

Jahresbericht 2002, 3. März 2003

Qualitätssicherungssystem für Solaranlagen

Methode zur permanenten Funktionskontrolle thermischer Solaranlagen

Autor und Koautoren	Urs Grossenbacher
beauftragte Institution	EnergieBüro Grossenbacher
Adresse	Pestalozzistr. 10, 3280 Murten
Telefon, E-mail, Internetadresse	026 672 90 02, e-buero@sesamnet.ch
BFE Projekt-/Vertrag-Nummer	37529 / 77269
Dauer des Projekts (von – bis)	Mai 2000 - 01.12.2003

ZUSAMMENFASSUNG

Das Ziel dieses Projektes besteht darin, die im Rahmen der ersten Etappe [1] beschriebenen Verfahren zur permanenten Funktionskontrolle thermischer Solaranlagen auf realen, in Betrieb stehenden Anlagen in die Praxis umzusetzen und die Möglichkeiten und Grenzen derselben auszuloten. Dabei handelt es sich um die sog. Spektralmethode[3], welche das Anlageverhalten rein relativ bezogen auf das fehlerfreie Verhalten während einer Lernphase überwacht und die Energiebilanzmethode, welche aufgrund der stationären Temperaturbedingungen zum Einschaltzeitpunkt der Kollektorkreispumpe eine während dem ersten Pumpintervall dem Speicher zugeführte Wärmemenge prognostiziert und mittels Wärmemengenmessung am Speicher den Istwert mit dem Sollwert vergleicht.

Die Auswertungen der gemessenen Daten zeigten für beide Methoden durchaus erfreuliche Ergebnisse. D.h. es konnten mit beiden Verfahren die simulierten Störungen vom fehlerfreien Betrieb unterschieden werden. Mit der Spektralmethode, für welche nur ein einziger zusätzlicher Temperaturfühler notwendig ist, konnte bei beiden Anlagen eine Kollektorleistungsreduktion ab etwa 10 - 20% mit einer Treffsicherheit von ca. 80 - 90% erkannt werden. Dabei macht es allerdings einen Unterschied, ob die Leistungsreduktion mit einer Asymmetrie im Kollektorfeld (z.B. ein Drittel der Fläche komplett abgedeckt) oder einer gleichmässigen Reduktion (mit einer ganzflächigen Abdeckung, welche etwa 30% abschattet) erfolgt. Ebenso konnten mit der Spektralmethode Veränderungen im Kollektorkreisvolumenstrom (Pumpenleistung), eine veränderte Einschalttemperaturdifferenz sowie der Wechsel des Fluids (Viskosität, Wärmekapazität usw.) erkannt werden.

Die Energiebilanzmethode erfordert zwar vier zusätzliche Temperaturfühler hat aber den Vorteil, dass keine Lernphase notwendig ist. Das Problem dieser Methode besteht u.A. darin, den Durchfluss im Kollektorkreis mittels Temperaturflankendurchlaufzeitmessung zu erfassen, da versucht werden soll, ohne mechanische Volumenstrommessgeber auszukommen. Zur besseren Beurteilung der Möglichkeiten dieser Methode, sind noch weitere Messdaten und Auswertungen notwendig.

Projektziele

Obwohl im Bereich der thermischen Solarenergienutzung viele wertvolle Beiträge zur Verbesserung der Qualität und der Zuverlässigkeit der Anlagen in letzter Zeit umgesetzt worden sind, ergab z.B. die jüngste Evaluation der laufenden Pilot- und Demonstrationsanlagen, dass nach wie vor nur etwa drei-viertel der Anlagen wirklich problemlos und einwandfrei funktionieren [2]. Ein Aspekt unter vielen ist dabei die Schwierigkeit einer einfach realisierbaren permanenten Funktionskontrolle, welche analog dem roten Öldruckkontrollämpchen im Auto den Anlagebesitzer auf Fehlfunktionen oder/und Leistungsabfall des Solarteils seiner Anlage aufmerksam macht. Wichtig ist dabei, dass eine solche **Überwachung völlig autonom**, d.h. ohne Beurteilung durch den Anlagebetreiber oder einen Fachmann auskommt.

Im laufenden Berichtsjahr ging es darum, die in einer vorgängig abgeschlossenen ersten Projektphase gesammelten theoretischen Erkenntnisse in die Praxis umzusetzen und an real in Betrieb stehenden Anlagen auszutesten und die Möglichkeiten und Grenzen auszuloten.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Die untersuchten Anlagen:

Bei den mit zusätzlicher Sensorik ausgerüsteten Anlagen handelt es sich um eine 12 jährige Anlage mit 12 Quadratmeter Heatpipe-Kollektoren und einem 4'200-Liter Kombispeicher in Münchenwiler bei Murten (*Anlage Rüt*) und eine einjährige Anlage mit knapp 16 Quadratmeter aufgeständerten Flachkollektoren und einem 1'000-Liter Kombispeicher in Thun (*Anlage Thun*), welche nur für die Warmwasseraufbereitung verwendet wird. Letztere ist eine Kit-Anlage, welche in dieser Konfiguration als Standard-Anlage installiert wurde.

Datenakquisition:

Die für das Projekt notwendige Messinfrastruktur beschränkt sich auf **Messpunkte entlang dem Kollektorkreis** sowie die Erfassung der Speichertemperatur und des Kollektorkreispumpenstatus (für den Einschaltzeitpunkt). Dabei wurden zunächst keine Eingriffe an der bestehenden Sensorik und Steuerung vorgenommen, d.h. die Anlagen funktionieren entsprechend ihrer bestehenden Einstellungen. Die gemessenen Parameter sind:

Parameter	Messpunkt-Position	Funktion / Verwendung	Bemerkungen
T_{koll}	<i>Anlage Rüt</i> : auf dem Kollektor-Sammelrohr neben dem bestehenden Kollektorfühler <i>Anlage Thun</i> : in der Leitung beim Kollektoraustritt	- Zur Prüfung, ob Dieser Messpunkt auch für die Überwachung mittels Spektralmethode verwendet werden könnte. - Ev. Einsatz als Kollektorfühler bei der Steuerung mit modulierender Einschalttemperaturdifferenz (s. Energiebilanzmethode).	Bei der Anlage Thun muss dieser noch umgebaut werden, weil die Konstruktion des Kollektors bei stehender Pumpe an diesem Messpunkt nicht die Kollektortemperatur liefert.

Parameter	Messpunkt-Position	Funktion / Verwendung	Bemerkungen
T_{LTGA}	ca. in der Mitte des dem Aussenklima ausgesetzten Leitungsabschnitts im Kollektor-VL (d.h. warme Seite)	<ul style="list-style-type: none"> - Erfassung des transienten Temperaturverlaufs nach Pumpeneinschaltung für die Spektralmethode - Starttemperatur für den betreffenden Leitungsabschnitt bei der Energiebilanzmethode - Messung der Flankendurchlaufzeit 	Bei der Anlage Rüti ist der Fühler L_{TGA} nur aussen am Rohr angeklemmt. Die Auswertungen haben gezeigt, dass die damit erwirkte Dämpfung des Signals den Messwert für die Belange der Spektralmethode unbrauchbar macht.
T_{LTGI}	ca. 3m nach Gebäudeeintritt im Kollektor-VL		
T_{WTVL}	unmittelbar vor dem im Speicher integrierten Wärmetaucher	<ul style="list-style-type: none"> - Erfassung des transienten Temperaturverlaufs nach Pumpeneinschaltung für die Spektralmethode - Wärmemengenmessung zur Energiebilanzmethode - Messung der Flankendurchlaufzeit 	
T_{WTRL}	unmittelbar nach dem Wärmetauscher-Austritt	- Wärmemengenmessung zur Energiebilanzmethode	
T_{SP}	Speichertemperatur auf der Höhe des von der Steuerung verwendeten Speicherfühlers (2/3-Höhe)	- Bezugstemperatur zur Prognostizierung der mit dem ersten Pumpintervall in den Speicher geführten Wärmemenge (s. Energiebilanzmethode).	

Bei den für die Spektralmethode verwendeten Parametern ist es von ausschlaggebender Bedeutung, dass die Temperaturflanke, welche sich nach der Pumpeneinschaltung durch das Rohr bewegt, durch die dazu verwendeten Messfühler möglichst präzise abgebildet werden kann. Deshalb wurden diese Fühler sehr klein gewählt (4mm) und nass eingetaucht montiert d.h. ohne Tauchhülse, damit sie **möglichst flink** reagieren.

Die Messdatenaufzeichnung und –Speicherung erfolgt mittels SPS (*SAIA-PCD1*) und einem Leitsystem (*VisiPlus, SAIA*) auf einem PC. Die maximale zeitliche Auflösung der Messpunkte beträgt eine Sekunde.

Signalanalyse und Berechnungsmethoden:

Die Auswertung der Massdatenreihen erfolgt offline, d.h. im Büro auf normalen EDV-Instrumenten. Dabei werden entsprechend der beiden zu verifizierenden Methoden folgende Verarbeitungsschritte durchgeführt:

Spektralmethode:

1. Festlegung eines Zeitfensters, pro Parameter:
 - Start = Pumpeneinschaltzeitpunkt
 - Ende = Erreichen eines mehr oder weniger stationären Zustandes nach Durchgang der hohen Temperaturspitze.
2. Ableitung des Temperatursignals nach der Zeit:
Damit werden die absoluten Signalanteile (Temperaturen) eliminiert.
3. Normierung des abgeleiteten Signals:
Das abgeleitete Signal wird auf dem festgelegten Zeitabschnitt durch dessen eigenes Integral dividiert. Damit beträgt das Integral für alle untersuchten Signale immer 1 und es können Signalmerkmale, welche durch unterschiedliche Betriebsbedingungen der Anlage herrühren über alle

Einschaltvorgänge ausgeglichen werden. Es bleibt dann alleine die Charakteristik der Temperaturänderung in Funktion der Zeit übrig.

4. Fouriertransformation des abgeleiteten und normierten Signals:
Mittels FFT (Fast Fourier Transformation) wird die Signalcharakteristik als Amplitudenwerte für mehrere Frequenzen im Spektralbereich abgebildet.
5. Bildung von Merkmalsvektoren:
Die signifikanten Amplitudenwerte von n Frequenzen werden als Vektor mit n Dimensionen weiterbehandelt bzw. gespeichert.
6. Definition des Referenz-Merkmalvektors:
Nach Abschluss der Lernphase (allgemein gültige Definition der Länge und Verteilung der Lernphase über verschiedene Jahreszeiten steht noch aus) wird der Mittelwert der aufgezeichneten Merkmalsvektoren als Referenzvektor bezeichnet.
7. Definition des Grenzwertes zur Unterscheidung von normalem zu fehlerbehaftetem Verhalten:
Die Addition der Standard-Abweichung der Merkmalsvektoren während der Lernphase zum Referenzvektor ergibt den Grenzwert, mit dem die aufgezeichneten Merkmalsvektoren ausserhalb der Lernphase fortan verglichen werden (s. Fig. 1).

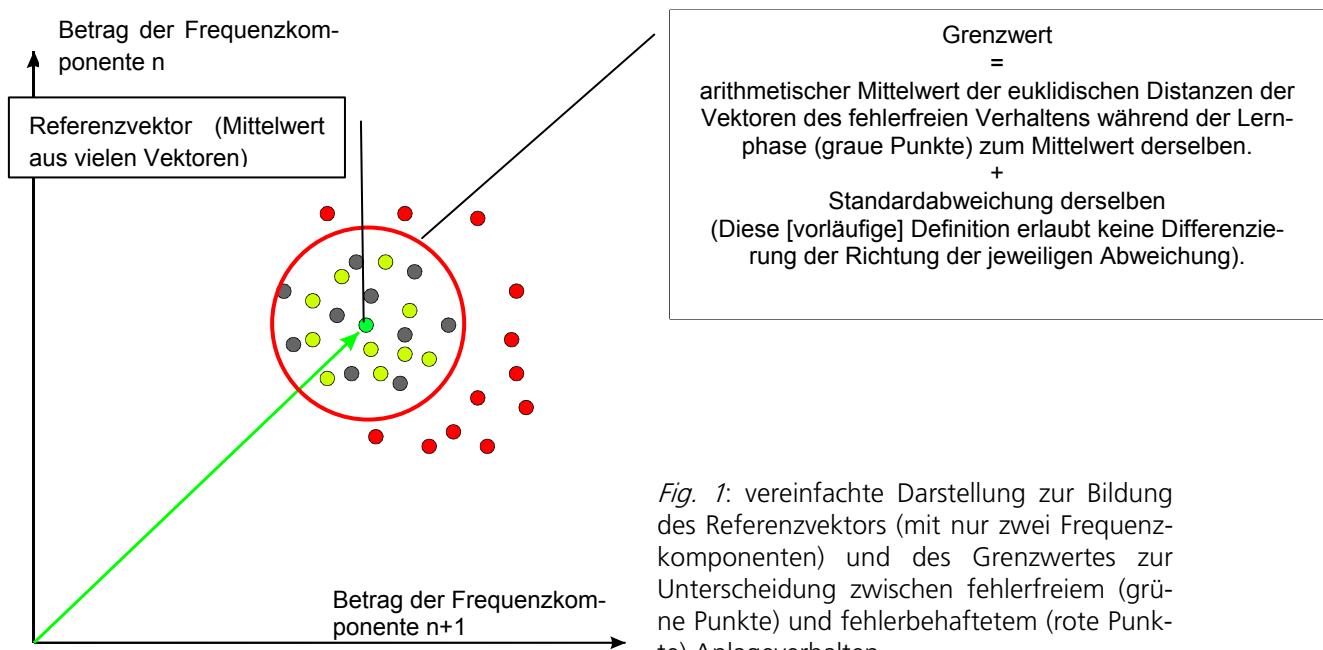


Fig. 1: vereinfachte Darstellung zur Bildung des Referenzvektors (mit nur zwei Frequenzkomponenten) und des Grenzwertes zur Unterscheidung zwischen fehlerfreiem (grüne Punkte) und fehlerbehaftetem (rote Punkte) Anlageverhalten.

Energiebilanzmethode:

1. Für die Energiebilanzmethode müssen zunächst die Starttemperaturen der verschiedenen Fluid-Teilvolumina im Kollektorkreis zum Zeitpunkt der Pumpeneinschaltung gemessen werden: TKOLL, TLTGA, TLTGI, TSP (Bezugstemperatur). Zusammen mit den jeweiligen Volumina (anlagespezifische Konstanten) kann daraus die dem Speicher im ersten Pumpintervall zugeführte Wärmemenge vorab berechnet werden. Grundlage dazu bildet das Energiebilanzmodell von Böhringer [4]:
Die im ersten Pumpintervall in den Speicher geführte Energie entspricht der Summe aus:
 - Wärme im Kollektor
 - Wärme in der Außenleitung
 - Wärme in der Innenleitung

2. Aus der Zeitdifferenz des Temperaturflankendurchlaufs (Maximum des abgeleiteten Temperatursignals) bei der Messstelle von T_{LTGA} oder T_{LTGI} zur Messstelle T_{WLVL} kann durch die Division mit dem dazwischenliegenden Fluidvolumen (anlagespezifische Konstante) auf einfache Weise der momentane Volumenstrom berechnet werden.
3. Aus dem so ermittelten Volumenstrom kann die erforderliche Zeit für ein volles Pumpintervall, d.h. eine komplette Umwälzung des gesamten Kollektorkreisinhalts, berechnet werden.
4. Mit dem Volumenstrom und der über dem Wärmetauscher kontinuierlich gemessenen Temperaturdifferenz kann die Wärmemenge, die dem Speicher entnommen bzw. zugeführt wird berechnet werden.
5. Aus dem Vergleich der prognostizierten Wärmemenge gem. Punkt 1 mit der gemessenen Wärmemenge gem. Punkt 4 zum Zeitpunkt des vollendeten Pumpintervalls gem. Punkt 3 kann ermittelt werden, ob ein Fehler vorliegt oder ob die Wärmemenge dem erwarteten Wert entspricht und damit die Anlage fehlerfrei funktioniert.

Die simulierten Störungen:

Es soll untersucht werden, mit welcher Methode sich welche Fehler erkennen lassen. Die zu simulierenden Störungen sind in folgende **vier Kategorien** aufgeteilt:

1. Störungen der Kollektorleistung
2. Störungen im Durchfluss
3. Störungen im Bereich der Steuerung
4. Störungen im Wärmeübergang

Systematisch untersucht wurden bisher verschiedene Arten der **Verminderung der Kollektorleistung**. Dabei wird unterschieden, ob mit einer Teilabdeckung der Kollektorfläche ein Teil des Kollektorfeldes „thermisch ausser Betrieb“ genommen wird oder ob die gesamte Fläche mittels einer Teilabschattung eine gleichmässig verteilte Einstrahlungsreduktion erfährt (s. Fig. 2).



Fig. 2: mit einem Netz komplett abgedecktes Kollektorfeld in Thun, das die Einstrahlung um etwa 30 .. 40% verringert.

Des weiteren wurden mittels Verstellen der Pumpenstufe der Durchfluss variiert, durch Veränderung der Einschalttemperaturdifferenz der Steuerung ein Fehler der Steuerung oder Drift eines Fühlers simuliert und durch die Auswechselung des Fluids eine veränderte Charakteristik im Bereich des Wärmeübergangs hervorgerufen.

Die Ergebnisse:

Mittels Spektralmethode:

Zum jetzigen Zeitpunkt liegen noch wenige quantitative Resultate definitiver Art vor, weil die Berechnungsmethoden beider Überwachungskonzepte sich in laufender Bearbeitung, mit dem Ziel der **Optimierung der Trefferquote**, befinden. Aber es liegen natürlich Resultate vor, die bereits **gute Hinweise zur Tauglichkeit der einen oder anderen Methode** liefern. So konnte z.B. bei der Anlage Rüti **mit dem Messpunkt L_{TG} eine Kollektorleistungsreduktion ab etwa 10 - 20% mit einer Treffsicherheit von 88%** erkannt werden. Dies bei insgesamt 288 Einschaltvorgängen, wovon 111 als fehlerfreie Lernphase bezeichnet wurden und ausserhalb derselben 68 Einschaltvorgänge mit unterschiedlich reduzierter Kollektorleistung aufgezeichnet wurden.

Weitere Ergebnisse sind noch nicht quantitativ detailliert ausgewertet aber es lässt sich feststellen dass:

- Eine Teilabdeckung des Kollektorfeldes bewirkt eine Asymmetrie in der Sprungantwort der Temperatur gegenüber dem fehlerfreien Verhalten und kann wesentlich klarer erkannt werden als eine homogene ganzflächige Leistungsreduktion. Dieser Aspekt konnte insbesondere bei der Anlage Thun deutlich gezeigt werden.
- Bei der Anlage Rüti musste aus von dritten verursachten Umständen im Oktober das Fluid ausgewechselt werden. Erstaunlicherweise konnte diese Veränderung mit der Messstelle T_{WTVL} problemlos (d.h. der Merkmalsvektor dieser Messstelle liegt seither immer ausserhalb des Grenzwertes) nachgewiesen werden.
- Eine Verringerung des Durchflusses kann am besten mit der Messstelle T_{WTVL} nachgewiesen werden. Das ist soweit auch logisch, weil dieser Messpunkt die grösste Zeitdifferenz gegenüber dem Referenzverhalten erfährt.

Mittels Energiebilanzmethode:

Bei diesem Verfahren liegt vorläufig u.A. noch die Schwierigkeit bei einer Aussage zur Genauigkeit der angewandten Methode zur **Volumenstrommessung mittels Temperaturflankendurchlaufzeitmessung**. Bei den bisherigen Auswertungen wurde die in Funktion der Temperatur unterschiedliche Viskosität noch nicht berücksichtigt. Ohne die Korrektur dieses Einflusses konnte bei der Anlage Rüti eine Kollektorleistungsreduktion im Frühsommer von 10 - 40% recht deutlich nachgewiesen werden. Allerdings zeigte sich dann im Verlauf des Sommers, das bei höheren Systemtemperaturen die Fluktuationen der Differenz zwischen prognostizierten und gemessenen Werten so gross und undifferenzierbar wurden, dass sie sich kaum mehr von der im Frühling vorgefundenen, durch Störungen bewusst hervorgerufenen Resultaten, unterscheiden liessen.

Nationale Zusammenarbeit

In der Schweiz sind in der jüngsten Vergangenheit wenige Projekte in Arbeit, welche sich mit einer ähnlichen Thematik befassen und daher eine Zusammenarbeit sich etablieren liesse. Im Rahmen eines rein privatwirtschaftlichen Projektes ist die Firma Agena aus Moudon daran, eine Steuerung für Solaranlagen mit zusätzlichen Überwachungsalgorithmen auszurüsten. Anlässlich einer gemeinsamen Sitzung in Yverdon am 14.06.2002 wurden die beiden Konzepte (Agena und Spektralmethode) vorgestellt und verglichen. Dabei stellte sich heraus, dass die beiden unterschiedlichen Ansätze sich kombinieren liessen, um eine möglichst umfangreiche Palette an möglichen Fehlfunktionen zu erkennen.

Internationale Zusammenarbeit

Im Rahmen der ersten Projektetappe wurden verschiedene Kontakte mit Forschungsinstituten im benachbarten Ausland aufgenommen, weil v.a. in Deutschland aufgrund gewisser Förderinstrumente der Bedarf an Möglichkeiten zur Leistungsgarantie bei thermischen Solaranlagen vorhanden war. Aus solchen Kontakten stammt das Konzept der Energiebilanzmethode [4] sowie die Volumenstrommessung mittels Temperaturflankendurchlaufzeitmessung [5].

Bewertung 2002 und Ausblick 2003

Die Arbeiten im Berichtsjahr zeigten, dass eine permanente Überwachung mittels einfacher Methoden, d.h. mit wenig zusätzlicher Messtechnik, durchaus möglich ist. Die Anwendung der Spektralmethode erwies sich als möglich und auch die Energiebilanzmethode ergab durchaus positive Ergebnisse.

Die nun anstehenden Arbeiten konzentrieren sich auf vier zentrale Aspekte:

Die Methoden müssen verfeinert werden:

- Optimierung der Länge des Zeitfensters bei der Spektralmethode
- ev. weitergehende Differenzierungen bei der Wahl des Referenzvektors (z.B. ein Referenzvektor pro Jahreszeit o.ä.)
- Korrektur des Volumenstroms durch den Einfluss der variablen Viskosität
- Kombinierung der Methode von Böhringer [4] zur Modulierung der Einschalttemperaturdifferenz mit der Überwachung der dem Speicher im ersten Pumpintervall zugeführten Wärmemenge (Dazu ist der Kollektorfühler notwendig).

Die Genauigkeit der Fehlererkennung und deren Grenzen müssen noch besser validiert werden:

- d.h. die möglichen Störungen müssen wiederholt und bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen simuliert werden um die Fähigkeiten der angewendeten Methoden besser auszuloten.

Die Methoden müssen verallgemeinert werden:

- Die bis jetzt vorliegenden Erkenntnisse basieren auf zwei Anlagetypen. Es muss festgelegt werden, wo welche Überwachung angewendet werden kann und wo dies aus anlagetechnischen Gegebenheiten nicht möglich sein wird (z.B. Schwerkraftanlagen, Drainback-Anlagen, Speicher mit externem Wärmetauscher usw.)
- Die eigentlichen Überwachungsalgorithmen sollen sich möglichst selber konfigurieren. V.a. bei der Spektralmethode muss ein Verfahren definiert werden, welches z.B. selber die Lernphase als beendet erklärt, die Länge von Zeitfenstern wählt usw.

Grundlagen für die praktische Umsetzung schaffen:

- Die gesammelten Erkenntnisse sollen in einem industriell umsetzbaren Pflichtenheft münden

Referenzen

- [1] SYNETRUM AG, Dr. Ch. Olivier, U. Grossenbacher.: ***Qualitätssicherung bei Solaranlagen: Permanente Funktionskontrolle***, 50 Seiten, ENET-Nr. 190242, 1998
- [2] ***Nationale Tagung 2002 ,Solarthermie - von der Forschung in die Praxis'*** (Referat Programmleitung P- & D-Projekte), Unterlagen zu beziehen beim Institut für Solarenergie SPF, Oberseestr. 10, 8640 Rapperswil, Fax 055 222 48 44
- [3] R. Räber: ***Spektralmethode zur Fehlerfrüherkennung in wärmetechnischen Anlagen***, Diss ETH Nr. 12234, ETH-Zürich, 1997
- [4] V. Böhringer: ***Ertragsoptimierung thermischer Solaranlagen durch modulierte Schalttemperaturdifferenz***, VDI-Verlag 'Heizung Lüftung/Klima Haustechnik' 48/97, esaa GmbH, D-Mühlacker, 1997
- [5] H. Altgeld, M. Mahler, F. Schuster, D. Theis: ***Fehlererkennung bei thermischen Solaranlagen***, aus Otti-Tagungsband zum achten Symposium Thermische Solarenergie, HTW des Saarlandes D-Saarbrücken, 1998