

Verfahren zur simulationsgestützten Funktionskontrolle großer thermischer Solarsysteme

Frank Wiese, Michael Krause, Klaus Vajen
Universität Kassel, Institut für Thermische Energietechnik, D-34119 Kassel
Tel.: 0561 / 804-3892, Fax: / 804-3993, solar@uni-kassel.de

Einleitung

Solaranlagen zur Trinkwassererwärmung im Ein- und Zweifamilienhausbereich sind in großer Anzahl im Einsatz. Obwohl die spezifischen Systemkosten mit zunehmender Größe der Solaranlagen abnehmen, sind Anlagen mit über 100 m² Kollektorfläche bisher noch nicht sehr verbreitet. Diese Systeme werden im Gegensatz zu den o.g. Kleinanlagen weniger „von der Stange“ gekauft, sondern meist individuell geplant. Dabei ist eine besondere Sorgfalt bei der Dimensionierung und Abstimmung der einzelnen Anlagenkomponenten aufeinander wichtig. Im Programm Solarthermie 2000 (Teilprogramm 2) wurden solche Systeme detailliert vermessen und untersucht. Dabei wurden an einer Vielzahl von Anlagen Mängel gefunden, die den Systemertrag stark negativ beeinflussen können. Weiter wurde festgestellt, dass viele dieser Mängel ohne intensive Vermessung und zeitaufwändige Auswertung der Messdaten womöglich nie erkannt worden wären [1]. Da diese detaillierte Betreuung nur im Rahmen von Forschungsprojekten möglich ist, ist ein kostengünstiges Verfahren zur Langzeitüberwachung großer solarunterstützter TWW-Bereitungssysteme erforderlich. Folgende Ansätze werden hierzu derzeit verfolgt:

Garantierte Resultate von Solaranlagen

Im Rahmen eines EU-Forschungsvorhabens wurden mit dem von [2] vorgeschlagenen Verfahren ab 1996 insgesamt 21 größere Solarsysteme in Deutschland überwacht. Einige Messwerte, insbesondere die von den Kollektoren gelieferten Wärmemengen, wurden 10-minütlich erfasst und nachts per Modem übertragen. Automatisiert wurde eine grobe Plausibilitätsprüfung der Daten durchgeführt, darüber hinaus wurden Monatsbilanzen erstellt. Durch einen Vergleich mit Simulationsergebnissen aus f-chart (einem sehr einfachen, eigentlich nicht für Großanlagen geeigneten Programm) werden bei diesem Vorgehen Fehlfunktionen detektiert. Bei Abweichungen zwischen Simulations- und Messergebnissen wird ein Fachbetrieb mit einem Kontrollbesuch bei der Anlage beauftragt. Die Unsicherheiten der Analyse betragen nach Angaben der Entwickler rund 10 % der solaren Jahres-Wärmelieferung. Wegen dieser Ungenauigkeiten ist bestenfalls eine Fehlerdetektion, aber keine Fehleranalyse und damit Lokalisierung möglich. Darüber hinaus können viele technische Probleme innerhalb des Unsicherheitsbereichs nicht erfasst werden. Auch ist die Nachheizung nie und der Speicher nicht immer in die Überwachung integriert.

Input-Output-Controller

Der am ISFH in Hameln entwickelte IOC vergleicht jeweils gemessene Tagessummen der solaren Einstrahlung (Input) mit der Nutzenergielieferung des Kollektors (Output) [3]. Liegt dessen Leistung über einen längeren Zeitraum unter den Erwartungen, wird ein Alarmsignal übermittelt. Dabei bleiben nach bisherigem Kenntnisstand die erfahrungsgemäß besonders fehleranfälligen Bereiche Speicher und Nachheizung ausgeblendet.

ISTT-Verfahren

Am ZAE in München wurde ein Verfahren entwickelt, große Solarsysteme über einen Zeitraum von 4 bis 6 Wochen intensiv mit einer aufwändigen, aber mobilen Messtechnik zu untersuchen [4]. Die Messwerte werden über Mobilfunk übertragen und mit den Ergebnissen von TRNSYS-Simulationen verglichen. Fehler in Planung und Bauausführung können so erkannt werden. Bei diesem Verfahren wird in der Regel keine Warmwasserzapfung erfasst, daher ist dann eine Überprüfung des Anlagenenertrags nicht möglich [4]. Da das Verfahren nicht im Hinblick auf eine

Langzeitüberwachung entwickelt wurde, wird nur der Ist-Zustand kontrolliert. Es eignet sich daher insbesondere für Abnahmemessungen und für Streitfälle.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die bisherigen Lösungsansätze zur Langzeitüberwachung nur Teilbereiche solarintegrierter Wärmeversorgungssysteme erfassen sowie zum großen Teil nicht automatisierbar (und damit dauerhaft kostenintensiv) sind und meist nur eine Fehlerdetektion, aber keine Lokalisierung ermöglichen.

Im Rahmen eines Forschungsprojektes wird an der Universität Kassel ein neues, simulationsgestütztes Funktionskontrollverfahren entwickelt. Dabei soll sowohl eine kostengünstige Messtechnik zum Einsatz kommen als auch die zeitintensive Auswertung der Messdaten automatisiert werden. Die diesem Verfahren zugrunde liegenden Überlegungen werden nachfolgend vorgestellt.

Messtechnik

Um einen kostenintensiven Datenlogger einzusparen, wird zur Datenaufnahme auf den Solarregler und die ohnehin zum Anlagenbetrieb erforderlichen Sensoren zurückgegriffen. Die heutigen Solarregler sind in der Regel mit einer größeren Anzahl von Sensoreingängen ausgestattet, als zum Betrieb der Systeme notwendig ist. Dadurch können noch weitere Messfühler ergänzt werden. Darüber hinaus sind fast alle Regler mit einer Datenkommunikationsschnittstelle ausgestattet.

Ein zusätzlicher Sensor wird vor allem für die Strahlungsmessung benötigt, die für eine Anlagenüberwachung grundlegend ist. Eine Untersuchung zur Genauigkeit von Strahlungssensoren [5] zeigte, dass es kalibrierte PV-Zellen mit guter Genauigkeit gibt, deren Vorteile gegenüber einem Pyranometer wesentlich niedrigere Anschaffungskosten und ein einfacher auswertbares Messsignal sind. Hierzu wurde ein Messsignalumsetzer entwickelt, der das Ausgangssignal des Strahlungssensors auf den Signalbereich eines PT-1000 Temperatursensors transformiert. Da die meisten Solarregler mit diesen Temperatursensoren arbeiten, kann die solare Globalstrahlung somit an einem freien Temperatureingang gemessen werden.

Als Datenzwischenspeicher wurde ein PC-System ausgewählt. Dieses liest kontinuierlich über die serielle Schnittstelle den vom Regler kommenden Datenstrom ein, berechnet Minutenmittelwerte und speichert diese in Tagesdateien ab. Zusätzlich ist dieser Logging-PC über ein Modem an das Telefonnetz angeschlossen (siehe Bild 1).

Die Archivierung und Auswertung der Messdaten erfolgt zentral auf einem PC in den Räumen der Universität Kassel. Dieser PC kann automatisiert mit Hilfe einer Fernsteuerungssoftware die Messdateien des Vortags von verschiedenen Mess-PCs abrufen.

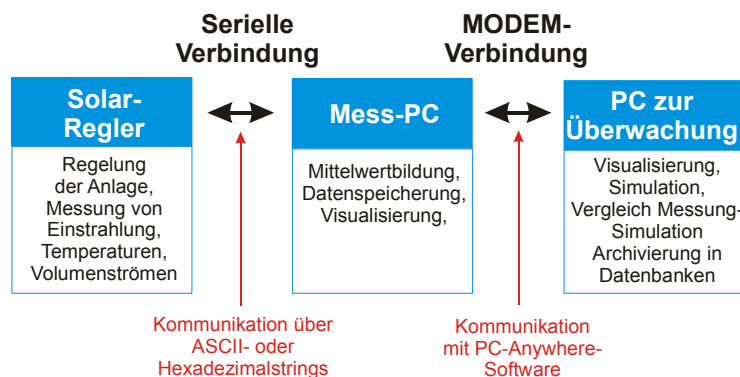


Bild 1: Schema der Messdatenaufnahme und -speicherung

Verfahren zur Funktionskontrolle

Das in der Entwicklung befindliche Funktionskontrollverfahren basiert auf dem Vergleich von Anlagenmesswerten mit Simulationswerten, die unter gleichen Randbedingungen (insbesondere Witterung und Verbrauch) ermittelten wurden. Dazu wird das gesamte System in der

Simulationsumgebung TRNSYS abgebildet und nachsimuliert. Die Kontrolluntersuchung erfolgt jeweils für einen vorangegangenen Zeitraum, z.B. für den Vortag, und läuft in mehreren aufeinander folgenden Schritten ab (siehe Bild 2).

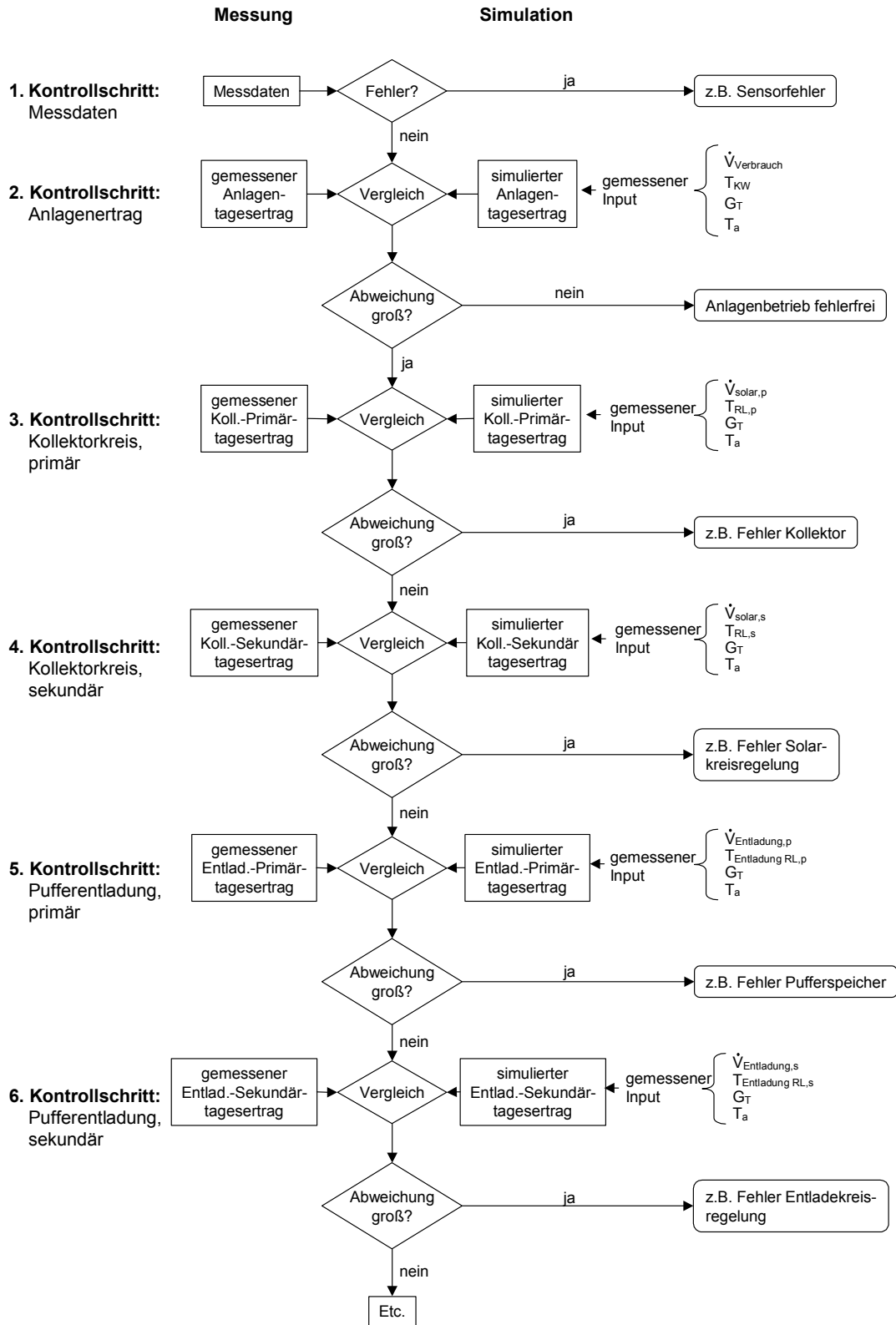


Bild 2: Ablaufschema der Funktionskontrolle

1. Kontrollschritt: Plausibilitätsprüfung

In einer ersten Prüfung sollen die Messdaten einer Plausibilitätsprüfung unterzogen werden. Diese hat im wesentlichen zwei Aufgaben: Einerseits sollen z.B. durch Sensordefekte oder Kabelbruch entstehende unrealistische „Messwerte“ abgefangen werden (z.B. Temperaturen größer 200°C). Dies ist in der Regel auch Voraussetzung für einen abbruchfreien Simulationslauf. Andererseits können durch Fehlfunktionen der Anlage untypische Betriebszustände entstehen, die sich direkt aus den Messdaten detektieren lassen, beispielsweise ein viel zu niedriger Volumenstrom im Kollektorkreis. Bei letzterem muss aber berücksichtigt werden, dass Volumenstromsensoren als Messsignal in der Regel Impulse pro Volumeneinheit abgeben. Bei Ein-/Ausschaltvorgängen kann es dann durch die Mittelungen zu erheblich kleineren Volumenströmen kommen. Diese dürfen nicht als Fehler interpretiert werden. Darüber hinaus lässt sich die Funktionsweise einiger Anlagenkomponenten ebenfalls direkt aus den Messdaten bestimmen. Beispielsweise können die eingesetzten Wärmeübertrager durch eine Energiebilanz überprüft werden, in dem aus den vier anliegenden Temperaturen und zusätzlich einem Volumenstrom (primär- oder sekundärseitig) der kA-Wert berechnet wird.

2. Kontrollschritt: Anlagenenergiebilanz

Sind im ersten Kontrollschritt keine Messwertprobleme detektiert worden, soll in einer zweiten Prüfung ermittelt werden, ob an dem untersuchten Tag überhaupt eine Minderung des Tagesertrags vorliegt, die durch eine Fehlfunktion hervorgerufen worden sein könnte. Ist dies nicht der Fall, können die weiteren Prüfungsschritte für diesen Tag entfallen. Zur Durchführung dieser Prüfung wird mit den Eingangsgrößen Kaltwassertemperatur, -zapfvolumen, Umgebungstemperatur und Einstrahlung eine nachträgliche TRNSYS-Simulation des Betriebsverhaltens der Solaranlage für den gemessenen Zeitraum durchgeführt. Durch den Vergleich von Energiesummen, z.B. auf Tagesbasis, wird nun festgestellt, ob die Anlage annähernd den in der Simulation ermittelten Ertrag erbracht hat. Ein Vergleich der Energiesummen kann an den Schnittstellen Nachheizung, Pufferspeicherentladung und Pufferspeicherbeladung vorgenommen werden. Als wichtigstes Vergleichskriterium für einen fehlerfreien Anlagenbetrieb wird die benötigte Nachheizenergie angesehen. Ist die Nachheizung nicht ins Messsystem integriert, ist die Pufferspeicherentladeenergie die wichtige Vergleichsgröße für den solaren Energiegewinn. Sollte allerdings eine Fehlfunktion im Solarkreis vorliegen, wird diese durch die Wirkung der Speicher erst zeitversetzt und evtl. weniger ausgeprägt (abhängig von Speicherisolation und TWW-Verbrauch) an der Entladeseite sichtbar. Ein zusätzlicher Vergleich der Energiesummen auf den Beladeseite kann daher sinnvoll sein. Liegen die Werte für den Anlagenenergieertrag (Messung/Simulation) eng beisammen, wird das Systemverhalten an diesem Tag als fehlerfrei bewertet. Weicht der gemessene Energieertrag jedoch deutlich von dem in der Simulation ermittelten Wert ab, liegt vermutlich eine Fehlfunktion vor. Um in diesem Fall eine aufwändige manuelle Fehlersuche zu umgehen, soll in weiteren Schritten der Fehler möglichst eng eingegrenzt, d.h. detektiert werden. Dazu werden mit Hilfe von weiteren TRNSYS-Simulationen einzelne Anlagenteile getrennt betrachtet.

3. Kontrollschritt: Energievergleich Kollektorwärmeübertrager primärseitig

Als erstes Teilsystem wird der Kollektorkreis an der Primärseite des Wärmeübertragers (WÜT) untersucht (siehe Bild 3, Pos. 1). Dazu wird das TRNSYS-Deck auf den Kollektorkreis beschränkt und mit den Messwerten Umgebungstemperatur, Einstrahlung, Kollektorrücklaufstemperatur und Primärvolumenstrom nachsimuliert.

Stimmen die Energiesummen zwischen Messung und Simulation gut überein, ist die Minderung des Systemertrags nicht auf eine Fehlfunktion der Kollektoren zurückzuführen. Als Fehlerquellen verbleiben nun ein zu geringer Volumenstrom im Kollektorkreis, ein Messfühlerausfall oder ein Fehler in den nachgeschalteten Teilsystemen der Anlage.

Stimmen die zuvor genannten Energiesummen nicht hinreichend überein, liegt ein Fehler im Primärkreis vor. Entweder sind Teile des Kollektorfeldes ausgefallen (z.B. Luft im Primärkreis) oder es gibt Probleme mit der Messtechnik, die im 1. Kontrollschritt nicht gefunden wurden.

4. Kontrollschritt: Energievergleich Kollektorwärmeübertrager sekundärseitig

Als zweites Teilsystem wird der Kollektorkreis an der Sekundärseite des WÜT untersucht (siehe Bild 3, Pos. 2). Neben den für alle Kontrollschritte festen Eingangsgrößen Umgebungstemperatur

und solare Einstrahlung kommen hier die Größen Rücklauftemperatur und Volumenstrom auf der Sekundärseite des Kollektorwärmeübertragers hinzu. Stimmen jetzt die Energiesummen zwischen Messung und Simulation nicht überein, liegt vermutlich ein Defekt an der Kollektorkreisregelung vor.

Kann in diesem Schritt keine Abweichung detektiert werden, folgt der nächste Kontrollschritt.

5. Kontrollschritt: Energievergleich Entladewärmeübertrager primärseitig

Als drittes Teilsystem wird die Primärseite des Entlade-WÜT untersucht (siehe Bild 3, Pos. 3). Spezifische Eingangsgrößen sind hier Rücklauftemperatur und Volumenstrom auf der Primärseite des Entladewärmeübertragers. Abweichungen in den Energiesummen (Messung und Simulation) lassen den Rückschluss auf ein Problem des Pufferspeicherbetriebs zu.

Kann auch in diesem Schritt keine Abweichung detektiert werden, folgt die Untersuchung des letzten Teilsystems.

6. Kontrollschritt: Energievergleich Entladewärmeübertrager sekundärseitig

Als viertes Teilsystem wird die Sekundärseite des Entlade-WÜT untersucht (siehe Bild 3, Pos. 4). Spezifische Eingangsgrößen sind Rücklauftemperatur und Volumenstrom auf der Sekundärseite des Entladewärmeübertragers. Abweichungen in den Energiesummen (Messung und Simulation) lassen den Rückschluss auf einen Defekt z.B. an der Regelung zu.

Beispiel

An einer Fehlfunktion, die am 21.03.02 an einer großen solarintegrierten Wärmeversorgungsanlage in Frankfurt (M) aufgetreten ist, sollen einige Verfahrensschritte beispielhaft diskutiert werden. Ein vereinfachtes Schaltbild dieser Anlage zeigt Bild 3. Bei dieser Anlage ist die Nachheizung räumlich getrennt installiert und wird nicht mit vermessen.

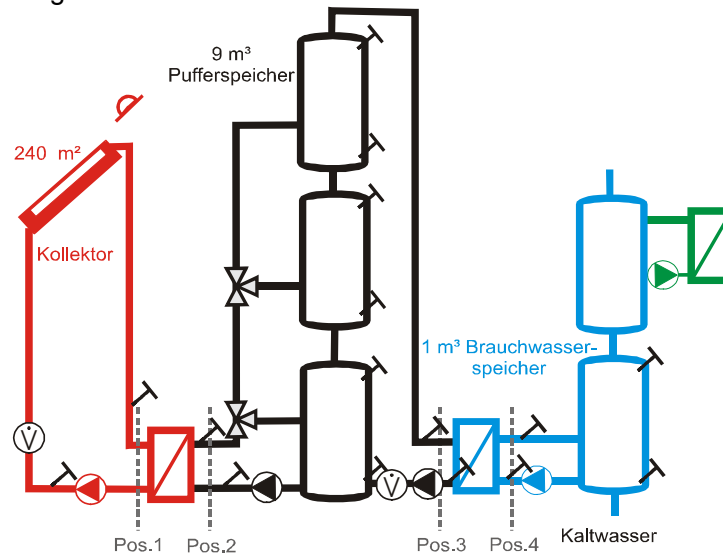


Bild 3: Vereinfachtes Schaltbild der im Folgenden diskutierten Solaranlage in Frankfurt (M)

Bei einer Überprüfung der Messdaten entsprechend dem Kontrollschritt 1 des beschriebenen Verfahrens wurde für den 21.03.02 um ca. 11:30 Uhr ein Absinken des primären Kollektorkreisvolumenstroms festgestellt, obwohl Einstrahlung und Speichertemperaturen eine weitere Beladung zugelassen hätten. Obwohl diese Fehlfunktion schon im 1. Kontrollschritt gefunden werden konnte, soll deren Auswirkung in den weiteren Kontrollschritten gezeigt werden.

Mit den Messdaten des genannten und der zwei vorherigen Tage wurde entsprechend dem Kontrollschritt 2 die Anlage nachsimuliert. In Bild 4 sind die aus Mess- und Simulationsdaten bestimmten kumulierten Tageserträge am Solarwärmeübertrager dargestellt.

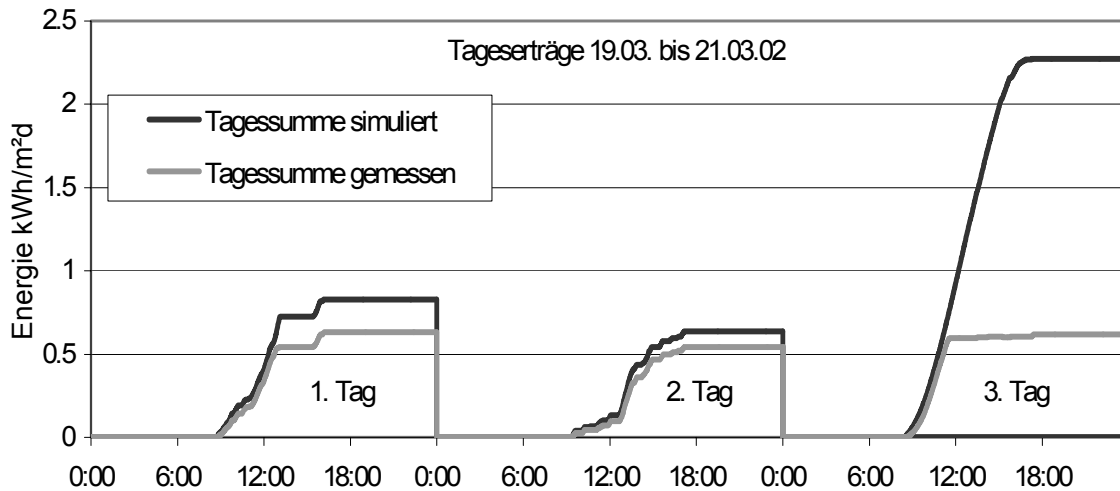


Bild 4: Kumulierter Tagesertrag (simuliert und gemessen), bestimmt an der Primärseite des Solarwärmeübertragers einer solaren Brauchwasseranlage in Frankfurt (M). Dargestellt ist der Zeitraum vom 19.03. bis 21.03.02. Eingangsdaten für die Simulation waren Globalstrahlung, Umgebungstemperatur, TWW-Volumenstrom und Kaltwassereintrittstemperatur entsprechend dem Kontrollschritt 2.

Die Grafik zeigt, dass an dem 3. Tag der gemessene Solarertrag wesentlich unter dem erwarteten (simulierten) Ertrag liegt. Dieses deutet auf eine Fehlfunktion der Anlage an diesem Tag hin. Zur weiteren Fehlereingrenzung wird somit Kontrollschritt 3 durchgeführt.

Bild 5 stellt die gemessene und simulierte Energielieferung der Kollektoren gegenüber. Dabei wurden Messwerte für die Kollektorrücklaufstemperatur und den Primärvolumenstrom in die Simulation eingelesen.

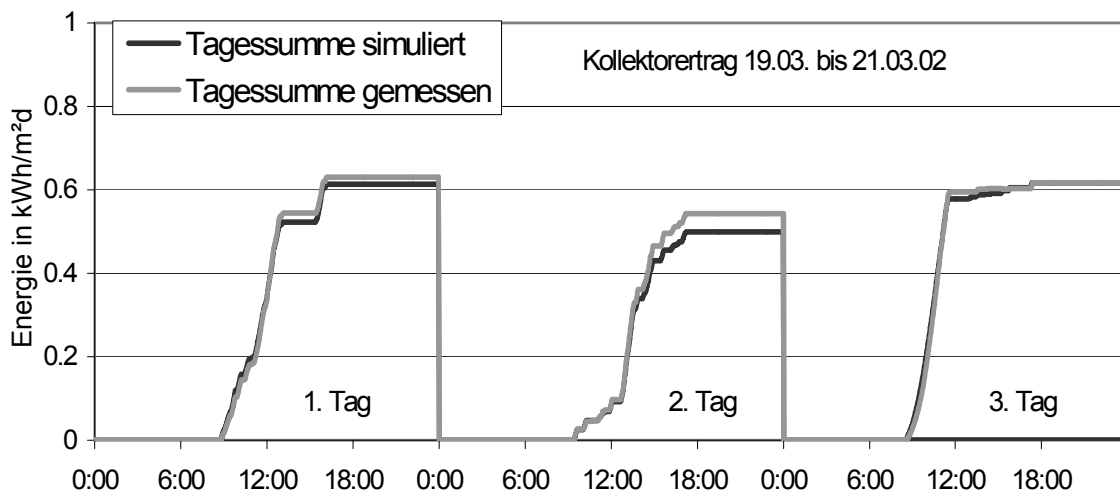


Bild 5: Kumulierter Tagesertrag (simuliert und gemessen), bestimmt am der Primärseite des Solarwärmeübertragers einer solaren Brauchwasseranlage in Frankfurt (M). Dargestellt ist der Zeitraum vom 19.03. bis 21.03.02. Eingangsdaten für die Simulation waren Globalstrahlung, Umgebungstemperatur, Kollektorrücklaufstemperatur und Kollektorrücklaufvolumenstrom entsprechend dem Kontrollschritt 3.

Wie aus der Grafik erkennbar, ist die Abweichung im Kollektorertrag (Messung vs. Simulation) bei diesen Simulations(rand)bedingungen auch am dritten Tag gering, an dem vorher bereits die Fehlfunktion detektiert wurde. Da die Kollektoren unter den vorgegebenen Randbedingungen (\dot{V}_{Sol} , T_{RL}) die in der Simulation erwartete Leistung erreicht haben, scheidet die Kollektoren als Fehlerquelle aus. Als mögliche Fehlerquellen kommen im Wesentlichen noch der primäre Volumenstrom, die Regelung oder eine Fehlerquelle in den übrigen Anlagenteilen in Frage.

In Bild 6 sind einige Messstellen für den Zeitraum des Auftretens der Fehlfunktion am 21.03.02 grafisch aufgetragen. Der primäre Volumenstrom sinkt um kurz vor 11 Uhr ab und fällt um ca. 11:30 Uhr ganz auf Null.

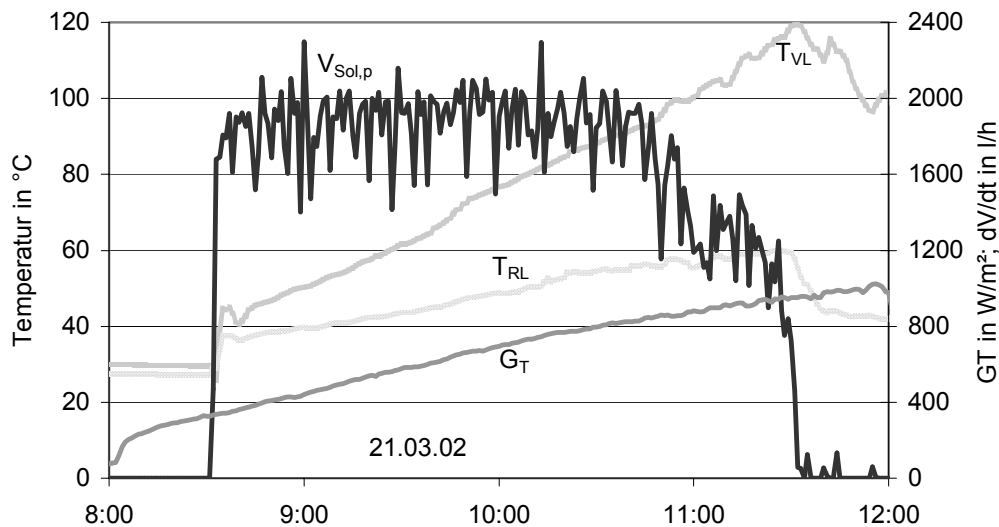


Bild 6: Kollektorzvolumenstrom, Kollektorzvorlauf- und Kollektorzrücklauftemperaturen sowie Globalstrahlung in Kollektorebene, aufgenommen an oben genannter Anlage am 21.03.02. Der Volumenstrom sinkt um kurz vor 11 Uhr ab und fällt um ca. 11:30 Uhr auf Null.

Zusammenfassung

Es wurde ein in der Entwicklung befindliches Verfahren zur Funktionskontrolle thermischer Solarsysteme vorgestellt. Da bei diesem Verfahren die Abbildung des Solarsystems in einer komplexen Simulationsumgebung (hier TRNSYS) erforderlich ist, ist das Verfahren eher für größere solargestützte Wärmeversorgungsanlagen geeignet. Die Kosten für die Messtechnik können durch Integration des Solarreglers in die Datenaufnahme gering gehalten werden.

Dieses Forschungsvorhaben wird unterstützt von der Rudolf Otto Meyer Umwelt-Stiftung und Firma Wagner & Co. Solartechnik Cölbe.

Literatur

- [1] Peuser, F. A., Croy, R., Rehrmann, U., Wirth, H. P.: *Solare Trinkwassererwärmung mit Großanlagen: praktische Erfahrung*, TÜV-Verlag GmbH, Köln, 1999.
- [2] Luboschik, U.: *Ergebnisse des EG-Projektes „GRS Garantierte Resultate von Solaranlagen“*, Tagungsband 8. Symposium Thermische Solartechnik, Regensburg, 1998.
- [3] Vanoli, K., Francisco, F.: *In-Situ Ertragsüberwachung thermischer Solaranlagen am Beispiel der ISFH-Technologie*. Tagungsband 11. Symposium Thermische Solartechnik, Staffelstein, 2001, S.134-148.
- [4] Schwenk, C., Kröger-Vodde, A., Schölkopf, W.: *Die Anwendung des ISTT-Verfahrens zur Erkennung von Anlagenmängeln*, Tagungsband 11. Symposium Thermische Solartechnik, Staffelstein, 2001, S.273-279.
- [5] Uecker, M., Krause, M., Vajen, K., Ackermann, H.: *Monitoring of Solar Systems - Theoretical and Experimental Investigation on Measurements of Solar Radiation*, Proceedings Euro Sun 2000, 19.-22.6.2000.