

Überprüfung von Messergebnissen durch Validierungssequenzen – eine Ergänzung zur Leistungsprüfung von Sonnenkollektoren

S. Fischer, H. Müller-Steinhagen

Universität Stuttgart, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW)

Pfaffenwaldring 6, D-70550 Stuttgart

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

email: fischer@itw.uni-stuttgart.de

1. Einleitung

In der europäischen Norm EN 12975 wird zur Bestimmung der thermischen Leistungsfähigkeit von Sonnenkollektoren sowohl das Verfahren unter stationären als auch das Verfahren unter quasi-dynamischen Bedingungen beschrieben. Obwohl in der Vorgehensweise unterschiedlich, gilt bei beiden Verfahren, dass die Prüfung beendet ist, wenn alle geforderten Messsequenzen abgearbeitet sind. Eine Überprüfung der aus den Messsequenzen gewonnenen Kennwerte, wie beispielsweise beim Speichertest üblich, erfolgt für die Kollektoren nicht.

Die aus der Prüfung bestimmten Kennwerte werden unter anderem zur Ertragsberechnung mittels dynamischer Simulationen herangezogen. Die Ergebnisse dieser Ertragsberechnungen werden wiederum als Kriterium dafür verwendet ob, die Installation eines Kollektors gefördert wird oder nicht. Vor diesem Hintergrund ist es durchaus sinnvoll die Leistungsprüfung für Sonnenkollektoren um eine Prüfsequenz zu erweitern mit der nachgewiesen wird, dass das dynamische Verhalten des Kollektors im Betrieb ausreichend genau durch die bestimmten Kennwerte beschrieben werden kann.

In diesem Beitrag wird eine mögliche Validierungssequenz und Kriterien festgelegt anhand derer über die Annahme bzw. Ablehnung des Prüfergebnisses entschieden werden kann. Das Verfahren wird am Beispiel eines Vakuum-Röhren-Kollektors vorgestellt.

2. Definition der Validierungssequenz

Die Anforderungen an die Validierungssequenz ergeben sich zum einen aus den Betriebsbedingungen, denen im Allgemeinen ein Kollektor in der Realität ausgesetzt ist und zum anderen aus den Randbedingungen einer dynamischen Simulation. Die im Folgenden verwendeten Kriterien und deren Grenzen sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Kriterium	Grenzen
Einstrahlungssumme in Kollektorebene	> 8 MJ/m ²
Standardabweichung der zeitlichen Änderung der globalen Bestrahlungsstärke mit der Zeit dG/dt (Strahlungsvariabilität)	> 2 W/(m ² s)
Differenz der mittleren Fluidtemperatur und Umgebungstemperatur	> 20 K
Einfallswinkelbereich der direkten Bestrahlungsstärke θ	0 bis min. 50°
Zeitschrittweite dt zur Aufzeichnung der Messwerte	< 60 s

Tabelle 1: Kriterien und Grenzen für die Auswahl einer geeigneten Validierungssequenz

3. Definition der Akzeptanzkriterien

Die für die Definition der Akzeptanzkriterien verwendete Bewertungsgröße ist die pro Quadratmeter Kollektorfläche während der Validierungssequenz übertragene Wärmemenge q nach Gleichung (1)

$$q = \int \dot{q} dt \quad (1)$$

Die flächenbezogene Kollektorleistung \dot{q} wird zum einen gemessen (vgl. Gl. 2) und zum anderen nach Gl. (3), unter Verwendung der durch die Prüfung bestimmten Kennwerte berechnet.

$$\dot{q}_m = \dot{m} c_p (\vartheta_{aus} - \vartheta_{ein}) \quad (2)$$

$$\dot{q}_r = \eta_0 K_{\Theta b}(\theta) G_b + \eta_0 K_{\Theta d} G_d - a_1 (\vartheta_m - \vartheta_a) - a_2 (\vartheta_m - \vartheta_a)^2 - c_{eff} \frac{d\vartheta_m}{dt} \quad (3)$$

Es müssen zwei Akzeptanzkriterien erfüllt sein:

1. Der Betrag der Differenz zwischen berechneter und gemessener Wärmemenge muss für die gesamte Validierungssequenz kleiner 2% sein (Gl. 4)

$$\varepsilon_q = \frac{|q_r - q_m|}{q_m} < 0.02 \quad (4)$$

und

2. die Summe der Beträge der übertragenen Wärmemengen pro Zeitschritt bezogen auf die Summe der gemessenen Wärmemenge pro Zeitschritt muss kleiner 5% sein (Gl. 5)

$$\varepsilon_p = \frac{\sum |\dot{q}_r - \dot{q}_m| dt}{\sum \dot{q}_m dt} < 0.05 \quad (5)$$

4. Anwendung des Verfahrens

Das oben beschriebene Verfahren wird im Folgenden am Beispiel eines Vakuum-Röhren-Kollektors angewendet. Es werden sowohl die unter stationären Bedingungen, als auch die unter quasi-dynamischen Bedingungen gewonnenen Kennwerte (vgl. Tabelle 2) verwendet. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass unter stationären Bedingungen nicht zwischen direkter und diffuser Bestrahlungsstärke unterschieden wird was sich insbesondere im Hinblick auf den Konversionsfaktor η_0 bemerkbar macht und dass die effektive Kollektorkapazität beim stationären Verfahren rechnerisch bestimmt wurde.

	η_0 [-]	$K_{\theta d}$ [-]	a_1 [W/(m ² K)]	a_2 [W/(m ² K ²)]	C_{eff} [J/(m ² K)]
stationär	0.679	-	0.478	0.008	10418
quasi-dynamisch	0.694	1.019	1.428	0.000	28900

Tabelle 2: Kollektorkennwerte

Der Einfallswinkelkorrekturfaktor $K_{\theta b}(\theta)$ für den untersuchten Kollektor berechnet sich nach Gl. (6), die entsprechenden Werte für θ_l und θ_t sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

$$K_{\theta b}(\theta) = K_{\theta b}(\theta_l, \theta_t) = K_{\theta b}(\theta_l, 0) \cdot K_{\theta b}(0, \theta_t) \quad (6)$$

Einfallswinkel θ	0	10	20	30	40	45	55	60	70	90
$K_{\text{ob}}(\theta, 0)$:	1.00	1.00	1.00	0.99	0.97	0.95	0.89	0.84	0.70	0
$K_{\text{ob}}(0, \theta_i)$: stationär	1.00	0.98	1.00	1.00	1.00	1.00	0.98	1.00	1.05	0
$K_{\text{ob}}(0, \theta_i)$: quasi-dynamisch	1.00	0.97	0.99	1.01	1.01	1.02	0.99	1.05	1.12	0

Tabelle 3: Einfallswinkelkorrekturfaktoren

Die Eigenschaften der verwendeten Validierungssequenz sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

Kriterium	tatsächlicher Wert
Einstrahlungssumme in Kollektorebene	18.2 MJ/m ²
Standardabweichung der zeitlichen Änderung der globalen Bestrahlungsstärke mit der Zeit dG/dt (Strahlungsvariabilität)	3.4 W/(m ² s)
Differenz der mittleren Fluidtemperatur und Umgebungstemperatur	46 K
Einfallswinkelbereich der direkten Bestrahlungsstärke θ	0 bis 65°
Zeitschrittweite dt	36 s

Tabelle 4: Werte der verwendeten Validierungssequenz

Die aus den bestimmten Kennwerten berechnete flächenbezogene Kollektorleistung ist zusammen mit der gemessenen Kollektorleistung und der Differenz aus berechneter und gemessener Kollektorleistung in den Abbildungen 1 und 2 dargestellt. Die Abweichung der übertragenen Wärmemengen ε_q beträgt in beiden Fällen 1%. Bei den übertragenen Leistungen ε_p ergibt sich mit 11% (stationär) und 4% (quasi-dynamisch) jedoch ein größerer Unterschied zwischen stationärer und quasi-dynamischer Messung. Unter Berücksichtigung der in Abschnitt 3 festgelegten Kriterien können die durch Messung unter quasi-dynamischen Bedingungen ermittelten Kennwerte als Ergebnis akzeptiert werden. Im Fall der stationär ermittelten Kennwerte sind jedoch noch zusätzliche dynamische Messungen erforderlich.

In Abbildung 1 ist ein deutliches Über- bzw. Unterschwingen der berechneten Kollektorleistung ersichtlich. Dies deutet auf eine Unterschätzung der effektiven Wärmekapazität des Kollektors hin, die darauf zurückgeführt werden kann, dass das

rechnerische Verfahren zur Bestimmung der effektiven Wärmekapazität im vorliegenden Fall unzureichend ist. Als erste Maßnahme ist hier die messtechnische Bestimmung (z.B. nach J.3 EN 12975) zu empfehlen. Mit der so bestimmten effektiven Wärmekapazität kann erneut der Kollektorleistung für die Validierungssequenz berechnet werden. Falls die Kriterien immer noch nicht erfüllt sein sollten sind weitere Messungen notwendig.

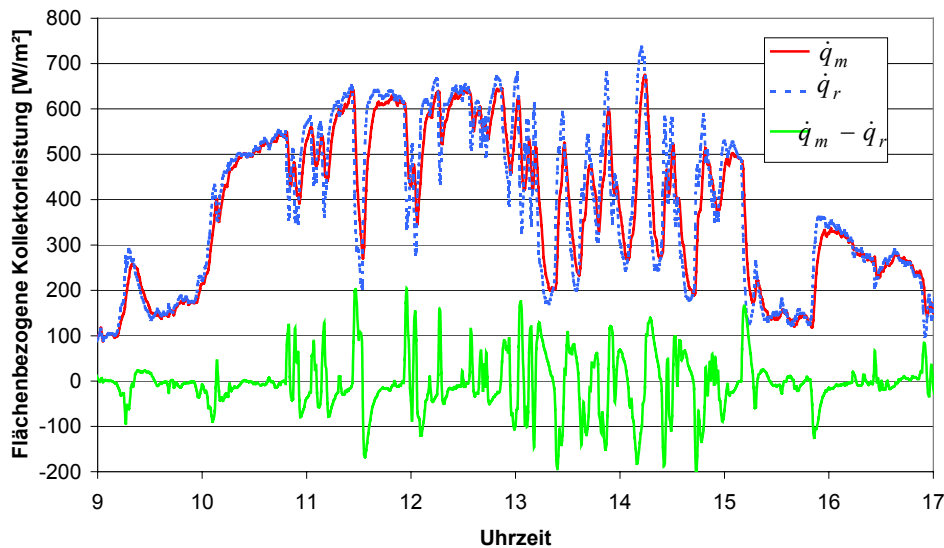


Abbildung 1: Gemessene und aus den stationären Kennwerten berechnete Kollektorleistung sowie Differenz von gemessener und berechneter Leistung

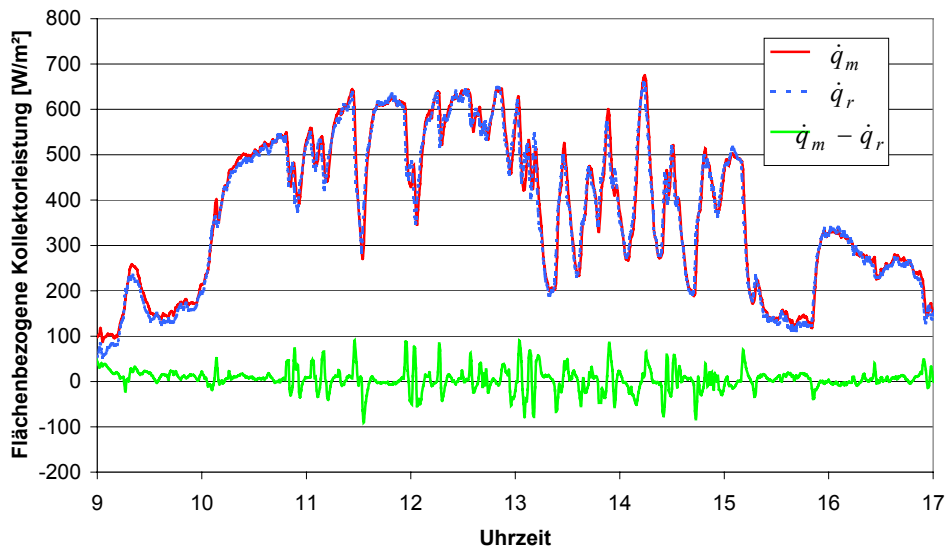


Abbildung 2: Gemessene und aus den quasi-dynamischen Kennwerten berechnete Kollektorleistung sowie Differenz von gemessener und berechneter Leistung

5. Zusammenfassung

Werden Kollektorkennwerte für eine dynamische Simulation im Rahmen von Ertragsberechnungen eingesetzt, ist vorher eine messtechnische Validierung der Kennwerte wünschenswert. Zu diesem Zweck wurden Kriterien für eine Validierungssequenz definiert und auf einen Kollektor angewendet. Das Ergebnis zeigt, dass nicht immer davon ausgegangen werden kann, dass die nach EN 12975 bestimmten Kennwerte auch das Verhalten von Sonnenkollektoren unter realen Bedingungen genau beschreiben. Durch die Einführung einer Validierungssequenz werden diese Fälle aufgedeckt und es können zusätzliche Maßnahmen ergriffen werden um das gewünschte Ziel zu erreichen.

Englischer Titel: **Validation of measurements using additional test sequences – an extension of the test procedure for solar collectors**