

Erste Ergebnisse und Betriebserfahrungen des Detailmonitorings einer solarthermischen Anlage zur Unterstützung der Kälteversorgung eines Büro- und Verwaltungsgebäudes

Elmar Bollin, Klaus Huber, Eva Scheck, Daniel Jödicke
Hochschule Offenburg
Badstraße 24, 77652 Offenburg
Tel.: 0781 205 294, 0781 205 138
bollin@fh-offenburg.de; klaus.huber@fh-offenburg.de
www.fh-offenburg.de/mv/st2000

1 Einleitung

Die Hochschule Offenburg begleitet seit Juli 2006 in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer ISE in Freiburg, die solar unterstützte Klimatisierung der Festo AG & Co. KG in Esslingen im Rahmen des Forschungsvorhabens Solarthermie2000plus. Dabei wurde die bereits bestehende Adsorptionskälteanlage, die bisher mit Gaskesseln und Kompressorenabwärme betrieben wurde, durch eine Solaranlage als dritte Wärmequelle ergänzt [1]. Bild 1 zeigt das Schema der Solaranlage in Esslingen.

Das Solarsystem setzt sich aus einem Kollektorfeld mit 1330 m² Vakuumröhrenkollektoren und zwei Pufferspeichern à 8,5 m³ zusammen. Die Kälteerzeugung wird mit drei Adsorptionskältemaschinen mit je 353 kW Nennkälteleistung realisiert. Solarsystem und Kälteanlage sind über das Heizungssystem über diverse Verteiler miteinander verbunden. Zusätzlich wurde die Solaranlage an die Bauteiltemperierung eines neuen Gebäudes angeschlossen, um im Winter die Solarwärme optimal bei niedrigen Rücklauftemperaturen nutzen zu können. Mit Hilfe von 81 Sensoren wird das Detailmonitoring des Solar- und Kälteanlagenbetriebs durch die Hochschule Offenburg ermöglicht. Nach Beendigung des Probetriebs konnte im August 2008 das erste Intensivmessjahr gestartet werden. Auf dem Poster werden erste Ergebnisse und Betriebserfahrungen des aktuellen Intensivmessjahres sowie des vorhergehenden Probetriebs vorgestellt und untersucht, wobei hier besonderes Augenmerk auf den Betrieb der Solaranlage gelegt wird. Auf den Betrieb der Kälteanlage gehen Wiemken et al. [2] näher ein.

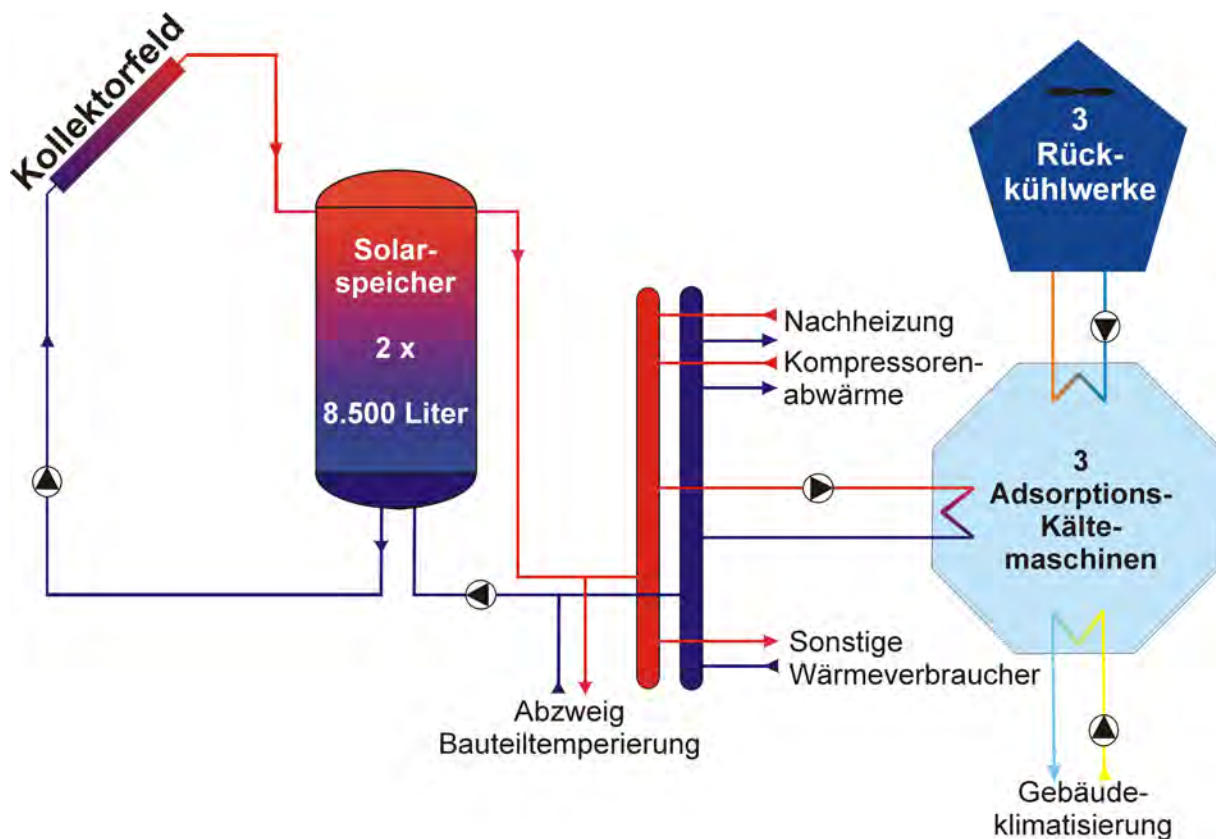


Bild 1: Vereinfachtes Schema der solaren Klimatisierung der Festo AG & Co. KG Esslingen

2 Bisherige Optimierungsmaßnahmen

Während des Probetriebs wurden alle Anlagenkomponenten hinsichtlich ihrer Funktionsweise überprüft, um einen regulären Anlagenbetrieb während der Intensivmessphase gewährleisten zu können. Insbesondere die Regelung und die Gleichmäßigkeit der Durchströmung des Kollektorfeldes wurden auf Störungen überprüft.

Im Kollektorkreis wurden nachts Fehlströmungen festgestellt, verursacht durch die im Vergleich zu den Kollektoren höhere Speichertemperatur. Diese führten zu hohen Wärmeverlusten über das Kollektorfeld. Ursache hierfür war eine Schwerkraftbremse mit zu geringer Federkraft, die diese Fehlströmungen nicht verhindern konnte. Seit Austausch der Schwerkraftbremse Ende April 2008 wurden keine Fehlströmungen mehr festgestellt (Bild 2).

Im August kam es außerdem vor allem aufgrund einer Störung der Entladung der Solarspeicher nochmals an einigen Tagen zu Stillständen im Kollektorkreis wegen Überhitzung. Bei störungsfreiem Anlagenbetrieb hätte sehr wahrscheinlich ein höherer Ertrag, als in Tabelle 1 angegeben, erzielt werden können.

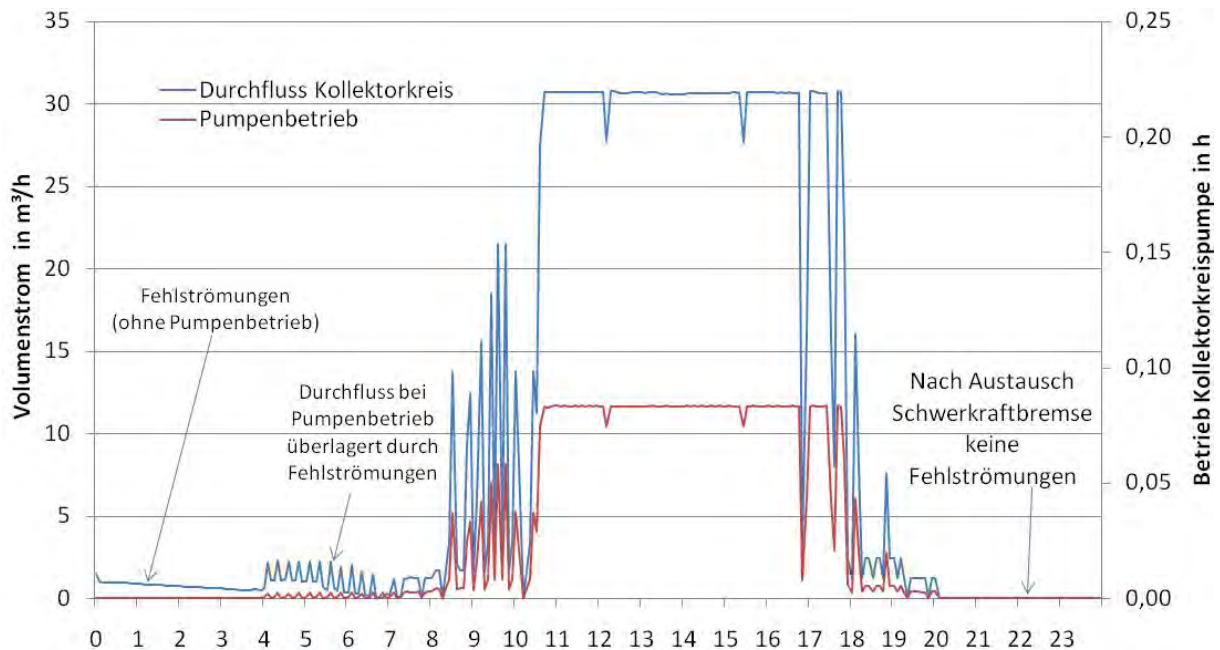


Bild 2: Volumenstrom Kollektorkreis und Betriebsdauer der Kollektorkreispumpe während eines 5-Minutenintervalls am 29.04.08

Die Solaranlage ist mit den Adsorptionskältemaschinen über einen zentralen Verteiler, an den auch andere Wärmeverbraucher angeschlossen sind, verbunden (siehe Bild 1). Bei Einspeisung in diesen Hauptverteiler liegen die Rücklauftemperaturen meist über 60 °C. Die Starttemperatur für die Speicherentladung liegt bei 80 °C. Deshalb wurde ein direkter Abzweig zur Bauteilaktivierung eines Neubaus eingebaut. Die Speicher werden bei Entladung direkt zur Bauteilaktivierung ab 35 °C entladen. Hierdurch sind Rücklauftemperaturen von 25 °C und darunter erreichbar. Da über diesen Weg nur maximal 200 kW Wärmeleistung abgeführt werden können, wurde zur Verhinderung häufigen Umschaltens zwischen Bauteilaktivierung und Hauptverteiler die vorhergesagte Sonnenscheindauer des nächsten Tages als Regelparameter eingefügt. Sobald die prognostizierte Sonnenscheindauer einen bestimmten Wert überschreitet, wird am nächsten Tag permanent auf den Hauptverteiler geschaltet. Durch diese Regelung wurde an vielen Tagen die Einspeisung in die Niedertemperaturbauteilaktivierung verhindert. Durch die hohe Vor- und Rücklauftemperatur erhöht sich die Temperatur in den Speichern deutlich (Bild 5) und es ergeben sich dadurch negative Auswirkungen auf den solaren Ertrag und die Wärmeverluste durch die Frostschutzschaltung (siehe hierzu Abschnitt 4). Es ist daher geplant die Regelung dieser Umschaltung so zu optimieren, dass die Bauteilaktivierung mit Ihrer niedrigen Rücklauftemperatur häufiger direkt bedient wird.

3 Stillstandsverhalten

Durch diverse Betriebsstörungen kam es mehrfach zu Stillständen der Solaranlage, bei denen das nachfolgend beschriebene Stillstandsverhalten beobachtet werden konnte. (Siehe hierzu Bild 3) Sobald die Kollektorkreis Pumpe ausschaltet, steigt die Kollektortemperatur auf bis zu 200 °C (überhitzter Dampf) steil an. Die Temperatur im Kollektorkreisvorlauf steigt auf bis zu 143 °C an, was einem Sattdampfdruck von ca. 3,9 bar entspricht. Damit kann davon ausgegangen werden, dass im Rohr Dampf ansteht. Der angegebene Druck auf Speicherhöhe wird auf nahezu gleicher Höhe gemessen wie die Vorlauftemperatur. Auch im Speicher ist ein ansteigen der Temperatur, wahrscheinlich verursacht durch im Speicher kondensierenden Dampf, zu beobachten.

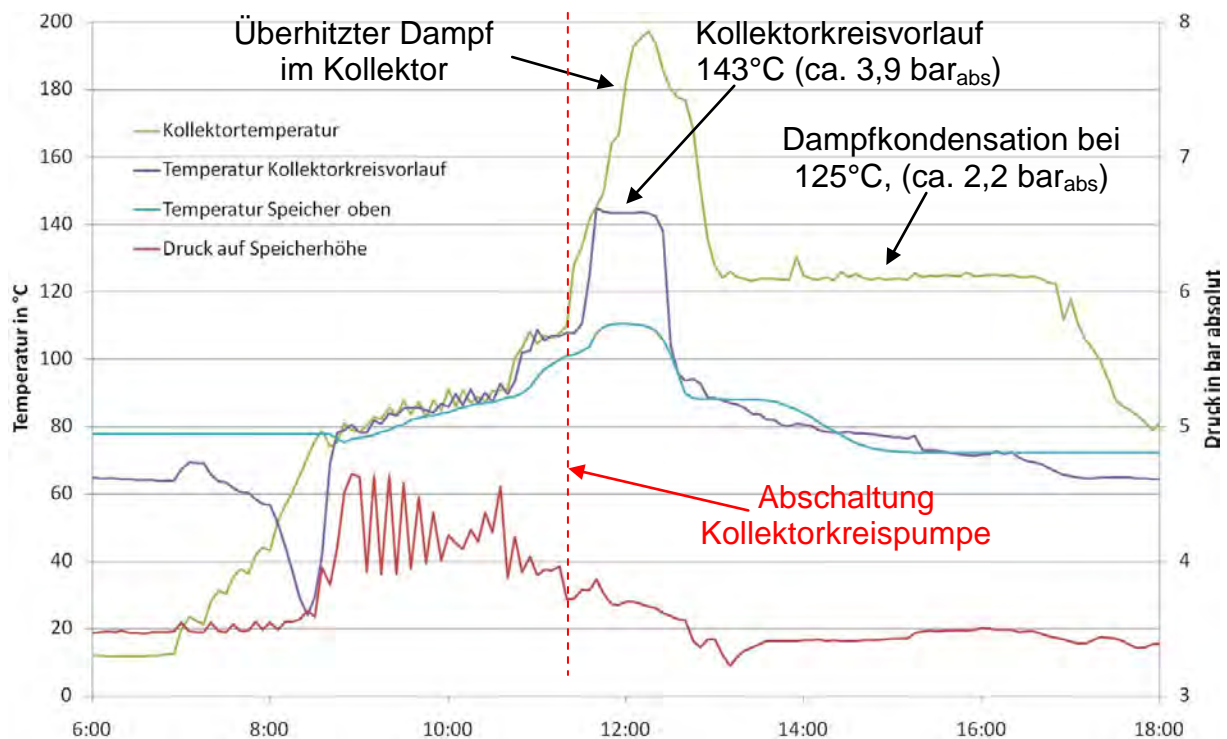


Bild 3: Stillstandsverhalten der Solaranlage der solaren Klimatisierung der Festo AG & Co. KG in Esslingen am 17.08.09

Deshalb kann davon ausgegangen werden, dass das flüssige Wasser komplett aus den Kollektoren über den Vorlauf in den ersten Speicher gedrückt wird und auch Dampf eingetragen wird, der dort kondensiert. Für diesen Fall wurde der Vorlauf in halber Höhe am Speicher angebracht, damit der Dampf beim Aufsteigen durch das Wasser im Speicher abkühlt und kondensiert. Die Kondensation im Kollektor findet bei ca. 125 °C statt, was einem Sattdampfdruck von ca. 2,2 bar entspricht.

4 Frostschutzregelung

Der Kollektorkreis ist ohne Wärmetauscher direkt mit dem Solarspeicher verbunden. Dementsprechend zirkuliert im Kollektorkreis auch Heizungswasser ohne Frostschutzzusatz. Damit im Winter ein Einfrieren des Wassers im Kollektorkreis zuverlässig vermieden wird, verfügt der Solarregler über einen Algorithmus, der bei Unterschreiten einer voreingestellten Kollektortemperatur aktiviert wird und durch Fördern von Speicherwasser zum Kollektor das Einfrieren in den Solarleitungen verhindert. Die Wärmeverluste über das Kollektorfeld (Summe aus Wärmebedarf für die Frostschutzschaltung und Anfahrverlusten) waren im Winter 2008/09 immer noch deutlich höher als erwartet (vgl. Abschnitt 2). Hauptursache hierfür ist die häufig hohe Tem-

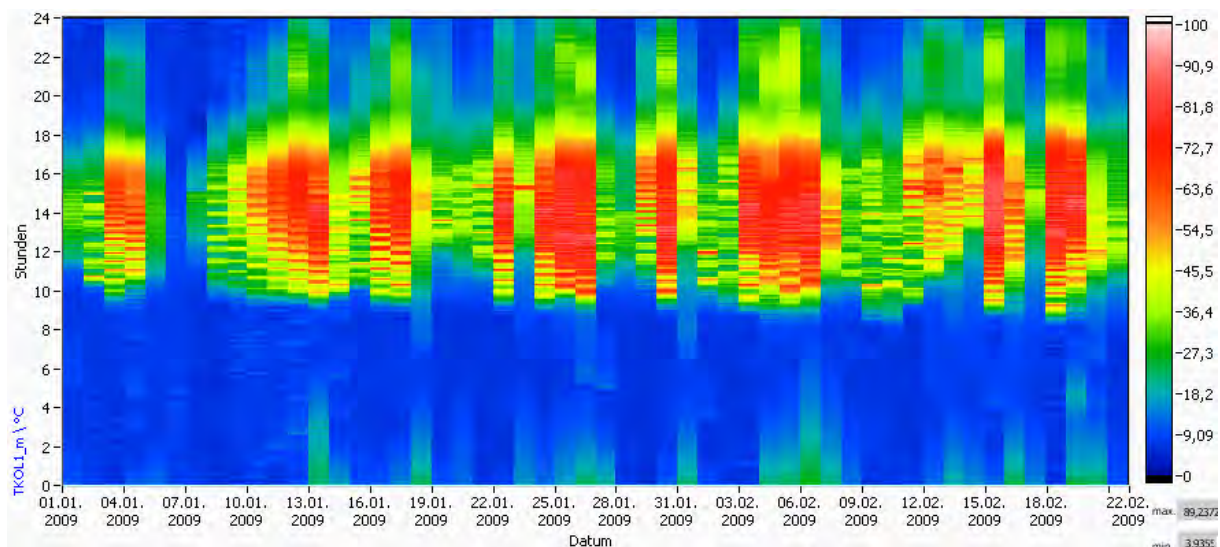


Bild 4: Kollektortemperatur. Nach 20:00 Uhr erhöht sich die Kollektortemperatur durch die Frostschutzschaltung auf häufig über 30 °C. Dieser Fall tritt nur auf, wenn die untere Speichertemperatur über 70°C liegt (vgl. Bild 5).

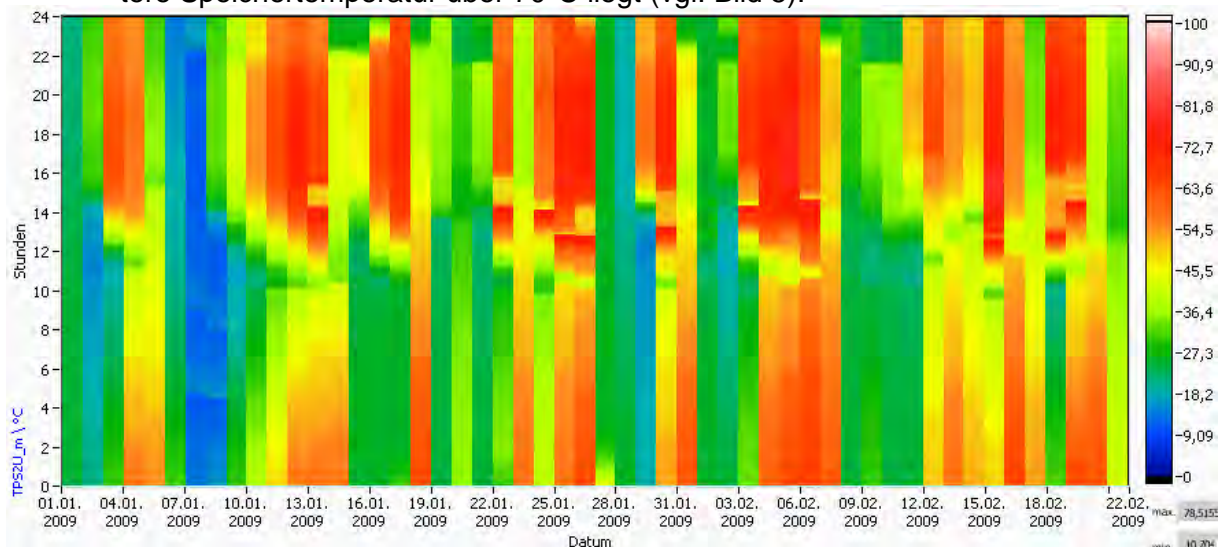


Bild 5: Temperatur des Niedertemperaturspeichers unten. Niedrige Rücklauftemperaturen treten vor allem dann auf, wenn die Speicher von der Bauteilaktivierung entladen wurden.

peratur in den Solarspeichern, aus denen Wasser zu Frostschutzzwecken in die Kollektoren gepumpt wird. Im Carpetplot in Bild 4 ist zu sehen, dass sich der Kollektor durch die Frostschutzschaltung nach Sonnenuntergang nochmals auf teilweise über 30 °C erwärmt. Dies tritt nur bei hohen Speichertemperaturen auf, wenn während des Tages zum Hauptverteiler (vgl. Abschnitt 2) entladen wurde. Dabei wird heißeres Wasser zu den Kollektoren gepumpt als notwendig woraus sich höhere Wärmeverluste ergeben als bei niedrigerer Temperatur. Ein Vergleich der mittleren täglichen Speichertemperatur mit dem täglichen Wärmeverlust über den Kollektorkreis in Bild. 6 zeigt, daß hier ein deutlicher Zusammenhang besteht. Wie in Abschnitt 2 bereits angemerkt soll die Umschaltung der Speicherentladeregulung optimiert werden, so dass zukünftig häufiger zur Bauteilaktivierung entladen wird und somit das niedrige Rücklauf temperaturniveau zur Senkung der Speichertemperatur genutzt werden kann. Ein positiver Nebeneffekt wäre, dass durch die niedrigere Systemtemperatur auch höhere solare Erträge erzielt werden könnten.

Eine weitere mögliche Lösung wäre die Installation einer Rücklaufbeimischung zum Kollektorkreisvorlauf, durch die bei aktiver Frostschutzschaltung eine eingestellte Zieltemperatur im Kollektorkreisvorlauf realisiert werden könnte.

Zur Ermittlung des Wärmeverbrauchs für die Frostschutzschaltung wurde ein zusätzlicher Messpunkt im Datenlogger angelegt, mit dem nur Wärmemengen / -leistungen aufgezeichnet werden, die vom Speicher zum Kollektor gehen. Außer den Leistungen für den Frostschutz werden hier auch Anfahrverluste aufgezeichnet. Die Filte-

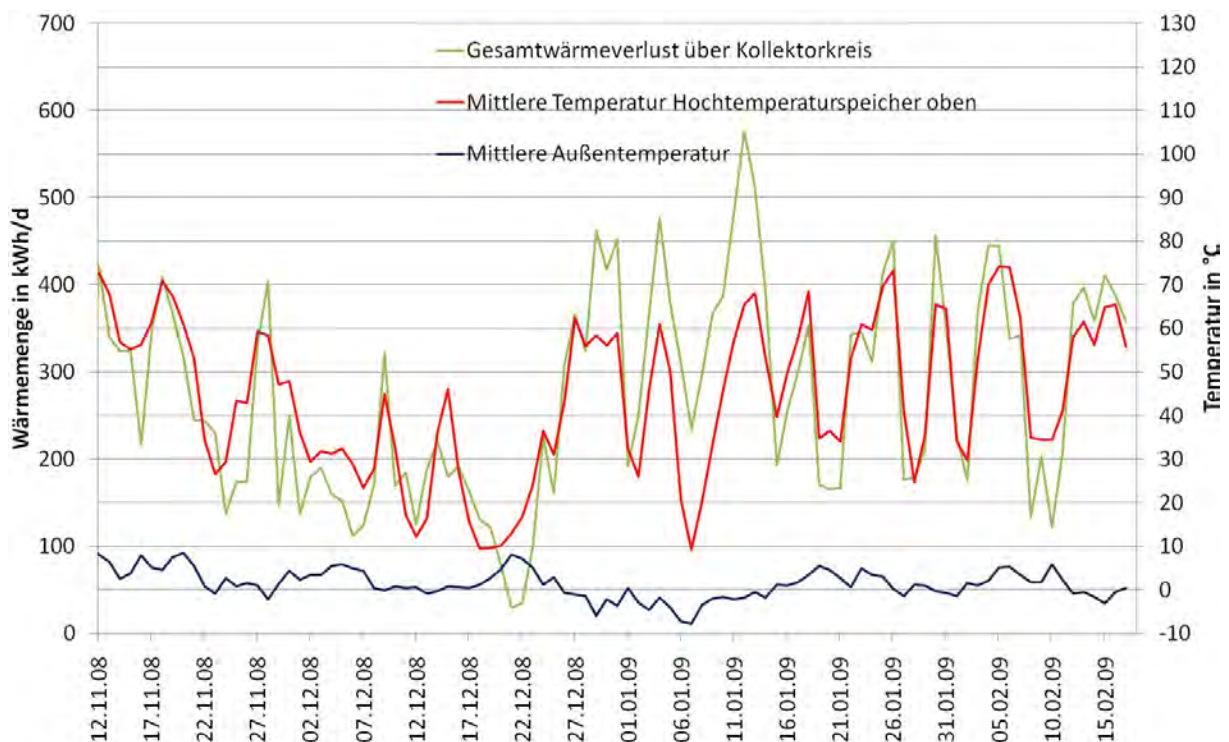


Bild 6: Zusammenhang zwischen mittlerer Speichertemperatur des Tages und Wärmeverluste an das Kollektorfeld bei Frostschutzbetrieb

nung der reinen Frostschutzverluste stellt sich aufgrund der komplizierten Regelung als kaum möglich dar.

Da sich der Kollektorfühler etwas außerhalb des Kollektors befindet läuft die Kollektorkreispumpe in regelmäßigen Abständen kurz an (Bild 4). Dadurch wird das Wasser aus dem Kollektor an den Temperaturfühler geschoben, so dass die Temperatur des Wassers im Kollektor ermittelt werden kann. Dieses Takten der Pumpe im Normalbetrieb ähnelt sehr dem Verhalten der Pumpe im Frostschutzbetrieb, was die Filterung zusätzlich erschwert. Eine Abschätzung der Frostschutzverluste über einen Vergleich mit den sommerlichen Anfahrverlusten scheint noch am geeignetsten, obwohl hier auch davon ausgegangen werden muß, dass die Anfahrverluste im Winter deutlich höher ausfallen als im Sommer. In den Monaten Juni und August ergaben sich z.B. jeweils Wärmeverluste von ca. 1,5 MWh.

5 Bisherige Messergebnisse

Seit Start des ersten Intensivmessjahres kam es zu einigen Störungen im Anlagen- und Messbetrieb, wodurch es zur Schmälerung des solaren Ertrags beziehungsweise zu einem Messdatenausfall kam. Vom 06.08. – 15.08. war ein Ventil auf der Entladeseite gestört, wodurch der Entladevolumenstrom um ca. Faktor 20 und entsprechend die Entladeleistung und der solare Ertrag durch hohe Speichertemperaturen und Stillstände verringert wurden. Zwischen dem 15.09. und 06.10. kam es zu einem Sensorausfall, weshalb der Entladevolumenstrom und die entladene Wärmemenge nicht erfasst werden konnten. Dieser Fehler wurde in Tabelle 1 und Bild 7 berücksichtigt, indem für diesen Zeitraum der gleiche prozentuale Wärmeverlust im Speicher unterstellt wurde, wie in den beiden Wochen vor und nach dem Fühlerausfall. Die Messdaten seit Juni 2008 sind nachfolgend in Tabelle 1 zusammengefasst und teilweise in Bild 7 grafisch dargestellt.

Seit Juni 2008 konnte bei einer solaren Strahlungsmenge auf das Kollektorfeld von 1004 MWh (824 kWh/m^2), 345 MWh (283 kWh/m^2) an Wärme in die Solarspeicher eingespeist werden. Hiervon wurde bereits die Wärmemenge, die an Anfahr- und Frostschutzverlusten (insgesamt 41 MWh bzw. 34 kWh/m^2) entstanden ist abgezogen. Auf der Entladeseite konnten den Speichern 303 MWh (249 kWh/m^2) Wärme entnommen werden. Dies entspricht einem Systemnutzungsgrad von 30 %. Auch hier wurden bereits Anfahr- und Frostschutzverluste abgezogen.

Tabelle 1: Erste Messergebnisse der solaren Klimatisierung der Festo AG & Co. KG in Esslingen von Juni 2008 bis Februar 2009. Die grüne Senkrechte markiert den Beginn des Intensivmessjahrs.

	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jan	ges
Einstrahlung auf gesamtes Kollektorfeld in MWh	199	202	190	124	101	66	39	83	1004
Nettoertrag Kollektorkreis in MWh	163	166	70	45	30	10	2,8	10	345
Netto Nutzwärmeertrag in MWh	89	88	53*	42**	27**	7,6	2,4	7,9	303
Systemnutzungsgrad in % bezogen auf netto Nutzwärmeertrag	41	40	28*	34**	27**	12	6,0	9,0	30
Gesamtwärmeverluste an Kollektorfeld in MWh	1,5	2,9	1,6	4,9	6,2	8,2	6,2	10	41
Solarer Deckungsanteil in %	9,5	9,0	6,2	6,0	3,4	0,8	0,3	1,0	4,6
Regenerativer Deckungsanteil in % (Solar + Kompressoren)	20	29	34	36	29	25	33	30	29
Wärme an Adsorptionskältemaschinen in MWh	747	769	725	521	522	420	47	0,6	3752
Kälte von Adsorptionskältemaschinen in MWh	329	400	383	267	251	184	22	0,0	1836
COP	0,44	0,52	0,53	0,51	0,48	0,44	0,46	0,00	0,49

* Wegen Ventilstörung vom 06. – 15.08. nur geringe Entladeleistung

** Wegen Sensorausfall zwischen 15.09. und 06.10. angenommener Speicherverlust von 9 % (Mittelwert aus je einer Woche vor und nach Zeitraum)

Der solare Deckungsanteil für den betrachteten Zeitraum von 4,6% fällt sehr gering aus. In den Sommermonaten Juni und Juli konnten Deckungsanteile von knapp 10% erzielt werden. Da nur begrenzt geeignete Dachfläche zur Verfügung stand, konnte das Kollektorfeld nicht großzügiger ausgelegt werden. Der regenerative Deckungsanteil, berechnet aus Nutzwärme der Solaranlage und Abwärme von Kompressoren bezogen auf den Gesamtwärmeverbrauch, beträgt 29%. Dieser soll zukünftig durch höhere Kompressorabwärmeleistungen noch gesteigert werden. Für den Betrieb der Adsorptionskältemaschinen wurden 3.752 MWh an Wärme aus dem Wärmenetz der Festo AG & Co. KG benötigt, um damit 1.836 MWh an Kälte zu erzeugen. Damit ergibt sich ein COP (Coefficient of Performance) von 0,49.

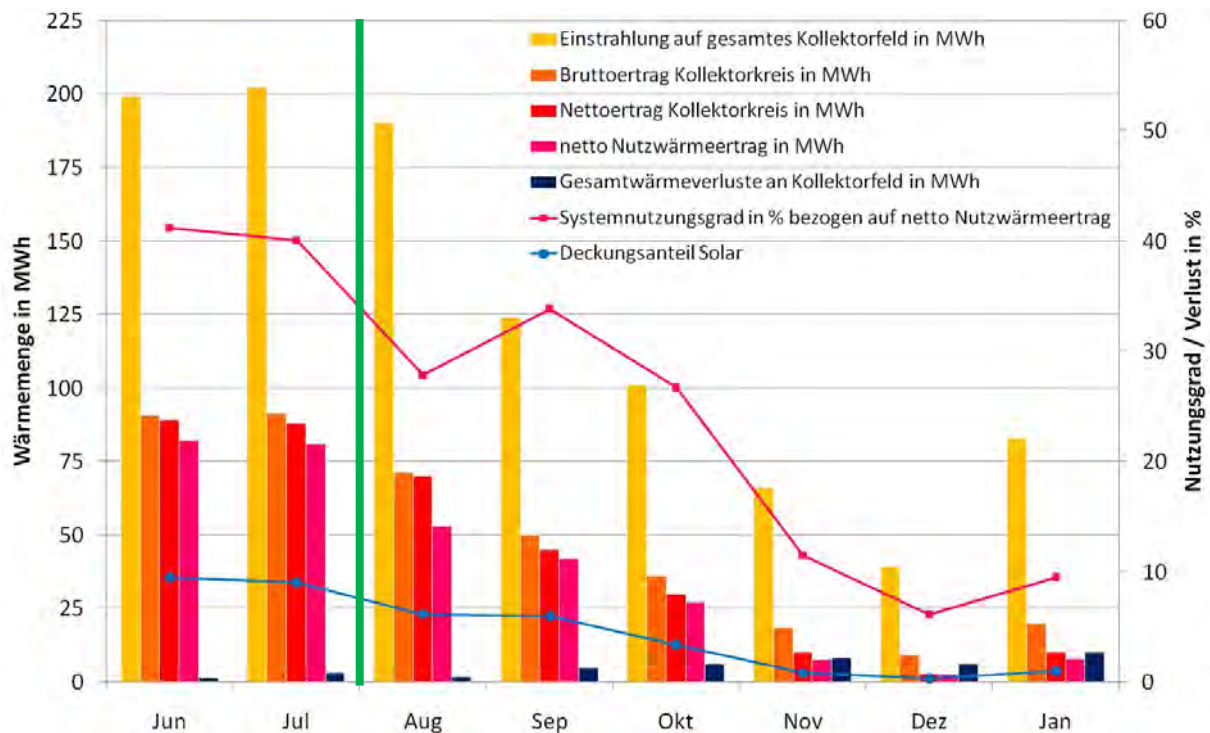


Bild 7: Grafische Darstellung der wichtigsten Messdaten aus Tabelle 1

6 Kosten

In Bild 8 sind die geschätzten Kosten für die einzelnen Anlagenkomponenten dargestellt. Bemerkenswert ist hier, dass aufgrund des Nur-Wasser-Systems weder Kosten für Wärmeträgerfluid noch für Wärmetauscher angefallen sind. Die hier vorgestellte Kostenverteilung liegt den Autoren jedoch nicht in jedem Detail vor und konnte nur aufgrund von Erfahrungswerten aus anderen Projekten realitätsnah ab-

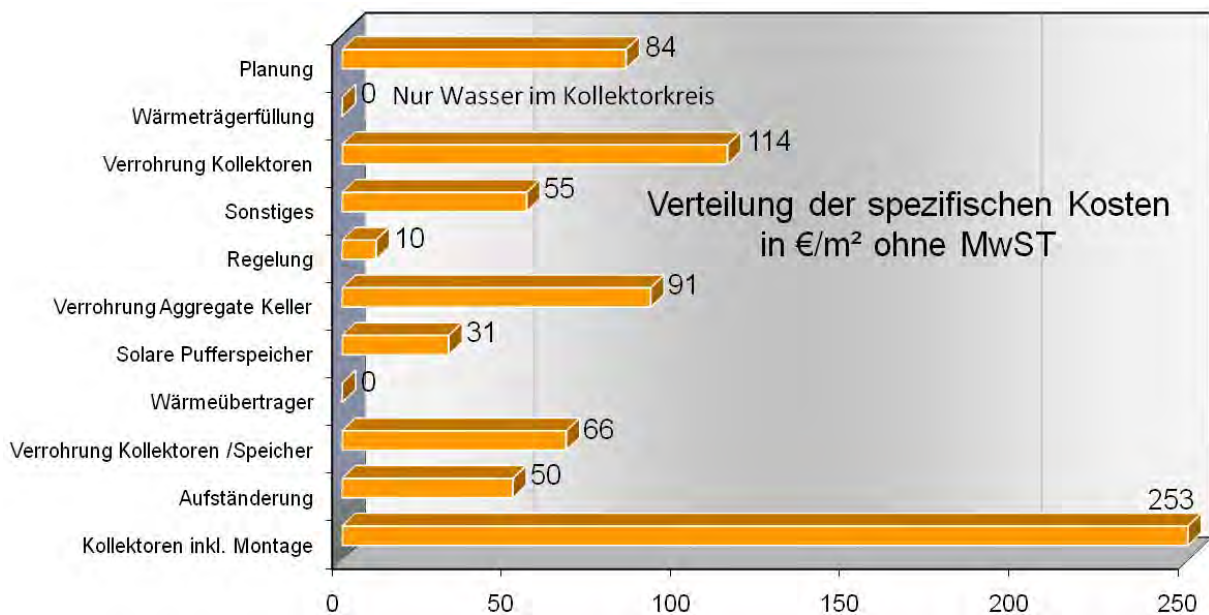


Bild 8: Geschätzte Verteilung der Kosten auf die einzelnen Anlagenbestandteile

geschätzt werden, da der Betreiber im Rahmen von ST2000plus nicht verpflichtet ist, die Kosten offen zu legen. Die Gesamtnettokosten des Projekts belaufen sich auf 1.040.100,- €. Davon entfallen 120.400,- € auf die Messtechnik und deren Planung. Damit ergibt sich für das Solarsystem ohne Messtechnik ein Preis von 919.700,- €. Zusammen mit der vom Kollektorhersteller abgegebenen Energiegarantie von 500 MWh Nettokollektorsertrag und bezogen auf eine Anlagenlaufzeit von 20 Jahren bei einem Zinssatz von 6% ergibt sich ein Wärmepreis von 0,191 €/kWh. Sinnvollerweise sollte der Wärmepreis auf die solare Nutzwärme berechnet werden. Da aber einerseits für die Nutzenergie keine Messdaten für ein ganzes Jahr vorliegen und die Energiegarantie auf den Netto-Kollektorsertrag abgegeben wurde, wurde die Berechnung auf Kollektorsertrag bezogen.

7 Zusammenfassung

Zur bestehenden Adsorptionskälteanlage wurde als dritte Wärmequelle eine Solaranlage mit 1330 m² Brutto-Kollektorfläche (1218 m² Aperturfläche) installiert. Im betrachteten Zeitraum von Juni 2008 bis Februar 2009 wurde ein solarer Deckungsanteil an der Gesamtwärme von 4,6% bei einem solaren Systemnutzungsgrad von 30% realisiert. Aufgrund der begrenzt zur Verfügung stehenden Dachfläche war eine großzügigere Auslegung des Kollektorfeldes nicht möglich. Insgesamt ergibt sich zusammen mit der Kompressorenabwärme ein regenerativer Deckungsanteil von 29%.

Seit Inbetriebnahme der Solaranlage konnten Betriebsstörungen im Solaranlagenbetrieb falsch eingebaute Anlagenteile und nicht optimale Regelparameter entdeckt und beseitigt werden, bzw. sollen in naher Zukunft optimiert werden.

Die Anlage befindet sich seit 01.08.2008 im Intensivmessbetrieb. Deshalb wird mit Messergebnissen eines kompletten Jahres für September 2009 gerechnet.

Die Solaranlage der Festo AG & Co. KG wird aus Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit im Rahmen des Förderprogramms Solarthermie2000plus unter dem Förderkennzeichen 0329605F zu 37,75 % gefördert.

Literatur:

- [1] Huber, K.; Bollin, E.; „Detailmonitoring einer solarthermischen Anlage zur Unterstützung der Kälteversorgung eines Büro- und Verwaltungsgebäudes“; 18. Symposium Thermische Solarenergie; Staffelstein; **2008**
- [2] Wiemken, E.; Wewiór, J. W.; „Solare Kühlung im Förderprogramm Solarthermie2000plus – Stand der Demonstrationsvorhaben und erste Betriebsergebnisse“; 19. Symposium Thermische Solarenergie; Staffelstein; **2009**