

DURCHFLUSS UND WÄRMEAUSTAUSCHERBEMESSUNG BEI SONNENENERGIEANLAGEN



Die Leistungsfähigkeit einer Sonnenenergieanlage wird oft anhand des Speichervolumens, der Temperaturschichtung im Speicher oder der Kollektorenfläche beurteilt. Doch genauso wie der Betriebspunkt einer Zentrifugalpumpe aber erst bei bekannter Rohrleitungscharakteristik bestimmt werden kann, ist eine praxisnahe Wirksamkeitsbeschreibung einer Anlage nur zusammen mit allen Komponenten, d.h. inkl. des Wärmeaustauschers im Speicher möglich. Sich beispielsweise allzu stark an Kollektoreigenschaften allein zu orientieren, hat wenig Sinn.

In Sonnenenergieanlagen mit unterhalb der Kollektoren angeordneten Speichern und Wärmeaustauschern muß die Zirkulation der Wärmeübertragungsflüssigkeit durch eine Pumpe gewährleistet sein. Wie die folgenden Ausführungen zeigen, ist der Volumenstrom im praktischen Betrieb bis zu einem gewissen Minimaldurchsatz ohne nennenswerten Einfluß auf den Wirkungsgrad der Anlage.

Dipl.-Chem. Rene Weiersmüller,
Schlieren/Zürich

Charakteristik von Sonnenkollektoren

In erster Näherung kann die Charakteristik eines Sonnenkollektors mit zwei Kenngrößen beschrieben werden. Der Anteil der Strahlungsenergie, welcher die transparente Abdeckung durchdringt, wird als optischer Wirkungsgrad η_{opt} bezeichnet; die Wärmeverluste des sich in Betrieb befindlichen Kollektors werden durch den thermischen Verlustfaktor k_0 (vergleichbar mit den Wärmedurchgangskoeffizienten k) charakterisiert. Die von den Kollektoren abgegebene Wärmeleistung Q ist somit

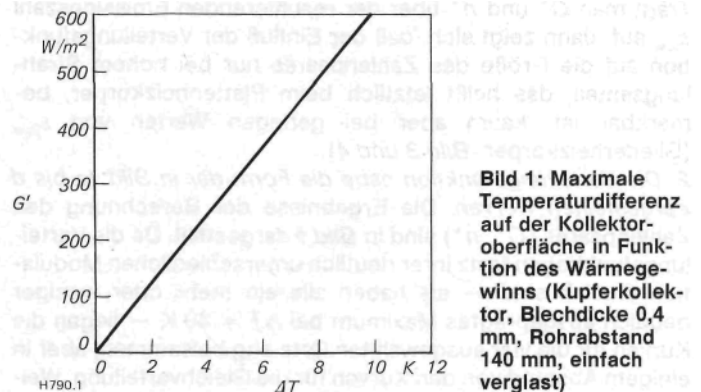
$$\dot{Q} \cong [G \eta_{opt} - k_0 (\vartheta_m - \vartheta_a)] F_0 \quad (1)$$

wobei

- G Globalstrahlung [W/m^2]
- η_{opt} Optischer Wirkungsgrad des Kollektors [—]
- k_0 Thermischer Verlustfaktor des Kollektors in der Nähe der Umgebungstemperatur [$W/m^2 K$]
- ϑ_m Mittlere Kollektortemperatur bzw. näherungsweise mittlere Mediumtemperatur [$^{\circ}C$]
- ϑ_a Umgebungstemperatur des Kollektors [$^{\circ}C$]
- F_0 Kollektorfläche [m^2]

bedeutet.

Bei Flachkollektoren aus dünnem Blech und großem Abstand der flüssigkeitsführenden Rohre (oder Kanäle) kann der Temperaturunterschied zwischen den durchflossenen Kollektorteilen und den dazwischenliegenden Blechverbindungen



recht ansehnliche Werte erreichen (Bild 1). Die mittlere Mediumtemperatur entspricht in solchen Fällen selbst näherungsweise nicht mehr der mittleren Kollektortemperatur, d.h., Gl. (1) wird ungenau. Große Temperaturunterschiede auf der Kollektoroberfläche ergeben sich mit entsprechenden Problemkollektoren aber nur bei großer Globalstrahlung und Betrieb in der Nähe der Umgebungstemperatur — beides Zustände, die in der Praxis nicht unbedingt relevant sind. Es gilt übrigens

$$\Delta T_{max} \cong 1/8 \frac{G' a^2}{\lambda d} \quad (2)$$

mit

- G' Wärmegewinn des Kollektors [W/m^2]
- a Rohrabstand [m]

λ Wärmeleitkoeffizient des Kollektormaterials [W/mK]
 d Blechstärke des Kollektors [m].

Die grafische Darstellung von Gl. (1) erfolgt üblicherweise in Form einer Kurvenschar (Bild 2). Entspricht die mittlere Kollektortemperatur der Umgebungstemperatur, so ist die von den Kollektoren abgegebene Wärmeleistung am größten ($\dot{Q} = \eta_{opt} \cdot G$). Die abgegebene Wärmeleistung wird Null, wenn die mittlere Kollektortemperatur soweit angehoben wird, bis der

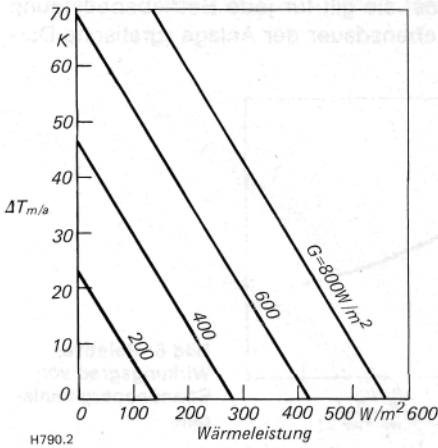


Bild 2: Kollektorcharakteristiken ($\eta_{opt} = 0,7$; $k_0 = 6 \text{ W/m}^2 \text{ K}$)

Einstrahlungsgewinn dem Wärmeverlust des Kollektors entspricht, d.h. $G \cdot \eta_{opt} = k_0 (\vartheta_m - \vartheta_a)$. Diese u.a. von der Globalstrahlung abhängige Leerlauftemperatur kann recht einfach bestimmt werden.

Charakteristik des Wärmeaustauschers

Insbesondere bei einem in horizontaler Ebene angeordneten Wärmeaustauscher ist die an den Speicher abgegebene Wärmeleistung

$$\dot{Q} \cong k_{WT} F_{WT} (\vartheta_m - \vartheta_{Sp}) \quad (3)$$

wobei

- k_{WT} Wärmedurchgangskoeffizient des Wärmeaustauschers [W/m² K]
- F_{WT} Fläche des Wärmeaustauschers [m²]
- ϑ_{Sp} Mittlere Speichertemperatur in der Umgebung des Wärmeaustauschers [°C].

bedeutet.

Die Durchflußgeschwindigkeit in den Austauscherrohren bzw. der entsprechende Wärmeübergangskoeffizient ist auf den Wärmedurchgangskoeffizienten im Falle von Glattrohrwärmeaustauschern ohne große Bedeutung, da diese im wesentlichen durch den sekundärseitig sehr kleinen Wärmeübergangskoeffizienten (praktisch stehendes Wasser im Speicher) bestimmt wird. Abweichungen vom Idealverhalten (Bild 3) sind

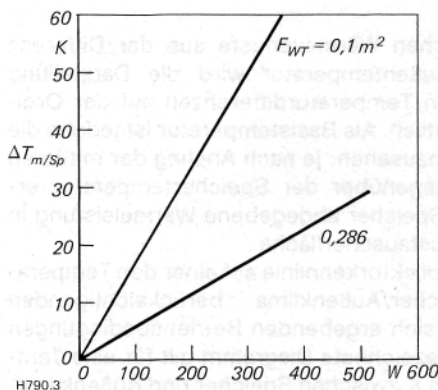


Bild 3: Wärmeaustauschercharakteristik ($k_{WT} = 60 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, Rippenrohr)

zum Beispiel möglich, wenn durch hohe Temperaturen auf der Primärseite der sekundärseitige Wärmeübergangskoeffizient infolge erhöhter Konvektionsströmung angehoben wird.

Volumenstrom durch Kollektor und Wärmeaustauscher

Durch Gleichsetzen von Gl. (1) und Gl. (3) sowie Auflösen nach ϑ_m wird

$$\vartheta_m \cong \frac{F_0 G \eta_{opt} + F_0 k_0 \vartheta_a + F_{WT} k_{WT} \vartheta_{Sp}}{F_0 k_0 + F_{WT} k_{WT}} \quad (4)$$

d.h., unter den gemachten Voraussetzungen ist die mittlere Mediumtemperatur (Mittel zwischen Kollektorvorlauf- und Rücklauf-temperatur) offensichtlich nicht direkt von dem durchfließenden Volumenstrom abhängig. Dies ist in der Praxis auch gut nachweisbar, sinkt doch mit der Verminderung des Volumenstromes die Vorlauf-temperatur bzw. steigt um praktisch den gleichen Betrag auch die Rücklauf-temperatur (siehe dazu Bilder 4 und 5).

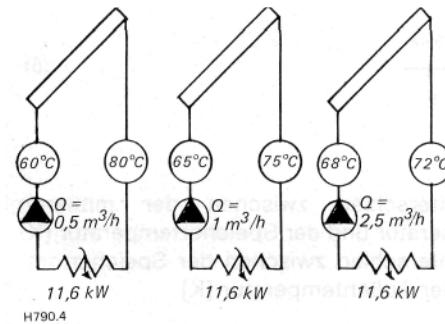


Bild 4: Unterschiedliche Volumenströme – praktisch gleiche mittlere Temperaturen und Leistungen

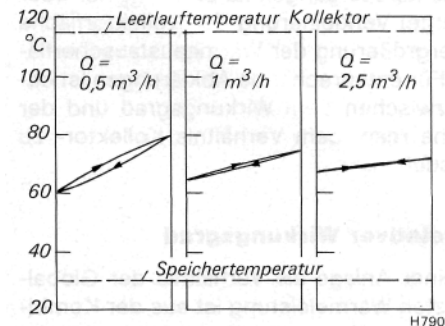


Bild 5: Temperaturverläufe am Kollektor bzw. Wärmeaustauscher bei verschiedenen Volumenströmen

Die Mitteltemperatur verändert sich erst deutlich, wenn durch Einstellen eines Fördervolumenstroms unter etwa 10 l Wärmeübertragungsflüssigkeit je Stunde und Quadratmeter Kollektorfläche in den Grenzbereich vorgestoßen wird, wo der Unterschied zwischen den eigentlichen, korrekterweise einzusetzenden logarithmischen Mitteltemperaturen und den ersatzweise eingesetzten arithmetischen Mitteltemperaturen zu groß wird! In diesem Fall wird die Näherung noch zusätzlich ungenauer, weil der thermische Verlustfaktor des Kollektors (Strahlungsanteil) mit steigender Temperaturdifferenz zunimmt.

Eine ausreichende Genauigkeit der Gleichung ist aber bei mehr oder weniger gleichmäßigem Durchfluß der einzelnen Kollektorelemente gegeben, wenn die Differenz zwischen Kollektorvorlauf-temperatur/Kollektorleerlauf-temperatur höchstens doppelt so groß ist wie die Differenz Kollektorrücklauf-temperatur/Kollektorleerlauf-temperatur (Analoges gilt für den Wärmeaustauscher im Speicher). Der Fehler aus der Wärmeübertragung ist dann kleiner als 5%; der nichtlineare Einfluß des thermischen Verlustfaktors sowie allenfalls der Temperaturdifferenzen zwischen den flüssigkeitsführenden Kollektor-

röhren und den dazwischenliegenden Flächen kann so ebenfalls nahezu vernachlässigt werden. Der Volumenstrom sollte daher vorwiegend auf die Anforderungen der Regelung zugeschnitten werden.

Tiefere mittlere Kreislauf­temperatur für besten Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad eines Sonnenkollektors ist dann am größten, wenn die Eigenverluste am kleinsten sind, d.h., die praktisch mit der mittleren Kreislauf­temperatur identische Betriebstemperatur sollte nur soviel über der Außentemperatur liegen, wie von selten der Speichertemperatur absolut notwendig ist.

Wie vorstehend gezeigt, ist aber die Verminderung oder Anhebung des Volumenstroms ein untaugliches Mittel, um die mittlere Kreislauf­temperatur bzw. den entsprechenden Unterschied zur Speichertemperatur verändern zu können. Der Temperaturunterschied zwischen der mittleren Kreislauf­temperatur und der Speichertemperatur ist

$$\Delta T_{m/Sp} \cong \frac{\frac{G \eta_{opt}}{k_0} - \Delta T_{Sp/a}}{\frac{F_{WT} k_{WT}}{F_0 k_0} + 1} \quad (5)$$

wobei

$\Delta T_{m/Sp}$ Temperaturunterschied zwischen der mittleren Kreislauf­temperatur und der Speichertemperatur [K]

$\Delta T_{Sp/a}$ Temperaturunterschied zwischen der Speichertemperatur und der Außentemperatur [K]

bedeutet.

Bei sonst gleichen Randbedingungen kann $\Delta T_{m/Sp}$ nur über eine (meist unerwünschte) Verkleinerung der Kollektorfläche oder aber über eine Vergrößerung der Wärmeaustauscherfläche minimiert werden. Für entsprechende Abklärungen ist daher die Abhängigkeit zwischen dem Wirkungsgrad und der Wärmeaustauscherfläche resp. dem Verhältnis Kollektor- zu Austauscherfläche zu suchen.

Wirkungsgrad und relativer Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad einer Anlage als Verhältnis der Globalstrahlung zu der genutzten Wärmeleistung ist aus der Kombination von Gl. (3) und (5) sowie um die Erweiterung mit der Globalstrahlung berechenbar:

$$\eta \cong \frac{\eta_{opt} - \frac{\Delta T_{Sp/a}}{G} k_0}{1 + \frac{F_0 k_0}{F_{WT} k_{WT}}} \quad (6)$$

Der maximale Wirkungsgrad η_{max} mit unendlich großer Wärmeaustauscherfläche und (für diesen Fall) großem Volumenstrom ist dann

$$\eta_{max} \cong \eta_{opt} - \frac{\Delta T_{Sp/a}}{G} k_0 \quad (7)$$

Nur mit unendlich großer Wärmeaustauscherfläche (oder sehr großem k_{WT} bzw. sehr kleinem k_0 oder F_0) sind also die Kollektorcharakteristiken η_{opt} direkt und k_0 über die Globalstrahlung sowie die Differenz zwischen Speicher- und Außentemperatur maßgebend. Wird dagegen das Verhältnis der Produkte aus k -Werten und Flächen von Kollektoren und Wärmeaustauschern mitberücksichtigt, kann der relative Wirkungsgrad η_{rel} mit der Bezugsbasis η_{max} nur kleiner werden.

Es ist also

$$\eta_{rel} = \frac{\eta}{\eta_{max}} \cong \frac{1}{1 + \frac{F_0 k_0}{F_{WT} k_{WT}}} \quad (8)$$

Erst mit diesem Ansatz — er ist unabhängig von Globalstrahlung, Speicher- und Außentemperaturen — ist „das Vorgehene vom maximal überhaupt Möglichen“ berechenbar. Die Gleichung ist zeitlos; sie gilt für jede Betriebsbedingung während der ganzen Lebensdauer der Anlage (grafische Darstellung siehe Bild 6).

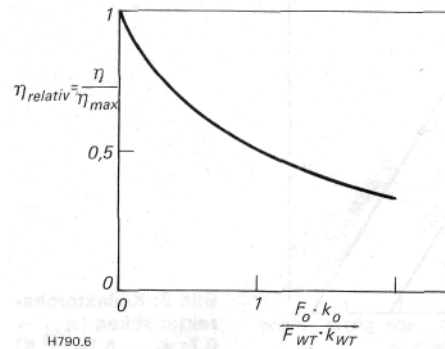


Bild 6: Relativer Wirkungsgrad von Sonnenenergieanlagen

Grafische Darstellung der (des) Betriebspunkte(s) einer Anlage

Anschaulichere Informationen über das Zusammenwirken von Kollektoren und Wärmeaustauschern sind allerdings weniger aus reinen Gleichungen erarbeitbar. Übersichtlicher ist eine grafische Darstellung, die vergleichbar ist mit der Bestimmung des Betriebspunktes von Pumpensystemen. Ausgehend von den etwas modifizierten Gl. (1) und (3) kann so ein Diagramm gezeichnet werden, in dem die Leistung des Kollektors je Quadratmeter und des Wärmeaustauschers in Abhängigkeit der verschiedenen Temperaturunterschiede aufgezeichnet ist (Bild 7).

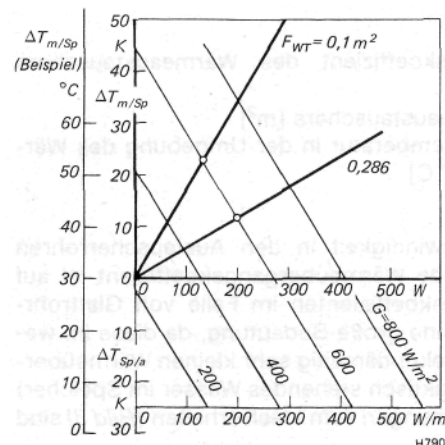


Bild 7: Charakteristik von Kollektor und Wärmeaustauscher
(Annahmen: Kollektor: $\eta_{opt} = 0,7$; $k_0 = 6 \text{ W/m}^2 \text{ K}$; Kollektorfläche $F_0 = 1 \text{ m}^2$. Wärmeaustauscher: $k_{WT} = 60 \text{ W/m}^2 \text{ K}$; Austausch­erfläche $F_{WT} = 0,1$ bzw. $0,286 \text{ m}^2$ pro m^2 Kollektorfläche) $\eta_{WT} = 0,1$ bzw. $0,286 \text{ m}^2$ pro m^2 Kollektorfläche)

Durch die zusätzlichen Wärmeverluste aus der Differenz Speichertemperatur/Außentemperatur wird die Darstellung mit den verschiedenen Temperatur­differenzen auf der Ordinate etwas unübersichtlich. Als Basistemperatur ist jedoch die Speichertemperatur anzusehen; je nach Anstieg der mittleren Kreislauf­temperatur gegenüber der Speichertemperatur erhöht sich die an den Speicher abgegebene Wärmeleistung in Funktion der Wärmeaustauscherfläche.

Durch Aufbau der Kollektorkennlinie auf einer den Temperaturunterschied Speicher/Außenklima berücksichtigenden Hilfsabszisse sind die sich ergebenden Betriebsbedingungen direkt ablesbar. Das gezeichnete Diagramm gilt für eine Temperatur­differenz von 25 K zwischen Speicher und Außenklima;

bei anderer Temperaturdifferenz muß die Hilfsabszisse zusammen mit den Kollektorkennlinien vertikal verschoben werden, was durch eine entsprechende Transparentkopie einfach realisierbar ist.

Beispiel:

Außentemperatur 5 °C Speichertemperatur 30 °C

Globalstrahlung 600 W/m²

Mit 0,286 m² Austauschfläche im Speicher je Quadratmeter Sonnenkollektor stellt sich eine mittlere Kreislauftemperatur (entsprechend etwa der mittleren Kollektortemperatur) von 30 °C (Speicher) + 12 °C (Übertemperatur) = 42 °C ein.

Der optische Verlust des Kollektors ist 0,3 • 600 = 180 W/m², der thermische 220 W/m². Als Nutzleistung bleiben noch 200 W/m², die sich bei Verwendung von lediglich 0,1 m² Austauschfläche sogar auf 135 W/m² erniedrigt. Der Wirkungsgrad bei diesen durchaus nicht extremen Verhältnissen ist dabei 0,33 bzw. 0,225.

Die bei angenommener Speicher- und Außentemperatur maximal mögliche Wärmeleistung ergibt sich wie erwähnt bei Verwendung einer unendlich großen Wärmeaustauscherfläche. Dies entspricht direkt dem Schnittpunkt der Kollektorkennlinie mit der Hauptabszisse; mittlere Kollektortemperatur, mittlere Kreislauftemperatur und die Speichertemperatur wären praktisch gleich hoch. Bezogen auf diese maximale Wärmeleistung von 270 W/m², ist der relative Wirkungsgrad nach Beispiel bei 0,286 m² Austauschfläche 0,74 bzw. bei 0,1 m² 0,5.

Genauigkeit und Weiterentwicklungen

Wie bereits mehrfach erwähnt, sind die Charakteristiken auf Näherungen aufgebaut. Immerhin ist die Genauigkeit im praxisnahen Bereich so gut, daß eine fälschlicherweise um 20% zu groß eingesetzte Wärmeaustauscherfläche beim Verifizieren bereits eine intensive Suche nach Rechenfehlern ausgelöst hat. Würden auf der Ordinate das logarithmische Mittel der Temperaturdifferenz und gemessene Charakteristiken von Kollektoren (k_0 und teilweise η_{opt} sind je nach Randbedingungen unterschiedlich!) und von Wärmeaustauschern aufgetragen, wäre das Diagramm praktisch ohne Einschränkungen auch in der Nähe der Leerlauftemperatur von Kollektor und/oder Speicher richtig. Der Aufwand für die exakte Bestimmung der einzelnen Charakteristiken würde aber unverhältnismäßig groß, zumindest was über die Bestimmung der Kollektorleerlauftemperatur bei bestimmter Globalstrahlung hinausgeht.

Größere Wärmeaustauscher — kleinere Kosten

Die Zusammenhänge unter den aufgeführten Gleichungen können nun für die Berechnung des kostenoptimalen Flächenverhältnisses Wärmeaustauscher/Kollektor benutzt werden. Es ist

$$\frac{F_{WT}}{F_0} (\text{opt.}) \cong \sqrt{\frac{\Delta K_0 k_0}{\Delta K_{WT} k_{WT}}} \quad (9),$$

wobei

ΔK_0 Mehrkosten des Kollektors je m²

ΔK_{WT} Mehrkosten des Wärmeaustauschers je m²

bedeuten.

In dem zugrundegelegten Fall nach [1] mit Kollektormehrkosten von 400 DM/m² und Rippenrohr-Wärmeaustauschermehrkosten von 150 DM/m² ($k_0 = 6 \text{ W/m}^2\text{K}$, $k_{WT} = 60 \text{ W/m}^2\text{K}$) wäre das Verhältnis mit dem besten Kosten-/Nutzenverhältnis

$$\frac{F_{WT}}{F_0} (\text{opt.}) \cong \sqrt{\frac{400}{150} \frac{6}{60}} = 0,52$$

Der relative Wirkungsgrad wäre dann nach Gl. (8)

$$\eta_{rel} \cong \frac{1}{1 + \frac{1}{0,52} \frac{6}{60}} = 0,84$$

anstatt

$$\eta_{rel} \frac{1}{1 + \frac{28}{8} \frac{6}{60}} = 0,74$$

d.h., anstelle von 28 m² Kollektor mit $\eta_{rel} = 0,74$ hätten theoretisch 28 m² • 0,74/0,84 = 24,7 m² Kollektorfläche, zusammen mit 24,7 m² • 0,52 = 12,8 m² Wärmeaustauscherfläche die gleiche Leistung erbracht. Die optimale Lösung wäre allerdings um 600 DM (3,3 m² Sonnenkollektor zu 400 DM/m² minus 4,8 m² Wärmeaustauscherfläche zu 150 DM/m²) billiger gewesen, d.h. etwa 4% der Kosten für Kollektor und Wärmeaustauscher.

Noch günstiger wäre die Verwendung eines Glattrohrwärmeaustauschers gekommen. Je Quadratmeter Austauschfläche ist das Glattrohr zwar etwa doppelt so teuer, der Wärmedurchgangskoeffizient aber ungefähr dreimal bis viermal größer als mit Rippenrohr (insbesondere bei rostfreiem Stahl wird die Rippenrohrfläche wegen der ungenügenden Wärmeleitfähigkeit der Rippen mit zunehmendem Abstand vom flüssigkeitsführenden Rohr immer unwirksamer). In zukünftigen Anlagen würden daher Glattrohrwärmeaustauscher eingesetzt.

In der Praxis genügt meist eine ungefähre Abschätzung der Flächenverhältnisse, besteht doch die Kollektorfläche vorwiegend aus großen, unteilbaren Elementen, und die Fläche des Wärmeaustauschers im Speicher kann aus Platzgründen oft auch nicht beliebig groß gewählt werden.

Immerhin sollte aber aus diesen theoretischen und nochmals als Näherung zu bezeichnenden Ausführungen ersichtlich sein, daß je Quadratmeter Rippenrohr-Wärmeaustauscherfläche höchstens 2 bis 4 m² Sonnenkollektorfläche vorgesehen werden sollten, je Quadratmeter Glattrohr-Wärmeaustauscher maximal etwa 5 m². Die Sanierung einer Anlage mit 10 m² Kollektorfläche und 0,5 m² Rippenrohr-Wärmeaustauscherfläche durch Verdoppelung der Kollektorfläche auf 20 m² ist so gesehen verschwendetes Geld. [H 790]

Literatur

[1] Weiersmüller, René: „Eine Heizanlage mit elektrisch betriebener Wärmepumpe und Sonnenkollektoren“. Schweizer Ingenieur und Architekt, 14, 1983.