufwand überall einzubauen.

Sie erhalten ein System für wenig Geld und sicherer Funktion, weil keine aufwendige Technik notwendig ist.

Informieren Sie sich über WIED-Solar. Es lohnt sich.

Bitte informieren Sie mich kostenlos über das WIED-Solar-System.

Name \_\_\_\_\_

Straße \_\_\_\_\_

Ort \_\_\_\_\_