

# **Langzeitmonitoring einer solarthermischen Anlage zur Unterstützung der Kälteversorgung eines Büro- und Verwaltungsgebäudes**

Klaus Huber, Elmar Bollin, Eva Scheck, Daniel Jödicke

Hochschule Offenburg

Badstraße 24, 77652 Offenburg

Tel.: 0781 205 294

klaus.huber@fh-offenburg.de; bollin@fh-offenburg.de

[www.fgnet.fh-offenburg.de](http://www.fgnet.fh-offenburg.de)

## **1 Einleitung**

Die Hochschule Offenburg begleitet seit Juli 2006 in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer Institut ISE in Freiburg die solar unterstützte Klimatisierung der Festo AG & Co. KG in Esslingen. Die Anlage wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens Solarthermie2000plus vom Bundesumweltministerium gefördert. Dabei wurde die bereits bestehende Adsorptionskälteanlage, die bisher mit Gaskesseln und Kompressorenabwärme betrieben wurde, durch eine Solaranlage als dritte Wärmequelle ergänzt. Es handelt sich hierbei mit ca. 1 MW Nennkälteleistung um die leistungstärkste Adsorptionskälteanlage weltweit. Das Kollektorfeld war laut Hersteller zum Zeitpunkt der Montage ebenfalls das weltweit größte mit Vakuumröhren. Eine weitere Besonderheit dieses Solarsystems ist, dass im Kollektorkreis nur Wasser zirkuliert und die Frostsicherheit über eine Frostschutzregelung der Kollektorkreispumpe gewährleistet ist. Hierdurch ist auch kein Wärmetauscher notwendig, der den Glykolkreislauf vom Wasserkreis trennt.

Das Solarsystem setzt sich aus einem Kollektorfeld mit 1330 m<sup>2</sup> Bruttokollektorfläche CPC-Vakuumröhrenkollektoren der Fa. Paradigma und zwei Pufferspeichern à 8,5 m<sup>3</sup> zusammen. Zur Kälteerzeugung werden drei Adsorptionskältemaschinen (AdKM) mit je 353 kW Nennkälteleistung eingesetzt. Solarsystem und Kälteanlage sind über das Heizungssystem mittels diverser Verteiler miteinander verbunden. Zusätzlich wurde die Solaranlage an die Bauteiltemperierung eines neuen Gebäudes angeschlossen, um außerhalb der Betriebszeiten der Kältemaschinen die Solarwärme optimal bei niedrigen Rücklauftemperaturen nutzen zu können.



Quelle: Festo

Bild 1.1: links oben: Luftaufnahme des Firmengeländes der Festo AG & Co. KG in Esslingen; rechts oben: Kollektorfeld; unten: Adsorptionskälteanlage

Mit Hilfe von 81 Sensoren wird ein Detailmonitoring des Solar- und Kälteanlagenbetriebs ermöglicht [1,2]. Nach Beendigung des Probetriebs konnte im August 2008 das erste Intensivmessjahr gestartet werden. Zusammen mit der Probetriebsphase ab Juni 2008 stehen bis zum Tag des Vortrags Messdaten und Betriebserfahrungen für einen Zeitraum von annähernd zwei Jahren zur Verfügung.

Vom Kollektorhersteller wurde für die Anlage eine Garantie von 500 MWh/a bzw. 411 kWh/(m<sup>2</sup>.a) für die in die Solarspeicher eingespeiste Energie bei einem Nutzungsgrad von 33,5% abgegeben. Die Messungen im Intensivmessjahr vom 01.08.2008 bis 31.07.2009 ergaben einen Ertrag von 543 MWh/a bei einem Nutzungsgrad im Kollektorkreis von 34,7 %, womit die Energiegarantie deutlich erfüllt ist.

Die bei diesem Projekt entstandenen Kosten incl. Kostenverteilung auf die einzelnen Anlagenteile wurden bereits im letzten Jahr unter [1] veröffentlicht.

Bild 1.2: Schema der solaren Klimatisierung der Festo AG & Co. KG in Esslingen

## 2 Messergebnisse

Im Fünf-Minutentakt werden die Messwerte der Sensoren erfasst und täglich von der Hochschule Offenburg abgerufen. Bis auf wenige Störungen liegen aus dem bisherigen Anlagenbetrieb vollständige Messdaten vor. Die wichtigsten Messdaten sind nachfolgend in Tabelle 2.1 und Bild 2.1 dargestellt. Die im Text genannten spezifischen Werte beziehen sich auf die Aperturfläche der Anlage von 1218 m<sup>2</sup>.

In 2009 konnten bei einer solaren Strahlungsmenge auf das Kollektorfeld von 1628 MWh (1337 kWh/m<sup>2</sup>), 586 MWh (481 kWh/m<sup>2</sup>) (Nutzungsgrad 36 %) an Wärme in die Solarspeicher eingespeist werden. Hier wurde bereits die Wärmemenge, die an Anfahr- und Frostschutzverlusten (insgesamt 61 MWh bzw. 50 kWh/m<sup>2</sup>) entstanden ist, abgezogen. Auf der Entladeseite konnte den Speichern 533 MWh (438 kWh/m<sup>2</sup>) Wärme entnommen werden (Nutzungsgrad 32,7 %). Auch hier wurden bereits Anfahr- und Frostschutzverluste abgezogen. Der solare Deckungsanteil von 8,5 % für den betrachteten Zeitraum fällt gering aus. Das Kollektorfeld konnte wegen begrenzt zur Verfügung stehender Dachfläche nicht größer ausgelegt werden. Im Monat Juni konnte ein Deckungsanteil von 21 % erzielt werden, was unter anderem auf die veränderte Betriebsweise der AdKMs zurückzuführen ist. Dabei kommen die Gaskessel seltener zum Einsatz. Im Juli 2009 wurde die Betriebsweise nochmals verändert, so dass der Deckungsanteil der nachhaltig erzeugten Wärme (Summe aus Solarwärme und Kompressorenabwärme) wieder deutlich geringer ausfiel (vgl. Abschnitt 3).

Tab. 2.1: Ergebnisse der solaren Klimatisierung der Festo AG & Co. KG Esslingen für 2009

	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	2009
Einstrahlung auf gesamtes Kollektorfeld in MWh	83	64	104	180	210	203	199	223	159	92	65	47	1628
Nettoertrag Kollektorkreis in MWh	10	11	28	67	93	92	85	96	59	25	14	7,0	586
netto Nutzwärmeertrag in MWh	7,9	7,2	23	61	86	86	78	90	54	21	13	6,9	533
Systemnutzungsgrad in % bezogen auf netto Nutzwärmeertrag	9,5	11	22	34	41	42	39	40	34	23	20	15	32,7
Gesamtwärmeverluste an Kollektorfeld in MWh	10	8,5	8,9	5,2	3,0	1,5	1,4	1,9	2,3	6,4	5,9	5,6	61
Wärme aus Gaskesseln in MWh	548	208	85	78	179	73	324	438	53	111	64	347	2507
Deckungsanteil Solar in %	1,0	1,5	6,0	16	16	21	12	11	14	4,9	3,5	1,2	8,5
Deckungsanteil nachhaltig	30	58	78	80	68	82	50	47	86	74	83	40	60
Wärmeverbrauch AdKMs	0,6	0,1	0,2	155	382	274	530	688	215	126	2,9	1,3	2375
Kälte von Adsorptionskältemaschinen	0	0	0	67	184	102	206	307	80	52	0	0	997
COP	0	0	0	0,44	0,48	0,37	0,39	0,45	0,37	0,41	0,08	0	0,42

Der Deckungsanteil nachhaltig erzeugter Wärme, berechnet aus Nutzwärme der Solaranlage und Abwärme von Kompressoren bezogen auf den Gesamtwärmeverbrauch, beträgt im Mittel 60% und steigt im Sommer auf bis zu 82 % an. Dieser konnte ab Februar 2009 durch eine höhere Kompressorenabwärmeleistung deutlich gesteigert werden. Außerdem erhöht sich der Deckungsanteil auch hier durch die veränderte Betriebsweise der AdKMs (vgl. Abschnitt 3). Für den Betrieb der AdKMs wurden 2375 MWh an Wärme aus dem Wärmenetz der Festo AG & Co. KG benötigt, um damit 997 MWh an Kälte zu erzeugen. Damit ergibt sich ein durchschnittlicher COP (Coefficient of Performance / Quotient aus Nutzkälte und Antriebswärme) von 0,42. Im betrachteten Zeitraum fällt der thermische COP meist deutlich niedriger aus als in den vorhergehenden Monaten, in denen er bei bis zu 0,53 lag. Ursache hierfür ist vermutlich das häufige Anfahren der Maschinen seit Änderung der Betriebsweise der AdKMs im vorliegenden Zeitraum [2,3,4].

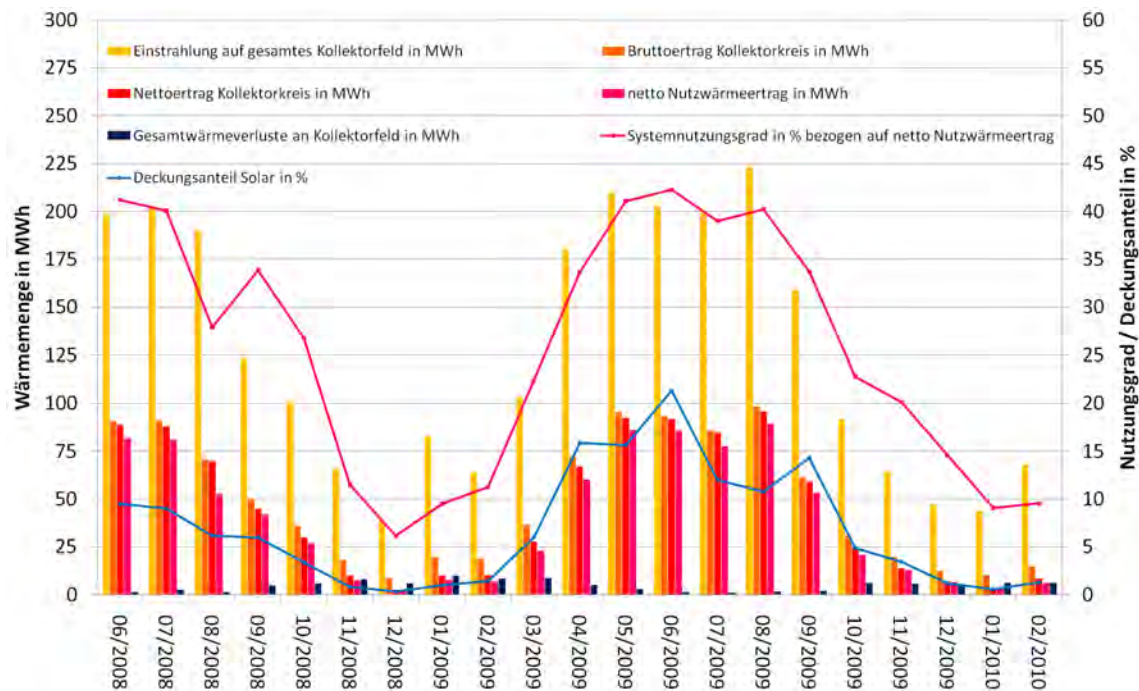


Bild 2.1: Ergebnisse des ersten Intensivmessjahres der solaren Klimatisierung der Festo AG & Co. KG in Esslingen von Juni 2008 bis Februar 2010. Wegen Ventilstörung vom 06. – 15.08.08 nur geringe Entladeleistung. Wegen Sensorausfall auf zwischen 15.09. und 06.10.08 angenommener Speicherverlust von 9 % (Mittelwert aus je einer Woche vor und nach dem Zeitraum der Störung)

### 3 Betriebsweise und Optimierungsmaßnahmen

Die Solaranlage ist mit den AdKMs über einen zentralen Verteiler, an den weitere Wärmeverbraucher angeschlossen sind, verbunden (siehe Bild 1.2). Bei Einspeisung in diesen Hauptverteiler liegen die Rücklauftemperaturen meist über 60 °C. Die Solltemperatur für die Speicherentladung liegt bei 80 °C. Deshalb wurde ein direkter Abzweig zur Bauteilaktivierung eines Neubaus eingebaut. Die Speicher werden bei Entladung zur Bauteilaktivierung ab 35 °C entladen. Hierdurch sind Rücklauftemperaturen von 25 °C und darunter erreichbar. Zur Verhinderung häufigen Umschaltens zwischen Bauteilaktivierung und Hauptverteiler wurde 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.

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 unter-



schreiten einer voreingestellten Kollektortemperatur aktiviert wird und durch Fördern von Speicherwasser zum Kollektor das Einfrieren in den Solarleitungen verhindert. Durch die hohen Vor- und Rücklauftemperaturen bei Entladung zum Hauptverteiler bleibt die Temperatur in den Speichern auf hohem Niveau und es ergeben sich negative Auswirkungen auf den solaren Ertrag und die Wärmeverluste durch die Frostschutzschaltung. In Bild 3.1 links ist jeweils deutlich zu erkennen, dass bei hohen Speichertemperaturen hohe Wärmeverluste an das Kollektorfeld zu verzeichnen sind. Deshalb wurde die prognostizierte Sonnenscheindauer als Regelparameter gelöscht. Es wird jetzt bei Heizbetrieb allein anhand der Speichertemperatur entschieden, ob zur Bauteilaktivierung entladen wird. In Bild 3.1 ist jeweils rechts zu sehen, dass die Speichertemperaturen nun deutlich niedriger liegen und damit die Wärmeverluste über den Kollektorkreis geringer ausfallen. Außerdem ist zu sehen, dass die Wärmeverluste bei hohen Speichertemperaturen zwar größtenteils immer noch von der Speichertemperatur abhängen aber nicht mehr so hoch ausfallen. Dies ist auf eine Änderung der Frostschutzregelung durch den Hersteller zurückzuführen, die bei hohen Speichertemperaturen die Rate des Pumpenbetriebs für den Frostschutz verringert. Eine zusätzlich mögliche Lösung wäre die Installation einer Rücklaufbeimischung zum Kollektorkreisvorlauf, durch die bei aktiver Frostschutzschaltung eine eingestellte Zieltemperatur im Kollektorkreisvorlauf realisiert werden könnte und damit die Verluste sehr wahrscheinlich weiter reduziert werden könnten.

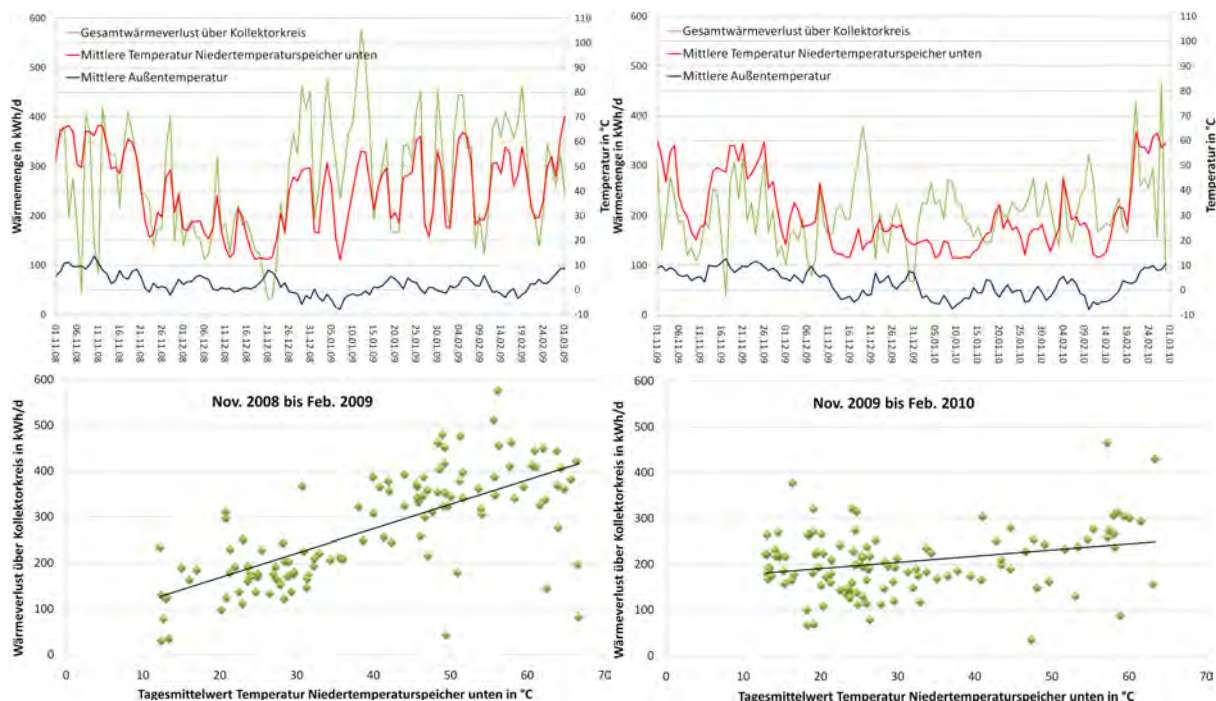


Bild 3.1: Zusammenhang zwischen mittlerer Speichertemperatur des Tages und Wärmeverluste an das Kollektorfeld bei Frostschutzbetrieb vor (links) und nach (rechts) Optimierung der Speicherentladeregelung

Anfang April 2009 wurde die Betriebsweise der AdKMs so geändert, dass diese nur noch in Betrieb gehen, wenn eine nachhaltige Mindestwärmeleistung von der Solaranlage und den Kompressoren über einen bestimmten Zeitraum zur Verfügung steht. Die einzelnen Maschinen werden dann je nach zur Verfügung stehender Wärmeleistung zu- bzw. weggeschaltet. Hierdurch wird eine primärenergetisch ungünstige Zusatzheizung durch die Gaskessel weitgehend vermieden. Die zusätzlich benötigte Kälte wird mit elektromotorischen Kompressionskältemaschinen erzeugt. Wie in Tab. 2.1 und Bild 2.1 zu sehen wurde hierdurch der solare und nachhaltige Deckungsanteil am Gesamtwärmeverbrauch in den Sommermonaten deutlich gesteigert. Um den Kältebedarf der Gebäude abzudecken, mussten im Juli und August 2009 die AdKMs wieder häufiger betrieben werden, als es mit den nachhaltigen Wärmequellen allein möglich gewesen wäre. Dementsprechend fällt der solare Deckungsanteil mit 12 % bzw. 11 %, bei nahezu gleichem solarem Ertrag als im Mai und Juni, deutlich niedriger aus.

Wegen zu geringer Wärmeabnahme am Hauptverteiler kam es in den Übergangszeiten April und September 2009 teilweise zu Stagnationen der Solaranlage (Bild 3.2). Zusätzlich wurde vom Hauptverteiler Wärme in die Solarspeicher eingetragen, da einerseits kaum Wärme am Verteiler abgenommen wurde andererseits aber Wärme von den Kompressoren in das Heizungsnetz eingespeist wurde. Die geringe Wärmeabnahme entstand, da die AdKMs aufgrund der beschriebenen veränderten Betriebsweise nicht in Betrieb waren. Die daraus resultierende Abschaltung der Kollektorkreispumpe, wegen überschrittener Maximaltemperatur in den Solarspeichern, führte zu einer Verringerung des solaren Ertrags.

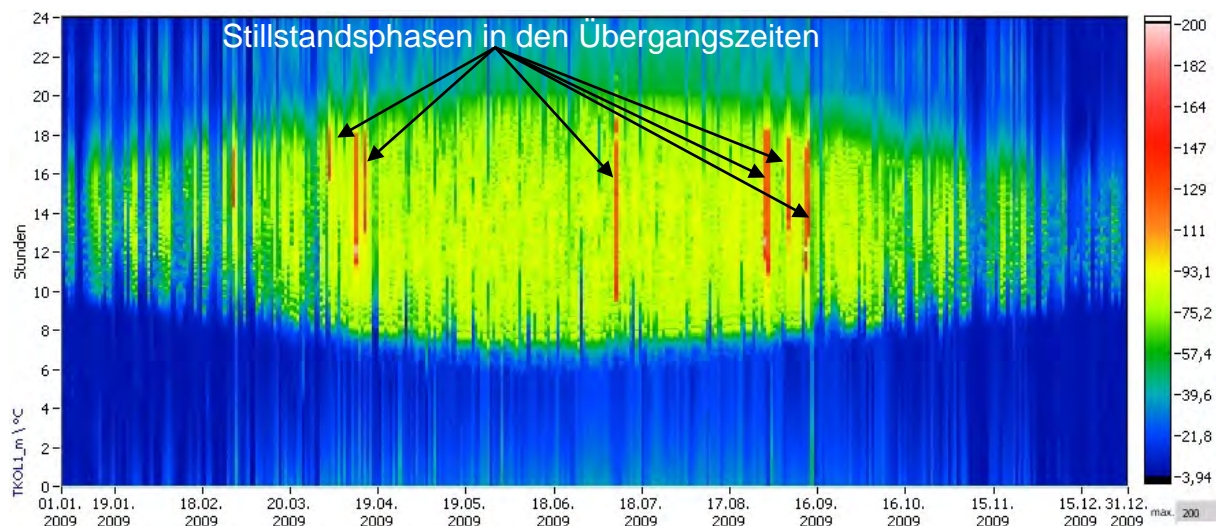


Bild 3.2: Carpetplot Kollektortemperatur der Anlage FESTO: Die dargestellte Temperatur im Kollektor steigt im Stillstand auf bis zu 200 °C. Zu erkennen an den roten Linien in denen die Kollektortemperatur auf deutlich über 100°C ansteigt.

Durch eine schrittweise Verringerung der zuvor beschriebenen nachhaltigen Mindestwärmeleistung für den Betrieb einer AdKM von ca. 500 kW auf nun 350 kW konnte das Problem nicht gänzlich behoben werden. Stagnationen treten fast ausschließlich in den Übergangszeiten auf, wenn das Angebot an nachhaltig erzeugter Wärme nicht für den Betrieb einer AdKM ausreicht, der Solarspeicher aber solar aufgeheizt und nicht entladen wird.

Da die AdKMs nur noch ab 350 kW nachhaltiger Wärmeleistung betrieben werden, kommt es bei schwankender Wärmeleistung von Kompressoren und Solaranlage zu einem ungünstigen Betriebsverhalten mit häufigen Startphasen, die zu einem ineffizienten Betrieb der AdKMs führen [3,4]. Zur Reduzierung des Taktens soll der Betrieb der AdKMs weiter optimiert werden, um einen effizienteren Teillastbetrieb zu ermöglichen. Insbesondere sollen die Volumenströme in den drei Kreisläufen der Kältemaschinen variiert werden.

#### 4 Stillstandsverhalten

Bei auftretenden Stagnationen konnte das nachfolgend beschriebene Verhalten beobachtet werden (Bild 4.1). Die Kollektortemperatur steigt auf bis zu 200 °C (überhitzter Dampf) an. Die Temperatur im Kollektorkreisvorlauf steigt auf bis zu 143 °C, was einem Sattedampfdruck von ca. 3,9 bar entspricht.

Deshalb kann davon ausgegangen werden, dass das flüssige Wasser komplett aus den Kollektoren über den Vorlauf in den ersten Speicher gedrückt wird und 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 Solaranlage ist in der Lage im Fall einer Stagnation bei voller Einstrahlung den überhitzten Dampf aufzunehmen und nach der Kondensation des Dampfes wieder den regulären Betrieb selbständig aufzunehmen.



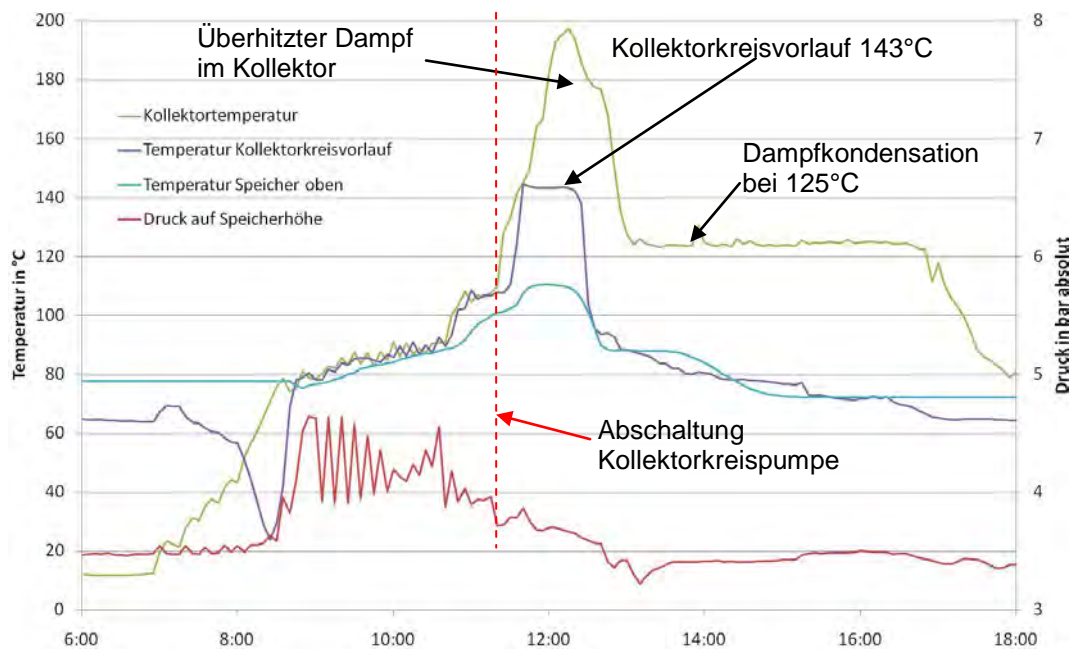


Bild 4.1: Stillstandsverhalten des Kollektorfeldes der solaren Klimatisierung der Festo AG & Co. KG in Esslingen am 17.08.08

## 5 Zusammenfassung

Die bisherige Betriebserfahrung zeigt, dass die Kollektoranlage einen sinnvollen Beitrag zur Einsparung an Primärenergie und zur Vermeidung von CO<sub>2</sub>-Emissionen leistet. Die vom Kollektorhersteller abgegebene Ertragsgarantie von 500 MWh/a in den Solarspeicher einzuspeisende Wärme, bei einem Nutzungsgrad von 33,4 %, wurde in 2009 mit 586 MWh/a bei einem Nutzungsgrad von 36 % übertroffen. Durch Optimierungsmaßnahmen an der Regelung der Speicherentladung zur Niedertemperaturnutzung im Winter konnten geringere Wärmeverluste im Bereich der Frostschutzschaltung und eine Absenkung der Systemtemperatur und damit höhere Nettoerträge erzielt werden. Insgesamt ergibt sich zusammen mit der Kompressorenabwärme ein Deckungsanteil der nachhaltig erzeugten Wärme von 60 % (Deckungsanteil solar 8,5 %). Dieser konnte durch die veränderte Betriebsweise der AdKMs höherer Abwärmeleistungen der Kompressoren und einen höheren solaren Ertrag im Vergleich zum Beginn der Messphase in 2008 deutlich gesteigert werden.

## 6 Literatur:

- [1] K. Huber, E. Bollin; „Detailmonitoring einer solarthermischen Anlage zur Unterstützung der Kälteversorgung eines Büro- und Verwaltungsgebäudes“; 18. Symposium Thermische Solarenergie; Bad Staffelstein; 23.-25.04.2008
- [2] E. Bollin, K. Huber, E. Scheck, D. Jödicke; „Erste Ergebnisse und Betriebserfahrungen des Detailmonitorings einer solarthermischen Anlage zur Unterstüt-

zung der Kälteversorgung eines Büro- und Verwaltungsgebäudes“; 19. Symposium Thermische Solarenergie; Bad Staffelstein; 06.-08.05.2009

- [3] K. Huber, E. Bollin, E. Scheck, E. Wiemken, J. Wewior, U. Eicker, D. Pietruschka, A. Dalibard, R. Meißner, C. Kettner; „Solare Unterstützung der Kälteversorgung eines Büro- und Verwaltungsgebäudes Betriebsanalyse und energetische Bewertung“; Technik am Bau; Jan. 2010
- [4] K. Huber, E. Bollin, E. Scheck, E. Wiemken, J. Wewior, U. Eicker, D. Pietruschka, A. Dalibard, R. Meißner, C. Kettner; „Operation Analysis and Energy Evaluation of a Solar-thermal System Assisting the Air Conditioning of an Office/ Administration Building“; [www.renknow.net](http://www.renknow.net); 25.01.2010
- [5] [www.fgnet.fh-offenburg.de](http://www.fgnet.fh-offenburg.de)