

Das Verhalten von Solarsystemen im Stagnationsfall

Robert Hausner, Christian Fink
AEE - Arbeitsgemeinschaft ERNEUERBARE ENERGIE
Feldgasse 19, A-8200 Gleisdorf
Tel.: +43-3112 / 5886, Fax: DW -18
e-mail: r.hausner@aee.at, c.fink@aee.at

1 Einleitung

Ein günstiges Stillstandsverhalten ist für einen langjährigen, zuverlässigen und möglichst wartungsfreien Betrieb von thermischen Solaranlagen von großer Bedeutung. Insbesondere bei Anwendungen zur solarthermischen Heizungsunterstützung rückt das Thema Stillstandsverhalten in das Blickfeld von Herstellern und Betreibern, denn diese Anlagen befinden sich im Sommer aufgrund fehlender Last sehr häufig im Stillstand. Dieser Betriebszustand stellt für alle Komponenten im Kollektorkreis eine erhöhte Belastung dar, die sich deutlich von der Belastung bei normalen Betriebsbedingungen unterscheidet:

Hohe Temperaturbelastungen können im Technikraumbereich einen Ausfall von Systemkomponenten und Lecks verursachen. Öffnen des Überdruckventils, obwohl die üblichen Auslegungsrichtlinien bezüglich Ausdehnungsgefäßgröße und Druckverhältnisse eingehalten wurden, kann auftreten und über Geräuschbelästigungen durch Kondensations-Druckschläge in Primär- und Sekundärkreis wird von Seiten der Anwender geklagt.

Aus diesem Grund wurde in dem von der EU unterstützten Projekt »Stagnation Technology for Thermal Solar Systems« (CRAFT-JOULE-Programm) mit den Firmen Sonnenkraft, Solvis, Technische Alternative, Tyforop und Scherzinger Pumpen in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer ISE und der AEE - Arbeitsgemeinschaft ERNEUERBARE ENERGIE, das Verhalten thermischer Kollektorsysteme im Stillstand untersucht. Im Vordergrund stand hierbei, genauere Erkenntnisse über den Verlauf der Temperaturen und Drücke im System bei Stillstandssituationen zu bekommen. Die Arbeiten sollen die Firmen unterstützen, um ihre Anlagen und Komponenten im Hinblick auf unproblematisches und zuverlässiges Stillstandsverhalten weiterzuentwickeln. Zu diesem Zwecke wurden vom Fraunhofer ISE messtechnische Untersuchungen an Testsystemen sowie von der AEE „Insitu“ Messungen an drei Feldanlagen über zwei Sommerperioden durchgeführt.

Der nachfolgende Bericht zeigt Ergebnisse und Erkenntnisse aus den von der AEE durchgeführten Messreihen an drei Feldanlagen.

2 Messungen

Drei solcher problembehafteter, mit Flachkollektoren ausgestatteter Systeme mit repräsentativer Dimensionierung und Anlagenhydraulik, jedoch unterschiedlicher Kollektorhydraulik, wurden aus einer Vielzahl von Anlagen ausgewählt, mit einem Messsystem versehen und während zweier Sommer vermessen. Erfasst wurden dabei die solare Einstrahlung in Kollektorebene, die Umgebungstemperatur, die Temperaturverteilung im Kollektorfeld, mehrere Temperaturen von Vor- und Rücklaufleitungen, am Wärmetauscher auch sekundärseitig und am Ausdehnungsgefäß, der Druck und

die Strömungsgeschwindigkeiten in Vor- und Rücklauf und der Druck am Ausdehnungsgefäß.

3 Prinzipieller Ablauf des Stagnationsvorganges

Auf Basis der durchgeführten Messungen kann der Stagnationsvorgang allgemein beschrieben werden: Es treten aufeinanderfolgend fünf verschiedene und klar unterscheidbare Phasen unterschiedlicher Systemzustände auf. Im folgenden ist der Vorgang beschrieben für eine Anordnung des Rückschlagventils im Zuge der Vorlaufleitung, so dass Flüssigkeit über Vor- und Rücklaufleitung zum Ausdehnungsgefäß gedrückt werden kann, umgekehrt aber nur über die Rücklaufleitung den Kollektor wieder erreicht.

- **Phase 1 – Flüssigkeitsdehnung**

Nach Abschalten der Kollektorkreispumpe aus dem normalen Betriebszustand heraus, steigen die Kollektortemperaturen rasch gleichmäßig an, bis an einer Stelle des Absorbers der Verdampfungsvorgang beginnt. Der Anstieg des Systemdruckes ist bis hierher nur sehr gering.

- **Phase 2 – Ausdrücken der Flüssigkeit aus dem Kollektor durch erste Dampfbildung**

Der Beginn der Verdampfung entspricht der Siedetemperatur, die sich aus dem lokal herrschenden Druck ergibt. Diese Siedetemperatur ist vorerst noch relativ nieder.

Eine kleine Menge Medium verdampft und schiebt einen größeren Teil des flüssigen Kollektorinhalts aus, bis die Vor- und Rücklaufleitungen von Sattdampf erreicht werden. Da große Mengen Flüssigkeit in das Ausdehnungsgefäß gelangen, steigt der Systemdruck in dieser Phase rasch an. Ebenso die Siedetemperatur im mit Sattdampf gefüllten Bereich. Die Dauer dieser Phase beträgt nur einige Minuten.

Die Temperaturen der Vor- und Rücklaufleitungen im Technikraum und der Zulaufleitung zum Ausdehnungsgefäß sind zuerst nieder (nach Pumpenstillstand abgekühlt) und steigen später (heißer Kollektorinhalt) an, erreichen jedoch nicht die ursprünglich hohen Kollektortemperaturen aufgrund von Abkühlverlusten in den Leitungen. Sind diese Leitungen kurz und haben niedrige Abkühlverluste, so kann es zu unzulässig hohen Temperaturbelastungen am Ausdehnungsgefäß und anderen Systemkomponenten kommen, insbesondere wenn bei hoch gewähltem Systemdruck das Verdampfen erst bei höheren Temperaturen beginnt. Lange und ungedämmte Leitungen zum Ausdehnungsgefäß senken dessen Temperaturbelastung deutlich.

- **Phase 3 – Leersieden des Kollektors – Phase mit Sattdampf**

Der Druckanstieg verlangsamt sich. Ein kleinerer, jedoch nicht unbedeutender Teil des Kollektorinhaltes ist in den Absorber- und Sammelrohren noch in flüssiger Form vorhanden und verdampft langsam. In dieser Phase wird an allen Messstellen entweder flüssiges Medium, oder Sattdampf im Gleichgewicht mit Flüssigkeit beobachtet. Die Vor- und Rücklaufleitungen werden zunehmend nach unten in Richtung Technikraum mit etwa gleichem Flüssigkeitsniveau leergedrückt und der Wärmetauscher kann vom Dampf erreicht werden. Dies bewirkt auch auf dessen Sekundärseite Dampfbildung. Der Druck am Ausdehnungsgefäß erreicht seinen Maximalwert und

damit auch die Siedetemperatur. Die vom Kollektor mittels Dampf abgeführte Energie (ergibt sich aus dem Kollektorwirkungsgrad bei hohen Temperaturen) steht dabei im Gleichgewicht mit den Wärmeverlusten des unter Dampf stehenden Bereiches in den Rohrleitungen, den Armaturen und am Wärmetauscher. Nach dem Prinzip des Wärmerohres wird hierbei sehr effektiv Energie bei nahezu konstanter Temperatur von der Wärmequelle bis zu allen Wärmesenken transportiert, wobei hier der Dampf wieder kondensiert und als Flüssigkeit nach unten abläuft. Die Temperaturunterschiede zwischen Wärmequelle (Kollektor) und Wärmesenke (z. B. Wärmetauscher) sind dabei niedrig (Größenordnung wenige K), da nur geringe Druckunterschiede bestehen. Das bedeutet, dass der maximal erreichte Druck (an der Phasengrenze Dampf - Flüssigkeit) die maximale Temperaturbelastung der vom Dampf erreichten Anlagenkomponenten entsprechend des Zusammenhanges Druck – Siedetemperatur bestimmt.

- **Phase 4 – Leersieden des Kollektors – Phase mit Sattdampf und überhitztem Dampf**

In Bereichen des Kollektors beginnt die Flüssigkeit vollständig zu verdampfen - sie überhitzen. Dadurch sinkt der Kollektorwirkungsgrad weiter und die mit Dampf abtransportierende Energiemenge sinkt, so dass auch die "Verlustfläche" der Anlage sinken kann. Das Dampfvolument und damit auch der Anlagendruck und die Satt-dampftemperatur sinken mit sich ausdehnenden Überhitzungsbereichen im Kollektor auch bei gleichbleibender solarer Einstrahlung. Flüssigkeit wird aus dem Ausdehnungsgefäß langsam in Richtung Kollektor geschoben und erreicht den Kollektorzulauf. Das Flüssigkeitsniveau kann hier längere Zeit stabil verbleiben.

Die Überhitzungsphase kann an wolkenlosen Tagen einige Stunden dauern und endet durch sinkende Einstrahlung.

- **Phase 5 – Wiederbefüllen des Kollektors**

Die Wiederbefüllung des Kollektors erfolgt über die Rücklaufleitung.

3.1 Extrembelastungen

Höchste Systemdrücke und damit Temperaturbelastungen treten an den Anlagen nicht an wolkenlosen Tagen auf, sondern an klaren Tagen mit wechselnder Bewölkung. So wurden an solchen Tagen des öfteren kurzfristig (einige Minuten) Globalstrahlungswerte in Kollektorebene über 1200 W/m^2 gemessen, welche zu deutlich höherem Dampfvolument und damit weitreichenderer Temperaturbelastung der Anlagenkomponenten führte als wolkenlose Tage. Die höchsten Absorberrtemperaturen im Überhitzungsbereich wurden jedoch an wolkenlosen Tagen in der Phase 4 mit etwa $210 \text{ }^\circ\text{C}$ gemessen.

3.2 Kritische Phase

Als kritischste Phase für Anlagenkomponenten und Wärmeträgermedium erweist sich die Phase 3 des Stagnationsvorganges. Die Menge der Flüssigkeit, die in dieser Phase im Kollektor zur Verdampfung zur Verfügung steht (in Phase 2 nicht ausgedrückte Flüssigkeitsmenge), bestimmt die Zeitdauer der extremen Temperaturbelastungen der Anlagenkomponenten und wegen der Dynamik der Erwärmungsvorgänge auch mit die Reichweite des Sattdampfvolumentens.

In Absorberkonstruktionen aus denen größere Mengen Restflüssigkeit nicht abfließen können, kommt es wegen der bevorzugten Verdampfung von Wasser zu einer Konzentrationssteigerung der Glykol- und Zusatzkomponenten und damit auch zu einer bedeutenden Steigerung des Siedepunktes der restlichen Mischung. Dies führt

dann so weit, dass eine bedeutende Menge hochkonzentrierter Restflüssigkeit nicht mehr verdampft und sehr lange Zeit extrem hohen Temperaturen ausgesetzt ist, was zu einer beschleunigten Degradation des Wärmeträgers führt.

Aus diesen Gründen sollten Kollektoren so konstruiert sein, daß in Phase 2 eine möglichst weitgehende Entleerung möglich ist (Abb.1).

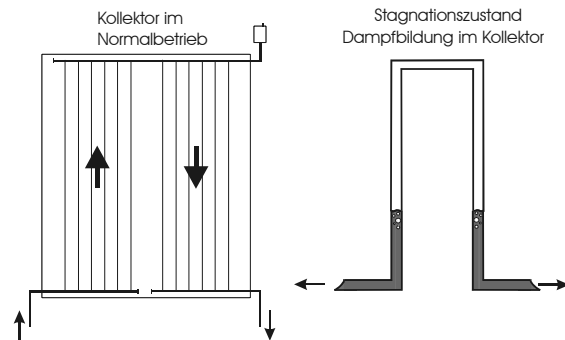


Abb. 1. Schema eines gut entleerenden Kollektors

3.3 Dimensionierung des Ausdehnungsgefäßes

Bei schlecht entleerenden Kollektorsystemen ist bei der Dimensionierung des Ausdehnungsgefäßes nicht nur, wie bisher, das Dampfvolumen innerhalb des Kollektors, sondern auch das mitunter wesentlich größere außerhalb des Kollektors in Rechnung zu stellen um das Ansprechen des Sicherheitsventils zu vermeiden.

4 Vermeidung von unzulässigen Temperaturbelastungen an Anlagenkomponenten

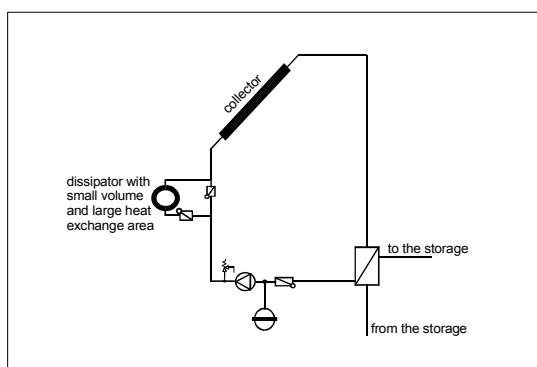
Bei schlecht entleerenden Kollektoren wurden einige Maßnahmen zur Vermeidung bzw. zur Begrenzung des Dampfvolumens auf unkritische Bereiche erfolgreich erprobt:

- **Vermeidung des Stagnationszustandes mittels Nachtkühlung**

Während des Sommers kann bei vollem Speicher durch nächtlichen Betrieb der Anlage Überschussenergie über den Kollektor weggekühlt werden. Durch geeignete Regelstrategie kann der Pumpenergieaufwand minimiert werden.

- **Gezielte Abfuhr der im Stagnationsfall über Dampf transportierten Energie**

➤ **Einsatz eines Stagnationskühlers**

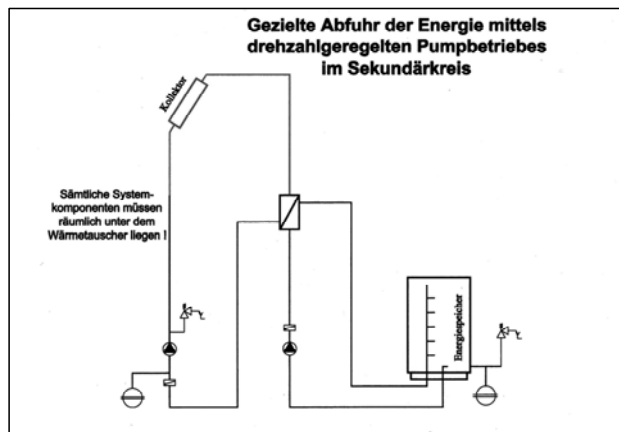


Im Stagnationszustand Kondensation des Dampfes durch einen kleinvolumigen einfachen Luftkühler relativ geringer Leistung im primären Solarkreis der, automatisch gesteuert (entweder mit Dreiwegeventil oder Rückschlagventilen), auch bei Stromausfall, das Dampfvolumen begrenzt. Dieser sollte, wenn möglich, nahe am Kollektor eingesetzt werden (Abb. 2).

Abb. 2. Schema - Stagnationskühler

➤ Einsatz des externen Wärmetauschers und der Sekundärkreispumpe

Geregelte Abfuhr der Dampfleistung über den Wärmetauscher in den Sekundärkreis



(geregelte Sekundärkreispumpe) und damit eine Verhinderung der Dampfbildung im Sekundärkreis und Begrenzung der Dampfausbreitung im Primärkreis. Als Regelgröße kann die Temperatur am primären Wärmetauscherzulauf verwendet werden. Der Wärmetauscher sollte auf hohem Niveau montiert sein. Der zusätzliche Energieeintrag in den Speicher ist relativ niedriger (Abb. 3).

Abb. 3. Schema des Einsatzes einer Stagnationskühlung über den Wärmetauscher.

5 Kondensationsschläge

Aus der Vielzahl möglicher Ursachen für Kondensationsschläge interessieren hier in erster Linie Kondensat-induzierte Schläge in horizontalen Rohren und Dampfblasen-induzierte Schläge. Im ersten Fall streicht Sattdampf über Flüssigkeitsbereiche in horizontal gelegenen Rohren und wird durch entstehende Flüssigkeitswellen eingeschlossen. Ein eingeschlossener Bereich kondensiert und die Flüssigkeit schlägt auf die Rohrwand. Im zweiten Fall kondensiert ein eingeschlossener Dampfbereich zwischen zwei Flüssigkeitssäulen, die dann aufeinanderprallen.

Im Rahmen der durchgeführten Messungen wurden zum akustischen Nachweis von Kondensationsschlägen und Geräuschen Mikrofone an die Rohrleitungen mechanisch angekoppelt und deren Signale mit der Messdatenerfassung mit registriert.

Bei einer größeren Zahl der registrierten Ereignisse konnte eine Korrelation der akustischen Ereignisse mit Druck- und Strömungsschwingungen und Temperaturübergängen Sattdampf-flüssig an kritischen Stellen der Anlagen gefunden werden. Solche kritische Stellen wurden als längere horizontale Rohrleitungen, vor allem aber Rohrabsenkungen im Zuge einer horizontalen Rohrleitung und Verzweigungspunkte zu getrennten Kollektorfeldern (mit horizontal wegführenden Leitungen) erkannt.

6 Literatur

R. Hausner, C. Fink, K. Lustig, M. Rommel, D. Stankowski, Experimentelle Untersuchungen zum Stillstandsverhalten von solarthermischen Anlagen, Zehntes Symposium Thermische Solarenergie, Staffelstein 2000

R. Hausner, C. Fink, Stagnation Behavior of Thermal Solar Systems, EUROSUN, Kopenhagen, 2000

W. Streicher, Minimising the risk of water hammer and other problems at the beginning of stagnation of solar thermal plants – a theoretical approach, EUROSUN, Kopenhagen, 2000

Summary

The stagnation behaviour of solar systems is now much better understood than in the past. On the basis of the measurements performed, the stagnation procedure can generally be divided into five typical phases, apart from differences arising from differences in the type of plant. In phases where steam occurs energy is transported very effectively from the collector to other system components and leads to high temperature loads.

Solar systems should be constructed in such a way that at the end of the phase where liquid is pushed out of the collector, the residual content of liquid in the collector is as low as possible in order to minimise thermal loads to system components.

The stagnation behaviour of collector systems which do not empty well can be controlled and improved by additional methods: these are small volume stagnation coolers, heat exchangers regulated on the secondary side, nocturnal cooling strategies via the collector, or the arrangement of the check valve within the course of the inlet pipe in relation to the connection of the expansion vessel.

Moreover we recommend the deliberate and simple control of the pipework avoiding long horizontal pipes, pipe drops and rises to reduce acoustic effects (water hammer).

New developments would be necessary in many cases in the field of absorber pipework in the way presented here with due consideration to what is required in normal operation.