

Leistungsprüfung von Solaranlagen zur Brauchwassererwärmung nach den zukünftigen CEN-Normen des TC 312

H. Drück, M. Peter, E. Hahne

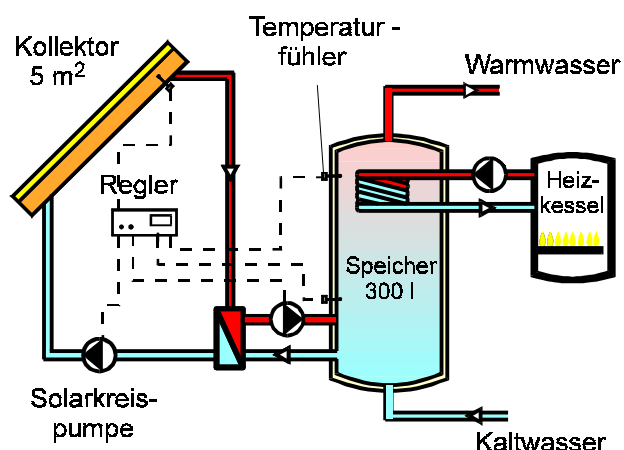
Universität Stuttgart, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW)
Pfaffenwaldring 6, D-70550 Stuttgart
Tel.: 0711/685-3536, Fax: 0711/685-3503

1. Einleitung

Gegenwärtig werden vom Europäischen Komitee für Normung (CEN) innerhalb des technischen Komitees TC 312 Normen für Solaranlagen und ihre Komponenten erstellt, die voraussichtlich ab 1998 die nationalen Normen ersetzen. Zusätzlich zu den Anforderungen an die Sicherheit und Gebrauchstauglichkeit sind Verfahren zur Ermittlung der thermischen Leistungsfähigkeit ein wesentlicher Bestandteil dieser Normen. Aufgrund der diversen Anlagenkonzepte und Vertriebsweisen ist eine Unterteilung in **fabrikfertige Solaranlagen** und **kundenspezifisch zusammengestellte Solaranlagen** vorgenommen worden (vgl. /1/).

Diese Unterteilung kann dazu führen, daß technisch baugleiche Anlagen mit dem DST¹⁾-Verfahren oder dem CTSS²⁾-Verfahren getestet werden. Insbesondere in diesen Fällen muß gewährleistet sein, daß die beiden Verfahren zu den gleichen Ergebnissen führen.

In diesem Beitrag wird die gesamte Vorgehensweise bei der Anwendung des CTSS-Verfahrens auf die unten beschriebene Anlagenkonfiguration vorgestellt und abschließend die Ergebnisse mit der Prüfung nach dem DST-Verfahren verglichen.



2. Anlagenkonfiguration

Die Solaranlage besteht aus drei Flachkollektoren und einem Standspeicher. Über einen externen Plattenwärmeübertrager wird die Solarenergie dem Speicher zugeführt. Die Nachheizung erfolgt mittels eines eingetauchten Wärmeübertragers.

Die Temperaturdifferenzen zum synchronen Ein- und Ausschalten der beiden Pumpen des Solarkreises werden vom Regler adaptiv gewählt.

Bild 1: Konfiguration der geprüften Anlage

¹⁾ DST: Dynamic System Testing

²⁾ CTSS: Component Testing - System Simulation

3. Test der Anlage nach dem DST-Verfahren

Die Bestimmung der Leistungsfähigkeit von **fabrikfertigen Solaranlagen** erfolgt nach ISO 9459, Teil 5, dem **DST-Verfahren** /2/. Das Verfahren hat sich bereits für ein breites Spektrum von solaren Brauchwassererwärmungsanlagen bewährt.

Zum Test wird die gesamte Anlage auf einem hierfür konzipierten Teststand montiert und entsprechend definierten Prüfbedingungen betrieben. Aus den während des Betriebs der Anlage aufgezeichneten Meßdaten werden mittels Parameteridentifikation die für diese Anlage spezifischen Kennwerte bestimmt. Auf der Basis der Kennwerte kann die thermische Leistung der Solaranlage für Referenzbedingungen berechnet werden.

Die Anlage (vgl. Bild 1) wurde im Spätsommer 1996 in Stuttgart getestet. Hierbei wurden die von der ISO geforderten Testsequenzen (S_{sol} , S_{store} , S_{aux}) mindestens zweimal durchlaufen.

4. Test der Anlage nach dem CTSS-Verfahren

Kundenspezifisch zusammengestellte Solaranlagen werden nach einem komponentenorientierten Prüfverfahren getestet. Hierzu werden zunächst der Kollektor, der Speicher und der Regler separat geprüft. Mit den ermittelten Kennwerten der einzelnen Komponenten kann in Verbindung mit einem geeigneten Simulationsprogramm das Verhalten der gesamten Solaranlage nachgebildet werden. Auf dieser Basis ist eine Vorhersage der thermischen Leistungsfähigkeit der Anlage für Referenzbedingungen sowie beliebige Randbedingungen (z. B. Meteorologie und Entnahmeprofile) möglich.

Mit der CEN-Norm TC 312, XXZ-2 liegt erstmals eine detaillierte Beschreibung der Vorgehensweise für den Test einer Solaranlage nach dem CTSS-Verfahren vor. Zur Anwendung dieses Verfahrens sind verbindliche Prüfvorschriften für die einzelnen Komponenten eine elementare Voraussetzung. Im Gegensatz zu Kollektor und Regler waren bisher für Warmwasserspeicher von Solaranlagen noch keine genormten Prüfverfahren vorhanden, die eine genaue Charakterisierung des thermischen Verhaltens dieser Komponente ermöglichen. Im Rahmen der Arbeiten des TC 312 wurde daher zusätzlich eine Prüfrichtlinie für Warmwasserspeicher erstellt (TC 312, XXZ-3).

Der Anwendungsbereich des CTSS-Verfahrens ist durch seinen komponentenorientierten Aufbau flexibel und auf beliebige Anlagenkonfigurationen erweiterbar. Um sicherzustellen, daß sich die verwendeten Rechenmodelle zur Beschreibung des thermischen Verhaltens der jeweiligen Komponenten sowie der gesamten Anlage eignen, sind spezielle Validierungen integraler Bestandteil des Verfahrens.

Auf den folgenden Seiten werden die Prüfungen der einzelnen Komponenten beschrieben.

4.1 Test des Speichers

Das wesentliche Ziel bei der thermischen Prüfung des Speichers ist es die Kennwerte zu ermitteln, die in Verbindung mit einem Rechenmodell eine detaillierte Beschreibung des thermischen Verhaltens des Speichers beim Betrieb in einer Solaranlage ermöglichen. Hierzu werden in der CEN TC 312, XXZ-3 zwei Verfahren beschrieben. Gemeinsamer Bestandteil beider Verfahren ist es, daß die Speicherkennwerte durch Parameteridentifikation ermittelt werden. Die benötigten Meßdaten können jedoch entweder beim Betrieb des Speichers auf einem Prüfstand im Labor oder im Rahmen eines Tests der Anlage nach dem DST-Verfahren ermittelt werden. Auf Messungen im Inneren des Speichers wird bei beiden Methoden bewußt verzichtet, um die Temperaturschichtung nicht zu beeinflussen.

Speichertest im Labor: Beim Test im Labor wird der Speicher entsprechend definierten Testsequenzen thermisch be- und entladen. Um die Speicherkennwerte sicher bestimmen zu können sind diese Testsequenzen so konzipiert, daß einzelne physikalische Phänomene gezielt angeregt werden. Beim Betrieb des Speichers am Teststand werden kontinuierlich die Volumenströme sowie die Ein- und Austrittstemperaturen am Speicher bzw. Wärmeübertrager aufgezeichnet.

Speichertest im System: Hier werden die Speicherkennwerte im Rahmen eines Tests der gesamten Anlage nach dem DST-Verfahren ermittelt. Hierzu ist es erforderlich, im Solarkreis zusätzlich den Volumenstrom sowie die Ein- und Austrittstemperaturen am Wärmeübertrager zu messen.

Kennwerte des Speichers

Im vorliegenden Fall wurde der Speicher sowohl am Prüfstand als auch im System (*in sys*) getestet. Die wichtigsten der dabei durch Parameteridentifikation ermittelten Kennwerte sind in Tab. 1 zusammengestellt.

	Teststand	<i>in sys</i>
effektiv nutzbares Speichervolumen [Liter]	312	300
Wärmeverlustrate $(kA)_{s,a}$ [W/K]	2,2	2,38
Volumen des Bereitschaftsteils [Liter]	189	180
effektive vertikale Wärmeleitfähigkeit λ_{eff} [W/(m K)]	1,44	2,28
Wärmeübertragungsvermögen externer Solarkreis-WT [W/K]	184	188
relative Höhe oberer Anschluß externer Solarkreis-WT [-]	0,35	0,36
Wärmeübertragungsvermögen Nachheizkreis-WT [W/K] (bei einer mittleren lokalen Temperatur von 40 °C)	583	626

Tab. 1: Mit den beiden Verfahren ermittelte Kennwerte des Speichers

Mit Ausnahme von λ_{eff} stimmen die mit den zwei unterschiedlichen Verfahren ermittelten Speicherkennwerte gut überein. Die relativ großen Abweichungen bei λ_{eff} sollten nicht überbewertet werden, da diese Größe nun einen geringen Einfluß auf das thermische Verhalten des Speichers hat.

4.2 Test des Kollektors

Entsprechend den Vorgaben der CEN TC 312 XXX-2 kann die thermische Leistungsfähigkeit

C_{eff}	7,3 kJ/(m ² K)
η_0	0,824
k_1	3,37 W/(m ² K)
k_2	0,022 W/(m ² K ²)
b_0	0,2377

von Kollektoren mit einem stationären Verfahren (ähnlich DIN 4757) sowie durch ein dynamisches Verfahren ermittelt werden. Im vorliegenden Fall lag bereits ein Prüfzertifikat nach DIN 4757, Teil 4 vor. Der von der CEN-Norm geforderte Parameter (b_0) zur Beschreibung des Einfallswinkel-Korrekturfaktors für die direkte Strahlung wurde analytisch ermittelt. Die übrigen Kennwerte wurden entsprechend den Herstellerangaben übernommen. Die verwendeten Kollektorkennwerte sind in Tab. 2 zusammengestellt.

Tab 2: Kollektorkennwerte

4.3 Test des Reglers

Zur Prüfung der Solarkreisregelung nach der CEN-Norm werden die Temperaturfühler mit entsprechenden Temperaturen beaufschlagt oder durch einstellbarer Widerstände ersetzt. Da es sich im vorliegenden Fall um eine Regelung mit adaptivem Verhalten handelt, wurden die Temperaturfühler mit den zugehörigen Tauchhülsen verwendet. Die Fühler wurden in temperierbare Bäder eingesetzt. Neben der Bestimmung der Ein- und Ausschalt-Temperaturdifferenzen bei unterschiedlichen Reglereinstellungen und Temperaturniveaus wurde die Funktion der einstellbaren Hysterese überprüft. Die Abweichung der Anzeige gegenüber einer Referenztemperatur wurde in 10 °C Schritten aufgenommen. Abschließend wurden die Fühler mit verschiedenen Temperaturverläufen beaufschlagt und das Adaptieren der Regelung beobachtet. Beginnend bei einer Einschalt-Temperaturdifferenz von 5 K und einer Hysterese von 2,5 K wurden die Fühler im Bereich von 10 °C bis 100 °C betrieben. Nach einigen Temperaturzyklen wählte die Regelung eine Einschalt-Temperaturdifferenz von 23 K was zu einer Hysterese von 11,5 K führte. Dieses Phänomen konnte auch während des Tests der Anlage nach dem DST-Verfahren auf dem Prüfstand beobachtet werden.

5. Validierung der System-Simulation

Entsprechend CEN TC 312 XXZ-2 muß die System-Simulation für jede Anlagenkonfiguration einmalig validiert werden. Hierzu wurden die Testsequenzen verwendet, die nicht zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit der Anlage nach dem DST-Verfahren herangezogen worden waren.

Zusätzlich zur Bestimmung der Kennwerte des Kollektorfeldes wird in einem zweiten Schritt das Verhalten der Anlage unter Verwendung der gemessenen Eingangsgrößen simuliert. Hierbei werden die vom Kollektor und Speicher gelieferten Wärmeströme berechnet und mit den gemessenen verglichen. Integriert man die Leistungen über der Zeit, so dürfen innerhalb eines Integrationsintervalls von 24 Stunden die Abweichungen der Energiemengen zwischen Simulation und Messung nicht größer als 10 % sein. An Tagen, an denen nur geringe Energiemengen umgesetzt wurden, konnte diese Forderung nicht immer eingehalten werden. Diese infolge geringer Einstrahlung bzw. Entnahmen auftretenden Effekte sind beim realen Betrieb der Anlage jedoch ohne Bedeutung.

In Gegensatz dazu ergaben sich Abweichungen von nur ± 2 %, wenn die während einer gesamten Sequenz umgesetzten Energiemengen betrachtet wurden.

6. Vergleich der Ergebnisse

Zur Bewertung der Leistungsfähigkeit von Solaranlagen bietet die vorliegende Norm zwei Möglichkeiten. Die eine Größe wird als solarer Deckungsanteil bezeichnet. Im Unterschied zur ISO 9459-5 werden jedoch die Wärmeverluste des Speichers rechnerisch für die Erwärmung des Brauchwassers mit und ohne Solaranlage bestimmt. Die Ermittlung dieses solaren Deckungsanteils, wie er in der CEN-Norm vorgeschlagen wird, kann nur auf der Basis umfangreicher Simulationsrechnungen erfolgen und ist mit der gegenwärtig für das DST-Verfahren zur Verfügung stehenden Version des Programmpaketes DF /2/ (Version 2.6 β) nicht möglich. Die zweite Größe zur Bewertung der Leistungsfähigkeit sind die sogenannten "*fractional energy savings* (f_{sav})". Diese Größe gibt den Anteil der Energie an, der durch die Solaranlage im Vergleich zu einer konventionellen Warmwasserbereitung eingespart werden kann. Hierzu wird ein mittlerer Nutzungsgrad des Heizkessels von 75 % angenommen.

Für die untersuchte Anlage wurde die anteilige Energieeinsparung (f_{sav}) für die in Tab. 3 aufgeführten Entnahmen und Standorte nach dem DST- und dem CTSS-Verfahren berechnet.

Entnahme [Liter/Tag]	Stockholm		Würzburg		Davos	
	DST	CTSS	DST	CTSS	DST	CTSS
100	55,4	55,2	59,5	60,1	83,2	81,8
140	52,5	51,5	57,3	57,0	77,9	76,5
200	47,4	46,2	52,4	52,0	68,1	68,4
300	39,1	38,6	44,4	44,1	54,4	55,5

Tab 3: Vergleich der anteiligen Energieeinsparung (fractional energy savings) in Prozent

7. Zusammenfassung

Es wurde eine Solaranlage zur Brauchwassererwärmung nach dem DST- und dem CTSS-Verfahren getestet und die anteilige Energieeinsparung für unterschiedliche Randbedingungen berechnet. Die erzielten Ergebnisse stimmen im Rahmen der geforderten Genauigkeit von 5 % mit Abweichungen kleiner als $\pm 1,5$ % erstaunlich gut überein.

Mit der Verabschiedung der CEN-Normen ist neben dem CTSS-Verfahren erstmals auch ein Verfahren zur thermischen Prüfung von Warmwasserspeichern für Solaranlagen standardisiert. Dies ist insbesondere für die Leistungsprüfung beliebig konfigurierter Solaranlagen wichtig, wie sie z. B. zur kombinierten Brauchwassererwärmung und Raumheizung eingesetzt werden.

Literatur:

Die erwähnten CEN-Normen werden ab Mitte des Jahres 1997 als prEN bei den nationalen Normungskörpern erhältlich sein. Im Anschluß daran wird eine CEN-Umfrage mit einer Dauer von 6 Monaten stattfinden. Während dieser Zeit können in Deutschland Kommentare über den Spiegelausschuß des CEN TC 312 eingebracht werden.

- /1/ Th. Pauschinger: CEN-Normen für thermische Solaranlagen - Status und Auswirkungen, Veröffentlichung in: Tagungsband zum sechsten Symposium Thermische Solarenergie, Kloster Banz, Mai 1996
- /2/ W. Spirkel et al.: ISO/CD 9459, Part 5, Solar Heating - Domestic Water Heating Systems, System Performance Characterisation by Means of Whole System Testing and Computer Simulation (Draft), February 1994