

Einführung einer neuen Bezugsfläche in der Darstellung des Wirkungsgrads von Sonnenkollektoren

S. Fischer, E. Hahne

Universität Stuttgart, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW)

Prof. Dr.-Ing. E. Hahne

Pfaffenwaldring 6, D-70550 Stuttgart

Tel.: 0711/685-3536, Fax: 0711/685-3503

Zur Beschreibung der thermischen Leistungsfähigkeit von Sonnenkollektoren dient unter anderem die Wirkungsgradkennlinie. Der Verlauf der Wirkungsgradkennlinie ist unmittelbar von der gewählten Bezugsfläche abhängig. Im Folgenden werden die bisher üblichen Bezugsflächen beschrieben und deren Einfluß auf die Wirkungsgradkennlinien von drei unterschiedlichen Kollektorbauarten dargestellt. Im Anschluß daran wird die Konversionsfläche als neue Bezugsfläche eingeführt. Deren Vorteile gegenüber den anderen Bezugsflächen werden diskutiert.

Einleitung

So alt wie die Solartechnik selbst ist die Diskussion über die, für den Wirkungsgrad des Kollektors, relevante Bezugsfläche. Je nach maßgebender Norm existieren weltweit drei Varianten, Absorber-, Apertur- und Bruttofläche als die maßgebliche Bezugsfläche. In Deutschland gilt derzeit, entsprechend DIN 4757, Teil 4 /1/, die Aperturfläche als Bezugsfläche. In anderen Ländern besitzt jedoch die ISO 9806-1 /2/ Gültigkeit und diese sieht eine Angabe des Wirkungsgrades unter Verwendung der Absorber- und der Bruttofläche vor. Dieser Umstand erschwert den Vergleich der, von unterschiedlichen Prüfinstituten, ermittelten Kennwerte erheblich. Zwar lassen sich unter Kenntnis der Bezugsfläche die Kennwerte der Wirkungsgradkennlinie auf jede Fläche umrechnen, doch kommt es immer wieder zu Irritationen und Verwechslungen. Es ist daher zwingend notwendig, daß der Konversionsfaktor η_0 und die die Wärmeverluste des Kollektors beschreibenden Kennwerte a_1 und a_2 nur unter Angabe der Bezugsfläche veröffentlicht werden. Eine Vermischung der auf unterschiedliche Bezugsflächen bezogenen Kennwerte führt unmittelbar zu einem falschen Verlauf der Wirkungsgradkennlinie. Mit der bevorstehenden Einführung der CEN Norm prEN 12975-2 /3/ ist die, in den letzten Jahren etwas verstummte, Diskussion um die Bezugsfläche wieder voll entflammt. Das vorläufige Ergebnis ist jedoch wenig zufriedenstellend. Stand der Normungsarbeit ist die Darstellung der Wirkungsgradkennlinie und der Kennwerte bezogen auf die Absorber- und die Aperturfläche. Im vorliegenden Artikel wird mit der Konversionsfläche als Bezugsfläche eine Größe eingeführt, die zur endgültigen Beendigung der Diskussion beitragen kann.

Definition der Bezugsflächen

Die Definition der Bezugsflächen gestaltet sich nicht immer so einfach wie die entsprechende Bezeichnung vermuten läßt. Am Beispiel von drei Kollektoren wird im Folgenden die Problematik der bestehenden Flächendefinitionen aufgezeigt. Als Beispiele wurden

- ein Flachkollektor mit 4 Glasscheiben und 3 Auflagestegen,
- ein direktdurchströmter Vakuumröhrenkollektor mit flachem Absorber
- ein direktdurchströmter Vakuumröhrenkollektor mit zylindrischem Absorber und CPC-Reflektor

gewählt.

Absorberfläche

Die Absorberfläche ist nach /1/ als das Produkt aus der projizierten, unbeschatteten Fläche eines Absorberstreifens und der Anzahl der Absorberstreifen zuzüglich der projizierten, unbeschatteten Fläche der Anschlußstutzen und Sammler definiert. Dies hat zur Folge, daß bei Kollektoren mit Auflagestegen für die Glasscheiben die definitionsgemäße Absorberfläche kleiner als die wirkliche Absorberfläche ist. Gleiches trifft auf Vakuumröhrenkollektoren zu, deren einzelne Röhren von Spannvorrichtungen fixiert sind. Bei Vakuumröhrenkollektoren mit zylindrischen Absorbern ist dieser Effekt noch wesentlich größer, da die physikalische Absorberfläche um den Faktor π größer ist als die nach /1/. Dies kann durchaus zu Wirkungsgraden größer 100% führen.

Aperturfläche

Die Apertur- oder auch Lichteintrittsfläche nach /1/ ist definiert als die Projektion der unbeschatteten Fläche, durch die Licht in den Kollektor eintritt. Anlaß zur Diskussion liefert hier immer wieder die Frage ob, der Kollektor vor oder hinter der Scheibe beginnt. Strenggenommen beginnt der Kollektor an der nach außen gewandten Seite der Glasscheibe. Dies hat jedoch zur Folge, daß die Aperturfläche durch Abkleben der Glasscheibe an Stellen, an denen diese auf Gehäuse, Wärmedämmung oder Stützen aufliegt, verringert werden kann und somit höhere Wirkungsgrade erzielt würden.

Bei Röhrenkollektoren ohne Reflektor ist die Aperturfläche definiert als das Produkt aus dem Innendurchmesser der Röhren, der unbeschatteten zylindrischen Innenlänge der Röhren und der Anzahl der Röhren des Kollektors. Diese Definition widerspricht der für Flachkollektoren geltenden, da der Kollektor somit an der Innenseite der Glasabdeckung und nicht an der Außenseite beginnt.

Die Aperturfläche eines Röhrenkollektors mit Reflektor ist definiert als das Produkt der äußeren Länge und Breite des Reflektors. Dies führt zu einer Unterbewertung aller mit Reflektoren ausgestatteten Röhrenkollektoren gegenüber denen ohne Reflektor, da die Aperturfläche dabei grundsätzlich überproportional größer ist als die zusätzliche Leistungssteigerung. Zudem ist kein Reflexionsgrad angegeben, ab dem die Flächendefinition gilt. Strenggenommen wäre also diese Flächendefinition auf jeden Röhrenkollektor anzuwenden, dessen Hintergrund die Solarstrahlung nicht zu 100% absorbiert.

Bruttofläche

Eine Übereinstimmung zwischen den einzelnen Kollektortypen wird bei der Definition der Bruttofläche hergestellt. Diese ist als das Produkt aus äußerer Länge und Breite der Kollektoren definiert. Unter physikalischen Gesichtspunkten stellt sich jedoch die Frage, ob der Zwischenraum bei Röhrenkollektoren ohne Reflektor wirklich dem Kollektor zuzuordnen ist.

Auswirkung der Bezugsfläche auf den Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad ist durch das Verhältnis von Nutzen zu Aufwand definiert. Im Fall des Sonnenkollektors ist dies das Verhältnis von Nutzleistung zu dem Produkt aus der Bezugsfläche und der solaren Bestrahlungsstärke.

$$\eta = \frac{\dot{m}c_p (\vartheta_{aus} - \vartheta_{ein})}{AG} \quad (1)$$

Aus Gl. 1 wird der Einfluß der Bezugsfläche auf den Wirkungsgrad deutlich. Eine große Bezugsfläche führt zu kleinen, eine kleine Bezugsfläche zu großen Wirkungsgraden. Der Wirkungsgrad eines Sonnenkollektors nimmt, bedingt durch die Wärmeverluste, mit steigender Temperatur des Wärmeträgerfluids ab. Diese Tatsache läßt sich aus Gl. 2 für die Wirkungsgradkennlinie ablesen.

$$\eta = \eta_0 - a_1 \frac{(\vartheta_m - \vartheta_a)}{G} - a_2 \frac{(\vartheta_m - \vartheta_a)^2}{G} \quad (2)$$

Bei gegebener Temperaturdifferenz zwischen Wärmeträgerfluid und Umgebung ist der Wärmeverlust eines Kollektors, unabhängig von der gewählten Bezugsfläche, konstant. Dies führt bei der Wahl einer großen Bezugsfläche zu geringen, die Wärmeverluste beschreibenden, Werten von a_1 und a_2 . Wird dagegen eine kleine Bezugsfläche gewählt, führt dies zu hohen Werten von a_1 und a_2 (vgl. Tabelle 1).

In den Abbildungen 1, 2 und 3 sind die Verläufe der Wirkungsgradkennlinien der drei Kollektorbauarten für die jeweilige Bezugsfläche dargestellt¹.

¹ Um einen Vergleich der drei Abbildungen zu ermöglichen wurde die Ordinate der Abbildungen der Wirkungsgradkennlinien trotz der physikalischen Unsinnigkeit auf eine Länge von 1,4 dargestellt.

Flachkollektor	A [m ²]	η_0 [-]	a_1 [W/(m ² K)]	a_2 [W/(m ² K ²)]
Absorberfläche	4,99	0,817	3,655	0,0180
Aperturfläche	5,09	0,801	3,583	0,0176
Bruttofläche	5,85	0,697	3,118	0,0153
Röhrenkollektor mit flachem Absorber				
Absorberfläche	1,36	0,801	1,788	0,0175
Aperturfläche	1,49	0,731	1,632	0,0160
Bruttofläche	2,03	0,537	1,198	0,0117
Röhrenkollektor mit zylindrischem Absorber und CPC-Reflektor				
Absorberfläche	1,50	1,317	0,611	0,0236
Aperturfläche	3,22	0,614	0,285	0,0110
Bruttofläche	3,85	0,514	0,238	0,0092

Tabelle 1: Bezugsflächen und Kennwerte der drei Kollektortypen

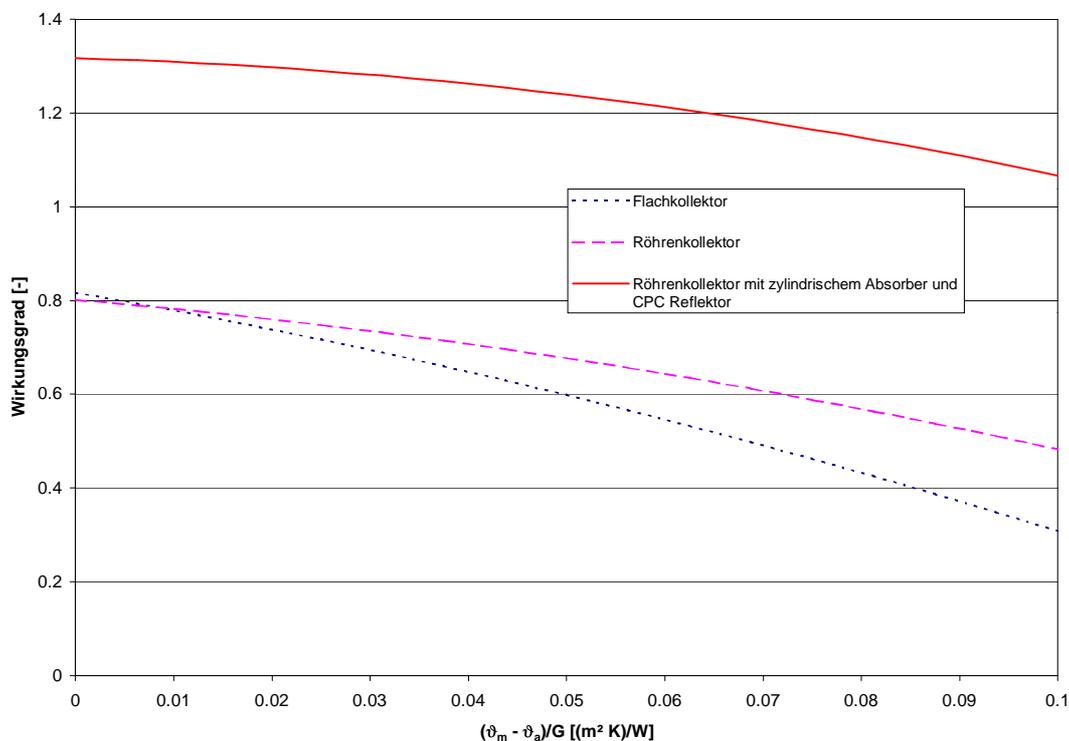


Abbildung 1: Wirkungsgradkennlinien der drei Kollektortypen unter Verwendung der Absorberfläche als Bezugsfläche

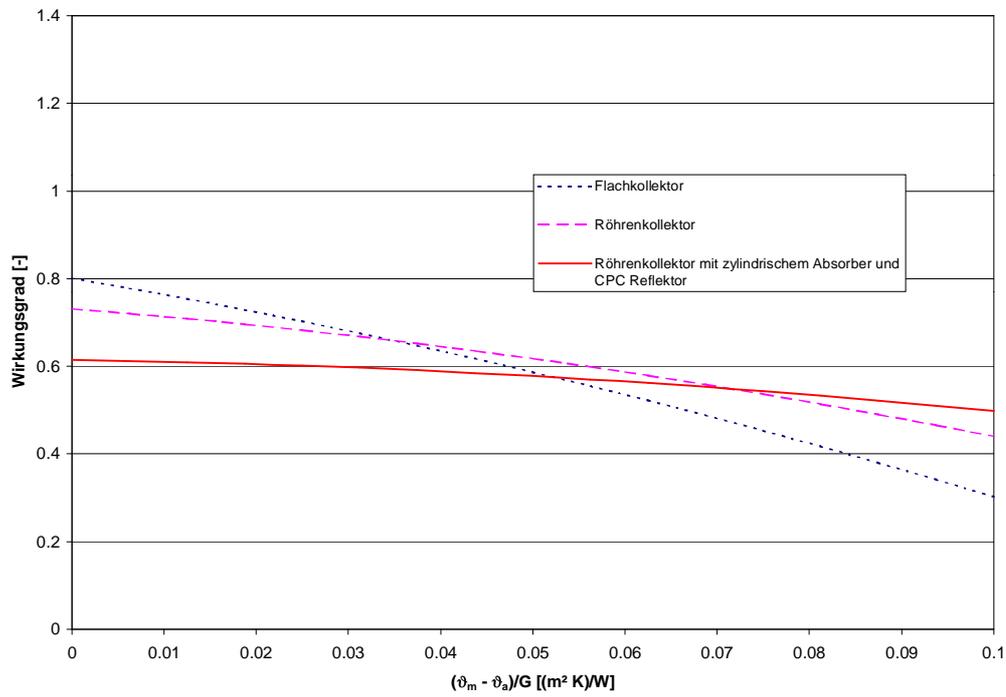


Abbildung 2: Wirkungsgradkennlinien der drei Kollektortypen unter Verwendung der Aperturfläche als Bezugsfläche

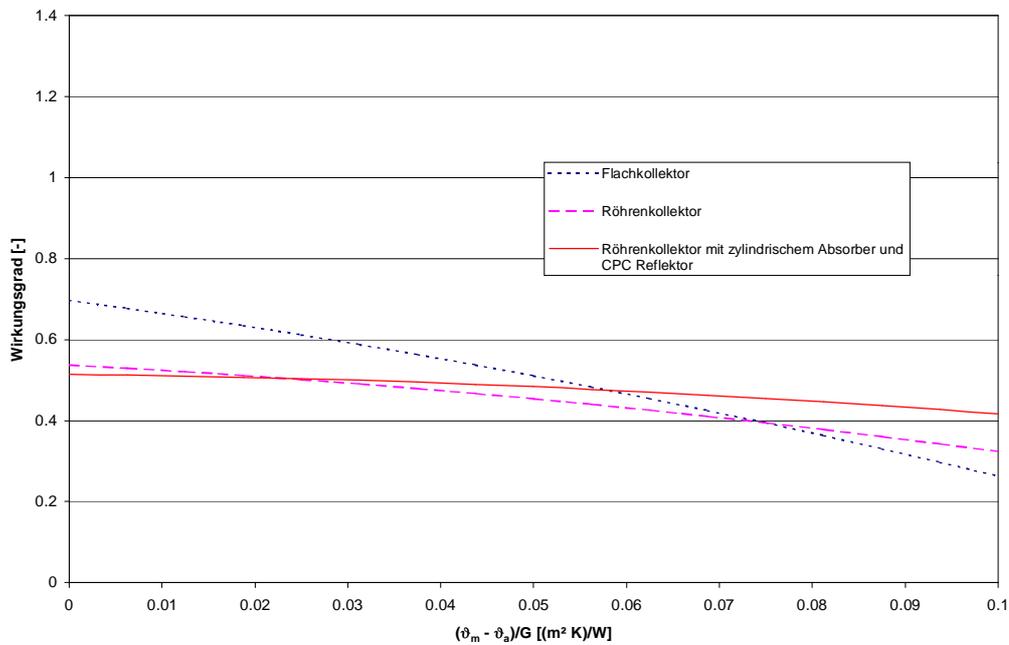


Abbildung 3: Wirkungsgradkennlinien der drei Kollektortypen unter Verwendung der Bruttofläche als Bezugsfläche

Wo immer Wirkungsgradkennlinien graphisch dargestellt werden, sollen sie Auskunft über die thermische Leistungsfähigkeit der Sonnenkollektoren geben. Je nach Wahl der Bezugsfläche ergibt sich jedoch ein unterschiedliches Bild. In Abbildung 1 ist das Verhältnis der Leistungsfähigkeit von Vakuumröhrenkollektoren ohne Reflektor zu Flachkollektoren korrekt dargestellt. Der Wirkungsgrad des Vakuumröhrenkollektors mit zylindrischem Absorber und CPC-Reflektor liegt, bedingt durch die physikalisch falsche Flächendefinition über 100%. Somit ist die Darstellung der Wirkungsgradkennlinien mit der Absorberfläche als Bezugsfläche abzulehnen.

Könnte mit Abbildung 1 zumindest prinzipiell die Leistungsfähigkeit der drei Kollektoren verglichen werden, so ist dies, aufgrund der sich kreuzenden Wirkungsgradkennlinien, in den Abbildungen 2 und 3 nur unter genauer Kenntnis der Betriebsbedingungen möglich. Zusammenfassend muß festgestellt werden, daß keine der Bezugsflächen dem Anspruch genügt, die Leistungsfähigkeit von unterschiedlichen Kollektorbauarten zu vergleichen.

Einführung der Konversionsfläche

Im folgenden wird die Konversionsfläche A_0 eingeführt. Sie verspricht eine, von der Kollektorbauart unabhängige, Vergleichbarkeit der Kollektorkennlinien.

Definition: Die Konversionsfläche ist die Fläche des Kollektors die, bei wärmeverlustrfreiem Betrieb, die auf sie einfallende solare Bestrahlungsstärke vollständig umsetzt.

Durch Multiplikation von Gl. 2 mit dem Produkt aus der Bezugsfläche A und der solaren Bestrahlungsstärke G erhält man die Nutzwärmeleistung \dot{Q} nach Gl. 3.

$$\dot{Q} = AG \left(\eta_0 - a_1 \frac{(\vartheta_m - \vartheta_a)}{G} - a_2 \frac{(\vartheta_m - \vartheta_a)^2}{G} \right) \quad (3)$$

Durch Wahl der Konversionsfläche A_0 als Bezugsfläche ergibt sich

$$\dot{Q} = A_0 G \left(1 - a_1^* \frac{(\vartheta_m - \vartheta_a)}{G} - a_2^* \frac{(\vartheta_m - \vartheta_a)^2}{G} \right) \quad (4)$$

mit

$$A_0 = A \eta_0 \quad a_1^* = \frac{a_1}{\eta_0} \quad a_2^* = \frac{a_2}{\eta_0}$$

Die bisher im Konversionsfaktor η_0 enthaltene Information über den Kollektorwirkungsgradfaktor F' und das, den optischen Wirkungsgrad des Kollektors bestimmende, Transmissions-Absorptions-Produkt $(\tau_G^* \alpha_A^*)$ geht somit auf die Konversionsfläche A_0 über.

Bezieht man Gl. 4 wiederum auf das Produkt aus Konversionsfläche A_0 und solarer Bestrahlungsstärke G , so folgt die Beschreibung der normierten Wirkungsgradkennlinie entsprechend Gl. 5.

$$\eta^* = 1 - a_1^* \frac{(\vartheta_m - \vartheta_a)}{G} - a_2^* \frac{(\vartheta_m - \vartheta_a)^2}{G} \quad (5)$$

In Tabelle 2 sind die, unter Berücksichtigung von Gl. 4 und 5, ermittelten Kennwerte der drei Kollektorbauarten zusammengefaßt.

	A_0 [m ²]	a_1^* [W/(m ² K)]	a_2^* [W/(m ² K ²)]
Flachkollektor	4,077	4,473	0,0220
Röhrenkollektor mit flachem Absorber	1,089	2,233	0,0219
Röhrenkollektor mit zylindrischem Absorber und CPC-Reflektor	1,977	0,464	0,0179

Tabelle 2: Kennwerte der drei Kollektortypen mit der Konversionsfläche als Bezugsfläche

Abbildung 4 zeigt, unter der Berücksichtigung der Konversionsfläche, die Verläufe der normierten Wirkungsgradkennlinien der drei Kollektortypen. Nun ist es ohne eine Benachteiligung von Sonderbauformen, also unabhängig von der Kollektorgeometrie, möglich, die thermische Leistungsfähigkeit direkt aus dem Verlauf der normierten Wirkungsgradkennlinien zu vergleichen. Die Konversionsfläche kann ohne zusätzlichen Aufwand alternativ zum Konversionsfaktor direkt aus den während einer Kollektorprüfung aufgenommenen Meßdaten ermittelt werden. Desweiteren kann sie auch aus allen bisher durchgeführten Kollektorprüfungen berechnet werden. Zusätzlich kann die Messung der Apertur- und Absorberfläche entfallen. Damit werden Fehler in der Messung der Flächen ausgeschlossen. Spezielle Kollektorbauarten zwingen die Prüfinstitute zur Demontage oder Zerstörung des Prüflings, um die Apertur- und Absorberfläche zu bestimmen. Die Einführung der Konversionsfläche ermöglicht hingegen eine zerstörungsfreie Prüfung.

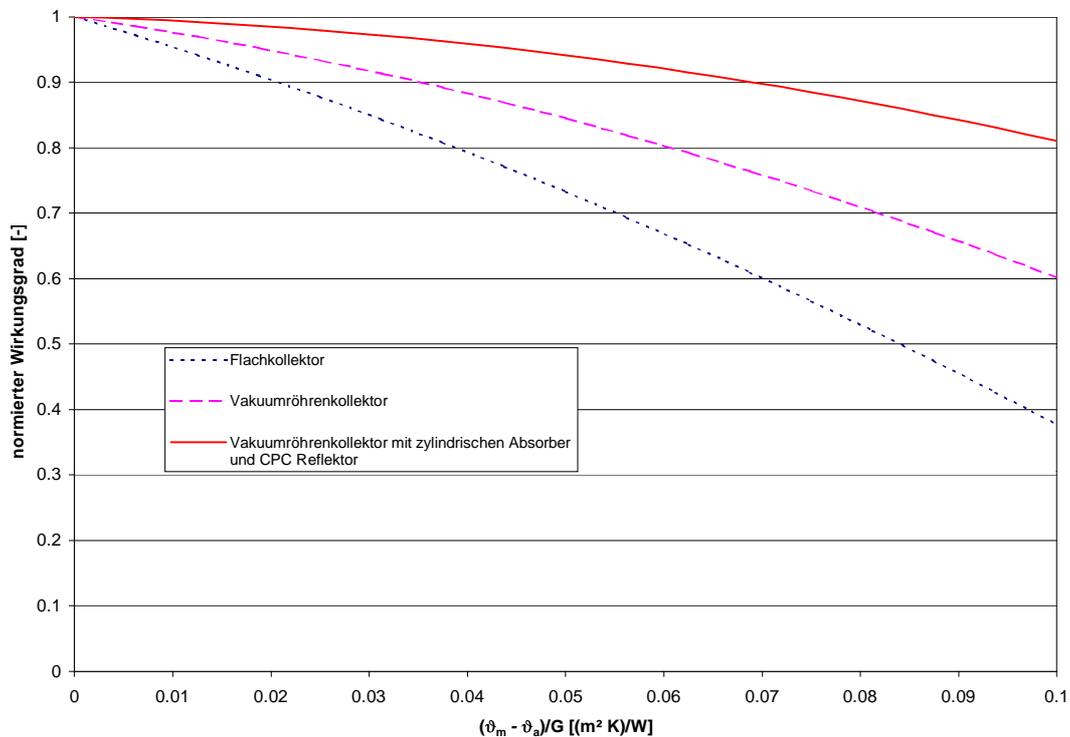


Abbildung 4: Normierte Wirkungsgradkennlinien der drei Kollektortypen unter Verwendung der Konversionsfläche als Bezugsfläche

Zusammenfassung

Innerhalb der gültigen Normen zur Bestimmung der thermischen Leistungsfähigkeit von Sonnenkollektoren werden, je nach Geltungsbereich der Norm, drei unterschiedliche Flächen (Absorber-, Apertur- und Bruttofläche) als Bezugsflächen vorgegeben. Dies erschwert den internationalen Vergleich der Prüfergebnisse erheblich. Bei wissenschaftlicher Betrachtung sind die Flächendefinitionen teilweise unhaltbar, zudem ergibt sich eine Verzerrung der wirklich Leistungsfähigkeit der Kollektoren. Diese Problematik kann nur durch die konsequente Einführung der Konversionsfläche als Bezugsfläche gelöst werden. Die Vorteile der Konversionsfläche sind

- eine absolute Gleichbehandlung aller Kollektorbauformen
- eine direkte Vergleichbarkeit der Wirkungsgradkennlinien
- eine zerstörungsfreie thermische Prüfung
- die bestehenden Prüfverfahren zur Bestimmung der thermischen Leistungsfähigkeit von Sonnenkollektoren können beibehalten werden
- die Ergebnisse früherer Prüfungen unter Verwendung einer anderen Bezugsfläche können direkt umgerechnet werden
- die ermittelten Kennwerte können, wie die Ergebnisse früherer Prüfungen direkt innerhalb aller Simulationsprogramme verwandt werden.

Die Einführung der Konversionsfläche als Bezugsfläche innerhalb der CEN-Normen würde einen großen Schritt in Richtung internationaler Vergleichbarkeit der Prüfergebnisse bedeuten.

Nomenklatur

Formelzeichen

A	m^2	Bezugsfläche
A_0	m^2	Konversionsfläche
a_1	$W/(m^2K)$	Konstanter Wärmedurchgangskoeffizient
a_2	$W/(m^2 K^2)$	Temperaturabhängiger Wärmedurchgangskoeffizient
a_1^*	$W/(m^2K)$	Konstanter Wärmedurchgangskoeffizient mit der Konversionsfläche A_0 als Bezugsfläche
a_2^*	$W/(m^2 K^2)$	Temperaturabhängiger Wärmedurchgangskoeffizient mit der Konversionsfläche A_0 als Bezugsfläche
G	W/m^2	solare Bestrahlungsstärke
F'	-	Kollektorwirkungsgradfaktor
\dot{Q}	W	Nutzwärmeleistung
\dot{m}	kg/s	Massenstrom des Wärmeträgerfluids
c_p	$J/(kg K)$	Spezifische Wärmekapazität des Wärmeträgerfluids
ϑ_a	$^{\circ}C$	Kollektorumgebungstemperatur
ϑ_{aus}	$^{\circ}C$	Kollektoraustrittstemperatur des Wärmeträgerfluids
ϑ_{ein}	$^{\circ}C$	Kollektoreintrittstemperatur des Wärmeträgerfluids
ϑ_m	$^{\circ}C$	Mittlere Temperatur des Wärmeträgerfluids ($\vartheta_m = (\vartheta_{ein} + \vartheta_{aus})/2$)
η	-	Kollektorwirkungsgrad
η^*	-	Kollektorwirkungsgrad mit der Konversionsfläche A_0 als Bezugsfläche
η_0	-	Konversionsfaktor
$(\tau_G^* \alpha_A^*)$	-	Transmissions-Absorptions-Produkt

Literatur

- /1/ DIN V 4757-4, Teil 4: Sonnenkollektoren, Bestimmung von Wirkungsgrad, Wärmekapazität und Druckabfall, November 1995
- /2/ ISO 9806-1, Test methods for solar collectors – Part 1: Thermal performance of glazed liquid heating collectors including pressure drop, 1994
- /3/ prEN 12975-2, Thermische Solaranlagen und ihre Bauteile, Kollektoren, Teil 2: Prüfverfahren, Oktober 1997

Danksagung: Dank gilt in erster Linie Herrn Wolfgang Spirkl, der die Konversionsfläche, unter der Bezeichnung effektive Kollektorfläche, bereits seit Jahren innerhalb seines Kollektormodells verwendet. Zusätzlich dankt der Autor allen Herstellern von Sonnenkollektoren, die durch die Kritik an den von uns veröffentlichten Prüfergebnissen zur Formulierung des Artikels beigetragen haben.

Dipl.-Ing. Stephan Fischer ist wissenschaftlicher Mitarbeiter beim Forschungs- und Entwicklungszentrum für Solaranlagen (TZS) des Instituts für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW) der Universität Stuttgart. Prof. Dr.-Ing. Erich Hahne ist der Leiter dieses Instituts.