

- [ 4 ] *Schulz, H.*: Einsatz von Solarenergie in der Landwirtschaft. Statusbericht des BMFT "Nutzung der Sonnenenergie in der Landwirtschaft". Weihenstephan (1982) S. 2/11.
- [ 5 ] *Ratschow, J.-P. u. H.-G. Claus*: Nutzung der Sonnenenergie in der Landwirtschaft. Landtechnik Bd. 33 (1978) Nr. 1, S. 18/21.
- [ 6 ] *Grimm, W.*: Messungen an Solarkollektoren für die Landwirtschaft. Grundl. Landtechnik Bd. 30 (1980) Nr. 5, S. 149/55.
- [ 7 ] *Grimm, W.*: Anwendung, Aufbau und Arbeitscharakteristik von Solardach-Luftkollektoren in der Landwirtschaft. Diss. Univ. Göttingen, 1983.
- [ 8 ] *Lücke, W.*: Vergleichende Hallen- und Freilandversuche an Solardach-Kollektoren. Diss. Univ. Göttingen, 1983.
- [ 9 ] *Stutterheim, W. u. M. Hesse*: Energiesituation in der Land- und Forstwirtschaft der Bundesrepublik Deutschland. Ber. über Landwirtschaft, Band 59, S. 201/37. Hamburg und Berlin: Verlag Paul Parey, 1981.
- [ 10 ] *Krämer, K.*: Verwendung der Solarenergie in der Haustechnik. Karlsruhe: Promotor Verlag, 1978.
- [ 11 ] Unterlagen der Firma KAMI, Schweden.
- [ 12 ] *Hell, F.*: Grundlagen der Wärmeübertragung. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1973.
- [ 13 ] Unterlagen der Firma EAM, Kassel.
- [ 14 ] Unterlagen der Firma HEYLO, Sarstedt.
- [ 15 ] *Daniels, K.*: Einsatz von Solarenergie. In: Heizen mit Sonne. Tagungsbericht der DGS. Göttingen (1976) S. 279/330.
- [ 16 ] *Sabady, P.R.*: Wie kann ich mit Sonnenenergie heizen? Zürich: Helion Verlag, 1977.

## Grundlagen zur Berechnung und Dimensionierung von großflächigen Sonnenkollektoren zur Luftanwärmung

Von Wulf Grimm, Göttingen\*)

DK 620.91:697.329

Mit steigenden Kosten für fossile Energieträger gewinnt auch in der Landwirtschaft die Nutzung der Sonnenenergie an Bedeutung. Die Kollektorentwicklung hat mit großflächig verlegbaren Solardach-Luft-Kollektoren einen gewissen Abschluß gefunden. Die unter künstlicher und natürlicher Bestrahlung für diese Kollektorbauform gewonnenen Meßergebnisse werden durch eine thermische Leistungsbilanz ergänzt. Das Berechnungsverfahren erlaubt die Quantifizierung der einzelnen Verlustwärmeströme und gestattet eine rechnerische Überprüfung konstruktiver Änderungen zur Verbesserung des Kollektorwirkungsgrades. Die vorgestellten Meß- und Berechnungsverfahren können als Grundlage für Kollektorprüfungen angesehen werden.

### 1. Einleitung

Die thermische Nutzung der Solarenergie als Niedertemperatur-Wärmequelle erlangt zunehmende Bedeutung. Aufgrund der relativ geringen Energiedichte mit maximalen Tagessummen der Einstrahlung von 4,5 bis 5,5 kWh/m<sup>2</sup>, der täglichen und jahreszeitlichen Schwankungen sowie der fehlenden Speichertechnologie scheinen sich auf absehbare Zeit nur solche Kollektorsysteme durchzusetzen, die sich mit geringen Investitions-, Betriebs- und Wartungskosten in einem überschaubaren Zeitraum amortisieren.

\*) *Dipl.-Ing. W. Grimm* ist wissenschaftlicher Assistent am Institut für Agrartechnik (Direktor: Prof. Dr.-Ing. F. Wieneke) der Georg-August-Universität Göttingen.

Zur Deckung des Wärmeenergiebedarfs für landwirtschaftliche Trocknungsanlagen wurden bisher Flachkollektoren in selbsttragender Bauweise, Folienkollektoren und Solardach-Luft-Kollektoren entwickelt. Vor allem die letztere Bauform bietet mit großflächigen und preisgünstigen Anlagen gute Aussichten, einen ansehnlichen Anteil zur solaren Energiegewinnung beizutragen. Sie nutzt die ohnehin vorhandene Dachhaut eines Gebäudes als nicht abgedeckten Absorber mit großer Haltbarkeit und optisch ansprechender Formgebung.

Zur Optimierung des konstruktiven Aufbaus dieser Kollektoren nach ökonomischen und technologischen Gesichtspunkten bieten sich einerseits kostspielige und zeitintensive Messungen auf Prüfständen mit natürlicher und künstlicher Sonnenbestrahlung und andererseits theoretische Abschätzungen an. Mit einem mathematischen Modell können das Betriebsverhalten der Kollektoren, die Oberflächentemperaturen der einzelnen Bauteile und die Verlustwärmeströme unter verschiedenen klimatischen Bedingungen und Betriebszuständen ermittelt werden.

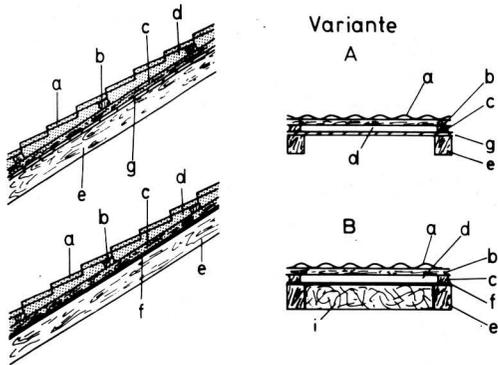
In verschiedenen Veröffentlichungen werden die Grundlagen zur Energiegewinnung mit Kollektoren dargelegt. Sie betreffen jedoch entsprechend der größeren Verbreitung zumeist die zur Wassererwärmung vorgesehenen Flachkollektoren mit einer oder mehreren transparenten Abdeckungen [1 bis 3].

### 2. Aufbau des Solardach-Luft-Kollektors

Den prinzipiellen konstruktiven Aufbau eines Solardach-Luft-Kollektors zeigt als Beispiel **Bild 1** in zwei Varianten. Auf die Dachsparren *e* wird eine Hartfaserplatte *g* als Kollektorboden aufgelegt. Mit der Konterlatte *c* und der Dachlatte *b* entsteht ein ausreichend großer Strömungskanal zwischen dem Absorber aus Metall *a* und dem Kollektorboden *g*. Die quer zur Strömungsrichtung verlaufende Dachlatte wirkt als Verwirbelungssteg für die Luft und verbessert somit den Kollektorwirkungsgrad. Gegenüber einer konventionellen Dacheindeckung erfordert der Solardach-Luft-Kollektor bei

diesem Aufbau lediglich den zusätzlichen Einbau des Kollektorbodens und der Konterlatte. Die Grundkosten für die Dacheindeckung sind zumindest preisgleich, mit einer Tendenz zu sinkenden Kosten gegenüber der Bedachung mit Wellasbest, Dachziegeln und -pfannen. Aus Dächern von Wirtschaftsgebäuden mit großem Bänderabstand wird die Luft quer zur Dacheindeckungsrichtung bei in etwa vergleichbarem Dachaufbau abgesaugt.

Bei der Variante B wird gegenüber der Variante A die Spanplatte durch eine kräftige Dachunterspannbahn *f* ersetzt und eine Isolierung *i* des Daches vorgenommen. Dieser Aufbau entspricht den heute üblichen Bedachungen für Wohngebäude. Die zusätzlichen Investitionen beschränken sich auf die Luftkanäle zum Absaugen der erwärmten Luft.



**Bild 1.** Aufbau von Solardach-Luft-Kollektoren mit nicht abgedecktem Absorber.

- |                  |                   |
|------------------|-------------------|
| a Dacheindeckung | e Dachsparren     |
| b Dachplatte     | f Unterspannbahn  |
| c Konterlatte    | g Hartfaserplatte |
| d Strömungskanal | i Isolierung      |

### 3. Ermittlung der Arbeitscharakteristik eines Luft-Kollektors

Die Leistungsfähigkeit eines Kollektors wird einerseits durch die Lufteintrittstemperatur  $T_e$ , Lufteintrittsfeuchte  $\varphi_e$ , Lufttemperatur  $T_a$  im Kollektor an verschiedenen Stellen über der Länge sowie dem Luftvolumenstrom  $\dot{V}$  und andererseits von der Globalstrahlung  $\dot{G}_g$  bestimmt.

Die Nutzleistung  $\dot{Q}_N$  berechnet sich aus dem Massenstrom und der Enthalpiedifferenz der Luft zwischen dem Eintrittszustand und den verschiedenen Meßstellen über der Kollektorlänge. Unter der Voraussetzung, daß keine Falschluf durch Undichtigkeiten in die Kollektoren und Rohrverbindungen eintreten kann, ist der Massenstrom der Luft im gesamten System konstant. Damit ergibt sich

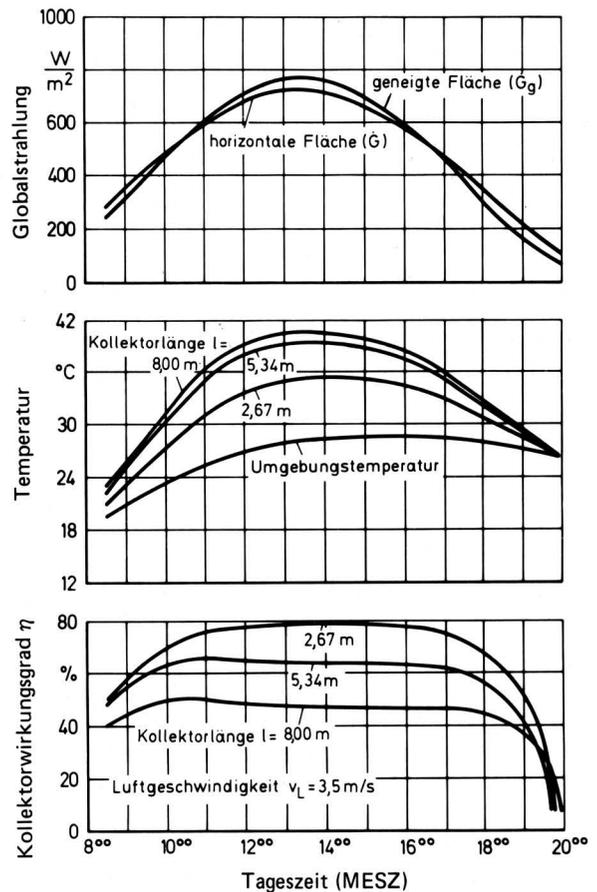
$$\dot{Q}_N = \rho_L \dot{V} \Delta h = \dot{m} [c_{pL}(T_a - T_e) + x_L c_{pD}(T_a - T_e)] \quad (1)$$

Der Kollektorwirkungsgrad  $\eta$  wird definiert als das Verhältnis der Nutzleistung  $\dot{Q}_N$  zur eingestrahlenen Leistung  $\dot{G}_g$  bei einer bestimmten Eintrittsfläche  $A_e$  des Kollektors für die Strahlung:

$$\eta = \dot{Q}_N / (\dot{G}_g A_e) \quad (2)$$

Die Messungen an Kollektoren mit diesem Aufbau zeigen unter natürlicher Sonnenbestrahlung für die Erwärmung der Luft im Kollektor und für den Kollektorwirkungsgrad  $\eta$  charakteristische Ergebnisse, **Bild 2**. Nach einer Anlaufphase, die bis etwa 2 Stunden andauert und durch einen ansteigenden Kollektorwirkungsgrad (unteres Diagramm) gekennzeichnet ist, verläuft der Kollektorwir-

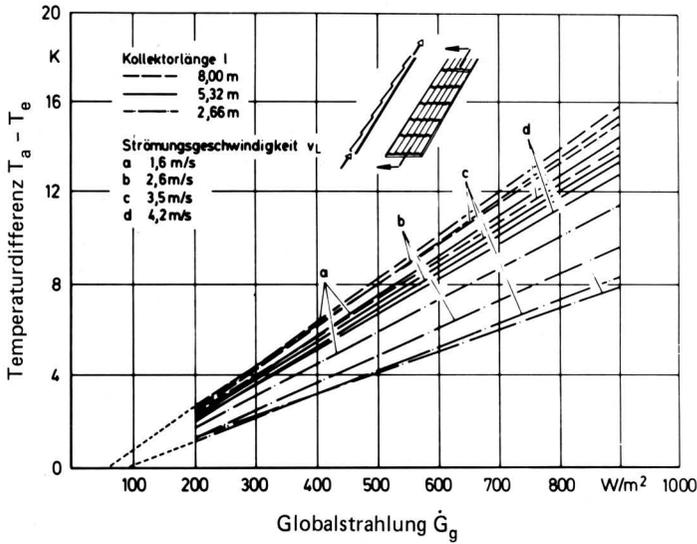
kungsgrad für die folgenden 6 bis 8 h nahezu konstant. Die Globalstrahlung (oberes Diagramm) und die Temperaturdifferenz der Luft im Kollektor gegenüber der Umgebungsluft, wie auch diese selbst (mittleres Diagramm), steigen demgegenüber im Tagesverlauf an und fallen am Nachmittag wieder ab. Gegen Abend nimmt der Kollektorwirkungsgrad mit sinkender Strahlungsintensität über einen Zeitraum von wiederum 1 bis 2 Stunden erheblich ab.



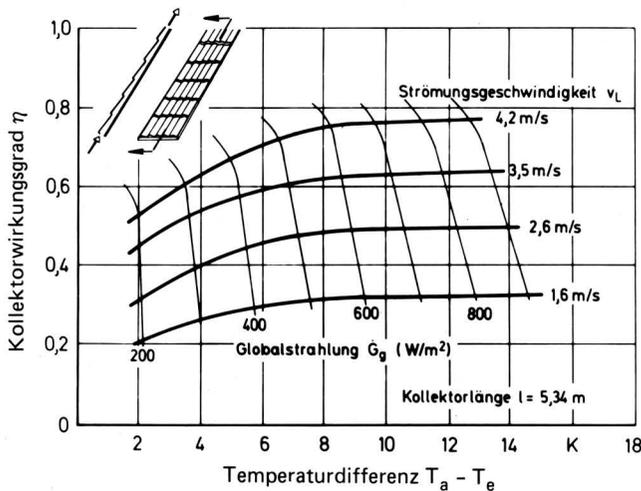
**Bild 2.** Verlauf von Globalstrahlung, Temperaturen und Kollektorwirkungsgrad bei verschiedenen Kollektorlängen im Tagesgang;  $v_L = 3,5 \text{ m/s}$ .

Im einzelnen zeigte sich während der Messungen unter natürlicher Sonnenbestrahlung und auf einem Sonnensimulator an jedem Meßpunkt des Kollektors über der Kollektorlänge stets ein linearer Zusammenhang zwischen der Globalstrahlung  $\dot{G}_g$  und der Temperatursteigerung der Luft im Kollektor gegenüber der Umgebungsluft ( $\Delta T = T_a - T_e$ ), **Bild 3**. Je nach Kollektorlänge und Strömungsgeschwindigkeit kann die Luftanwärmung bei nicht abgedeckten Kollektoren bis zu 20 K betragen.

Die wichtigsten Leistungsdaten der Kollektoren lassen sich in einem Betriebskennfeld zusammenfassen, **Bild 4**. Ausgehend von einer bestimmten Globalstrahlung und der gewünschten Strömungsgeschwindigkeit  $v_L$  ist in dem Diagramm für eine bestimmte Kollektorlänge die erreichbare Temperaturdifferenz  $\Delta T$  sowie der Kollektorwirkungsgrad  $\eta$  abzulesen. Der Kollektorwirkungsgrad  $\eta$  nimmt zunächst mit steigender Globalstrahlung  $\dot{G}_g$  zu, um dann nahezu konstant zu bleiben.



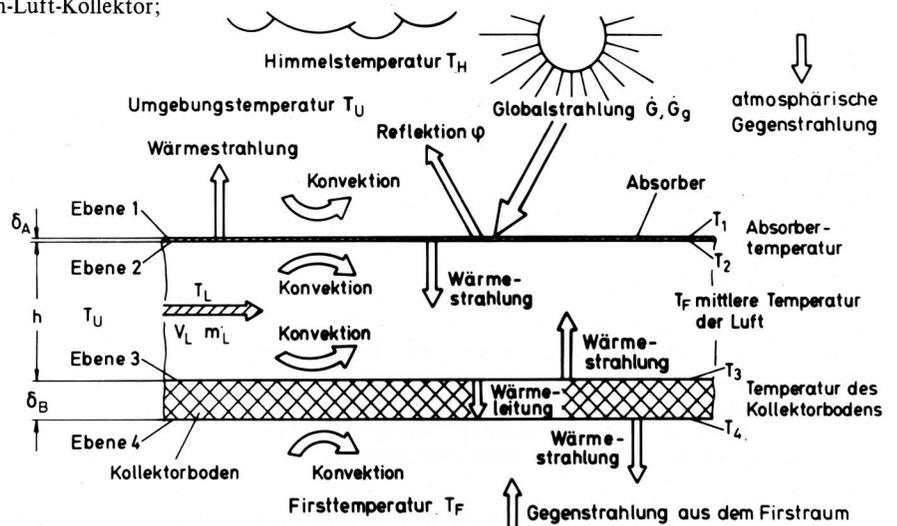
**Bild 3.** Lufterwärmung im Kollektor in Abhängigkeit von der Globalstrahlung bei verschiedenen Kollektorlängen und Strömungsgeschwindigkeiten der Luft im Kollektor.



**Bild 4.** Betriebskennfeld für einen Solardach-Luft-Kollektor;  $l = 5,34$  m.

#### 4. Ansatz für die Berechnung von Luftkollektoren ohne Abdeckung

In den Berechnungen wird der stationäre Betriebsfall für einen nicht abgedeckten Kollektor mit allen die Leistungsbilanz beeinflussenden Temperaturen und Anteilen des Wärmeübergangs, **Bild 5**, betrachtet [4]. Die Verluste an den Seiten der Kollektoren sollen aufgrund des geringen Anteils an der Gesamtfläche bei großflächiger Anwendung vernachlässigt werden.



Die Globalstrahlung trifft direkt auf den Absorber und wird, da der Absorber nicht transparent ist, entsprechend den optischen Eigenschaften der Oberfläche entweder absorbiert oder reflektiert. Die absorbierte Strahlungsleistung beträgt mit dem Reflexionskoeffizienten  $\rho_S$ :

$$\dot{Q}_A = (1 - \rho_S) A_e \dot{G}_g \quad (3)$$

Die erwärmte Absorberoberfläche  $A_e$  gibt infolge Strahlungsaustauschs mit der Atmosphäre und infolge Konvektion einen nicht mehr nutzbaren Wärmestrom an die Umgebung ab. Der Strahlungswärmeverlust an der Absorberoberfläche wird durch die Temperatur des Absorbers und die sogenannte Himmelstemperatur bestimmt. Letztere beschreibt ein angenommenes Niveau für die Temperatur der Atmosphäre. Als praktisches Beispiel zur Wirkung des Strahlungsaustauschs sei das Vereisen von Fahrzeugscheiben, die gegen die Atmosphäre geneigt sind, in den bewölkungsarmen Morgenstunden bei einer Lufttemperatur von  $1-4$  °C angeführt. Die eher senkrechten Seitenscheiben stehen dagegen mit der wärmeren Umgebung im Strahlungsaustausch und sind daher oft nur betaut.

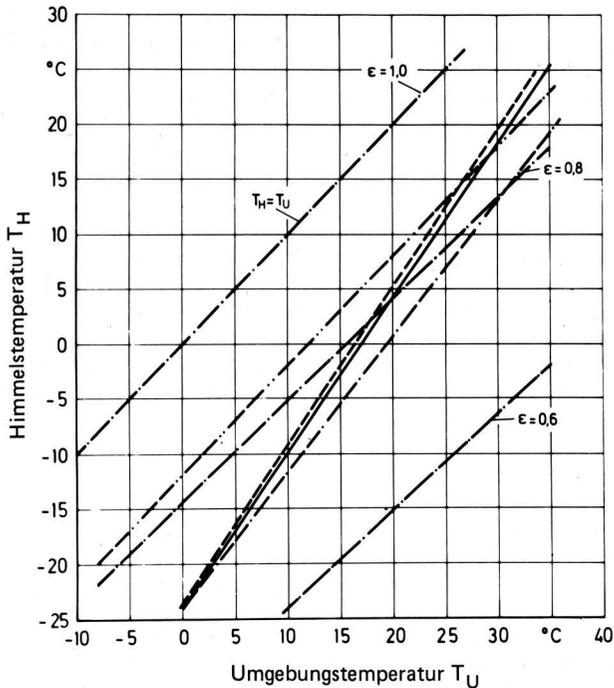
In **Bild 6** sind die Beziehungen zwischen der leicht meßbaren Umgebungstemperatur und der Himmelstemperatur nach verschiedenen Quellen [1, 5, 6, 7] zusammengestellt. Mit zunehmender Dunstschicht bzw. Bewölkung nähern sich die Temperaturen der Umgebungsluft und des Himmels einander an, weil die Erdoberfläche dann mit der Dunstschicht oder den Wolken im Strahlungsaustausch steht. Die folgenden Berechnungen gehen von einem modifizierten Ansatz nach *Duffie u. Beckmann* [1] aus:

$$T_H = 0,0562 T_U^{1,5} \quad (4)$$

Die Bestimmung der Wärmeverluste am Absorber durch Strahlungsaustausch mit der Atmosphäre erfolgt mit

$$\dot{Q}_{V,S1} = \sigma \epsilon_1 A_e (T_1^4 - T_H^4) \quad (5)$$

wobei  $\epsilon_1$  der Emissionskoeffizient der abstrahlenden Fläche und  $\sigma = 5,75 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$  die Stefan-Boltzmann-Konstante ist.



**Bild 6.** Himmelstemperatur als Funktion der Umgebungstemperatur nach verschiedenen Quellen.

- - -  $T_H = e^{1/4} T_U$  n. Gordon, Govaer u. Zarmi [5]
- $T_H = 0,0552 T_U^{1,5}$  n. Duffie u. Beckmann [1]
- · ·  $\sigma T_H^4 = 9,37 \cdot 10^{-6} \sigma T_U^6$  n. Swinbank [6]
- $\sigma T_H^4 = 1,06 \cdot \sigma T_U^4 - 119$  n. Umsworth u. Monteith [6]
- - - - -  $T_H = T_U - 12$  n. Cooper, Christie u. Dunkle [7]

mit  $T_U$  Umgebungstemperatur in K,  $T_H$  Himmelstemperatur in K,  
 $\sigma = 5,75 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$  Stefan-Boltzmann-Konstante und  
 $\epsilon$  Emissionskoeffizient

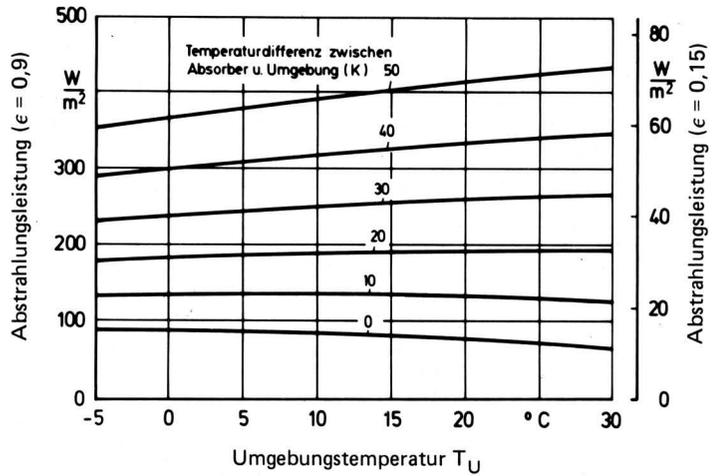
**Bild 7** zeigt den Wärmestrom infolge Abstrahlung von der Absorberoberfläche in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur. Bei einem Emissionskoeffizienten von  $\epsilon_1 = 0,9$  und Temperaturgleichheit zwischen Absorber und Umgebungstemperatur beträgt die Abstrahlungsleistung bereits  $80 \text{ W/m}^2$ , wobei sich dieser Wert mit ansteigender Umgebungstemperatur und der sich an sie annähernden Himmelstemperatur leicht vermindert. Mit zunehmender Absorbertemperatur steigt der Verlustwärmestrom etwa proportional an. Bei einem gegenüber der Umgebungstemperatur um  $50 \text{ K}$  wärmeren Absorber erreicht er  $350$  bis  $400 \text{ W/m}^2$ .

Die Absorbertemperatur wird aber nicht nur durch die Abstrahlungsverluste, sondern auch durch die konvektiven Verluste bestimmt. Für sie gilt mit der Wärmeübergangszahl  $a_1$ , der Fläche  $A_e$  und der Temperaturdifferenz zwischen Absorber und Umgebungsluft

$$\dot{Q}_{V,K} = a_1 A_e (T_1 - T_U) \quad (6)$$

Die Abschätzung des konvektiven Wärmeübergangs erfolgt näherungsweise mit Gleichungssystemen, die dem VDI-Wärmeatlas [8] für vergleichbare Anwendungsfälle zu entnehmen sind. Neben der Unterscheidung hinsichtlich turbulenter oder laminarer Strömung sind verschiedene Kennzahlen ( $Pr$ ,  $Nu$ ,  $Gr$ ,  $Re$ ) zu berücksichtigen, auf deren eingehende Erläuterung an dieser Stelle verzichtet werden soll.

Für den Fall der freien Konvektion bestimmt die Temperaturdifferenz zwischen der Absorberoberfläche und der Umgebungsluft die Wärmeübergangszahl  $a_1$ . Die Temperaturdifferenzen sind allerdings so gering, daß sich nur ein laminares Strömungsprofil ausbildet. Die zugehörigen Wärmeübergangszahlen sind **Tafel 1** zu entnehmen.



**Bild 7.** Abstrahlung einer Fläche gegenüber der Atmosphäre in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur für verschiedene Temperaturen der strahlenden Fläche;  $T_H = 0,0562 T_U^{1,5}$ .

freie Konvektion								
Temperaturdifferenz $\Delta T$	K	5	10	15	20	25	30	35
Wärmeübergangszahl $a$	$\text{W/m}^2 \text{ K}$	2,8	3,3	3,7	3,9	4,2	4,3	4,5
erzwungene Konvektion								
Luftgeschwindigkeit $v_L$	m/s	0,2	0,6	1,0	3,0	5,0	7,0	
Wärmeübergangszahl $a$	$\text{W/m}^2 \text{ K}$	3,4	5,8	7,5	13,1	16,7	21,5	

**Tafel 1.** Wärmeübergangszahlen an der Absorberoberfläche bei freier und erzwungener Konvektion.

Die Strömungsform wird bei der erzwungenen Konvektion durch die Reynoldszahl  $Re$  charakterisiert. Der Ansatz nach dem VDI-Wärmeatlas zeigt, daß bis zur Luftgeschwindigkeit  $v_L = 7 \text{ m/s}$  die Strömung noch laminar ist. Die Wärmeübergangszahlen sind wesentlich größer als bei der freien Konvektion und unten in **Tafel 1** angegeben.

Der Nutzwärmestrom  $\dot{Q}_N$  wird bei den Solardach-Luft-Kollektoren auf der Rückseite des Absorbers abgetragen. Mit geringer Eigenmasse, also auch kleiner Wärmespeicherkapazität, und guter Wärmeleitfähigkeit gewährleisten die Absorber aus Metall daher, daß gerade bei wechselhafter Witterung die Perioden kurzer, intensiver Sonnenstrahlung zu einem unmittelbaren Anstieg der Lufttemperatur im Kollektor führen.

Die Wärmeleitung wird durch den Ansatz

$$\dot{Q}_L = A_A (T_1 - T_2) \lambda_{1,2} / \delta_{1,2} \quad (7)$$

beschrieben. Mit einer Materialdicke von  $\delta_{1,2} = 0,0005 \text{ m}$  und der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{1,2}$  von  $50 \text{ W/Km}$  verfügt das Metalldach über einen äußerst geringen Wärmeleitwiderstand von  $10^{-5} \text{ K/W}$ .

Der konvektive Wärmeübergang innerhalb des Kollektors ist durch den Ansatz für die erzwungene Strömung zwischen zwei Platten zu charakterisieren. Mittels der Reynoldszahl wird wiederum zwischen laminarer und turbulenter Strömung unterschieden.

**Tafel 2** zeigt für Strömungsgeschwindigkeiten von  $1,5$ – $4,5 \text{ m/s}$  die Werte für die Reynoldszahl  $Re$ , die Nusseltzahl  $Nu$  und die Wärmeübergangszahl  $a_{2,3}$ . Die Nusseltzahl enthält die gesuchte Wärmeübergangszahl und berücksichtigt darüber hinaus die stoffspezifische Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_L$  sowie die Strömungslänge  $l$ , auf der der Wärmeübergang stattfindet.

Luftgeschwindigkeit $v_L$	m/s	1,5	2,5	3,5	4,5
Reynoldszahl Re	—	8063	13438	18812	24188
Nusseltzahl Nu	—	41,8	66,4	87,8	107,3
Wärmeübergangszahl $a$	$W/m^2 K$	12,6	20,1	26,5	32,4
nach eigener Abschätzung					
Wärmeübergangszahl $a$	$W/m^2 K$	35	50	90	150

Tafel 2. Kennzahlen für den konvektiven Wärmeübergang im Kollektor.

Die Berechnungen ließen jedoch erkennen, daß der Aufbau des Kollektors mit einer quer zur Strömungsrichtung verlaufenden Lattung und dem profilierten Absorberblech zu wesentlich höheren Wärmeübergangszahlen führte. Die für diesen Dachaufbau ermittelten Anhaltswerte sind in der untersten Zeile der Tafel 2 aufgeführt.

Im Innern des Kollektors stehen der Absorberrücken und der Kollektorboden im Strahlungswärmeaustausch. Dieser kann in bekannter Weise mit

$$\dot{Q}_{S2,3} = \sigma A_A (T_2^4 - T_3^4) / [(1/\epsilon_2) + (1/\epsilon_3) - 1] \quad (8)$$

beschrieben werden. Neben den bereits bekannten Größen sind die Emissionskoeffizienten der am Strahlungsaustausch beteiligten Flächen zu berücksichtigen.

Die Temperaturdifferenz zwischen den beiden Oberflächen des Kollektorbodens bewirkt einen stationären Verlustwärmestrom in Richtung auf die dem Firstraum zugewandte Seite des Kollektors. Mit einer möglichst geringen Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{3,4}$  und großen Wandstärke  $\delta_{3,4}$  des Kollektorbodens kann diese Verlustwärmeleistung begrenzt werden. Die Berechnung erfolgt analog Gl. (7).

Im Firstinnenraum des Gebäudes wird die Wärme konvektiv und durch Abstrahlung vom Kollektorboden gemäß den bereits vorgestellten Ansätzen abgetragen. Die Luftbewegung ist hier zumeist sehr gering und führt zu sehr kleinen Wärmeübergangszahlen. Die quantitative Bestimmung kann mit Beziehungen analog den Gln. (6) und (8) vorgenommen werden.

Zur Bestimmung der einzelnen Oberflächentemperaturen und der Fluidtemperatur im Kollektor muß, ausgehend vom Eintritt der Umgebungsluft in den Kollektor, der Kollektor mit einer Gesamtlänge von 8 m in kleine Längenabschnitte unterteilt werden. In jedem Längenabschnitt wird für die 4 in Bild 5 bezeichneten Ebenen und für den gesamten Kollektor eine Leistungsbilanz unter Berücksichtigung der jeweils zutreffenden und vorstehend aufgeführten Anteile aufgestellt. Sie stellen ein System mit insgesamt 5 unabhängigen, nichtlinearen Gleichungen dar. Die näherungsweise Lösung des Gleichungssystems erfolgt mit dem Newton- (Raphson- bzw. Kantorowitsch-) Verfahren [9, 10, 11]. Bei diesem Verfahren werden die nichtlinearen Funktionen in der Nähe der Nullstellen linearisiert und somit eine vereinfachte Lösung des Gleichungssystems ermöglicht. Die Konvergenz dieses Iterationsverfahrens ist stets 2. Ordnung, wenn die erste Abschätzung des Startwertes nahe der Lösung liegt. Eine ausführliche Beschreibung des Berechnungsablaufs ist in [12] niedergelegt.

Die Berechnung der Lufttemperaturen im Kollektor sowie der Oberflächentemperaturen verläuft nach dem folgenden Schema. Zu Beginn sind entsprechend der Kollektorkonstruktion die geometrischen Abmessungen, die Wandstärken und Wärmeübergangszahlen der Materialien festzulegen. Weiterhin werden der Massenstrom der Luft und die Emissionskoeffizienten definiert. Die Globalstrahlung, die Temperatur der Umgebungsluft und die Temperatur im Firstraum sind als Klimawerte vorzugeben. Die Himmelstemperatur wird als Funktion der Umgebungslufttemperatur mit Gl. (4) berechnet.

Entsprechend der Anzahl der gewählten Längenabschnitte wird in einer Schleife nach der iterativen Bestimmung aller Temperaturen die Endtemperatur des vorhergehenden Abschnittes zur Anfangstemperatur des neuen Längenabschnittes. Die Genauigkeit des Rechnungsablaufs ist mit der Anzahl und Größe der Längenabschnitte zu beeinflussen.

Die errechnete Temperaturdifferenz zwischen der Temperatur der Umgebungsluft und jener bei einer bestimmten Kollektorlänge ist in Bild 8 im Vergleich zu Meßwerten für einen Schönwettertag und für mittlere Tageswerte aufgetragen. Die berechneten Werte zeigen im Mittel die gleiche Abhängigkeit von der Globalstrahlung wie die gemessenen Werte. Bei 2,67 m Kollektorlänge liegen die rechnerisch ermittelten Werte niedriger als die Meßwerte. Dieses mag darin begründet sein, daß sich im Versuchsaufbau etwa 150 mm vor der Meßstelle eine Querlattung befand, die zu intensiver Luftverwirbelung und somit zu nachhaltigem Wärmeabtrag vom Absorber führte.

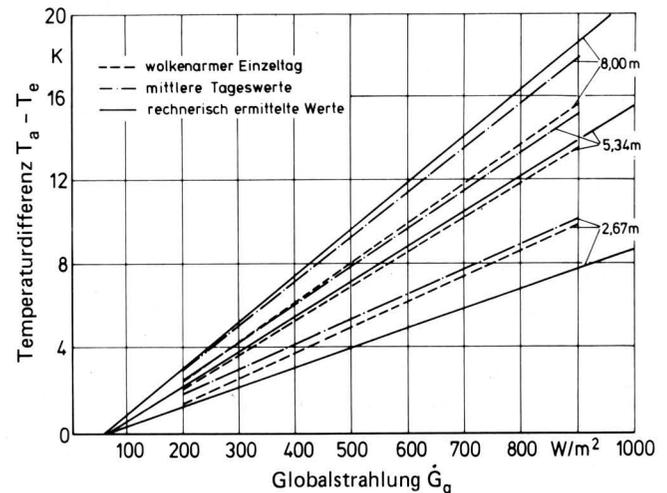


Bild 8. Rechnerisch ermittelte Werte der Temperaturdifferenz (—) und Ergebnisse von Messungen für die Temperaturdifferenz zwischen Kollektoraus- und -eintritt (--- bzw. - · -) als Funktion der Globalstrahlung bei unterschiedlicher Kollektorlänge.

Ergänzend zur Temperaturdifferenz am Kollektor sind in Bild 9 die einzelnen Anteile der Strahlungs- und Wärmeleistung für die Oberflächen des Kollektors über der Globalstrahlung für eine Kollektorlänge  $l = 8$  m aufgetragen.

Die Reflexionsverluste (6) betragen 10 % der eingestrahlt Globalstrahlung und treten auch schon bei kleinen Werten von  $G_g$  auf. Bis zu einer Globalstrahlung von etwa 60  $W/m^2$  kann die Einstrahlung nicht in nutzbare Wärmeleistung umgesetzt werden, weil sich die Absorberrtemperatur infolge des Strahlungsaustausches mit der Atmosphäre noch unterhalb der Umgebungstemperatur befindet. Solange die eingestrahlt Energie nicht zur Deckung der Abstrahlungsverluste ausreicht, entnimmt der Absorber der Umgebungsluft die zur Erhaltung des Gleichgewichts erforderliche Energie.

Mit dem Überschreiten des Temperaturniveaus der Umgebungsluft steigen die Abstrahlungsverluste im untersuchten Temperaturbereich und die Konvektionsverluste linear an. Dabei fallen die Verluste am Absorber (5 bzw. 3) gegenüber denen am Kollektorboden (4 bzw. 2) wesentlich stärker ins Gewicht. Der Vergleich zwischen den Abstrahlungs- und Konvektionsverlusten zeigt, daß sowohl beim Absorber als auch beim Kollektorboden die Abstrahlungsverluste jeweils größer sind.

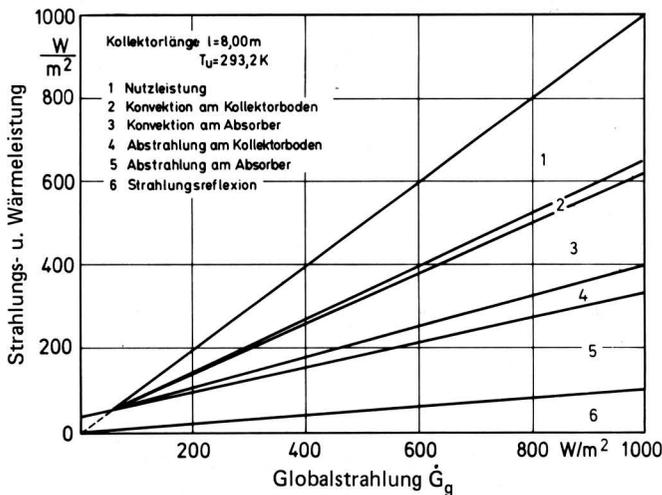
Der Kollektorwirkungsgrad  $\eta$  ist durch Gl. (2) als Verhältnis zwischen der Nutzleistung und der eingestrahlt Leistung definiert. Die vereinfachte Berechnung der Nutzleistung kann als Produkt aus der Temperaturdifferenz der Luft zwischen den Meßpunkten,

dem Massenstrom und der spezifischen Wärmekapazität erfolgen. Der Massenstrom, die spezifische Wärmekapazität und die Kollektorfläche können in einer Konstanten  $C_0$  zusammengefaßt werden:

$$\eta = \dot{m} c_{pL} \Delta T / (A_e \dot{G}_g) = C_0 \Delta T / \dot{G}_g \quad (9)$$

Die Temperaturdifferenz zwischen der Luft im Kollektor und der Umgebungsluft ist nach den Messungen und der rechnerischen Überprüfung linear abhängig von der Globalstrahlung:

$$\Delta T = C_1 \dot{G}_g - C_2 \quad (10)$$



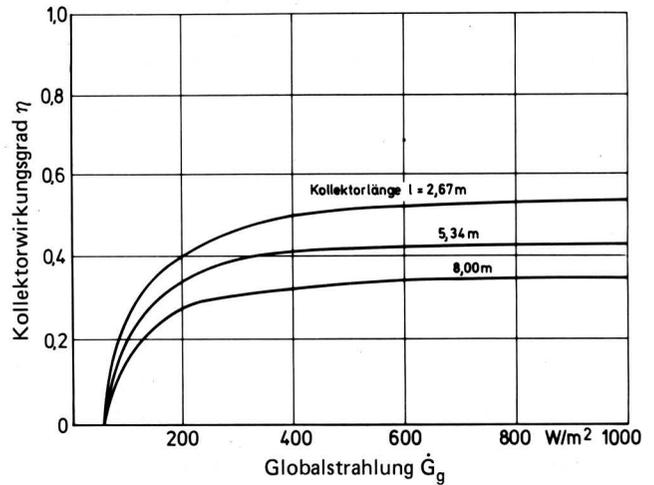
**Bild 9.** Errechnete Wärmeströme für die verschiedenen Verluste und die Nutzleistung eines Solardach-Luft-Kollektors von 8 m Länge.

Der Koeffizient  $C_1$  beschreibt die Steigung der Geraden, während  $C_2$  den Temperaturbetrag kennzeichnet, um den die Luft im Kollektor bei nicht vorhandener Globalstrahlung abgekühlt wird. Durch Einsetzen von Gl. (10) in Gl. (9) ergibt sich:

$$\eta = C_0 (C_1 \dot{G}_g - C_2) / \dot{G}_g = C_0 (C_1 - C_2 / \dot{G}_g) \quad (11)$$

Aus dieser Beziehung ist zu erkennen, daß für verschwindende Globalstrahlung der Kollektorwirkungsgrad gegen  $-\infty$  strebt. Mit zunehmender Globalstrahlung vermindert sich der Einfluß des Terms  $-C_2/\dot{G}_g$  und der Kollektorwirkungsgrad strebt asymptotisch gegen den Wert  $C_0 C_1$ . Der aus den Berechnungen abzuleitende Verlauf des Kollektorwirkungsgrads als Funktion der Globalstrahlung ist in Bild 10 aufgetragen.

Die physikalische Begründung für diesen Kurvenverlauf ist in dem Verlauf der Verlustwärmeströme am gesamten Kollektor zu finden. Die Konvektionsverluste am Absorber und die Konvektions- und Abstrahlungsverluste am Kollektorboden werden erst dann wirksam, wenn sich das Absorberblech über das Niveau der Umgebungsluft hinaus erwärmt. Demgegenüber gibt der nicht abgedeckte Absorber infolge des Wärmestrahlungsaustausches mit der Atmosphäre auch bei nicht vorhandener Globalstrahlung bereits einen Wärmestrom ab. Bei der Darstellung der Temperaturdifferenzen über der Globalstrahlung (Bild 8) zeigt sich dieses im Auftreten negativer Temperaturdifferenzen unterhalb einer Globalstrahlung von  $\dot{G}_g = 60 \text{ W/m}^2$ . Mit ansteigender Globalstrahlung und Erwärmung des Kollektors vermindert sich der Einfluß der Abstrahlungsverluste gegenüber den anderen Wärmeströmen, und das führt dann zu einem mit der Globalstrahlung ansteigenden Wirkungsgrad.



**Bild 10.** Berechneter Kollektorwirkungsgrad als Funktion der Globalstrahlung für Solardach-Luft-Kollektoren mit nicht abgedecktem Absorber bei unterschiedlicher Kollektorlänge;  $v_L = 2,5 \text{ m/s}$ .

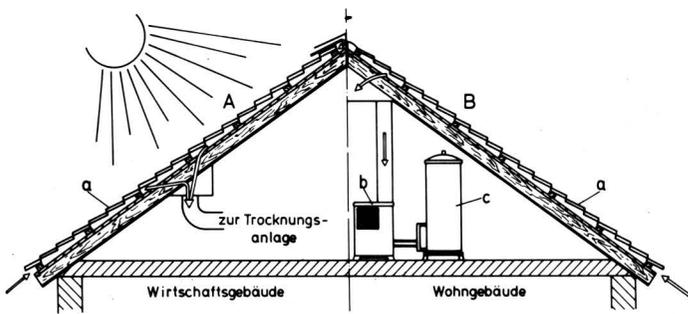
## 5. Möglichkeiten zur Verbesserung des Kollektorwirkungsgrades

Eine Erhöhung des Wirkungsgrades der Solardach-Luft-Kollektoren kann aufgrund der vorstehenden Ergebnisse mit verschiedenen Maßnahmen erreicht werden:

- Der Anteil der Strahlungsreflexion von etwa 10 % ist durch matte Oberflächen mit hoher Strahlungsabsorption zu vermindern. Eine Vergrößerung der Oberflächenstruktur durch Lamellen oder feine Profilierung kann angewendet werden, soweit der selbstreinigende Effekt für das Dach erhalten bleibt.
- Eine selektiv wirkende Beschichtung vermag die Wärmestrahlungsleistung theoretisch entsprechend der Herabsetzung des Emissionskoeffizienten zu reduzieren (s. Bild 7). Dieses würde jedoch nur dann eintreten, wenn die Absorbertemperatur im Vergleich zu einer nichtselektiven Beschichtung konstant bleiben würde. Im praktischen Anwendungsfall wäre dieses jedoch nur dann möglich, wenn zugleich der Wärmeübergang auf der inneren Seite des Absorbers durch eine Steigerung der Luftgeschwindigkeit oder zusätzliche Verwirbelungseinbauten verbessert wird. Diese Maßnahmen sind jedoch nur in bedingtem Umfang sinnvoll, weil mit ihnen nicht nur ein Anstieg des baulichen Aufwands, sondern auch des Energiebedarfs zum Absaugen der warmen Luft eintritt. Mit dem Ansteigen der Absorbertemperatur tritt darüber hinaus eine Zunahme der konvektiven Wärmeverluste auf.
- Die Wärmeverluste am Kollektorboden betragen in der Summe aus Abstrahlung und Konvektion 5–8 % der eingestrahlenen Leistung. Die Abstrahlungsverluste sind durch das Aufbringen einer Aluminiumfolie mit geringem Emissionskoeffizienten auf den äußeren Kollektorboden zu vermindern. Weiterhin kann die Vergrößerung der Wandstärke und die Auswahl von Materialien mit geringerer Wärmeleitfähigkeit zur Verminderung der Wärmeverluste beitragen. Dabei ist aber zu berücksichtigen, daß der gesamte Dachaufbau für die Unterkonstruktion nicht zu schwer wird und daß die Isoliermaterialien vor allem dann, wenn sie beispielsweise feuchter Trocknungsabluft ausgesetzt sind, vor einer Feuchtigkeitsaufnahme geschützt werden.

Der Investitionsspielraum für zusätzliche Isolierungen und abstrahlungsmindernde Beschichtungen ist bei Wirtschaftsgebäuden sehr klein; im Wohnhaus ist eine Isolierung des Dachaufbaus zur Vermeidung von Wärmeverlusten jedoch baurechtlich vorgeschrieben und verbessert somit ohne zusätzliche Kosten den Wirkungsgrad des Dachkollektors.

Die durchschnittliche Temperaturerhöhung sollte sich für den Betrieb von Halmfütter- und Getreidetrocknungsanlagen bei einer Globalstrahlung  $\dot{G}_g = 400\text{--}500 \text{ W/m}^2$  im Bereich  $\Delta T = 4\text{--}6 \text{ K}$  befinden. Unter Berücksichtigung der Wärmeverluste in den Kanälen, aber auch der Luftanwärmung im Ventilator und des natürlichen Trocknungspotentials der Umgebungsluft ergibt sich für die Trocknungsluft eine mittlere relative Luftfeuchte von etwa  $\varphi_L = 45\text{--}55 \%$ . Die geforderte Temperatursteigerung ist mit besonderer Effizienz dann zu erzielen, wenn die Luft sowohl an der Traufe als auch am First in das Dach eintritt und, wie links in Bild 11, auf halber Dachlänge abgesaugt wird. Die Strömungsgeschwindigkeit sollte im Kollektor  $v_L = 2,5\text{--}3,0 \text{ m/s}$  betragen. Ein durchschnittlicher Kollektorwirkungsgrad von etwa  $\eta = 50\text{--}55 \%$  kann so bei geringem Saugwiderstand erzielt werden.



**Bild 11.** Solardach-Luft-Kollektoren mit unterschiedlicher Nutzung; links: Anwärmen von Luft für eine Trocknungsanlage im Wirtschaftsgebäude; rechts: Warmwasserbereitung in einem Wohngebäude.

- a Solardach-Luft-Kollektor
- b Luft-Wasser-Wärmepumpe
- c Warmwasserspeicher

Die Nutzung der erwärmten Luft über eine Luft-Wasser-Wärmepumpe sollte hingegen mit einem Dachaufbau wie rechts in Bild 11 erfolgen. Die Luft tritt an der Traufe in das Dach ein und strömt bis zum First durch den Kollektor. Eine geringere Luftgeschwindigkeit  $v_L = 1,5\text{--}2,0 \text{ m/s}$  vermindert zwar den Kollektorwirkungsgrad auf etwa  $\eta = 40\text{--}45 \%$ , gewährleistet mit einer durchschnittlichen Temperaturerhöhung der Luft  $\Delta T \approx 8 \text{ K}$  aber eine nachhaltige Steigerung der Leistungsziffer der Wärmepumpe (Quotient aus Nutzwärmeleistung und Antriebsleistung) und Ausdehnung der jährlichen Betriebszeit.

## 6. Zusammenfassung

Solardach-Luft-Kollektoren mit nicht abgedecktem Absorber aus Metall vermögen bei globalen Bestrahlungsstärken  $\dot{G}_g = 300\text{--}800 \text{ W/m}^2$  die Temperatur von Luft gegenüber der Umgebungsluft um  $5\text{--}15 \text{ K}$  bei Wirkungsgraden  $\eta = 35\text{--}60 \%$  zu erwärmen. Der einfache und äußerst preiswerte Aufbau gewährleistet eine hohe Lebensdauer und eine rasche Amortisation. Die geringe Eigenmasse und gute Wärmeleitfähigkeit des Absorbers ermöglichen eine intensive Nutzung der Sonnenenergie auch bei wechselhaften Wetterlagen.

In einer Wärme-Leistungsbilanz werden die Verlustwärmeströme innerhalb und an den Außenflächen des Absorbers zusammenge-

stellt. Die hierbei errechneten Ergebnisse bestätigen die gemessenen Werte und liefern die Begründung für die Zunahme des Kollektorwirkungsgrades bei steigender Globalstrahlung.

Mit dem vorgestellten Berechnungsverfahren läßt sich der Einfluß konstruktiver Maßnahmen auf den Kollektorwirkungsgrad schnell und ohne Messungen überprüfen. Die Erweiterung des Berechnungssystems um zusätzliche Ebenen ermöglicht die weitergehende Untersuchung mit transparenten Abdeckungen versehener Dachkollektoren. Die Diskussion der einzelnen Verlustanteile läßt Möglichkeiten zur Verbesserung des Kollektorwirkungsgrades erkennen. Die unterschiedlichen Bauweisen der Solardach-Luft-Kollektoren auf Wirtschafts- und Wohngebäuden lassen sich auf die erforderliche Temperatursteigerung der Luft abstimmen.

Die Untersuchungen zeigen insgesamt, daß auf einfachen Prüfständen mit einer künstlichen Beleuchtungsquelle Kollektoren schnell und mit relativ geringem Aufwand überprüft werden können. Das Berechnungsverfahren ermöglicht die dort gewonnenen Ergebnisse auf praktische Anlagen zu übertragen und kann in Verbindung mit praktischen Messungen als Vorschlag für ein Verfahren zur Prüfung von Dachkollektoren zur Luftanwärmung angesehen werden.

### Verwendete Formelzeichen

$A_A$	$\text{m}^2$	Kollektorfläche
$A_E$	$\text{m}^2$	Eintrittsfläche für Strahlung
$C_0, C_1, C_2$		Konstante
$c_{pD}$	$\text{kJ/kg K}$	spez. Wärmekapazität von Wasserdampf
$c_{pL}$	$\text{kJ/kg K}$	spez. Wärmekapazität von Luft
$\dot{G}_g$	$\text{W/m}^2$	Globalstrahlung (globale Bestrahlungsstärke)
$\Delta h$	$\text{kJ/kg}$	Enthalpiedifferenz
$\dot{m}$	$\text{kg/s}$	Massenstrom der Luft
$\dot{Q}_A$	$\text{W}$	absorbierte Strahlungsleistung
$\dot{Q}_L$	$\text{W}$	Wärmeleitungsleistung
$\dot{Q}_N$	$\text{W}$	Kollektornutzleistung
$\dot{Q}_{V,K}$	$\text{W}$	Verlustleistung durch Konvektion am Absorber
$\dot{Q}_{V,S}$	$\text{W}$	Strahlungsverlustleistung am Absorber
$T_a$	$\text{K}$	Luftaustrittstemperatur aus dem Kollektor
$T_e$	$\text{K}$	Lufteintrittstemperatur in den Kollektor
$T_F$	$\text{K}$	Firsttemperatur
$T_H$	$\text{K}$	Himmelstemperatur
$T_U$	$\text{K}$	Umgebungstemperatur
$T_1, T_2$	$\text{K}$	Oberflächentemperaturen des Absorbers
$T_3, T_4$	$\text{K}$	Oberflächentemperaturen des Kollektorbodens
$\Delta T$	$\text{K}$	Temperaturdifferenz
$\dot{V}$	$\text{m}^3/\text{s}$	Volumenstrom
$v_L$	$\text{m/s}$	Luftgeschwindigkeit
$x_L$	$\text{g/kg}$	Wassergehalt der Luft
$a$	$\text{W/m}^2 \text{ K}$	Wärmeübergangszahl
$\delta$	$\text{m}$	Wandstärke
$\epsilon$		Emissionskoeffizient
$\eta$		Kollektorwirkungsgrad
$\lambda$	$\text{W/m K}$	Wärmeleitfähigkeit
$\varphi_L$	$\%$	relative Luftfeuchte
$\rho_L$	$\text{kg/m}^3$	Luftdichte
$\rho_S$		Reflexionskoeffizient
$\sigma$	$\text{W/m}^2 \text{ K}^4$	Stefan-Boltzmann-Konstante ( $\sigma = 5,75 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ )

## Schrifttum

Bücher sind durch • gekennzeichnet

- [ 1 ] • *Duffie, J.A. u. W.A. Beckmann*: Sonnenenergie – Thermische Prozesse.  
München: Udo Pfriemer Verlag 1976.
- [ 2 ] *Parker, B.F.*: Derivation of efficiency and loss factors for solar air heaters.  
Solar energy Bd. 26 (1981) Nr. 1, S. 27/32.
- [ 3 ] *Parker, B.F.*: Design equations for solar air heaters.  
Transactions ASAE Bd. 23 (1980) Nr. 6, S. 1494/99 u. 1504.
- [ 4 ] • *Hell, F.*: Grundlagen der Wärmeübertragung.  
Düsseldorf: VDI-Verlag 1973.
- [ 5 ] *Gordon, J.M., D. Govaer u. Y. Zarmi*: A "thermometer" for effective sky temperature.  
Solar energy Bd. 27 (1981) Nr. 6, S. 577/78.
- [ 6 ] *Gillet, W.B., R.W. Rawcliffe u. A.A. Green*: Collector testing using solar simulators.  
Solar energy codes of practice and test procedures. UK-section of the International Solar Energy Society London (1980) S. 57/71.
- [ 7 ] *Cooper, P.I., E.A. Christie u. R.V. Dunkle*: A method of measuring sky temperature.  
Solar energy Bd. 26 (1981) Nr. 2, S. 153/59.
- [ 8 ] • *VDI-Wärmeatlas*.  
Düsseldorf: VDI-Verlag 1953; ergänzt 1957, 1974, 1977.
- [ 9 ] • *Filtschakow, P.F.*: Numerische und graphische Methoden der angewandten Mathematik.  
Braunschweig: Vieweg-Verlag 1975.
- [ 10 ] • *Pizer, S.M.*: Numerical computing and mathematical analysis.  
Chicago: Science Research Associates 1981.
- [ 11 ] • *Bronstein, I.N. u. K.A. Semendjajew*: Taschenbuch der Mathematik. 21. Aufl.  
Frankfurt/Main: Verlag H. Deutsch 1984.
- [ 12 ] *Grimm, W.*: Anwendung, Aufbau und Arbeitscharakteristik von Solardach-Luft-Kollektoren in der Landwirtschaft.  
Diss. Univ. Göttingen 1983.

## Auszüge aus wichtigen Patent-Auslegeschriften

Int. Cl.<sup>2</sup>: A 01 C 15/00

Auslegeschrift 21 60 749

Anmeldetag: 8.12.71

Bekanntmachungstag: 2.12.76

### Maschine zum Ausbringen von pulverförmigem und gekörntem Material

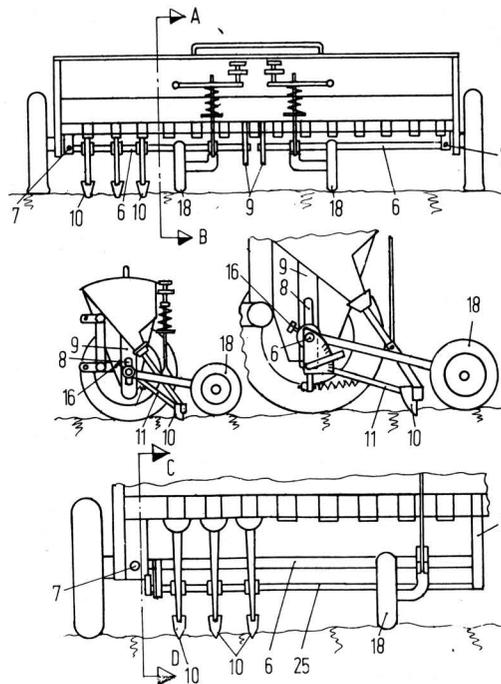
Anmelder: Amazonen-Werke H. Dreyer, 4507 Hasbergen

Die Erfindung betrifft eine Maschine zum Ausbringen von pulverförmigem und gekörntem Material, die einen Vorratsbehälter aufweist, aus dem das Material dem Boden über einen Dosiermechanismus und darin angeschlossene, mit Ausbringorganen und Auslauföffnungen versehene Leitungsrohre zugeführt wird, von denen zumindest ein Teil mit Auslegern verbunden ist, die um in Fahrtrichtung weisende Achsen im Bereich der Außenseiten des Vorratsbehälters schwenkbar angeordnet sind und an ihren gegenüberliegenden Enden Stützräder aufweisen, dadurch gekennzeichnet, daß die schwenkbaren Ausleger (16) von den Achsen (7) in den mittleren Bereich der Maschine ragen, in dem auch ihre Stützräder (18) wirksam sind.

Maschine nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Stützräder (18) in Fahrtrichtung gesehen hinter den Ausbringorganen (10) angebracht sind.

Maschine nach einem der Ansprüche 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß die inneren Enden der Ausleger (6) über zusätzliche Halterungen (9) mit der Maschine verbunden sind und in diesen Halterungen (9) in je einem aufrecht angeordneten Langloch (8) geführt werden.

Maschine nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Scharhalter (11) bei als Säschare ausgebildeten Ausbringorganen (10) an Stangen (25) angeordnet sind, welche drehbar und in dieser Drehung einstellbar an den Auslegern (6) befestigt sind.



VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1984

Schriftleitung: Dr. F. Schoedder, Braunschweig

Printed in Germany. Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung, vorbehalten. Kein Teil dieser Schriftenreihe darf in irgendeiner Form – durch Photokopie, Mikrokopie oder ein anderes Verfahren – ohne schriftliche Genehmigung des Verlages, auch nicht auszugsweise, reproduziert werden. – All rights reserved (including those of translation into foreign languages). No part of this issue may be reproduced in any print, microfilm, or any other means, without written permission from the publishers. – Herstellung: Druckerei Ruth, Braunschweig.