

# **Solare Prozessdampferzeugung für einen Aluminiumveredelungsbetrieb**

**D. Krüger, H. Schenk, K. Hennecke**, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Solarforschung, Köln

**Dr. K. Saidi**, Solitem GmbH, Aachen

**M. Walder**, Alanod GmbH & Co. KG, Ennepetal

**A. Anthrakidis**, Solar-Institut Jülich der FH Aachen

**S. Fischer**, Universität Stuttgart, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik, Stuttgart

## **Kurzfassung**

Sattdampf wird in Industriebetrieben oftmals zur Wärmeübertragung bei verschiedenen Verbrauchern verwendet. Ein wesentlicher Vorteil sind kleine Wärmeübertragerflächen und schnelles Aufheizen der angeschlossenen Prozesse. Im Rahmen des vom BMU geförderten P3 Projekts (Pilotanlage zur solaren Prozesswärmeerzeugung mit Parabolrinnenkollektoren) wurde ein Parabolrinnenfeld mit 108 m<sup>2</sup> Aperturfläche errichtet, das seit Juli 2010 Sattdampf bei 4 bar<sub>abs</sub> erzeugt und unmittelbar aus dem Solarfeld über eine Dampftrommel in die Prozessdampfschiene der Alanod GmbH in Ennepetal einspeist (Bild 1).

Das Projekt wurde in einem Konsortium durch die Alanod GmbH, die Solitem GmbH und als Forschungspartner das Institut für Solarforschung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt, das Solar-Institut Jülich der FH Aachen, das Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik der Universität Stuttgart sowie Prof. Volker Quaschnig der HTW Berlin bearbeitet.

Nach den ersten Betriebsmonaten zeigt sich, dass der Anlagenbetrieb unproblematisch und ohne Zwischenfälle verläuft. Die Wasserqualität entspricht den Anforderungen an das Dampfnetz. Anfahrsgeschwindigkeit und Leistung können über Anlagenumbauten noch gesteigert werden.

Die Projektergebnisse wurden umfangreich in einem Abschlussbericht dokumentiert [1].



Bild 1: Solarfeld

### **1. Aufbau der solaren Dampfeinspeisung**

Die Bereitstellung von Sattedampf für industrielle Verbraucher durch Solaranlagen wurde bisher in wenigen Anlagen weltweit erprobt. Ihnen gemeinsam ist die indirekte Dampferzeugung mittels Druckwasser und Wärmeübertrager oder Flashtank [2].

Untersuchungen in Forschungsanlagen haben gezeigt, dass die Dampferzeugung auch direkt im Solarfeld möglich ist, womit Wärmeübertrager oder Flashtank entfallen. Die direkte Dampferzeugung und Einspeisung in eine industrielle Dampfschiene wurde erstmals im Rahmen des P3 Projektes demonstriert.

Im Solarfeld, bestehend aus PTC1800 Parabolrinnenkollektoren der Firma Solitem wird ein Teil des Wassers verdampft, so dass eine Wasser/Dampfmischung in eine Dampffrommel mit 200 Liter Fassungsvermögen strömt (Bild 2). Dort wird der Dampf separiert und einer 4 bar<sub>abs</sub> Dampfschiene zugeführt. Der Wasseranteil wird rezirkuliert. Dabei sind eine Austrocknung der Receiver und ein zu geringer Massenstrom zu vermeiden, damit es nicht zu überhöhten thermischen Spannungen im Absorber kommt. Deswegen wird ein Massenstrom gewählt bei dem sicher ein Überschuss an Wasser zu erwarten ist, so dass immer eine Wasser/Dampfmischung das Solarfeld verlässt.

Entsprechend der abgeführten Dampfmenge wird Kondensat nachgespeist sobald ein Schwellwert der Füllstandsmessung unterschritten wird.

Da nur ein kleiner Teil der Solarenergie die Temperatur des Wassers erhöht und der weitaus größte Teil der Energie die Verdampfung bewirkt, wird nur wenig Speisewasser benötigt.

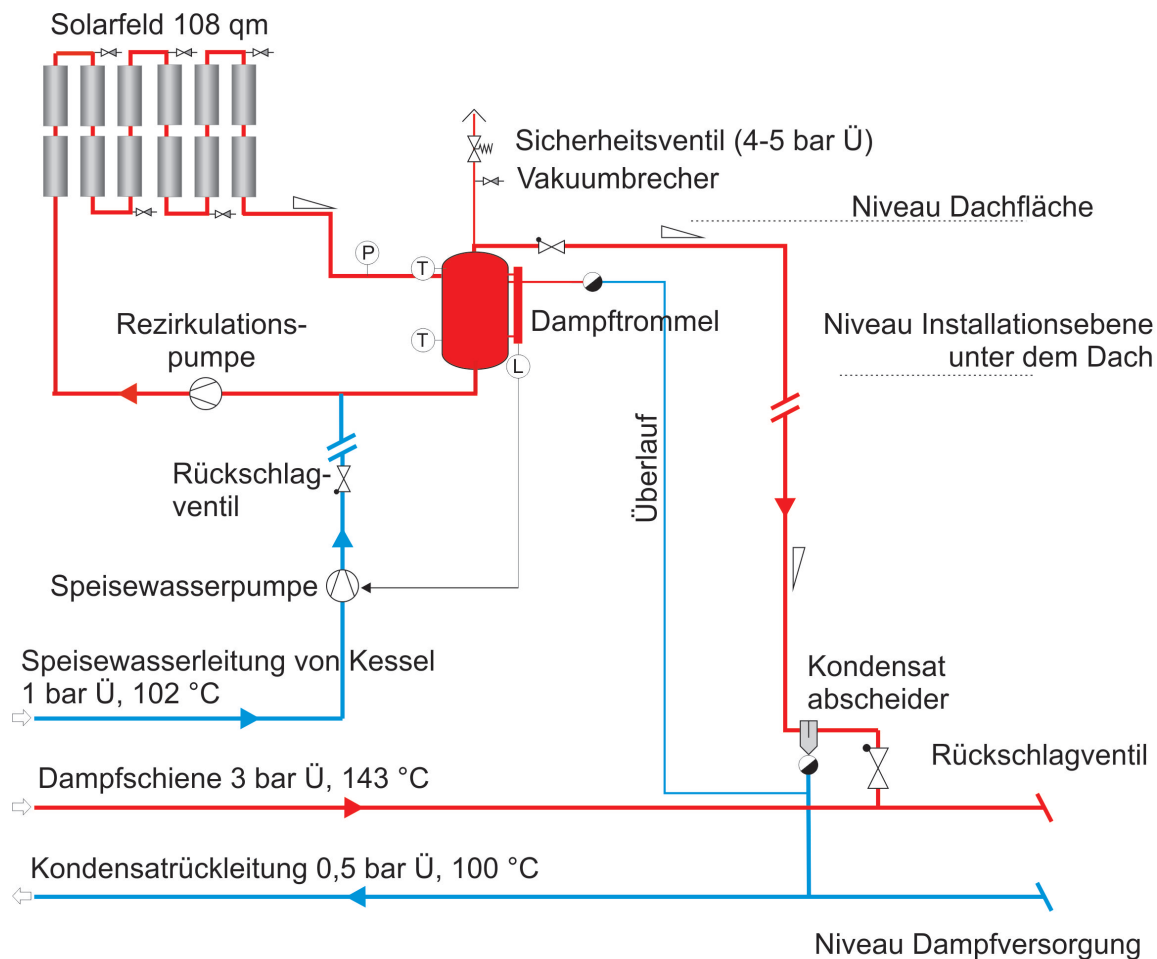


Bild 2: Hydraulische Anordnung des Solarkreislaufs

Für die Auslegung der Dampftrommelgröße wurden zwei Kriterien berücksichtigt: Sobald durch fehlende Einstrahlung die Dampferzeugung zusammenbricht, muss das Volumen in den Absorbern mit Wasser aus der Dampftrommel und der Speisewasserzuleitung nachgefüllt werden (Bild 3). Außerdem muss ein Volumen zur Verfügung stehen in dem Wasser von Dampf getrennt wird, denn es soll nur wenig Wasser in die Leitung zur Dampfschiene gelangen.

Eine offene Frage war, ob die Dampftrommel im Anlagenstillstand geflutet werden soll oder belüftet. Eine Belüftung führt auf Dauer zu Korrosion und die Luft muss beim nächsten Betrieb sicher hinausbefördert werden, denn falls sie mit dem Dampf zu den Wärmeübertragern gelangt kann sie dort deren Wärmeübergang verschlechtern. Andererseits kann bei einem geringeren Wasservolumen schneller angefahren werden.

Die Entscheidung fiel zugunsten der Belüftung über einen Vakuumbrecher. Nach dem Betrieb des Solarfeldes und dem Absinken der Temperatur unter ca. 100°C stellt sich ein

Vakuum gegenüber der Umgebung ein und Luft strömt durch den Vakuumbrecher ein. Die Auswirkungen auf die Wasserqualität und die Korrosion sollte aber noch untersucht werden.



Bild 3: Dampftrommel



Bild 4: Einspeisung in Dampfschiene

Durch den direkten Anschluss an die Dampfschiene (Bild 4) konnte das Solarsystem vergleichsweise einfach nachgerüstet werden. Aufwändige Infrastrukturmaßnahmen, wie etwa Versorgungsleitungen zu den einzelnen Verbrauchern, zusätzliche Wärmeübertrager und Ausgleichsbehälter und insbesondere eine Wasseraufbereitung mit Kontrolle der Wasserqualität sind nicht erforderlich. Auch eine gesonderte Regelung des Ausgleichs von Schwankungen der solaren Dampfproduktion wird verzichtbar, da diese sich auf die Regelung der vorhandenen Kesselanlage in gleicher Weise auswirken wie Schwankungen in der Dampfabnahme der Verbraucher.

## **2. Inbetriebnahme und Anfahren der Anlage**

Nach einer mehrwöchigen Inbetriebnahmephase begann der automatische Betrieb des Solarfeldes im Juli 2010. Die Verdampfung des Wassers in den Kollektoren und der Transport des Dampfes zur Dampftrommel und in die Dampfschiene zeigten sich als „friedlich“. Es traten keine hörbaren Dampfschläge auf und im Kollektorfeld entwickelte sich

eine Schwallströmung. Wegen eines spät gefundenen verstopften Filters wurde das Kollektorfeld lange Zeit mit einem niedrigen Massenstrom gefahren, so dass es durch vollständige Verdampfung zur Austrocknung im letzten Kollektorstrang kam, was aber nicht zu sichtbaren Schäden am Kollektor geführt hat.

Der Massenstrom der Rezirkulation wird geregelt und bei hoher Einstrahlung angehoben. Dabei wird eine hohe Sicherheitsmarge berücksichtigt. Innerhalb der Projektlaufzeit konnten jedoch keine Tests mit niedrigen Massenströmen durchgeführt werden, um den Stromverbrauch der Zirkulationspumpe zu senken.

Der Anfahrprozess stellt sich folgendermaßen dar:

- Das Solarfeld und die Trommel sind morgens teilweise mit Luft gefüllt.
- Die Einstrahlung am Globalstrahlungssensor überschreitet einen Schwellwert und triggert die Aufnahme der Rezirkulation.
- Nach Beginn der Rezirkulation werden die Kollektoren in den Fokus gefahren.
- Die Luft wird aus den Absorberrohren verdrängt, der Füllstand in der Dampftrommel sinkt.
- Die Temperatur im Feld steigt an, das Wasservolumen vergrößert sich.
- Bei ca. 100°C setzt eine erste Dampfbildung im Solarfeld ein. Das verdrängte Wasser erhöht den Füllstand der Trommel.
- Der Dampf gelangt in die Dampftrommel und mischt sich mit der Luft. Die Mischung verdrängt das Wasser in der Leitung zur Dampfschiene. Zunächst wird das Wasser durch den Kondensatabscheider (mit Dampflüftung) abgeführt, dann die Dampf-Luftmischung, solange bis sich der Druck dem Sattedampfdruck angepasst hat (also kaum noch Luft im Dampf vorhanden ist).
- Bei Überschreiten des Dampfschienendrucks öffnet das Rückschlagventil und entlässt Dampf in die Dampfschiene.

### **3. Erfahrungen aus dem Anlagenbetrieb**

Erste Erfahrungen aus dem Anlagenbetrieb liegen aus dem Jahr 2010 vor [3]. Im Winter wurde der Solarkreislauf zur Vermeidung von Frostschäden entwässert und mit Stickstoff beaufschlagt. Nach ersten Änderungen und Optimierungen wurde die Anlage im Sommer 2010 ständig betriebsbereit gehalten.

Erhebliche Vorbehalte gab es seitens des Kollektorherstellers zu Projektbeginn wegen der fallenden Rohrleitung hinter dem Kollektorfeld. Es wurde befürchtet, dass sich Luft und auch Dampf im mehrere Meter höher gelegenen Solarfeld stauen und nicht in die Dampftrommel fallen würden. Im Betrieb zeigte sich jedoch, dass der Dampf bereits zu Beginn der

Verdampfung in die Dampftrommel eintritt. Wegen der hohen Geschwindigkeiten im Absorberrohr ist eine Durchmischung von Dampf und Luft zu erwarten [4], die Luft wird somit spätestens bei der Dampfbildung in die Trommel abgeführt, wenn nicht schon vorher im Wasserbetrieb.

Im Rahmen des Projekts P3 konnte nicht mehr untersucht werden, ob im letzten Kollektor möglicherweise das Wasser zeitweise in das nach unten zur Dampftrommel führende Rohr abfließt und damit nur Dampf im Absorber zurückbleibt.

Ob die Entlüftung der Dampftrommel funktioniert, kann mit der Betrachtung von Temperatur und Druck überprüft werden. Bei der Sattdampferzeugung entsprechen Temperatur und Druck der Sattdampfkurve. Liegt Luft vor, erhöht sich der Druck, da der (gemessene) Gesamtdruck aus dem Partialdruck des Dampfes und der Luft summiert wird. Die aus dem Druck ermittelte Sattdampf Temperatur liegt dann höher als die tatsächliche. In Bild 5 ist sichtbar, wie sich der Druck in der Dampftrommel während der Anfahrphase dem Sattdampfdruck nähert. Folglich wird in dieser Zeit die Luft mit dem Dampf aus der Trommel getrieben. Die bleibende Differenz könnte aus Messungenauigkeiten herrühren.

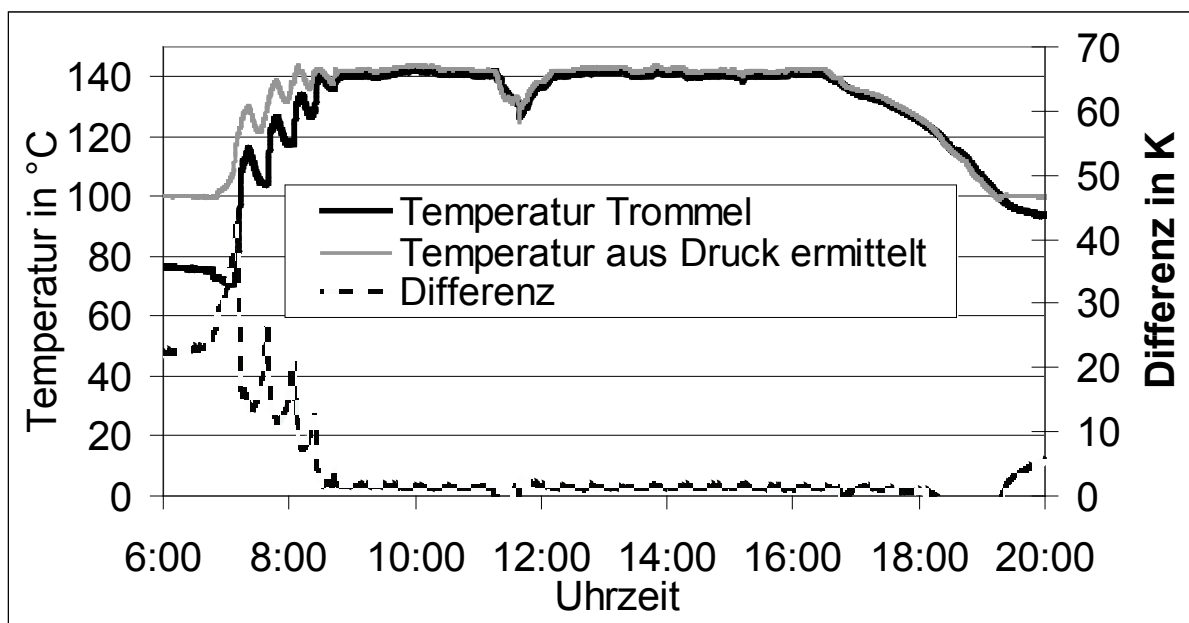


Bild 5: Nachweis des Luftinhalts in der Dampftrommel

Auf den ersten Blick erstaunlich sind die Zeitpunkte der Speisewasserbeschickung, nämlich insbesondere wenn die Direktstrahlung einbricht. Zu diesem Zeitpunkt kommt die Dampferzeugung in den Absorbern zum Erliegen, das freiwerdende Volumen wird mit

Wasser gefüllt. Dieses wird der Dampftrommel entnommen, deren Füllstand sinkt und der Schwellwert für die Füllhöhe wird unterschritten. Die Regelung schaltet die Speisewasserpumpe ein. In Bild 6 folgt die Zufuhr des Speisewassers ( $V_{\text{Spei}}$ ) dem Einbruch der Direktstrahlung. Dies reduziert die Eintrittstemperatur in das Solarfeld und verstärkt den Einbruch der Dampferzeugung.

Gemäß der Planung sollten die mittleren beiden (von 4) Füllstandssignale für die Regelung des Speisewassers benutzt werden. Die Hysterese stellte sich aber als zu groß heraus. Deswegen wird bereits beim Unterschreiten des 3. Füllstandssignals von unten das Speisewasser zugeführt und bei seinem Überschreiten abgeschaltet. Dabei ergibt sich immer noch eine große Hysterese und eine seltene Speisewasserzufuhr in großen Schwallen (Bild 6).

Die unteren beiden Füllstandssignale werden im Betrieb nicht mehr ausgelöst. Damit wird ca. ein Drittel der Trommel nicht genutzt, das Trommelvolumen könnte also erheblich reduziert werden.

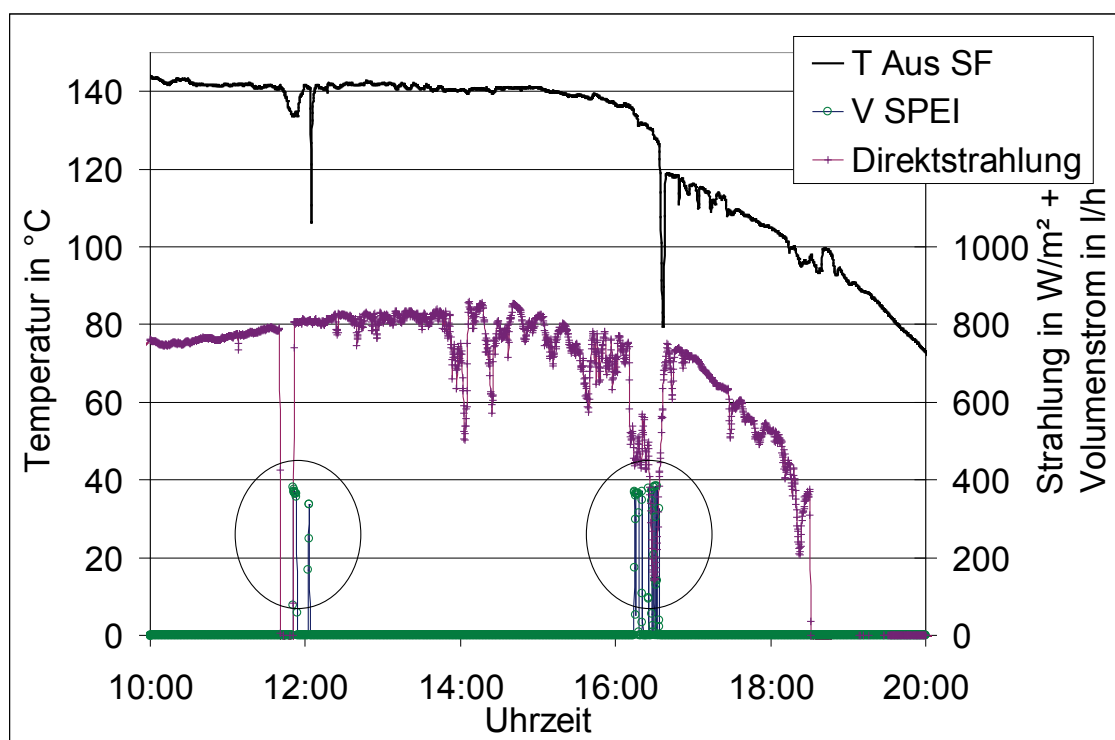


Bild 6: Zeitpunkte der Speisewasserzuführung

Während des Anfahrens schwingt die Austrittstemperatur des Solarfeldes (Bild 7), dies ist regelungstechnisch bedingt. Der Rezirkulationsvolumenstrom wird bei höheren Temperaturen angehoben. Nachdem die Austrittstemperatur des Solarfeldes schnell

ansteigt, reagiert die Regelung mit einer Erhöhung des Massenstroms. Bei etwa gleichbleibender Eintrittstemperatur sinkt dadurch die Austrittstemperatur und die Regelung verringert den Volumenstrom. Ab 130°C wird der Volumenstrom auf 100% eingestellt. Der Rezirkulationsvolumenstrom variiert stark im Laufe des Betriebes. Dies ist einerseits bedingt durch die Regelung abhängig von der Wassertemperatur. Aber auch bei konstant hohen Wassertemperaturen und damit 100% Leistung der Pumpe gibt es starke Schwankungen zwischen 200 l/h und 600 l/h für die noch keine Gründe gefunden wurden.

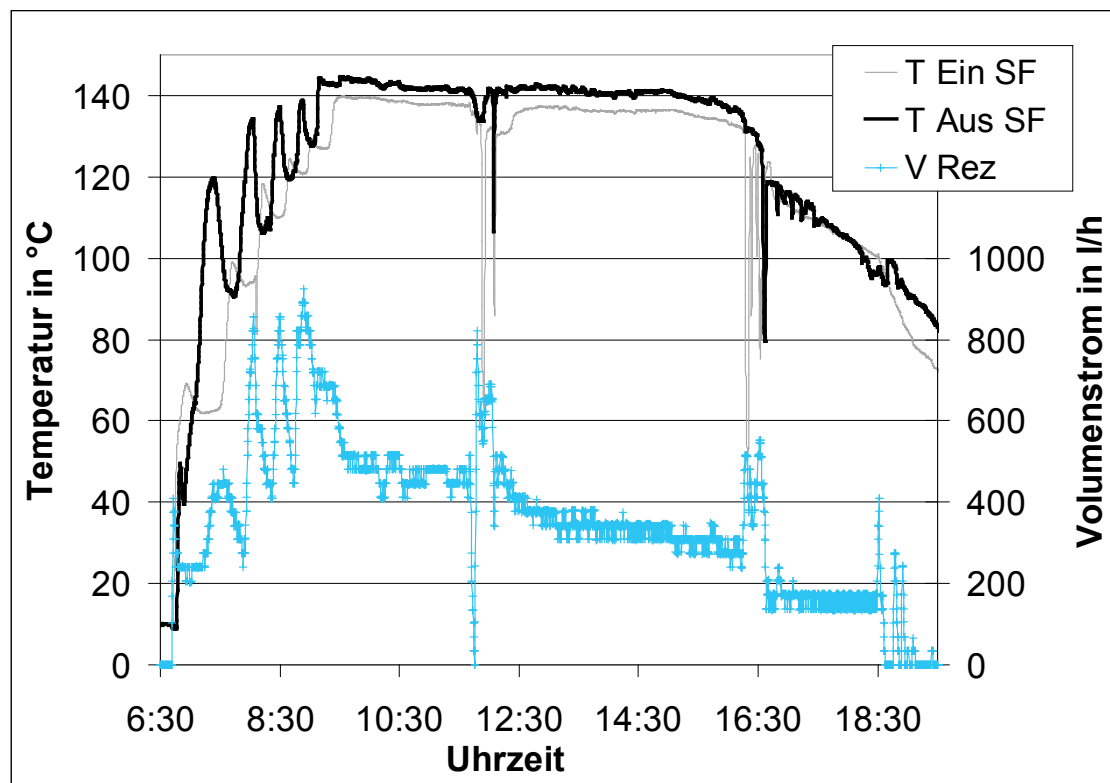


Bild 7: Anfahrprozess und Verlauf Rezirkulationsvolumenstrom

Der Wirkungsgrad des Kollektors [5] bei einer Einstrahlung von etwa 800W/m<sup>2</sup> Direktstrahlung bei senkrechter Einstrahlung liegt bei ca. 62% für die nominalen Betriebsbedingungen. An einem sonnigen Tag und ca. 900 W/m<sup>2</sup> Direktstrahlung, wie am 2.6.2011 (Bild 8), ist eine Anlagenleistung von etwa 60 kW entsprechend 100 kg/h Dampf zu erwarten, sie liegt aber real bei nur etwa der Hälfte. Zu berücksichtigen ist jedoch, dass die Leistung durch eine Messung am Ende der Dampfleitung vor der Einspeisung in die Dampfschiene bilanziert wird. Damit beinhaltet sie sämtliche thermische Verluste in den Rohrleitungen und der Dampftrommel. Eine Bilanzierung nur des Kollektorfeldes ist nicht



möglich, weil die Enthalpie der austretenden Dampf-Wassermischung nicht ausreichend genau bestimmt werden kann. Die Kollektorleistung kann indirekt bestimmt werden, dafür ist es noch erforderlich die Leitungsverluste zu berechnen. Bei Messungen der Nachführgenauigkeit der Kollektoren hat sich jedoch gezeigt, dass noch Optimierungspotenzial besteht. Derzeit ist eine häufige Justierung der Kollektornachführung notwendig, die durch das Betriebspersonal nur mit beschränkter Genauigkeit durchführbar ist. Daher befürwortet der Kollektorhersteller Solitem eine Änderung des Antriebssystems. Weiterhin hat auch die Verschmutzung der Kollektoren sowie die Endverluste einen Einfluss auf die Anlagenleistung. Endverluste entstehen am Ende eines Kollektorstranges, wo schräg einfallende Strahlung vom Spiegel jenseits des Receiverendes reflektiert wird.

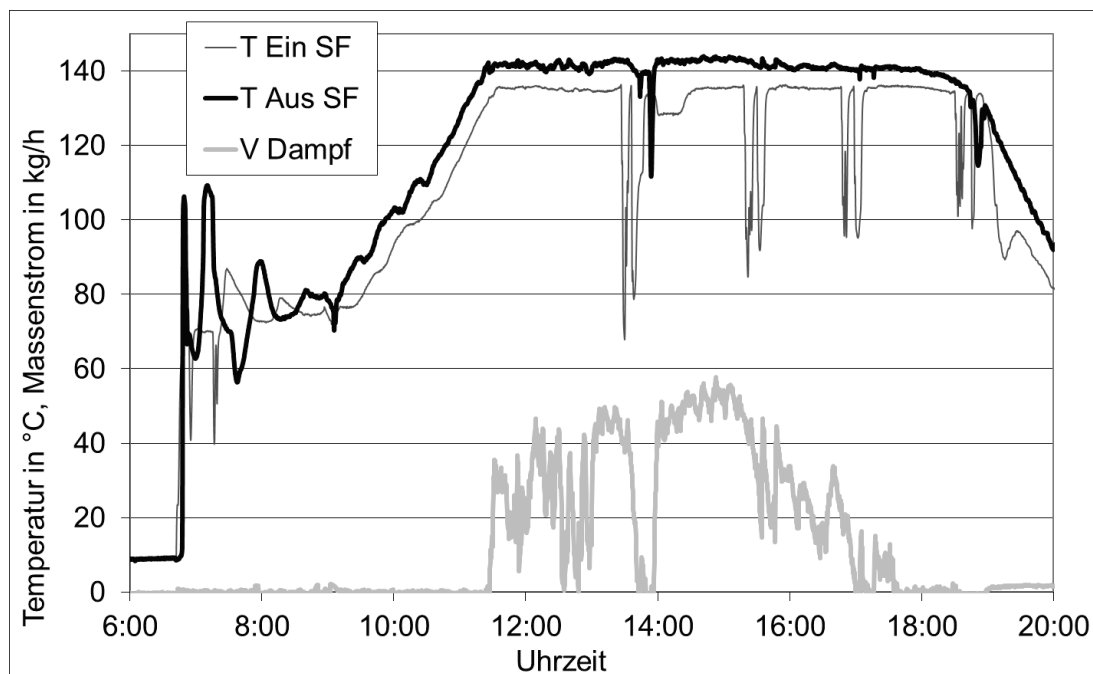


Bild 8: Dampfmassenstrom am 2.6.2011

Beim morgendlichen Anfahren des Kollektorfeldes benötigt das System relativ viel Zeit die Verdampfungstemperatur von ca. 143°C zu erreichen (Bild 9). Eine erheblich kleinere Dampftrömmel würde die Anfahrsgeschwindigkeit vergrößern und durch geringere thermische Verluste die Anlagenleistung verbessern.

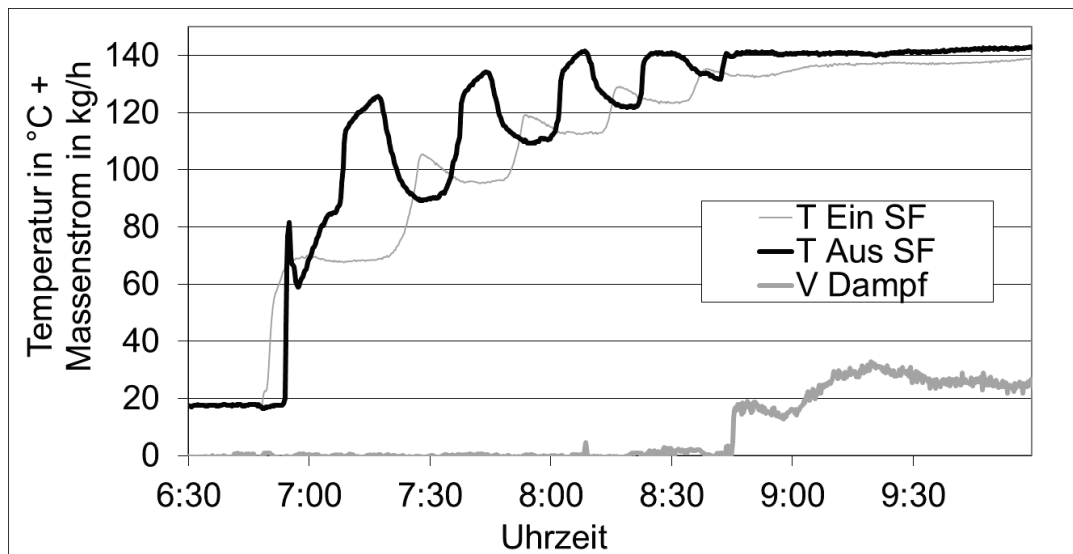


Bild 9: Anfahrverhalten am 27.6.2011

In Bild 10 ist erkennbar, dass das Einschaltkriterium noch optimiert werden sollte. Mit Erreichen des Einschaltkriteriums  $230 \text{ W/m}^2$  aus der horizontalen Globalstrahlungsmessung wird der Kollektor hochgefahren und damit auch die auf dem Kollektor befestigten Pyranometer für Global- und Diffusstrahlungsmessung. Die Differenz der beiden (Nachgeführte Global – Diffus) zeigt sofort eine Direktstrahlung auf die Aperturfläche von über  $700 \text{ W/m}^2$  an. Der Kollektor hätte also zu diesem Zeitpunkt schon eine halbe Stunde oder länger betrieben werden können. Eine angepasste Strahlungsmessung oder ein zusätzlicher Algorithmus in der Regelung könnte somit zur Verkürzung der Anfahrzeit führen.

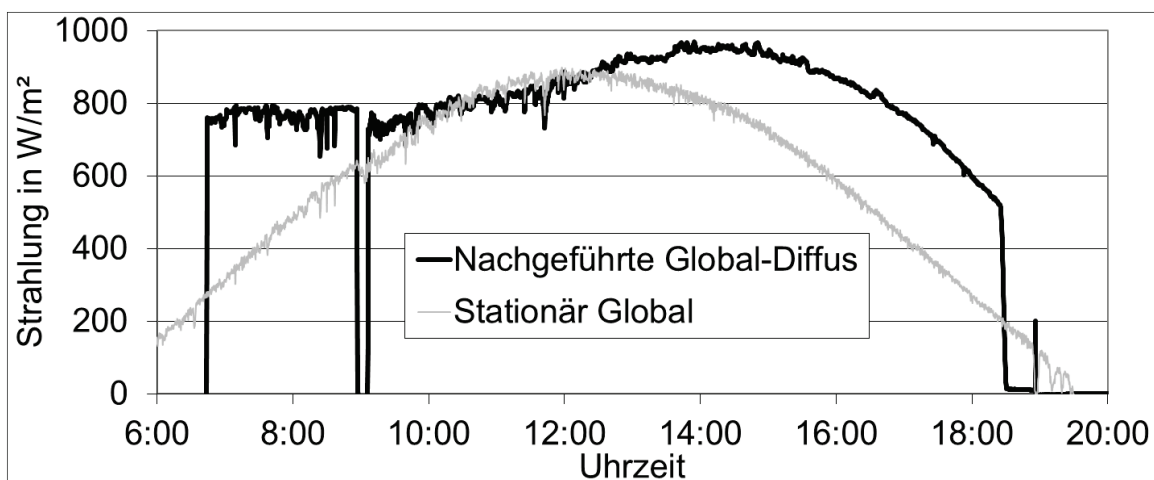


Bild 10: Strahlungsmessung am 2.6.2011

Bei der Anlagenplanung wurde zunächst ein hydraulisch getrennter Solarkreislauf durch die Firma Alanod gefordert, weil eine Beeinträchtigung der Dampfqualität befürchtet wurde. Wegen des viel einfacheren Anlagenschemas und der geringeren Investitionskosten wurde jedoch ein direkter Anschluss gewählt und dieses Risiko eingegangen. Die Dampf- und Wasserqualität im Dampfkreislauf der Produktion hat sich mit der Integration des Solarfeldes nicht merklich verschlechtert.

Eine Abschlammung erfolgt nicht, in unregelmäßigen Abständen wird ein feines Sieb vor der Pumpe gereinigt. Die Wasserqualität im Solarkreislauf ist aus Sicht des Anlagenbetreibers nicht zu beanstanden. Dennoch sollte möglicherweise anders als hier realisiert der Ablauf nicht unter dem Boden angeschlossen werden, sondern seitlich ein Stück über dem Boden damit der Schlamm sich am Boden sammeln und bei Bedarf abgelassen werden kann. Das dürfte die Reinigungsabstände der Siebe verringern. Es muss sich aber noch zeigen wie häufig überhaupt der Filter gereinigt werden muss.

Zur Begrenzung des Füllstands in der Dampftrommel wurde ein Überlauf mit Kondensatabscheider in etwa mittlerer Höhe der Dampftrommel installiert. Die Überlaufleitung wurde verriegelt, da ständig Dampf oder Wasser über den Kondensatableiter abfloss und zu nicht messbaren Verlusten führte. Ob dadurch größere Mengen Wasser in die Dampfleitung geraten und über den Kondensatabscheider hinweg in die Dampfschiene der Produktion geraten bleibt zu prüfen.

#### **4. Zusammenfassung**

Auch nach dem Ende des P3 Projektes werden weiter Daten aus dem Anlagenbetrieb aufgezeichnet. Das Solarsystem funktioniert ohne Störungen und liefert Sattedampf in die Dampfschiene der Produktion. Die Dampf- und Kondensatqualität entspricht den Anforderungen des Betreibers Alanod. Anfängliche Befürchtungen über Betriebsstörungen z.B. durch Schmutzeintrag konnten ausgeräumt werden.

Die Anlagenleistung kann noch optimiert werden. Mit einer erheblich kleineren Dampftrommel und verbesserter Nachführung kann schneller Angefahren und der Wirkungsgrad verbessert werden. Erst nachdem die Ursache für den schwankenden Rezirkulationsmassenstrom bekannt ist, kann über reduzierte Massenströme und den Einsatz kleinerer Pumpen entschieden werden.

Das hydraulische Konzept ist gut für die Prozessdampferzeugung geeignet und kann mit vereinfachter Anlagentechnik zukünftig in weiteren Projekten mit solarer Dampferzeugung eingesetzt werden.

Das P3 Projekt wurde vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

[1] Krüger, D.; Walder, M.; Saidi, K.; Anthrakidis, A.; Rusack, M.; Weis, F.; Schenk, H.; Dersch, J.; Fischer, S.; Hennecke, K.: P3 - Pilotanlage zur solaren Prozessdampferzeugung mit Parabolrinnenkollektoren zur Prozesswärmeerzeugung, Herausgeber: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Köln, 2011, 121 Seiten

[2] Krüger, Dirk; Hennecke, Klaus; Dathe, Sven: Parabolrinnen für Prozesswärme - Projekte und Entwicklungen. 11. Kölner Sonnenkolloquium, Köln, 24.6.2008

[3] Anthrakidis, A.; Weis, F.; Rusack, M.; Krüger, D.; Fischer, S.; Lokurlu, A.; Saidi, K.; Walder, M.; Croy, R.: Monitoring einer Parabolrinnen-Pilotanlage zur Bereitstellung von solarem Prozessdampf, 21. Symposium Solarthermie, Bad Staffelstein, Mai 2011

[4] Spirax Sarco, Grundlagen der Dampf- und Kondensattechnologie, Herausgeber Spirax Sarco, Konstanz, 2006

[5] Janotte, N.; Meiser, S.; Krüger, D.; Pitz-Paal, R.; Fischer, S.; Müller-Steinhagen, H.; Walder, M.: Bestimmung der thermischen Leistungsfähigkeit des Parabolrinnenkollektors PTC 1800. In: 19. Symposium Thermische Solarenergie, Bad Staffelstein, 6. - 8. Mai 2009