

Thermische Prüfung von Sonnenkollektoren nach CEN-Norm

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

Mit den CEN-Normen für Solaranlagen und deren Komponenten steht erstmals, alternativ zum Kollektortestverfahren unter quasi-stationären Bedingungen, auch ein spezielles Verfahren unter instationären Bedingungen zur Verfügung. Das Forschungs- und Testzentrum für Solaranlagen (TZS) des Instituts für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW) der Universität Stuttgart führt seit Jahren Prüfungen unter quasi-stationären und instationären Bedingungen durch und hat das Verfahren unter instationären Bedingungen mit entwickelt. Im folgenden werden zunächst die zwei, innerhalb der CEN-Norm gleichberechtigten Testverfahren vorgestellt. Im Anschluß daran wird, exemplarisch anhand von drei Kollektortests, die Vergleichbarkeit der Ergebnisse dargestellt. Abschließend werden die Vorteile des Kollektortestverfahrens unter instationären Bedingungen hervorgehoben.

Einleitung

Um das thermische Verhalten von Sonnenkollektoren unter unterschiedlichen meteorologischen und nutzerspezifischen Bedingungen beschreiben zu können, wird der Kollektor in einem mathematischen Modell abgebildet. Dem Kollektormodell liegen die physikalischen Vorgänge um und im Kollektor zugrunde. Diese Vorgänge werden dabei von den einzelnen thermischen Kenngrößen des Kollektors beschrieben. Angewendet werden die Kenngrößen vor allem zur Ertragsberechnung mit Simulationsprogrammen, zum unmittelbaren Vergleich unterschiedlicher Kollektoren sowie zu ihrer Optimierung. Die staatliche und kommunale Förderung von Solaranlagen ist oft von der Höhe des jährlichen Kollektorertrags abhängig, daher bekommen die Ertragsberechnungen eine immer größere Bedeutung.

Für die Bestimmung der thermischen Kenngrößen von Sonnenkollektoren gilt bis heute das in der DIN 4757, Teil 4 /1/ bzw. in der ISO 9806-1 /2/ festgeschriebene Verfahren unter quasi-stationären Bedingungen (stationäres Verfahren). Mit dem Erscheinen des CEN-Normenentwurfs prEN 12975-2 /3/ wird erstmals dem, seit Jahrzehnten anerkannten, Kollektortestverfahren unter quasi-stationären Bedingungen ein Kollektortestverfahren unter instationären Bedingungen gleichberechtigt gegenübergestellt. Um das Vertrauen von Herstellern und Verbrauchern von Sonnenkollektoren in das neueingeführte Testverfahren zu stärken, muß in erster Linie

eine größtmögliche Vergleichbarkeit der Testergebnisse gewährleistet sein, die unumstrittenen Vorteile des Testverfahrens unter instationären Bedingungen treten hierbei zunächst in den Hintergrund.

Testbedingungen

Während der Prüfung unter quasi-stationären Bedingungen gelten für die, für die Nutzwärmeleistung des Sonnenkollektors relevanten, Eingangsgrößen enge Grenzen (vgl. Tabelle 1). Eingangsgrößen sind

- die solare Bestrahlungsstärke,
- der Einfallswinkel der direkten Bestrahlung,
- der Anteil der diffusen Einstrahlung an der solaren Bestrahlungsstärke,
- die Umgebungstemperatur,
- der Massenstrom des Wärmeträgerfluids,
- die Temperatur des Wärmeträgerfluids am Kollektoreintritt.

Parameter	quasi-stationäre Bedingungen		instationäre Bedingungen	
	Absolutwert	Zulässige Abweichung vom Mittelwert	Absolutwert	Zulässige Abweichung vom Mittelwert
Solare Bestrahlungsstärke	> 700 W/m ²	± 50 W/m ²	300 < G < 1100 W/m ²	-
Einfallswinkel der direkten Bestrahlung	< 30°	-	-	-
Diffusstrahlungsanteil	< 30 %	-	-	-
Umgebungstemperatur	-	± 1 K	-	-
Massenstrom	0,02 kg/(m ² s)	± 1 %	0,02 kg/(m ² s)	± 1 %
Kollektoreintrittstemperatur	-	± 0,1 K	-	± 1 K

Tabelle 1: Vergleich der Testbedingungen

Den engen Grenzen der Eingangsgrößen des stationären Verfahrens liegen folgende Überlegungen zugrunde:

1. Bei geringen Schwankungen der Eintrittstemperatur, des Massenstroms, der Umgebungstemperatur und der solaren Bestrahlungsstärke wird der Einfluß der thermischen Kapazität des Kollektors minimiert und kann daher vernachlässigt werden.

2. Bei einem Diffusstrahlungsanteil kleiner 30 % und einem Einfallswinkel der direkten Bestrahlung kleiner 30° ist der Einfluß der diffusen Bestrahlung und die winkelabhängige Abschwächung der direkten Bestrahlung klein und kann daher vernachlässigt werden.

Die genannten Testbedingungen haben im Außentest erhebliche Auswirkungen auf die Dauer der Prüfung. So können grundsätzlich nur Meßdaten von Tagen mit unbewölktem Himmel zur Auswertung herangezogen werden. Bei nicht der Sonne nachgeführten Testständen werden diese Tage zusätzlich noch auf die Dauer von maximal 2 h vor und 2 h nach dem Sonnenhöchststand reduziert (vgl. Abbildung 1).

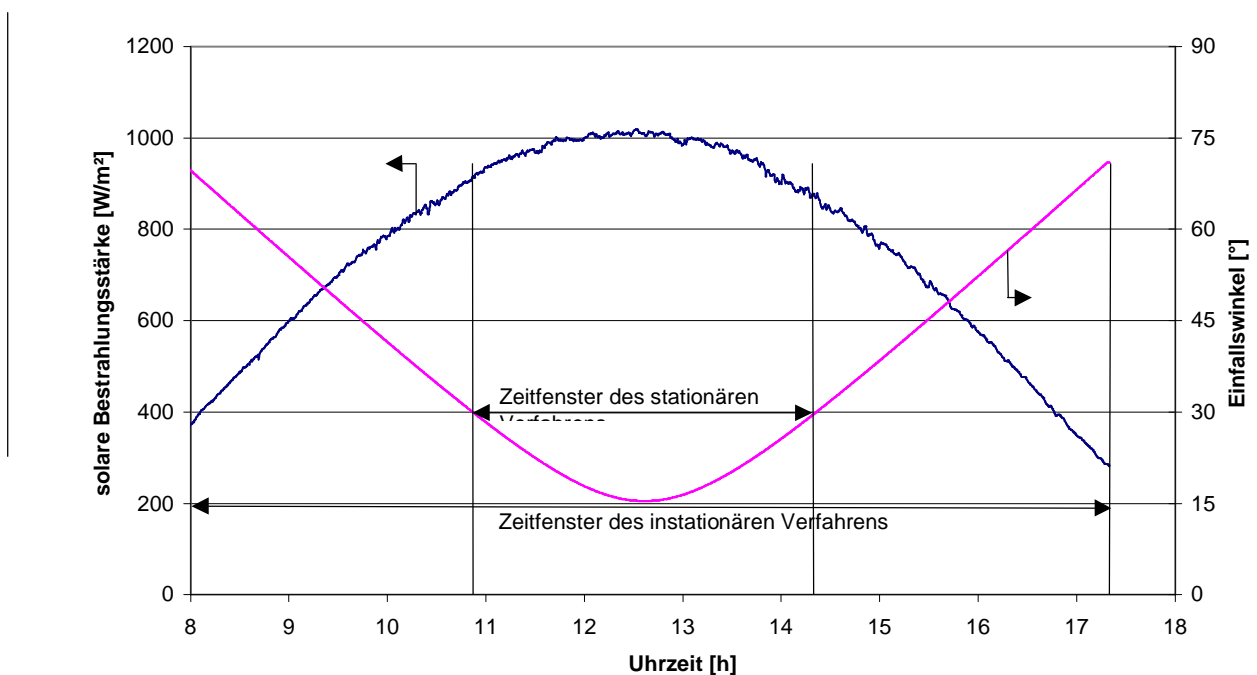


Abbildung 1: Typischer Tagesgang der solaren Bestrahlungsstärke in Kollektorebene und des Einfallswinkels der direkten Bestrahlung an einem wolkenlosen Tag

Für den Test unter instationären Bedingungen werden die Grenzen (vgl. Tabelle 1) stark erweitert bzw. gänzlich aufgehoben. Dies eröffnet an wolkenlosen Tagen ein wesentlich größeres Zeitfenster zur Aufnahme verwertbarer Meßdaten (vgl. Abbildung 1). Zusätzlich können auch Meßdaten von Tagen mit wechselnder Bewölkung, wie in Abbildung 2 dargestellt, verwendet werden wodurch sich eine Verkürzung der Testdauer und somit eine Kostenreduktion ergibt.

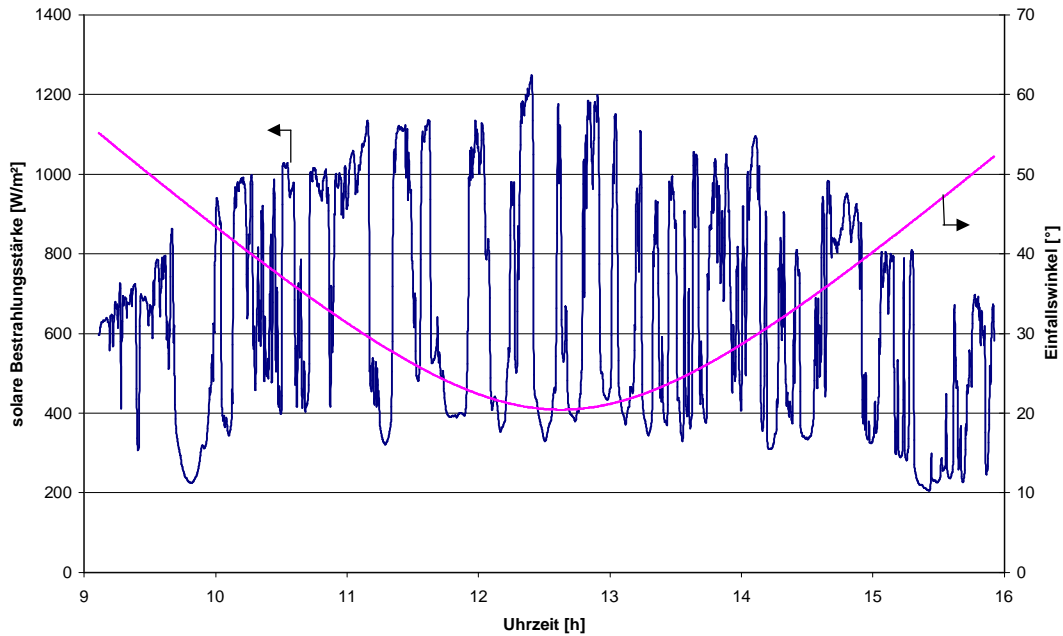


Abbildung 2: Typischer Tagesgang der solaren Bestrahlungsstärke in Kollektorebene und des Einfallswinkels der direkten Bestrahlung an einem Tag mit wechselnder Bewölkung

Modellierung der Nutzwärmeleistung eines Sonnenkollektors - thermische Kenngrößen

Die flächenbezogene Nutzwärmeleistung eines Sonnenkollektors \dot{q} wird als Produkt des Massenstroms, der spezifischen Wärmekapazität und der Temperaturdifferenz des Wärmeträgermediums zwischen Aus- und Eintritt am Kollektor bezogen auf die Bezugsfläche aus den Meßdaten berechnet. Unabhängig vom verwendeten Testverfahren gilt Gl. 1.

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

Unterschiede zwischen den beiden Testverfahren ergeben sich jedoch bei der Modellierung der flächenbezogenen Nutzwärmeleistung. Unter quasi-stationären Bedingungen wird diese nach Gl. 2, unter instationären Bedingungen gemäß Gl. 3 modelliert.

$$\dot{q}_{sta} = \eta_{0,sta} G - a_{1,sta} (\vartheta_m - \vartheta_a) - a_{2,sta} (\vartheta_m - \vartheta_a)^2 \quad (2)$$

$$\dot{q}_{insta} = \eta_{0,insta} (K_{\Theta b} G_b + K_{\Theta d} G_d) - a_{1,insta} (\vartheta_m - \vartheta_a) - a_{2,insta} (\vartheta_m - \vartheta_a)^2 - C_{eff} \frac{d\vartheta_m}{dt} \quad (3)$$

Konversionsfaktor

Der Konversionsfaktor η_0 beschreibt den Wirkungsgrad eines Kollektors ohne Wärmeverluste. Der wärmeverlustfreie Betrieb stellt sich dann ein, wenn die mittlere Kollektortemperatur, berechnet als arithmetisches Mittel von Kollektorein- und Austrittstemperatur, gleich der Umgebungstemperatur ist. Der Konversionsfaktor stellt somit den höchstmöglichen Wirkungsgrad eines Sonnenkollektors dar.

Effektiver Wärmedurchgangskoeffizient

Der effektive Wärmedurchgangskoeffizient k_{eff} wird aus den Kennwerten a_1 und a_2 gemäß Gl. 4 berechnet und beschreibt den Wärmedurchgang vom Wärmeträgerfluid im Kollektor an die Umgebung und damit die Höhe der Wärmeverluste eines Kollektors. Ein Kollektor mit einem geringen effektiven Wärmedurchgangskoeffizienten besitzt auch noch bei hohen Temperaturen eine hohe Nutzwärmeleistung.

$$k_{eff} = a_1 + a_2 (\vartheta_m - \vartheta_a) \quad (4)$$

Einfallswinkel-Korrekturfaktor für die direkte Bestrahlung

Der Einfallswinkel-Korrekturfaktor $K_{\Theta b}$ für die direkte Bestrahlungsstärke ist eine Funktion des Einfallswinkels Θ (vgl. Gl. 5) und hängt wesentlich vom winkelabhängigen Transmissionsvermögen der Glasabdeckung ab. Er beschreibt das Verhältnis, von einem durch einen gegebenen Einfallswinkel abgeschwächten Wirkungsgrad zum Wirkungsgrad bei senkrechter Einstrahlung.

$$K_{\Theta b} = 1 - b_0 \left(\frac{1}{\cos \Theta} - 1 \right) \quad (5)$$

Einfallswinkel-Korrekturfaktor für die diffuse Bestrahlung

Der diffusen Bestrahlungsstärke kann keine Einstrahlrichtung zugeordnet werden, es wird daher davon ausgegangen, daß sie gleichmäßig verteilt aus dem Sichtfeld des Kollektors auftrifft. Der Einfallswinkel-Korrekturfaktor $K_{\Theta d}$ für die diffuse Bestrahlungsstärke ist daher eine, vom Einfallswinkel Θ unabhängige, Konstante und beschreibt das Verhältnis, aus dem durch die isotrope Verteilung abgeschwächten Wirkungsgrad und dem Wirkungsgrad bei senkrechter Einstrahlung.

Effektive Wärmekapazität

Die effektive Wärmekapazität C_{eff} des Kollektors gibt an, welche Wärmemenge je Kelvin Temperaturänderung der mittleren Kollektortemperatur vom gesamten Kollektor aufgenommen bzw. abgegeben wird.

Vergleich der Ergebnisse

Zum Vergleich der zwei Verfahren wurden drei Flachkollektoren (C73, C75 und C89) einem Außentest unterzogen wobei die jeweils geforderten Testbedingungen streng eingehalten wurden. Als Bezugsfläche wurde die Aperturfläche gewählt. Die Kennwerte nach Gl. 2 und 3 wurden, entsprechend den Vorgaben der Norm, mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate aus den Meßdaten ermittelt. Zum Vergleich der zwei Verfahren werden sowohl die ermittelten Kennwerte als auch die daraus resultierende Wirkungsgradkennlinie einander gegenübergestellt. Zusätzlich wird der, entsprechend den *Richtlinien zur Förderung von Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien /4/* berechnete, jährliche Kollektorertrag für eine Kollektorfläche von 5 m² verglichen.

Die Wirkungsgradkennlinie des Tests unter quasi-stationären Bedingungen ergibt sich durch den Bezug der flächenbezogenen Nutzwärmeleistung auf die solare Bestrahlungsstärke zu

$$\eta_{sta} = \eta_{0,sta} - a_{1,sta} \frac{(\vartheta_m - \vartheta_a)}{G} - a_{2,sta} \frac{(\vartheta_m - \vartheta_a)^2}{G} \quad (6)$$

Bei der Modellierung der Wirkungsgradkennlinie wird, aufgrund der bereits erwähnten Annahmen, auf die Berücksichtigung des Einfallswinkels der direkten Bestrahlung, der diffusen Bestrahlung sowie der effektiven Wärmekapazität des Kollektors verzichtet. Beim Verfahren unter instationären Bedingungen gehen diese Größen jedoch nach den Gln. 3 und 5 in die Auswertung der Meßdaten mit ein. Um dennoch die Vergleichbarkeit der zwei Verfahren zu gewährleisten, müssen die unter instationären Bedingungen gewonnenen Kennwerte umgerechnet werden. Hierzu schreibt /3/ folgende Bedingungen vor:

- eine solare Bestrahlungsstärke von 800 W/m²
- einen Diffusstrahlungsanteil von 15 %
- einen Einfallswinkel der direkten Bestrahlung von 15°
- eine konstante mittlere Kollektortemperatur

Unter Berücksichtigung dieser Vorgaben erhält man aus Gl. 3 unter Verwendung von Gl. 5

$$\dot{q}_{insta} = \eta_{0,insta} G^* - a_{1,insta} (\vartheta_m - \vartheta_a) - a_{2,insta} (\vartheta_m - \vartheta_a)^2 \quad (7)$$

mit

$$G^* = (1 - 0,035 b_0) \cdot 680 \frac{W}{m^2} + K_{\Theta_d} \cdot 120 \frac{W}{m^2} \quad (8)$$

Durch den Bezug von \dot{q} auf die solare Bestrahlungsstärke G erhält man eine Gleichung, die direkt mit der Gleichung der Wirkungsgradkennlinie nach dem stationären Verfahren vergleichbar ist.

$$\eta_{insta} = \eta_{0,insta}^* - a_{1,insta} \frac{(\vartheta_m - \vartheta_a)}{G} - a_{2,insta} \frac{(\vartheta_m - \vartheta_a)^2}{G} \tag{9}$$

mit

$$\eta_{0,insta}^* = \eta_{0,insta} \frac{G}{G^*} \tag{10}$$

In Tabelle 2 sind die auf drei Nachkommastellen gerundeten Kennwerte und die berechneten, jährlichen Kollektorerträge der drei Kollektoren für beide Verfahren dargestellt. Abbildungen 3, 4 und 5 zeigen die Verläufe der Wirkungsgradkennlinien der drei Kollektoren.

Kollektor	Verfahren	η_0 [-]	a_1 [W/(m ² K)]	a_2 [W/(m ² K ²)]	Jährlicher Kollektorertrag [kWh/(m ² a)]
C73	quasi-stationär	0,737	3,545	0,013	459
	instationär	0,746	3,748	0,010	460
C75	quasi-stationär	0,792	3,578	0,018	480
	instationär	0,795	3,489	0,018	485
C89	quasi-stationär	0,770	4,153	0,013	455
	instationär	0,772	3,827	0,017	462

Tabelle 2: Gegenüberstellung der bestimmten Kennwerte und der berechneten, jährlichen Kollektorerträge

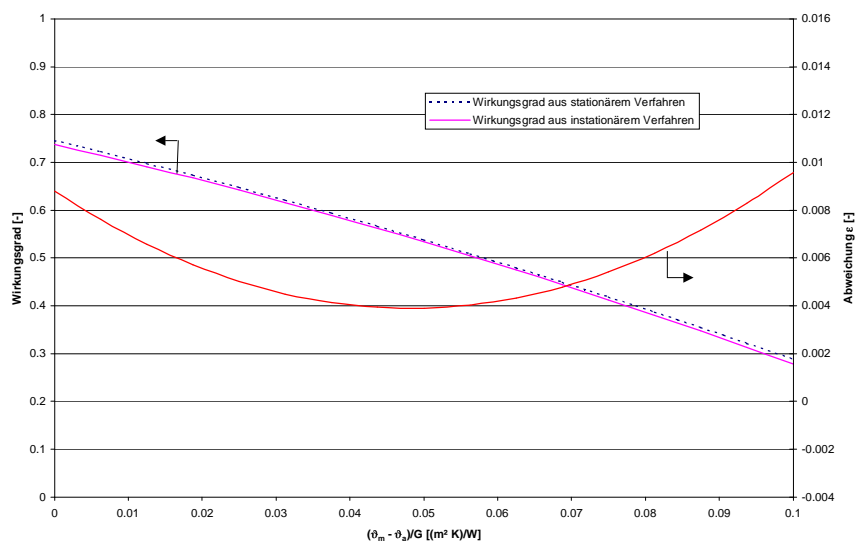


Abbildung 3: Wirkungsgradkennlinien des Kollektors C73

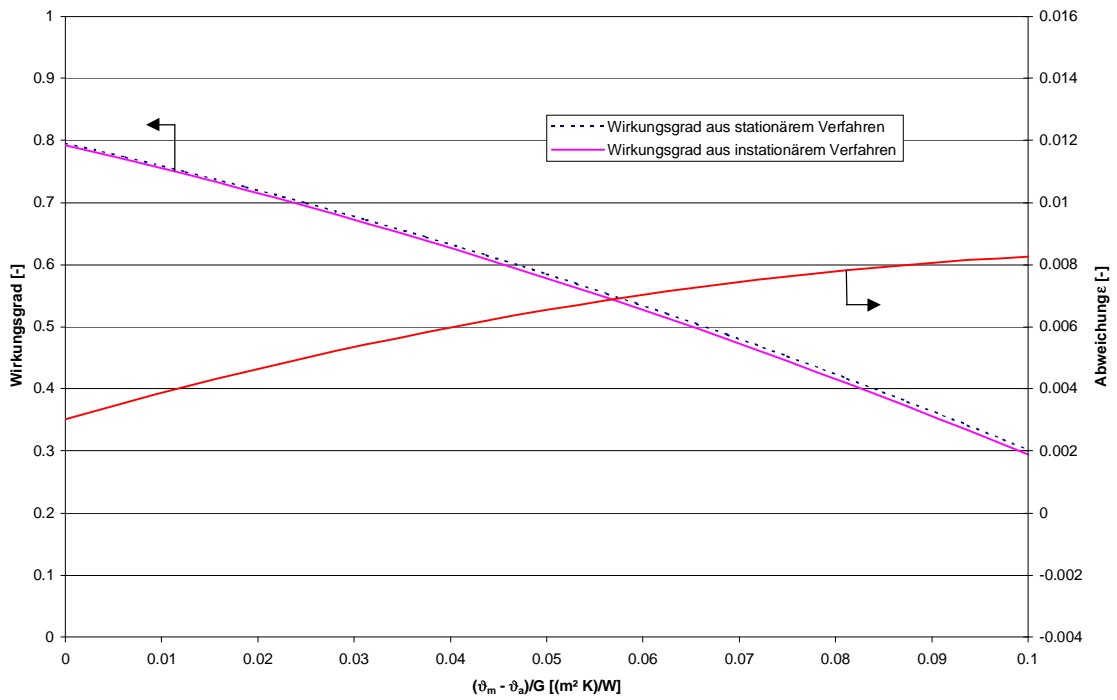


Abbildung 4: Wirkungsgradkennlinien des Kollektors C75

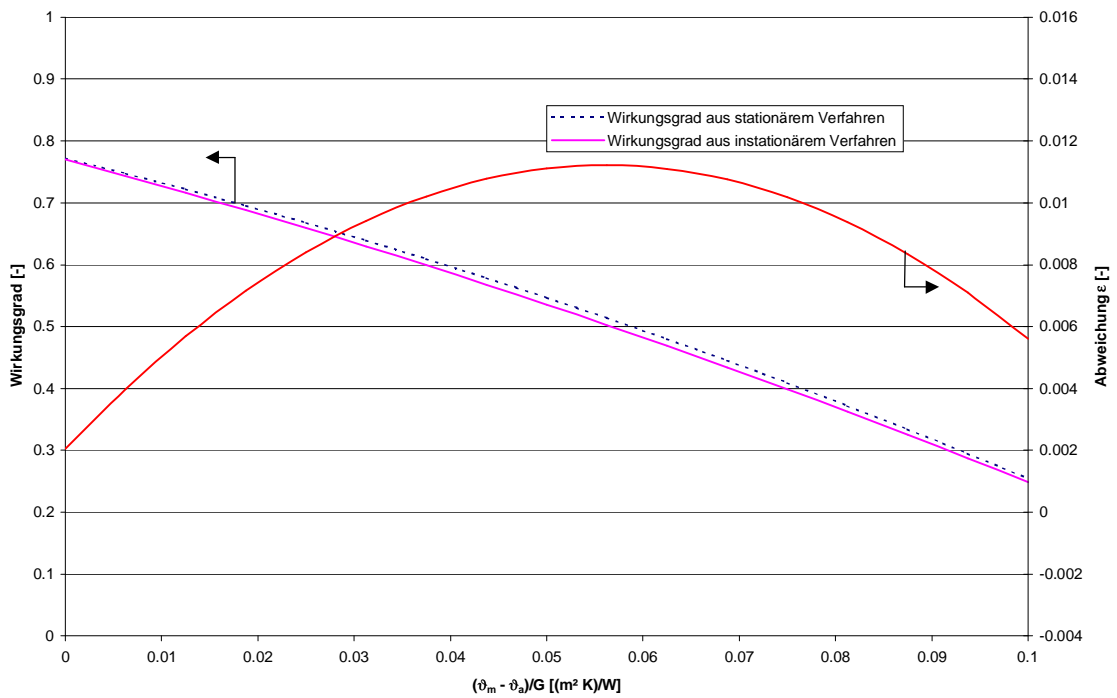


Abbildung 5: Wirkungsgradkennlinien des Kollektors C89

Die maximale Abweichung ε des nach dem Verfahren unter instationären Bedingungen bestimmten Konversionsfaktor η_0 von dem unter quasi-stationären Bedingungen bestimmten beträgt 0,009 (vgl. Tabelle 2). Auch die Vergleichbarkeit der, den effektiven Wärmedurchgangskoeffizienten bestimmenden, Koeffizienten a_1 und a_2 ist gegeben. Da die zwei Koeffizienten unmittelbar, entsprechend Gl. 4, miteinander verbunden sind ergibt sich trotz leicht unterschiedlicher Werte von a_1 und a_2 ein vergleichbarer effektiver Wärmedurchgangskoeffizient (vgl. Steigungen der Wirkungsgradkennlinien in den Abbildungen 3,4 und 5). Hier liegen die nach dem Verfahren unter instationären Bedingungen bestimmten Wirkungsgradkennlinien maximal um 0,011 höher als die nach dem Verfahren unter quasi-stationären Bedingungen ermittelten. Der Verlauf der Kennlinien ist jedoch nahezu gleich. Der höhere Wirkungsgrad nach dem instationären Verfahren ist auf die Tatsache zurückzuführen, daß bei einem Test auf einem fest ausgerichteten Teststand und unter quasi-stationären Bedingungen der mittlere Einfallswinkel der direkten Bestrahlung 15° überschreiten kann und der Anteil der diffusen Bestrahlungsstärke ebenfalls über 15 % liegen kann. Für Abbildung 6 wurden die unter instationären Bedingungen ermittelten Kennwerte des Kollektors C73 auf den, während der Messung nach dem quasi-stationären Verfahren vorherrschenden, mittleren Einfallswinkel der direkten Bestrahlung von 20° umgerechnet. Der Anteil der diffusen Bestrahlung betrug während der Messung 15 %, so daß hier keine Umrechnung durchgeführt werden mußte. Durch die Umrechnung verringert sich die maximale Abweichung von 0,009 auf 0,003.

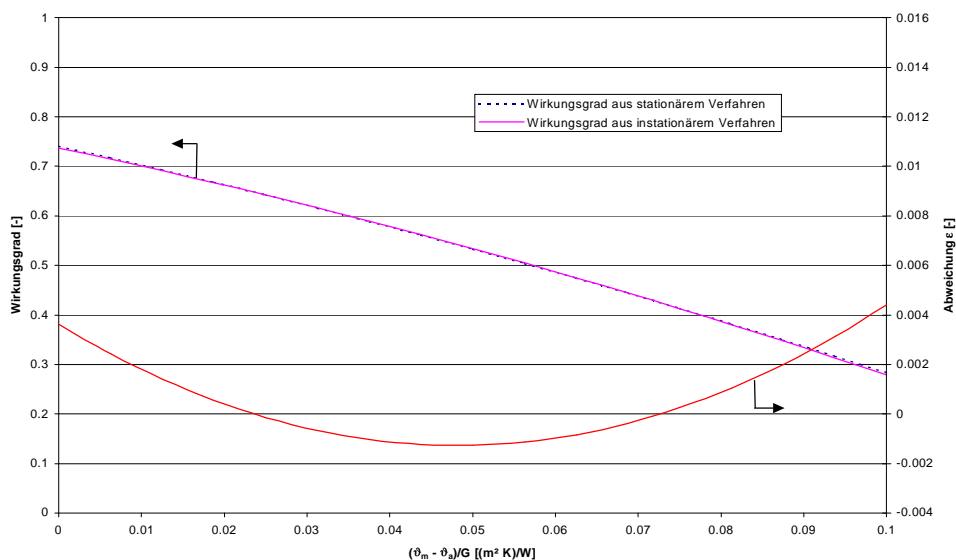


Abbildung 6: Wirkungsgradkennlinien des Kollektors C73. Die Kennlinie aus dem instationären Verfahren ist auf den, während des Tests unter quasi-stationären Bedingungen, vorherrschenden Einfallswinkel umgerechnet

Der Vergleich der berechneten, jährlichen Kollektorerträge ergibt ebenfalls nur geringe Unterschiede (vgl. Tabelle 2). Hier liegt die maximale Abweichung mit $7 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ a})$ unter 2 % des Gesamtertrags.

Die Abweichungen zwischen den, nach den beiden Verfahren bestimmten Ergebnissen sind im Vergleich zur Meßgenauigkeit sehr gering. Somit ist die Vergleichbarkeit des Verfahrens unter instationären Bedingungen zu dem Verfahren unter quasi-stationären Bedingungen gegeben. Zusätzlich können die für die Berechnung des jährlichen Kollektorertrags wichtige, effektive Wärmekapazität sowie die Einfallswinkel-Korrekturfaktoren des Kollektors ohne weitere Messungen direkt aus den vorhandenen Meßdaten bestimmt werden.

Zusammenfassung

Mit dem Erscheinen des CEN-Normenentwurfs prEN 12975-2 zur Bestimmung der thermischen Kennwerte von Sonnenkollektoren steht erstmals dem seit Jahren anerkannten stationären Testverfahren ein instationäres Testverfahren gleichwertig gegenüber. Die Ergebnisse des instationären Testverfahrens sind vergleichbar zu den mit dem stationären Verfahren ermittelten. Zudem zeichnet sich das instationäre Verfahren durch folgende Vorteile aus.

- **Zeitersparnis:** Durch die Verwendung von Meßdaten unter fast allen meteorologischen Bedingungen kann im Außentest eine kurze Prüfdauer erreicht werden. Gleichzeitig werden, ohne zusätzliche Berechnung oder Messung, die effektive Wärmekapazität und die Einfallswinkel-Korrekturfaktoren zuverlässig bestimmt.
- **Kostenreduktion:** Durch die verkürzte Meßdauer werden sich die Kosten einer Leistungsprüfung reduzieren.
- **Hohe Flexibilität:** Die bestimmten Kennwerte sind bei allen meteorologischen Bedingungen anwendbar. Damit eignen sie sich zur Überprüfung von garantierten, solaren Erträgen bei bereits installierten Solaranlagen.
- **Hohe Vergleichbarkeit:** Durch die Umrechnung der Ergebnisse auf gegebene Bedingungen lassen sich die Ergebnisse direkt mit den Resultaten anderer Testinstituten vergleichen. Dies gilt sowohl für die Ergebnisse aus Aussentests mit fest ausgerichtetem Teststand als auch für Aussentests mit nachgeführtem Teststand (Einfallswinkel der direkten Bestrahlung $\Theta = 0$) und für Tests im Sonnensimulator (nahezu keine diffuse Bestrahlungsstärke).

Nomenklatur

Formelzeichen

A	m^2	Bezugsfläche
a_1	$W/(m^2K)$	Konstanter Wärmedurchgangskoeffizient
a_2	$W/(m^2 K^2)$	Temperaturabhängiger Wärmedurchgangskoeffizient
b_0	-	Hilfsgröße zur Beschreibung des Einfallswinkel-Korrekturfaktor der direkten Bestrahlung
C_{eff}	$J/(m^2 K)$	Effektive Wärmekapazität des Kollektors
$d\vartheta_m/dt$	K/s	Zeitliche Änderung der mittleren Temperatur des Wärmeträgerfluids
ε	-	Abweichung des Wirkungsgrads aus instationären Meßdaten zu dem Wirkungsgrad aus quasi-stationären Meßdaten $\varepsilon = \eta_{insta} - \eta_{sta}$
G	W/m^2	solare Bestrahlungsstärke ($G = G_b + G_d$)
G^*	W/m^2	auf Normbedingungen umgerechnete solare Bestrahlungsstärke ($G = G_b + G_d$)
G_b	W/m^2	direkte Bestrahlungsstärke
G_d	W/m^2	diffuse Bestrahlungsstärke
k_{eff}	$W/(m^2 K)$	Effektiver Wärmedurchgangskoeffizient
K_{ob}	-	Einfallswinkel-Korrekturfaktor der direkten Bestrahlungsstärke
K_{od}	-	Einfallswinkel-Korrekturfaktor der diffusen Bestrahlungsstärke
\dot{q}	W/m^2	Flächenbezogene 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 ($\vartheta_m = (\vartheta_{ein} + \vartheta_{aus})/2$)
ϑ_{aus}	$^{\circ}C$	Kollektoraustrittstemperatur des Wärmeträgerfluids
θ	$^{\circ}$	Einfallswinkel der direkten Bestrahlung
η	-	Kollektorwirkungsgrad
η_0	-	Konversionsfaktor
η_0^*	-	auf Normbedingungen umgerechneter Konversionsfaktor

Indizes

insta instationär

sta stationär

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
- /4/ Richtlinien zur Förderung von Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien, Juni 1995

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.