

Verfahren zur Ermittlung der thermischen Leistungsfähigkeit von großen Solaranlagen mittels in-situ Kurzzeitmessungen

H. Drück, E. Hahne, Th. Beikircher, M. Gut*, P. Kronthaler*, C. Oberdorf*, W. Schölkopf**

*Universität Stuttgart, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW)
Pfaffenwaldring 6, D-70550 Stuttgart
Tel.: 0711/685-3536, Fax: 0711/685-3503
email: drueck@itw.uni-stuttgart.de*

** Bayerisches Zentrum für angewandte Energieforschung (ZAE Bayern)
Abteilung Solarthermie und Biomasse
Domagkstr. 11, D-80807 München
Tel.: 089/356250-0, Fax: 089/56250-23
email: Thomas.Beikircher@physik.uni-muenchen.de*

Einleitung

Um den vom Planer bzw. Erbauer prognostizierten Jahresenergieertrag (Garantiertes Solares Resultat, GSR) von Solaranlagen mit der tatsächlichen Energielieferung nach der Installation vergleichen zu können, wird ein schnelles und kostengünstiges Verfahren zur Ermittlung der thermischen Leistungsfähigkeit benötigt. Zusätzlich können mit einem solchen Verfahren unterschiedliche Anlagen bzw. Anlagenkonzepte für standardisierte Randbedingungen (Wetter, Last) objektiv beurteilt und verglichen werden. In einem vom ZAE Bayern und ITW gemeinsam bearbeiteten Forschungsvorhaben wird ein derartiges Verfahren zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit von großen Solaranlagen (ab ca. 100 m² Kollektorfläche) entwickelt.

Bei den bisher eingesetzten Verfahren werden die Solaranlagen zur Überprüfung des GSR detailliert meßtechnisch überwacht. Die über mindestens ein Jahr gemessenen Zeitreihen der Betriebsbedingungen (Wetter, Last) werden dabei als Randbedingungen in das Simulationsprogramm eingelesen, das vorher für die Auslegung der Anlage und die Ermittlung des GSR verwendet wurde. Auf dieser Basis ist ein Vergleich des prognostizierten und tatsächlich von der Anlage gelieferten Energieertrags zwar möglich, aber dieses Vorgehen weist mehrere Nachteile auf.

Zum einen muß die Anlage über einen Zeitraum von mindestens einem Jahr kontinuierlich meßtechnisch überwacht werden, was schwierig und mit hohen Kosten verbunden ist; zum anderen ist für den Fall, daß das reale Verhalten der Anlage mit dem für die Auslegung verwendeten Rechenmodell nicht nachgebildet werden kann, kein validiertes Rechenmodell für die Anlage vorhanden.

Für kleine Solaranlagen sind bereits Testverfahren verfügbar, die eine Berechnung des Anlagenenertrags für standardisierte Randbedingungen ermöglichen. Diese Testverfahren basieren entweder auf einem Test der gesamten Anlage (DST¹)-Verfahren) oder auf einem Test der zentralen Komponenten Kollektor, Speicher und Regelung (CTSS²) -Verfahren). Keines der beiden Verfahren kann jedoch sinnvoll auf Großanlagen angewandt werden.

Mit dem in diesem Beitrag vorgestellten ISTT³) -Verfahren wird eine bisher bestehende Lücke in der Qualitätskontrolle von großen Solaranlagen geschlossen, da es eine Bestimmung der auf standardisierten Randbedingungen beruhenden thermischen Leistungsfähigkeit der Anlagen ermöglicht.

¹) DST: Dynamic System Testing (vgl. ISO 9459,5)

²) CTSS: Component Testing - System Simulation (vgl. ISO/DP 9459,4)

³) ISTT: In situ Short Term Testing

Beschreibung des ISTT-Verfahrens

Der prinzipielle Aufbau des ISTT-Verfahrens ist in Bild 1 dargestellt. Die Basis sind in-situ Messungen, bei denen während des Betriebs der Anlage über einen Zeitraum von ca. 4 - 6 Wochen sämtliche relevanten Größen (Strahlung, Temperaturen und Massenströme) aufgezeichnet werden (erster Schritt). Dabei werden gegebenenfalls bestimmte Zustände (z. B. hohe Temperaturen im Kollektor oder Speicher) erzwungen, die im normalen Betrieb nicht auftreten, aber für die zuverlässige Bestimmung der Parameter einzelner Komponenten benötigt werden.

Große Solaranlagen zur Brauchwassererwärmung weisen ein breites Spektrum möglicher Anlagenkonfigurationen auf. So gibt es beispielsweise verschiedenste konstruktive Ausführungen des Speichers, die sich z. B. in der Zahl der Anschlüsse, den Vorrichtungen zur geschichteten Be- und Entladung usw. unterscheiden. Es kann deshalb a priori nicht allgemeingültig festgeschrieben werden, welche Parameter zur Beschreibung des thermischen Verhaltens der jeweiligen Solaranlage ermittelt werden müssen. Als zweiter Schritt ist daher in das ISTT-Verfahren eine Sensitivitätsanalyse integriert. Bei dieser wird mit einem detaillierten (idealerweise mit dem für die Auslegung verwendeten) Simulationsprogramm der Einfluß einzelner Komponentenparameter auf den solaren Jahresertrag der Anlage untersucht und somit festgelegt, welche Parameter im einzelnen bestimmt werden müssen.

Als dritter Schritt werden aus den in-situ Meßdaten die im Rechenmodell für die Beschreibung des thermischen Verhaltens der zentralen Komponenten (z. B. Kollektor, Speicher und Regelung) durch die Sensitivitätsanalyse als wesentlich identifizierten Parameter bestimmt und validiert. Diese Validierung erfolgt auf der Basis von sogenannten 'Kreuzvorhersagen'. Hierbei wird die etwa 6wöchige in-situ Meßsequenz in einzelne Untersequenzen zerlegt und aus jeder Untersequenz ein Parametersatz ermittelt, mit dem die übrigen Untersequenzen vorhergesagt werden. Wenn hierbei die Abweichungen zwischen Messung und Rechnung für einen bestimmten Prozentsatz (z. B. Vertrauensintervall 68 %) aller Untersequenzen kleiner als 5 % sind, sind die Parameter mit ausreichender Genauigkeit bestimmt. Die Messungen können in diesem Fall beendet werden.

Aufbauend auf den nun verfügbaren, validierten Komponentenmodellen wird im vierten Schritt das Simulationsmodell für den solaren Teil der Anlage (bis zum Entladewärmeübertrager des Pufferspeichers) erstellt und mittels der Meßdaten überprüft. Hierbei wird das Rechenmodell mit den gemessenen Eingangsgrößen (z. B. Wetter und Last) beaufschlagt. Die gemessene Energiemenge, die vom Pufferspeicher an den Lastkreis abgegeben wird, wird mit der berechneten Energiemenge verglichen. Ist die Abweichung kleiner als 5 %, so ist die Überprüfung positiv verlaufen und es steht jetzt ein Rechenmodell zur Verfügung, welches das thermische Verhalten der realen Anlage beschreibt. Mit diesem Modell können im letzten Schritt nun Ertragsberechnungen für standardisierte Randbedingungen vorgenommen und das garantierte solare Resultat (GSR) überprüft werden.

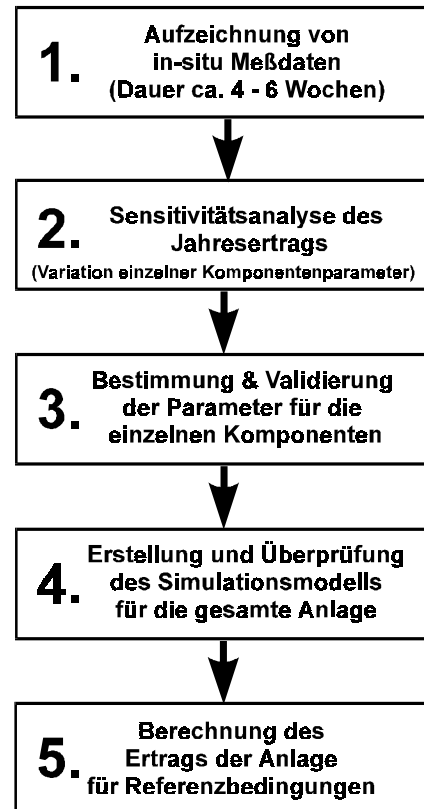


Bild 1: Das ISTT - Verfahren

Untersuchte Solaranlage und verwendete Meßgeräte

Angewandt wurde das ISTT-Verfahren exemplarisch auf die Solaranlage Baumgartnerstraße in München, die im Rahmen des Programms SOLARTHERMIE 2000 errichtet wurde. Die Anlage ist mit einfachverglasten Flachkollektoren mit einer Aperturfläche von 110 m² ausgestattet. Der Pufferspeicher mit einem Volumen von 6 m³ wird über externe Wärmeübertrager be- und entladen. In Bild 2 ist der prinzipielle Aufbau der untersuchten Solaranlage mit den verwendeten Meßstellen dargestellt.

Das auf die Kollektorfläche bezogene Speichervolumen beträgt 55 l/m², was einen relativ hohen Wert darstellt und in diesem Fall die Anlage als Vorwärmanlage charakterisiert. Durch die Messungen wurde bestätigt, daß sich die Anlage im normalen Betrieb über das gesamte Jahr in einem relativ schmalen Bereich von Betriebszuständen bewegt und die mittlere Temperatur des Kollektorfeldes nie mehr als 60 K über der Umgebungstemperatur liegt.

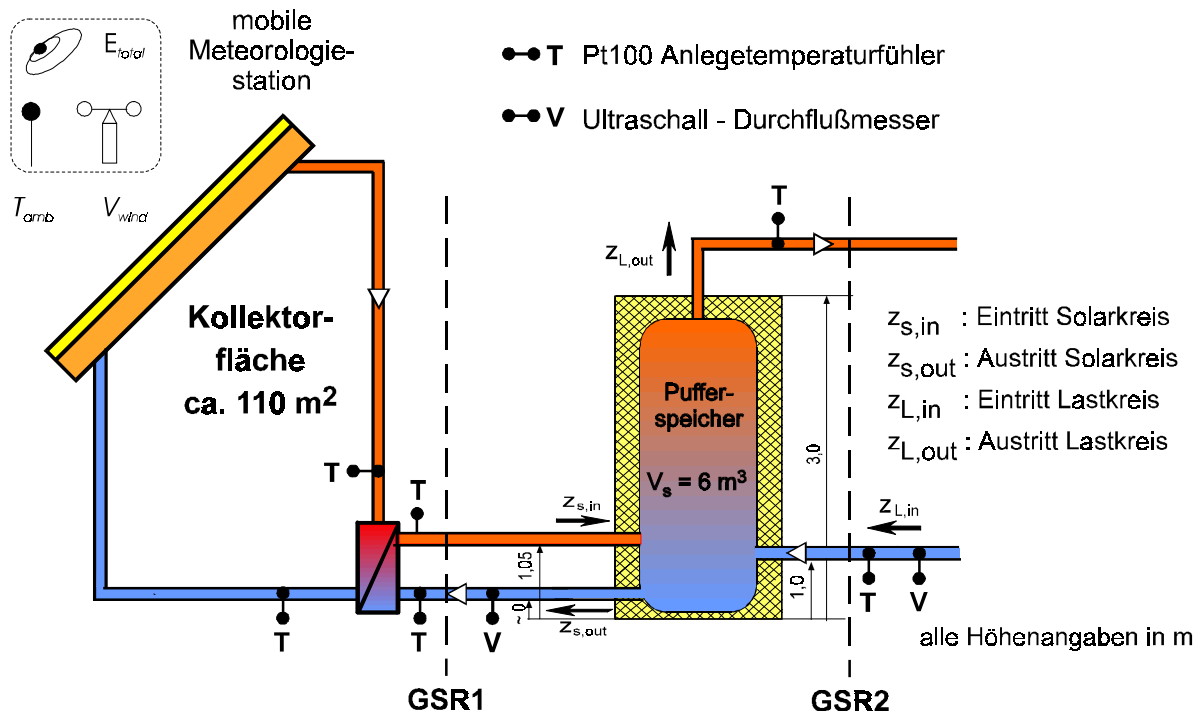


Bild 2: Prinzipieller Aufbau der untersuchten Solaranlage mit verwendeten Meßstellen

Der GSR-Wert bezieht sich entweder auf die vom Solarkreis an den Speicher (GSR1) oder vom Speicher an den Lastkreis (GSR2) gelieferte Energie. Im vorliegenden Fall wurde der GSR2 überprüft.

Um das ISTT-Verfahren innerhalb der angestrebten Meßdauer von ca. 6 Wochen kostengünstig durchführen zu können, muß eine zuverlässige, der Aufgabenstellung angepaßte Meßdatenerfassung, die auch juristischen Anforderungen (z. B. Erhaltung der Gewährleistungspflicht des Anlagebauers) gerecht wird, eingesetzt werden. Zur Vermessung von außen, d. h., in clamp-on Technik ohne direkten Eingriff in das System wurden neuartige Oberflächentemperaturfühler entwickelt und Ultraschallvolumenstromzähler eingesetzt. Zur Erfassung der meteorologischen Meßdaten wurde eine einfach zu montierende, stromautarke Meteorologiestation mit photovoltaischer Stromversorgung entwickelt. Diese erfaßt die solare Bestrahlungsstärke in Kollektorebene, Umgebungstemperatur und Windgeschwindigkeit und überträgt die Daten über Mobilfunk an den Auswerterechner beim ZAE Bayern /1/.

Durchführung und Validierung des ISTT-Verfahrens

Zur Bestimmung der Anlagenkennwerte wurden für den Kollektorkreis Meßdaten über einen Zeitraum von 11 Tagen (29.10. bis 8.11.97) im Normalbetrieb und über einen Zeitraum von 2 Tagen (24.-25.3.98) bei gedrosseltem Volumenstrom im Kollektorkreis, also bei hohen Kollektortemperaturen (bis 90 K über Umgebung) verwendet. Für die Ermittlung der Speicherkennwerte diente eine Meßsequenz mit 10 Tagen Dauer (21.4.-30.4.98).

Als Basis für die Parameterbestimmung wurde zunächst für das Simulationsprogramm TRNSYS ein Modell der Anlage erstellt und eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt (s. Bild 3).

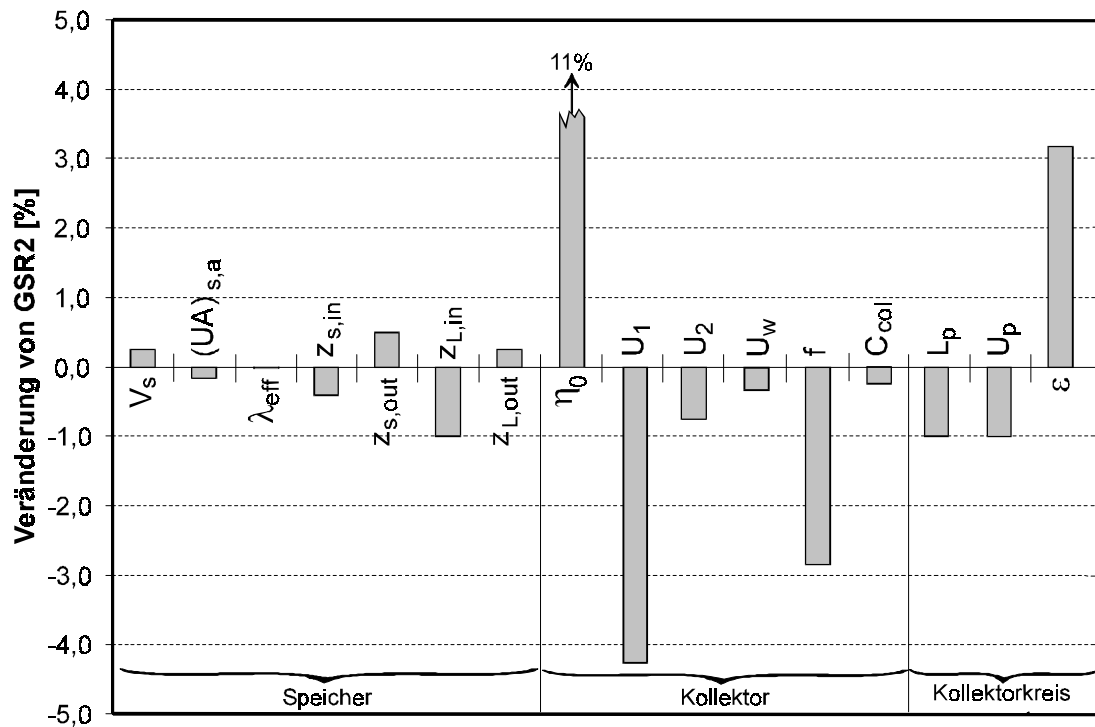


Bild 3: Sensitivitätsanalyse des Jahresertrags bei Variation einzelner Parameter um 10%.
(Die Bedeutung der einzelnen Parameter ist unten im Text erläutert)

Zur Beschreibung des thermischen Verhaltens des Speichers wurde das Rechenmodell 'MULTIPORT' eingesetzt. Aufgrund der Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse wurden für den Speicher die Wärmeverlustrate $(UA)_{s,a}$, die Eintrittshöhe $z_{s,in}$ und die Austrittshöhe $z_{s,out}$ des Solarkreises sowie die Eintrittshöhe $z_{L,in}$ des Lastkreises durch Parameteridentifikation aus den Meßdaten bestimmt. Wie die Sensitivitätsanalyse zeigt, sind das Speichervolumen V_s , die Austrittshöhe des Lastkreises $z_{L,out}$ sowie die effektive vertikale Wärmeleitfähigkeit λ_{eff} die Speicherkennwerte, die den geringsten Einfluß auf den GSR2 haben. Die Werte für V_s und $z_{L,out}$ können daher mit ausreichender Genauigkeit aus den Herstellerunterlagen entnommen werden. Für λ_{eff} wurde ein typischer Wert von 1,2 W/(m K) verwendet.

Für den Kollektorkreis wurden sechs Parameter für das Modell 'MFC' bestimmt (Kapazität C_{col} , Konversionsfaktor η_0 , konstanter (U_1) und von der Temperaturdifferenz abhängiger Anteil des Verlustkoeffizienten (U_2), Exponent des Winkelfaktors nach Ambrosetti f , Wärmeverlustkoeffizient der Rohrleitungen U_p). Zusätzlich wurde in getrennten Experimenten die Rohrlänge L_p und die Effektivität des Wärmeübertragers ϵ ermittelt.

Der windabhängige Verlustkoeffizient U_w wurde zu Null gesetzt, da die mittlere Windgeschwindigkeit im Testreferenzjahr München klein ist.

In Tabelle 1 sind die für die reale Anlage ermittelten Parameter zusammengestellt.

Parameter	$(UA)_{s,a}$ W/K	$Z_{S,in}$ m	$Z_{S,out}$ m	$Z_{L,in}$ m	η_0 [-]	U_1 W/m ² K	U_2 W/m ² K ²	f [-]	C_{col} kJ/Km ²	L_p m	U_p W/m ² K	ϵ [-]
real	42,4	2,4	0,0	1,0	0,84	2,72	0,0146	0,475	7,01	74	1,66	0,81
soll	21,7	1,05	0,0	0,0	0,78	3,67	0,013	0,338	12,13	30	2,29	0,81

Tab. 1: Parameter für die real ausgeführte (real) und für die geplante (soll) Anlage

Zur Validierung des ISTT-Verfahrens wurden von der ZFS aufgezeichnete Meßdaten für den Zeitraum vom März bis August 1998 herangezogen. Für diese Randbedingungen und mit den realen Anlageparametern wurden die Werte für den GSR1 und GSR2 berechnet und mit den Meßwerten verglichen. Über den gesamten Zeitraum lagen die Abweichungen im Bereich von ± 2 % wobei die maximalen Abweichungen für die einzelnen Monate ± 4 % nicht überschritten.

Garantierter Solarer Ertrag und seine Überprüfung

Nach der Validierung des Simulationsmodells bzw. des ISTT-Verfahrens ist es nun zuverlässig möglich, für beliebige Randbedingungen (Meteorologie, Last) den Ertrag der realen Anlage zu berechnen. Insbesondere kann nun für die bei der Auslegung der Anlage zugrunde gelegten Betriebsbedingungen der GSR1 und GSR2 ermittelt und mit dem vom Planer garantierten solaren Resultat verglichen werden.

Für die hier untersuchte Anlage besteht eine Geheimhaltungspflicht über den vom Planer garantierten Ertrag. Im Rahmen des Projektes wurde daher auf der Basis von veröffentlichten Testergebnissen für den Kollektor sowie aufgrund der Angaben des Erbauers bzw. den Planungsvorgaben ein 'eigener' Wert für die vom Pufferspeicher an den Lastkreis abgegebene Energie (GSR 2) berechnet; hierbei ergab sich ein Wert von 328 kWh/m²a.

Der für die Anlage mit dem ISTT-Verfahren ermittelte Wert beträgt 337 kWh/m²a. Dieser GSR2-Wert liegt also um 2,7 % über dem o. a. 'eigenen' garantierten Ertrag. Im Rahmen der angestrebten Verfahrensgenauigkeit von 5% kann daher festgestellt werden, daß die reale Anlage den an sie gestellten Leistungsanforderungen gerecht wird.

Im weiteren Projektverlauf sollen noch zwei Anlagen nach dem ISTT-Verfahren vermessen werden. Die geschätzten Kosten für eine Abnahmemessung liegen zwischen 10 TDM und 15 TDM und sind damit deutlich niedriger als die Kosten für die bisher zur Überprüfung des GSR durchgeführten Langzeitmessungen. Ein weiterer Vorteil des ISTT-Verfahrens besteht darin, daß ein Vergleich des GSR auf der Basis der für die Planung zugrunde gelegten Randbedingungen erfolgen kann, da ein validiertes Simulationsmodell der Anlage Bestandteil des Verfahrens ist. Das ISTT-Verfahren stellt daher eine interessante und kostengünstige Alternative für zukünftige Abnahmemessungen dar.

Literatur:

/1/ Th. Beikircher et. al.: Kurzzeittest für installierte thermische Kollektorfelder. Tagungsbeitrag zum 8. Symposium Thermische Solarenergie, Otti-Technologie-Kolleg, Regensburg, 1998.

Danksagung: Die in diesem Beitrag vorgestellten Arbeiten wurden vom Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF) unter der Kennzeichnung 0329728A gefördert. Für die Validierung des Verfahrens wurde auf Meßdaten der Zentralstelle für Solartechnik (ZFS) zurückgegriffen. Die Autoren danken beiden Institutionen für ihre Unterstützung.