

Autor

Klaus Huber¹, Elmar Bollin¹, Eva Scheck¹, Edo Wiemken², Jakub Wewior², Ursula Eicker³, Dirk Pietruschka³, Antoine Dalibard³, Rolf Meißner⁴, Christiane Kettner⁴

¹Hochschule Offenburg (HSO), Badstr. 24, 77652 Offenburg, bollin@fh-offenburg.de,

²Fraunhofer ISE (FHG ISE), 79110 Freiburg, edo.wiemken@ise.fhg.de,

³Hochschule für Technik Stuttgart (HfT), 70174 Stuttgart, ursula.eicker@hft-stuttgart.de,

⁴Paradigma Deutschland GmbH, 76307 Karlsbad, R.Meissner@paradigma.de



Bild 1a: Luftaufnahme des Firmengeländes der Festo AG & Co. KG in Esslingen

Solare Unterstützung der Kälteversorgung eines Büro- und Verwaltungsgebäudes

Betriebsanalyse und energetische Bewertung

Die Hochschule Offenburg begleitet seit Juli 2006 in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer ISE in Freiburg und der HfT Stuttgart 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 Kompressorabwärme und Gaskesseln betrieben wurde, durch eine Solaranlage als drittem Wärmelieferanten ergänzt.

Das Solarsystem der Festo AG & Co. KG in Esslingen setzt sich aus einem Kollektorfeld mit 1330 m² Bruttokollektorfläche CPC-Vakuumröhrenkollektoren der Fa. Paradigma und zwei Pufferspeichern mit je 8,5 m³ Speichervolumen zusammen. Die Kälteerzeugung wird mit drei Adsorptionskältemaschinen (AdKM) 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 außerhalb der Betriebszeiten der Kältemaschinen die Solarwärme optimal bei niedrigen Rücklauftemperaturen nutzen zu können. Im Vorfeld und parallel zum Anlagenbetrieb wurden von der HfT-Stuttgart sowie vom Kollektorhersteller Paradigma GmbH dynamische Simulationen zur Anlagendimensionierung und -evaluation durchgeführt. Mit Hilfe von 81 zusätzlichen Sensoren wird ein Detailmonitoring des Solar- und Kälteanlagenbetriebs ermöglicht. Nach Beendigung des Probetriebs konnte im August 2008 das erste Intensivmessjahr gestartet werden [1,2].

Motive für den Bau der Anlage und Vorgeschichte (HSO)

Auf dem Betriebsgelände der Festo AG & Co. KG in Esslingen fällt in großem Umfang Abwärme von Kompressoren mit einer Temperatur zwischen 65 und 75 °C an. Um diese auch im Sommer, wenn keine Raumheizung benötigt wird, nutzen zu können und damit Primär-

energie und CO₂-Emissionen einzusparen, wurden thermische Kältemaschinen in Betracht gezogen. Für handelsübliche Absorptionskältemaschinen war das mittlere Antriebstemperaturniveau von ca. 70 °C zu niedrig, weshalb drei AdKM der Firma Mayekawa mit je 353 kW Nennkälteleistung angeschafft und 2001 in Betrieb genommen wurden. Für den Betrieb der Kältemaschinen wurde neben der Kompressorabwärme auch Wärme von Gaskesseln benötigt. Um den Anteil der Gaskesselwärme zu reduzieren, entschied sich Festo als dritte Wärmequelle eine solarthermische Anlage zu installieren. Hier bot sich als Standort ein Scheddach auf einer Fabrikhalle an, das sowohl wegen der Neigung der Scheds (30°) als auch der Ausrichtung (Süd +18°) nahezu ideal ist. Um einen höheren Ertrag realisieren zu können und um das benötigte Temperaturniveau von 80 °C zu gewährleisten, wurden Vakuumröhrenkollektoren gewählt.

Auslegung und Hydraulik des Solarsystems (Paradigma)

Das Solarsystem der Kälteversorgung bei der Festo AG & Co. KG wird als Besonderheit mit Wasser als Wärmeträger betrieben („Nur-Wasser-System“). Zudem handelt es sich um ein Einkreisssystem, d.h. es wird auf Wärmeübertrager zwischen Kollektorkreis und Pufferspeicher/Heizsystem verzichtet. Das Nur-Wasser-System bietet einige Vorteile gegenüber Systemen die den Frostschutz mit Glykol im Kollektorkreis gewährleisten, bedarf aber einer aktiven Frostschutzschaltung im Solarregler.



Bild 1b: Vakuumröhren-Kollektorfeld auf dem Sheddach einer Fabrikhalle



bildunterschrift

Fotos: Festo

Insbesondere aber führt die vergleichsweise geringe Viskosität des Wassers gegenüber einem Glykol-Wasser-Gemisch (1/9 bei 0 °C ... 1/3 bei 100 °C) zu einer besseren hydraulischen Beherrschbarkeit, weil alle Vorgänge im turbulenten Strömungsbereich stattfinden. Gleich vier Gründe führen zu deutlich besseren Wärmeübertragungseigenschaften von Wasser gegenüber Frostschutzmitteln:

1. dünnere Grenzschichten, d. h. größere Nusseltzahlen, d. h. deutlich niedrigere Wärmeübergangswiderstände,
2. größere Wärmeleitfähigkeit, d. h. besserer Wärmetransport (ca. 50 % bei 40 °C),
3. höhere Wärmekapazität, d. h. höhere Leistungsdichte (ca. 15 % bei 40 °C),
4. geringerer Druckverlust (ca. 30 % bei turbulenter und 75 % bei laminarer Strömung), d. h. besserer Wärmetransport, Einsparung von sehr viel Elektroenergie.

Diese Prozesse spielen sowohl im Kollektor als auch im Wärmetauscher eine Rolle. Im Kollektor verbessert der Gebrauch von Wasser wesentlich den Kollektorwirkungsgrad. Beim Wärmetauscher erzielt Wasser bei bis zu zwei Dritteln kleineren Wärmetauscherflächen immer noch das gleiche Resultat wie typische Frostschutzmittel. Noch besser ist es aber, wie bei der Anlage Festo gleich ganz auf einen Wärmetauscher zu verzichten. Es ist unverständlich, dass die Leistungsermittlung nach DIN EN 12975 mit Wasser durchgeführt und die Ergebnisse auch für Frostschutzmittel angewandt werden. Das mag beim Einfamilienhaus, bei dem weder die Funktion noch der Ertrag kontrolliert werden, keine Rolle spielen, bei solaren Großanlagen mit Ertragsgarantien wird dies Kollektorhersteller zunehmend in Schwierigkeiten bringen.

Wegen der großen Druckautorität der Kollektorreihen konnte das Rohrnetz asymmetrisch ausgelegt werden. Die in die Kollektoren integrierten Rücklaufleitungen sparten ca. 700 m Rohre auf dem Dach. Asymmetrisch heißt, dass im von der Sammelleitung fernsten Kollektor der geringste Durchfluss herrscht, und dass der spezifische Durchsatz bis hin zur Sammelleitung anwächst. Dies dient der kontrollierten Entleerung im Stagnationsfall und der automatischen Befüllung. Es gibt im Kollektorfeld weder Ventile noch Abgleichvorrichtungen. Die Serienschaltung von zwei Solarpumpen gewährleistet den notwendigen Druck bei akzeptabel kleinen Pumpen. Dazu genügen noch sparsame Nassläufer-Pumpen, deren Abwärme weitestgehend dem System zugute kommt. Bei Ausfall einer Solarpumpe sind sowohl der Frostschutz als auch ein Notbetrieb mit etwa 75 % des Sollvolumenstromes noch gewährleistet.

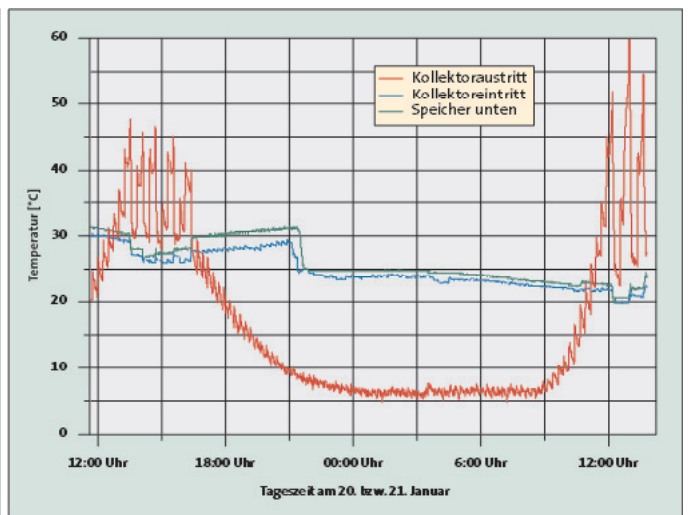


Bild 2: Verlauf von Kollektorein- und -austrittstemperaturen sowie der Speichertemperatur während des Frostschutz-Betriebs; die Kollektoraustrittstemperatur wird immer auf mindestens 5 °C gehalten

Beim so genannten „Eimerprinzip“ wird das Solarfeld immer nur „geleert“, wenn es heiß genug ist. Die Solarpumpen arbeiten dabei, wie auch im Frostschutzbetrieb, intervallartig, dann aber stets mit voller Leistung. Bei geregelten Solarpumpen (Matched-flow) ist die definierte Durchströmung jedes einzelnen Kollektors nicht gewährleistet. Das Eimerprinzip reduziert die Pumpenlaufzeit auf etwa die Hälfte gegenüber drehzahlregulierten Solarpumpen und spart besonders vor jedem Einschalten hohe Rohrleitungswärmeverluste.

Regelung des aktiven Frostschutzes (Paradigma)

Aktiver Frostschutz bedeutet, dass bei Bedarf geringe Wärmemengen aus dem Speicher dem Solarkreis zugeführt werden. Dafür genügt meist ein kurzes Pumpen in größeren Zeitabständen. Die Wärme stammt aus dem unteren Speicherbereich mit niedrigen Temperaturen und ist damit anderweitig oft nicht nutzbar. Der aktive Frostschutz ist auf ca. 5 °C im Kollektorausritt ausgelegt. Die Wärmeabstrahlung an die Umgebung ist gegenüber einer Anlage mit Frostschutzmittel und freier Auskühlung nur wenig erhöht, denn auch bei diesen erfolgt die Annäherung an die der Umgebungstemperatur nur sehr langsam.

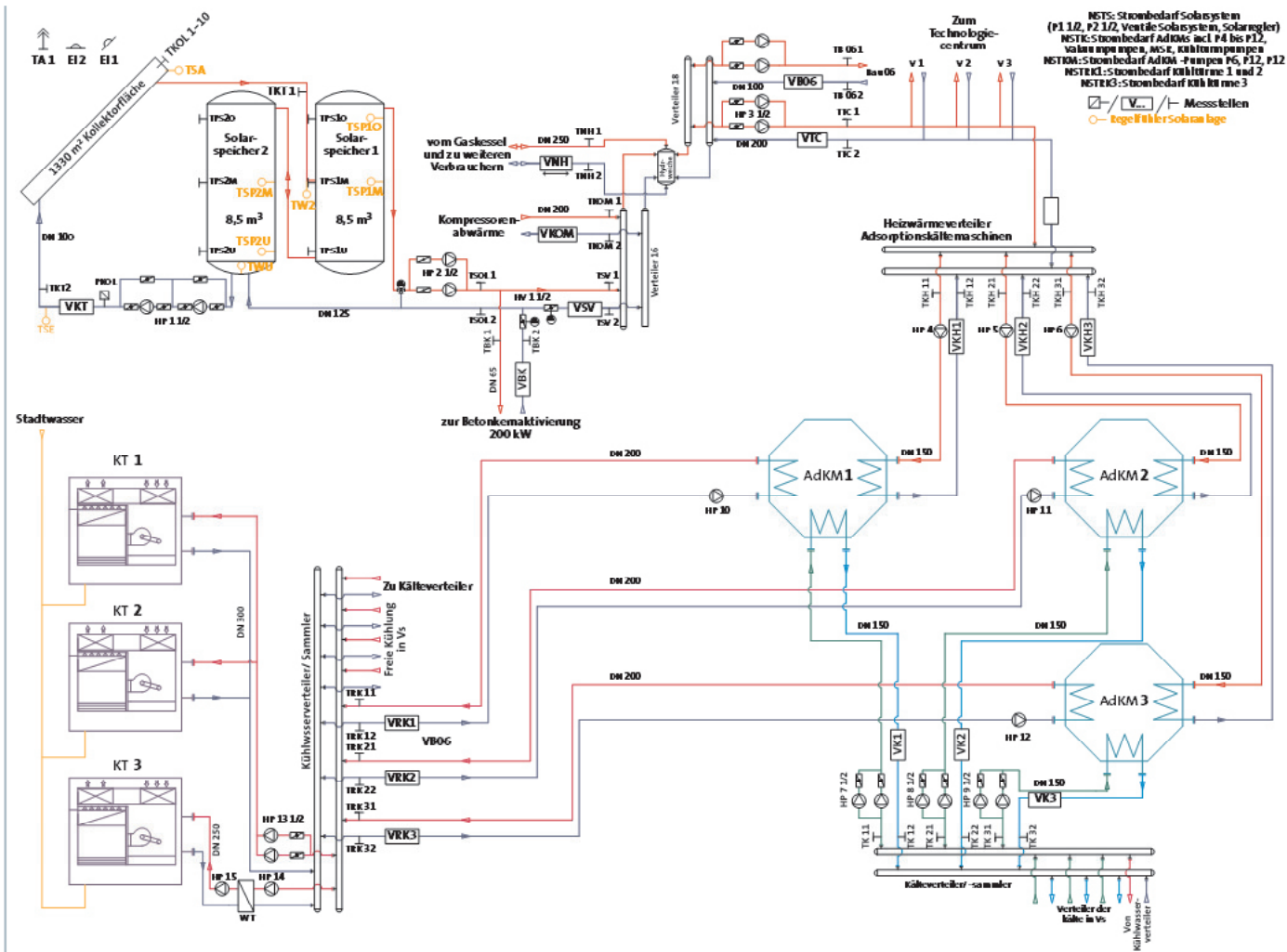


Bild 3: Schema der solaren Klimatisierung der Festo AG & Co. KG in Esslingen mit den Mess- und Regelfühlern des Solarsystems

Der Frostschutz stützt sich lediglich auf die ohnehin für die Einspeiseregulierung verwendeten Sensoren: untere Speichertemperatur, Solarrücklaufstemperatur sowie Kollektorausstrittstemperatur. Die außen liegenden Solarrohre kühlen auch bei guter Dämmschichtdicke deutlich schneller aus als die Vakuumröhrenkollektoren. Obwohl auf Temperaturfühler in den Rohren wegen des Aufwands verzichtet wird, muss der Solarregler wissen, welche Umlaufzeit für den Frostschutz notwendig ist, denn in der niedrigsten Frostschutzstufe, die für die meiste Zeit ausreicht, beträgt die „Reisezeit“ des Wassers im Solarvorlauf vom Kollektorfühler bis zum Speichereintritt viele Stunden. Das ist deutlich länger als die Zeit, die jedes der verwendeten Rohre benötigte, um einzufrieren, wenn die Außentemperatur z.B. $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ betragen würde. Der Frostschutz-Algorithmus passt das Regelverhalten an die jeweiligen Bedingungen an, um eine maximale Frostsicherheit bis $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ zu gewährleisten, ohne gleichzeitig bei weniger starkem Frost die Rohre zu warm zu halten. Das gelingt sehr gut, wenn die Speichertemperatur im unteren Bereich nachts im Winter nicht höher als ca. $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ ist, da, wie oben beschrieben, die Umlaufzeiten nicht beliebig verkürzt werden können, um die höhere Temperatur im Solarrücklauf zu kompensieren. Im Normalfall wird der Speicher im Winter für den Heizbetrieb soweit entladen, dass unten Temperaturen von nur 30 bis $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ vorherrschen. Bild 2 zeigt ein Beispiel für das Arbeiten der Frostschutz-Funktion. Die regelmäßigen Zacken in der Kollektorausstrittstemperatur stammen

von sekundenlangen Einschaltphasen der Solarpumpe. Nach der Abkühlphase regelt die Frostschutzfunktion die Kollektorausstrittstemperatur so, dass in den Minima ca. $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ erreicht wird. Wie die Erfahrungen mit dieser Anlage gezeigt haben, gibt es ein Manko bei der bisher üblichen Art der Ertragskontrolle bei solaren Großanlagen, nämlich die Vernachlässigung der „negativen Wärmeeinträge“ der Solaranlage in den Speicher. Negative Wärmeeinträge entstehen z. B. morgens beim ersten Einspeisen der Anlage, da hier zunächst der noch kalte Inhalt des Vorlaufrohres in den Speicher gespült wird. Anders als bei kleinen Anlagen übersteigt bei solaren Großanlagen der Fluidinhalt der Rohre oft deutlich den der Kollektoren. Bei der Festo-Anlage enthält z. B. allein der Solarvorlauf mehr Wasser als in alle Kollektoren zusammen. Negative Wärmeeinträge können auch entstehen, wenn die Rückflussverhinderung im Solarkreis versagt. Dann kann sich eine thermische Schwerkraftzirkulation in oder entgegen der normalen Fließrichtung ausbilden, bei der ständig warmes Wasser aus dem Speicher fließt und abgekühlt zurückkehrt. Dieser Effekt trat bei der Anlage Festo im Probebetrieb ebenfalls auf. Wird er über längere Zeit nicht bemerkt, kann das erhebliche Wärmeverluste des Speichers zur Folge haben. Diese Wärmeströme können mit vertretbarem Aufwand nicht genau genug gemessen werden. Nur eine geeignete Funktionskontrolle im Solarregler, welche z. B. die Fehlzirkulationen meldet, kann helfen, diese Verluste dauerhaft zu vermeiden. Anfahverluste und Fehlzirkulationen treten

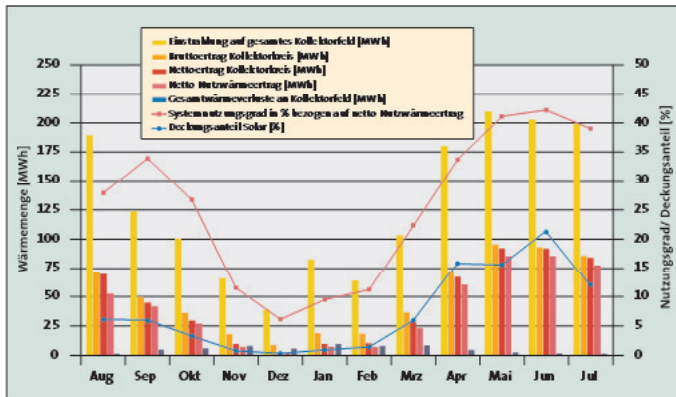


Bild 4: Grafische Darstellung der wichtigsten Messdaten aus Tabelle 1

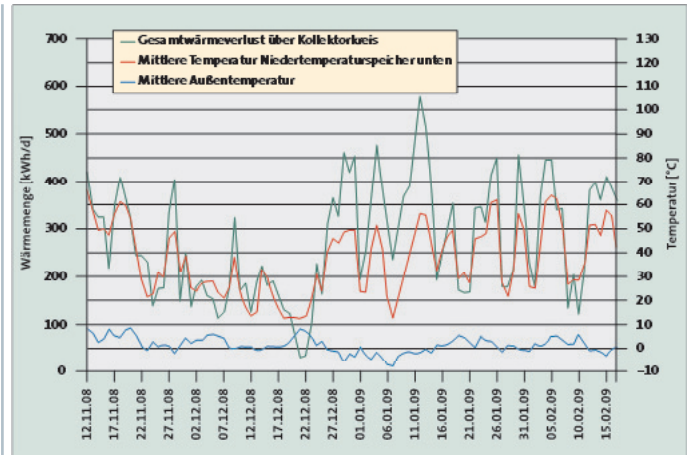


Bild 5: Zusammenhang zwischen mittlerer Speichertemperatur des Tages und Wärmeverluste an das Kollektorfeld bei Frostschutzbetrieb

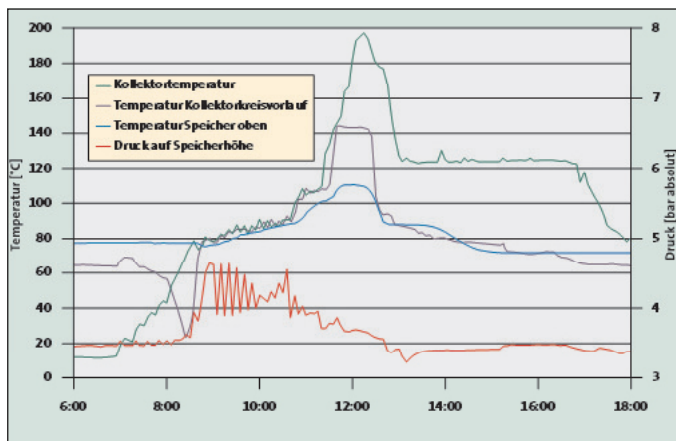


Bild 6: Stillstandsverhalten der Solaranlage der solaren Klimatisierung der Festo AG & Co. KG in Esslingen am 17. August 2008

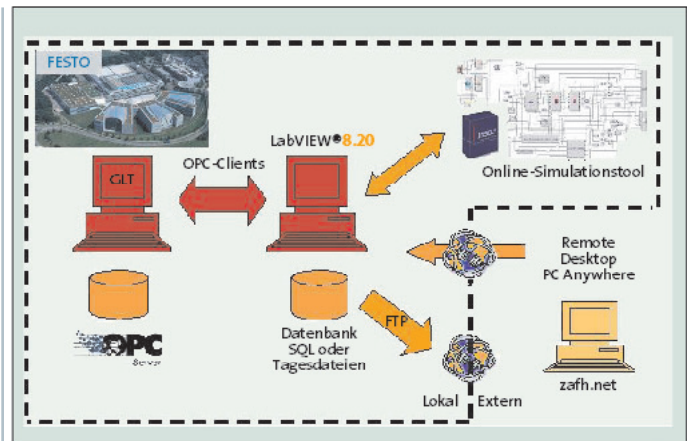


Bild 7: Kommunikationsstruktur für Online-Simulationen und externen Datenaustausch

bei allen Solaranlagen auf, das wurde aber bis zur Überwachung der Anlage Festo ignoriert.

Auch der aktive Frostschutz verursacht geringe negative Wärmeeinträge in den Speicher. Um diese zu untersuchen, wurden bei der Anlage Festo erstmals auch alle negativen Wärmeströme gemessen.

Noch weitere Faktoren müssen bei der energetischen Bewertung des aktiven Frostschutzes im Vergleich mit glykolgefüllten Anlagen bedacht werden:

Die vom aktiven Frostschutz während der Nacht in Kollektoren und Solarrohre eingebrachte Energie ist nicht verloren, sondern steht am nächsten Morgen zum Teil noch zur Verfügung. Die Erwärmungsphase beginnt dann von einem höheren Temperaturniveau aus als bei freier Auskühlung bis auf Umgebungstemperatur. Daher kann das Einspeisen früher beginnen.

Bleibt nach einem Einspeisetag abends im Speicher nur Restwärme unterhalb des niedrigsten nutzbaren Temperaturniveaus zurück, dann ist diese Wärme praktisch wertlos und es hat auf die Jahresbilanz der solar gelieferten Nutzenergie fast keinen Einfluss, ob diese Wärme für den Frostschutz verwendet wurde oder nicht.

Der Stromverbrauch der Solarpumpen für den Frostschutz ist gering und beträgt nur ein Bruchteil des Bedarfs im Solarbetrieb. Das Eimerprinzip führt zu einer Halbierung der Solarpumpenlaufzeit. Die beim Betrieb mit Frostschutzmittel nötige Systemtrennung erfordert dage-

gen in der Regel eine zusätzliche Solarpumpe. Die stark verschiedene notwendige Pumparbeit für Wasser und für Frostschutzmittel wurde bereits im letzten Abschnitt diskutiert.

Der Einsatz von Wasser als Wärmeträger ist in nicht frostsicheren Klimaregionen nur mit Vakuumröhrenkollektoren sinnvoll. Für Flachkollektoren sind dafür die Wärmeverluste viel zu hoch. Selbst mit sehr guten Vakuumröhrenkollektoren wird man in gemäßigten Klimazonen wie Deutschland mit einem zu simplen Frostschutz-Algorithmus keine gute Frostsicherheit erreichen und deutlich zu hohe Wärmeverluste in Kauf nehmen müssen. Erst die Kombination von sehr guten CPC-Vakuumröhrenkollektoren mit einem aktiven Frostschutz bringt neben den oben beschriebenen Vorteilen auch einen energetischen Vorteil.

Wenn die Solarwärme nicht abgenommen wird, schalten die Solarpumpen ab und das Wasser in den Kollektoren fängt rasch an zu sieden. Der Dampf dehnt sich in die Pufferspeicher aus und kondensiert dort wieder. Bei diesem Übergang der Solaranlage in die Stagnation erwärmt der kondensierende Dampf die Puffer nochmals um etwa 15 bis 20 K. Die Solarvorlaufleitung kann während des Übergangs in die Stagnation bis zu 180 °C erreichen, kühlt dann aber ganz langsam wieder auf Umgebungstemperatur ab und füllt sich wieder mit Wasser, während in der Solaranlage in der Stagnation nur noch Trockendampf mit 200 bis 300 °C anzutreffen ist. Die Stagnation kann problemlos beliebig oft und lange eintreten. Entgegen allen Erwartungen des Betreibers war

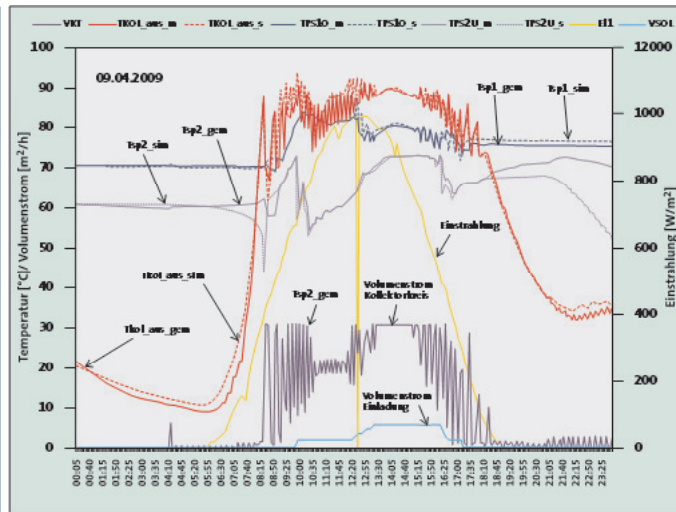


Bild 8: Ergebnisse des Onlinesimulationsmodells der Solaranlage im Vergleich zu realen Messdaten

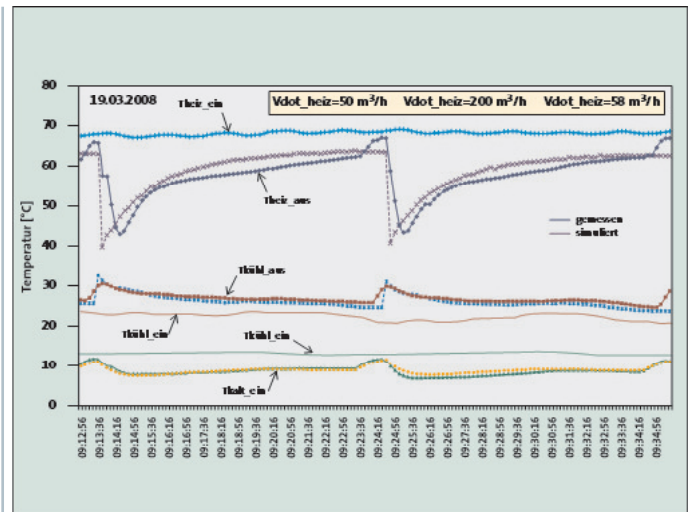


Bild 9: Ergebnisse des Onlinesimulationsmodells der Adsorptionskälteanlagen im Vergleich zu realen Messdaten

die Anlage Festo bereits 18-mal im Stillstand. Regelmäßig wurde dies jedoch nur von den Messgeräten und nicht von den anwesenden Mitarbeitern registriert, weil der Prozess trotz der schnellen Dampfbewegung unspektakulär geräuscharm verläuft.

Monitoring und Anlagentechnik (HSO)

Mit Hilfe des zusätzlichen Messsystems sollen alle Energieströme, innerhalb der Systemgrenzen Solaranlage/Hauptverteiler und Adsorptionskälteanlage und über die Systemgrenzen hinweg erfasst werden. Insbesondere wird neben der Wärmemenge, die vom Kollektorfeld in die Speicher eingespeist und an das Heizungssystem abgegeben wird, auch die Wärme von Heizkesseln und Kompressoren erfasst. Wegen des „Nur-Wasser-Systems“ und der damit verbundenen Frostschutzschaltung, wird auch die Wärme, die aus dem Heizungssystem über die Pufferspeicher zum Kollektorfeld gepumpt wird, separat erfasst. An den AdKM werden die Wärmemengen an allen drei Kreisläufen jeder Maschine gemessen. Die differenzierte Erfassung des Stromverbrauchs der AdKM, deren peripherer Pumpen sowie der Kühltürme soll Aufschluss über den elektrischen Energiebedarf der Maschinen liefern und eine Aufschlüsselung nach einzelnen Verbrauchern ermöglichen. Darüber hinaus wird die solare Einstrahlung sowie die Außen- und Kollektortemperatur erfasst. Bild 3 zeigt das Anlagenschema mit Mess- und Regelfühlern der Solaranlage.

Prinzip der Adsorptionskältetechnik (FHG ISE)

Große Konzerne und produzierende Unternehmen besitzen häufig einen hohen Bedarf an Kühlleistung für diverse Anwendungen. Heutzutage benötigen selbst kleine Unternehmen mit Serverräumen eine ganzjährige Kühlung. Die dadurch entstehenden Kosten für den Stromverbrauch können dabei einen Großteil der Kosten für Heizung und Klimatisierung ausmachen. Eine Alternative zu strombetriebenen Kompressionskältemaschinen sind dabei Ab- & Adsorptionskältemaschinen. Diese Geräte benötigen als Antriebsenergie primär Wärme, der Stromverbrauch der Geräte selbst ist minimal, jedoch sind die peripheren Stromaufnahmen der Kreislaufpumpen und insbesondere für die Rückkühlung nicht zu vernachlässigen. Dennoch erfolgt eine Entlastung der Stromnetze.

AdKM benötigen für den Betrieb Wärme auf niedrigem Temperaturniveau (60 bis 90 °C). Zudem enthalten die Maschinen selbst kaum bewegliche Teile, sie sind daher vergleichsweise robust im Aufbau. Als Kältemittel wird Wasser eingesetzt, als Sorptionsmaterial dient bis

vor kurzem ausschließlich Silicagel, in neueren Entwicklungen werden auch Zeolithe eingesetzt.

Eine marktübliche AdKM besteht aus vier Kammern: Dem Verdampfer, dem Adsorber, dem Kondensator und dem Desorber. Adsorber und Desorber sind identisch aufgebaut: die Kammern enthalten einen Wärmeübertrager, der in das Sorptionsmaterial eingebettet ist bzw. davon in möglichst gutem Wärmekontakt umgeben ist. Im Adsorber wird der Kältemitteldampf aus dem Verdampfer vom Sorptionsstoff adsorbiert. Die frei werdende Sorptionswärme muss über den Wärmeübertrager an den Kühlkreislauf (Rückkühlwerk) abgegeben werden. Der Adsorptionsprozess wird bis zur Sättigung des Sorptionsstoffes durchgeführt, danach wird auf die zweite Kammer umgeschaltet. Die jeweils andere Kammer wird in der Zwischenzeit regeneriert, d.h., das Wasser wird aus dem Sorptionsmaterial wieder ausgetrieben (desorbiert), indem statt Kühlwasser dem Wärmeübertrager Antriebswärme zugeführt wird. Die Geräte arbeiten damit zyklisch; typische Periodenlängen liegen zwischen 7 und 15 min. Das desorbierte Kältemittel wird im Kondensator wieder verflüssigt und dem Verdampfer erneut zugeführt. Im Verdampfer wird dem externen Kaltwasserkreis bei der Verdampfung des Kältemittels Wärme entzogen, dadurch erfolgt eine Absenkung der Kaltwassertemperatur zur effektiven Gebäudekühlung. Elektrische Energie wird zur Regelung und zum Umschalten der Kammerventile benötigt; die AdKM am Standort Festo enthalten zusätzlich eine integrierte Kältemittelpumpe. Insgesamt ist der Stromverbrauch der Maschinen – ohne die externen Kreislaufpumpen – sehr gering. Weitere Informationen zu Adsorptionskältemaschinen im Zusammenhang mit solarthermischer Kühlung können [3] entnommen werden.

Betriebsergebnisse und -erfahrungen (HSO / FHG ISE)

Messergebnisse Solarsystem (HSO)

Seit 1. August 2008 läuft die Intensivmessphase. Im Fünf-Minuten-takt werden die Messwerte von 81 Sensoren erfasst und täglich von der Hochschule Offenburg abgerufen. Zusätzlich erhalten alle Projektbeteiligten Zugang zu den wissenschaftlichen Messdaten. Bis auf wenige Störungen liegen aus dem ersten Intensivmessjahr vom 1. August 2008 bis 31. Juli 2009 vollständige Messdaten vor. Die Messdaten sind in Tabelle 1 zusammengefasst und teilweise in Bild 4 grafisch dargestellt.

Der aufgetretene Sensorausfall bei der Entladevolumenstrommessung (VSV) zwischen dem 15. September und 6. Oktober 2008) wurden in

Tabelle 1: Ergebnisse des ersten Intensivmessjahres der solaren Klimatisierung der Festo AG & Co. KG in Esslingen von August 2008 bis Juli 2009

	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	März	Apr	Mai	Jun	Juli	gesamt
Einstrahlung auf gesamtes Kollektorfeld in MWh	190	124	101	66	39	83	64	104	180	210	203	199	1563
Nettoertrag Kollektorkreis in MWh	70	45	30	10	2,8	10	11	28	67	93	92	85	543
netto Nutzwärmeertrag in MWh	53*	42**	27**	7,6	2,4	7,9	7,2	23	61	86	86	78	481
Systemnutzungsgrad in % bezogen auf netto Nutzwärmeertrag	28*	34**	27**	12	6,2	9,5	11	22	34	41	42	39	31
Gesamtwärmeverluste an Kollektorfeld in MWh	1,6	4,9	6,2	8,2	6,2	10	8,5	8,9	5,2	3,0	1,5	1,4	66
Wärme aus Gaskesseln in MWh	565	445	563	685	474	548	208	85	78	179	73	324	4227
Deckungsanteil Solar in %	6,2	6,0	3,4	0,8	0,3	1,0	1,5	6,0	16	16	21	12	6,3
Deckungsanteil Nachhaltige Wärme in %	34	36	29	25	33	30	58	78	80	68	82	50	45
Wärmeverbrauch AdKMs in MWh	725	521	522	420	47	0,6	0,1	0,2	155	382	274	530	3577
Kälte von AdKMs in MWh	383	267	251	184	22	0	0	0	67	184	102	206	1665
COP	0,53	0,51	0,48	0,44	0,46	0	0	0	0,44	0,48	0,37	0,39	0,47

* 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 dem Zeitraum)

Tabelle 1 und Bild 4 bei der Auswertung derart berücksichtigt, dass für diesen Zeitraum der gleiche prozentuale Wärmeverlust im Speicher unterstellt wurde, wie in den beiden Wochen vor und nach dem Fühlerausfall. Die Störung eines Ventils auf der Entladeseite (6. bis 15. August), die zu einer deutlichen Verringerung des Entladevolumenstroms und damit des Ertrags führte, wurde nicht weiter berücksichtigt.

Im Intensivmessjahr konnten bei einer solaren Strahlungsmenge auf das Kollektorfeld von 1563 MWh (1283 kWh/m²), 543 MWh (445 kWh/m²) (Nutzungsgrad 35%) an Wärme in die Solarspeicher eingespeist werden. Hiervon wurde bereits die Wärmemenge, die an Anfahr- und Frostschutzverlusten (insgesamt 66 MWh bzw. 54 kWh/m²) entstanden ist, abgezogen. Auf der Entladeseite konnten den Speichern 481 MWh (395 kWh/m²) Wärme entnommen werden (Nutzungsgrad 31%). Auch hier wurden bereits Anfahr- und Frostschutzverluste abgezogen. Der solare Deckungsanteil für den betrachteten Zeitraum von 6,3% fällt sehr gering aus. In den Sommermonaten Juni und Juli konnten Deckungsanteile von bis zu 21% erzielt werden. Ursache hierfür ist allerdings auch die veränderte Betriebsweise der AdKM wodurch die Gaskessel seltener zum Einsatz kommen. Im Juli 2009 wurde die Betriebsweise nochmals verändert, so dass der Deckungsanteil der nachhaltig erzeugten Wärme wieder deutlich geringer ausfiel (vgl. Kapitel „Betriebsweise und Optimierungsmaßnahmen“).

Der Deckungsanteil nachhaltig erzeugter Wärme, berechnet aus Nutzwärme der Solaranlage und Abwärme von Kompressoren bezogen auf den Gesamtwärmeverbrauch, beträgt 45%. Dieser konnte ab Februar 2009 durch höhere Kompressorabwärmeleistungen deutlich gesteigert werden. Außerdem erhöht sich der Deckungsanteil auch hier durch die veränderte Betriebsweise der AdKM. Für den Betrieb der AdKM wurden 3577 MWh an Wärme aus dem Wärmenetz der Festo AG & Co. KG benötigt, um damit 1665 MWh an Kälte zu erzeugen. Damit ergibt sich ein durchschnittlicher COP (Coefficient of Performance; der Quotient aus Nutzkälte und Antriebswärme) von 0,47. In den Monaten April bis Juli 2009 fällt der thermische COP deutlich niedriger aus als in den anderen Monaten.

Messergebnisse und Betriebsbewertung Adsorptionskältemaschinen (FHG ISE)

Für die Bewertung des Anlagenbetriebs der AdKM wurden auch Messdaten aus den beiden Monaten vor Beginn des Intensivmessjahres am 1. August 2009 herangezogen. Während der Analyse der Messdaten

wurden die vom Hersteller der Kältemaschinen angegebenen Nennbetriebsbedingungen mit den IST-Zuständen verglichen. Es zeigt sich, dass die Kältemaschinen überwiegend außerhalb der Nennbetriebstemperaturen gefahren werden und zusätzlich die Massenströme im Heizkreis stark von den Nenndaten abweichen. Dennoch erreichen die Maschinen unter Berücksichtigung dieser Umstände akzeptable Ergebnisse. Eine Häufung der Betriebszustände wurde bei 69 °C Antriebstemperatur, 9,5 °C Kaltwassertemperatur und 26 °C Kühlwassertemperatur beobachtet. Zwei der baugleichen Maschinen erreichen dabei Monats-COP zwischen 0,5 und 0,6. Die dritte Maschine weist vermutlich Schwierigkeiten mit der Vakuumdichtigkeit auf und erreicht daher Monats-COPs zwischen 0,4 und 0,5.

Für den Betrieb entscheidend ist zusätzlich auch die kontinuierliche Betriebsdauer der Maschinen. In der Startphase produzieren Kältemaschinen häufig verminderte Kälteleistungen, was sich negativ auf den COP auswirkt. Bei der Untersuchung der Laufzeitlängen zeigte sich, dass die Maschinenlaufzeiten bei einem Zehntel bis zu einem Drittel der gesamten Laufzeiten weniger als 2 h betrug. Dies hat häufige Startphasen zur Folge.

Die übrige aufgewendete Energie für den Betrieb der Adsorptionskälteanlage ist Strom für diverse Pumpen und für die Kühltürme. Der Gesamtstromaufwand beträgt für das Messjahr **690 MWh. Der Betrieb der Pumpen und der Regelung der Solaranlage benötigt lediglich 0,6% dieses Betrages.** Die drei Kältemaschinen mit den Vakuumpumpen sowie Heißwasser- und Kaltwasserpumpen benötigen 36,5% des gesamten Strombedarfs; der Hauptteil mit 62,8% wird für den Betrieb der Kühltürme aufgewendet. In diesem Wert ist nicht der Strombedarf für den Winterbetrieb der Kühltürme mit eingerechnet. Bei niedrigen Außentemperaturen kann einer der Kühltürme direkt in das Kaltwassernetz einspeisen. Diese Anwendung wird als Freie Kühlung bezeichnet. Die Anlage hat im Zeitraum Juni 2008 bis Mai 2009 ca. 8,1 GWh an Primärenergie für Strom und Gas verbraucht. Parallel entspricht dies einer Freisetzung von ca. 1500 t CO₂. Unter der Annahme dass die in diesem Zeitraum genutzte Solarwärme einen gleichen Wärmebeitrag aus dem Gaskessel substituiert haben, ergibt sich hier eine Einsparung von 3,9 GWh an Primärenergie und einer Vermeidung von ca. 750 t CO₂, davon ungefähr 150 t durch die Solaranlage. Bei einem Gaspreis von 0,05 €/kWh ergibt sich eine finanzielle Einsparung von knapp 200 000 € im Jahr, ohne Berücksichtigung der Installationskosten des Kollektors und der laufenden Kosten für die Solar- und Abwärmenutzung. Da

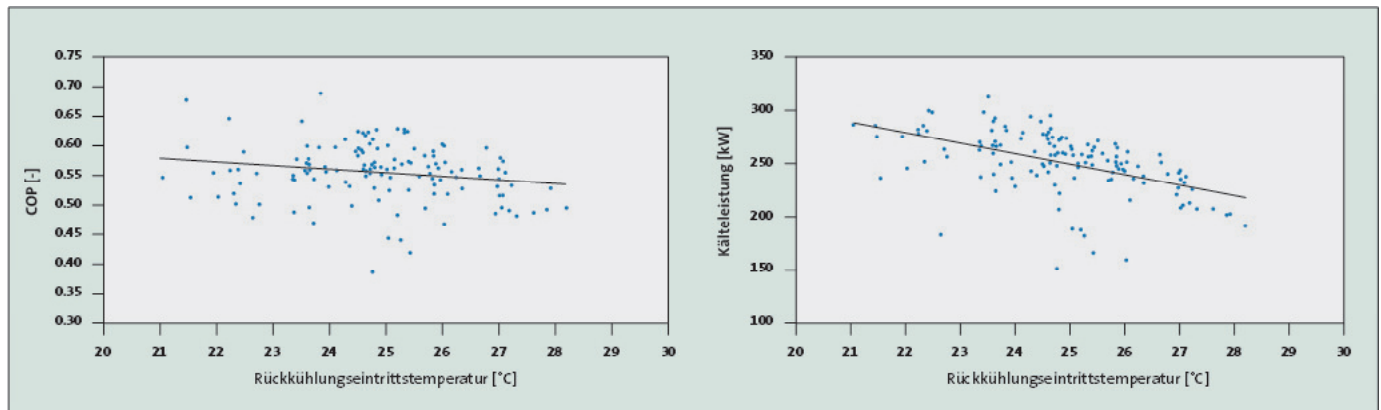


Bild 10: Messdaten zum Betrieb einer der Adsorptionskältemaschinen unter typischen Betriebsbedingungen im Sommer 2008. (Heißwassereintrittstemperaturen von 68 bis 70 °C, Kaltwassereintrittstemperaturen von 13 bis 14 °C und einem Heißwasservolumenstrom von 40 m³/h)

dieser Wert zum größten Teil auf den alten Betriebsbedingungen beruht, bei denen überwiegend Gas für den Antrieb der AdKM verwendet wurde, kann der Wert im kommenden Messjahr durchaus ansteigen. Weitere Informationen zum Betrieb der Kältemaschinen sind in [4] und [5] enthalten.

Betriebsweise und Optimierungsmaßnahmen (HSO)

Die Solaranlage ist mit den AdKM über einen zentralen Verteiler, an den weitere Wärmeverbraucher angeschlossen sind, verbunden (Bild 3). 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. Durch die hohe Vor- und Rücklauftemperatur bei Entladung zum Hauptverteiler erhöht sich die Temperatur in den Speichern deutlich und es ergeben sich negative Auswirkungen auf den solaren Ertrag und die Wärmeverluste durch die Frostschutzschaltung (Bild 5). Deshalb wurde die prognostizierte Sonnenscheindauer als Regelparameter gelöscht. Es wird jetzt bei Heizbetrieb allein anhand der Speichertemperatur entschieden, ob zur Bauteilaktivierung entladen wird. Da die Änderung erst kurz vor Umstellung auf Kühlbetrieb erfolgte, kann zu hierzu noch keine Aussage getroffen werden.

Die Frostschutzverluste können nicht separat von den Anfahrverlusten erfasst werden. (Zusammen 66 MWh/a). Hierbei ist allerdings zu berücksichtigen, dass durch die beschriebenen hohen Speichertemperaturen die Frostschutzverluste deutlich höher waren als bei niedrigerer Speichertemperatur und dass das Kollektorfeld mit aktivem Frostschutz nicht so stark auskühlt als ohne (vgl. Abschnitt „Regelung des aktiven Frostschutz“).

Anfang April 2009 wurde die Betriebsweise der AdKM 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 Zusatzheizung durch die Gaskessel weitgehend vermieden. Die zusätzlich benötigte Kälte wird mit elektromotorischen Kompressions-Kältemaschinen erzeugt. Wie in Tabelle 1 und Bild 4 zu sehen, wurde hierdurch der solare und nachhaltige Deckungsanteil am Gesamtwärmeverbrauch in den Sommermonaten deutlich gesteigert. Im Juli 2009 mussten die AdKM wieder häufiger betrieben werden, als es mit den nachhaltigen Wärmequellen allein möglich gewesen wäre, um den gesamten Kältebedarf der Gebäude abzudecken. Dementsprechend fällt der solare Deckungsanteil mit 12 %, bei nur leicht geringerem solarem Ertrag als im Mai und Juni, deutlich niedriger aus. Im April kam es teilweise zu Stagnationen der Solaranlage wegen zu geringer Wärmeabnahme. Die daraus resultierende Abschaltung der Kollektorkreispumpe wegen Überschreitung der Maximaltemperatur in den Solarspeichern führte zu einer Verringerung des solaren Ertrags. Dieses Problem konnte durch eine schrittweise Verringerung der zuvor beschriebenen nachhaltigen Mindestleistung für den Betrieb einer AdKM von ca. 500 kW auf nun 350 kW behoben werden.

Bei auftretenden Stagnationen konnte das nachfolgend beschriebene Verhalten beobachtet werden (Bild 6). Die Kollektortemperatur steigt auf bis zu 200 °C (überhitzter Dampf) an. Die Temperatur im Kollektorkreisvorlauf steigt auf bis zu 143 °C, was einem Satttdampfdruck 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.

Betriebsbegleitende Simulation zur Betriebsüberwachung und -optimierung (HfT)

Im Rahmen der Planung und Dimensionierung von z. B. großen Solar- und Kälteanlagen ist der Einsatz von dynamischen Simulationen bereits weit verbreitet. Die eingesetzten Simulationsmodelle eignen sich jedoch auch für die Entwicklung und den Test der Systemregler in der

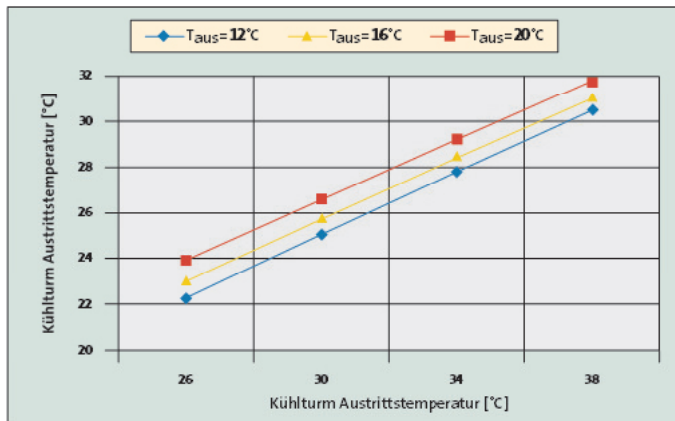


Bild 11: Simulierte Wasseraustrittstemperatur des Kühlturms bei 50 % des maximalen Volumenstroms in Abhängigkeit von der Wassereintrittstemperatur und der Lufttemperatur bei 80% relativer Feuchte

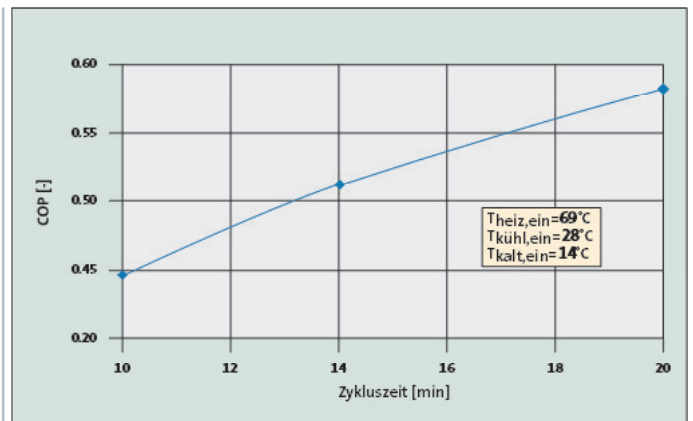


Bild 12: Simulierter thermischer COP der Adsorptionskältemaschine in Abhängigkeit von der Zykluszeit bei einem Heißwasservolumenstrom von $40 \text{ m}^3/\text{h}$

Simulationsumgebung. Dies ermöglicht einen umfassenden Test des entwickelten Reglercodes, der im realen Betrieb kaum möglich oder zumindest sehr zeitaufwendig wäre. Auch nach der Inbetriebnahme der Anlagen können die Simulationsmodelle noch sehr nützliche Informationen liefern. Dies gilt insbesondere dann, wenn sie als betriebsbegleitende Simulationen zur Betriebsüberwachung eingesetzt werden und so Referenzen für einen Soll-/Ist-Vergleich des Anlagenzustands ermöglichen. Dadurch können Anlagenfehlfunktionen und Fehler in der Regelung sehr zeitnah erkannt und behoben werden. Das zafh.net befasst sich im Rahmen eines im „KlimaZwei“-Förderprogramm des BMBF geförderten Verbundforschungsvorhabens mit der genannten Thematik. Projektpartner des Vorhabens sind neben der Festo AG & Co. KG und der Elektror airsystems GmbH auch die Stadt Ostfildern. Die wissenschaftliche Betreuung erfolgt durch die Hochschulen Offenburg und Stuttgart, die gemeinsam im Forschungsverbund zafh.net seit einigen Jahren an Forschungsvorhaben im Bereich energieeffizienter Gebäude arbeiten. Die Arbeiten des zafh.net werden nachfolgend am Beispiel der in den vorangegangenen Abschnitten bereits ausführlich beschriebenen Kälteerzeugung der Festo AG & Co. KG erläutert.

Betriebsbegleitende Simulationen

Voraussetzung für die Umsetzung von energetischen Betriebsanalysen und betriebsbegleitenden Simulationen ist eine umfassende Messdatenerfassung und -verwaltung z.B. über ein Gebäudeleitsystem (GLT) mit Schnittstellen für einen externen Online-Zugriff auf die gewonnenen Messdaten. Bei Festo werden alle zusätzlichen Datenpunkte und Energiemengenzähler des Gebäudes und der Versorgungstechnik inklusive der Kälteerzeugung und Solaranlage mit Hilfe eines zusätzlichen Messwerterfassungssystems erfasst und auf das GLT aufgeschaltet. Der externe Online-Zugriff auf die erfassten Daten erfolgt über einen OPC-Server, der vom GLT-System bereit gestellt wird. Mit Hilfe von OPC-Klienten können die für einzelne Komponenten entwickelten Simulationsmodelle auf die aktuellen Messdaten der realen Anlagen direkt zugreifen und so die prognostizierten Anlagenzustände mit Messdaten der realen Anlage vergleichen. Aus Sicherheitsgründen und auf Grund von Firewall-Problematiken laufen die Simulationsmodelle auf einem lokalen Rechner innerhalb des Firmennetzwerkes. Ein externer Datenzugriff (von außerhalb des Firmennetzes) ist nur auf historisierte Datensätze über abgesicherte VPN-Verbindungen oder FTP-Verbindungen möglich. Die bei Festo umgesetzte Kommunikationsstruktur für den Onlinedatenzugriff ist in Bild 7 dargestellt.

Zur Umsetzung der Onlinesimulationen wurde ein dynamisches Simulationsmodell der Solaranlage inklusive Speicher sowie der komplexen Abnahmestruktur mit Einspeisung in zwei Heizkreise auf unterschiedlichem Temperaturniveau in der Simulationsumgebung „INSEL“ abgebildet [6, 7]. Im Winter wird vorrangig der Heizkreis der Bauteilaktivierung mit Wärme auf geringem Temperaturniveau ($50/40^\circ\text{C}$) bedient, wohingegen im Sommer oder an Tagen mit hohem Solarangebot die Wärmeenergie im Wesentlichen dem Hauptheizkreis auf hohem Temperaturniveau ($70/60^\circ\text{C}$) zugeführt wird. Bild 8 zeigt einen Vergleich zwischen simulierten und gemessenen Daten beispielhaft für einen Tag im April 2009. Insgesamt wird hier eine sehr gute Übereinstimmung zwischen simulierten und gemessenen Kollektorausstrittstemperaturen und Speichertemperaturen erreicht. Damit steht für die Solaranlage ein Onlinesimulationstool zur Verfügung, das für eine automatisierte Fehlerüberwachung der Solaranlage und der komplexen Wärmeabnahmeregulation eingesetzt wird. Abgesehen von der Solaranlage wurde auch für die AdKM ein dynamisches Simulationsmodell erstellt, das selbst die Zykluszeiten der Anlagen richtig abbildet. Mit Hilfe dieses Modells lässt sich der Betrieb der Adsorptionskälteanlage somit sehr genau überwachen, wie ein Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Austrittstemperaturen einer Adsorptionskälteanlage in Bild 9 zeigt.

Simulationsbasierte Betriebsoptimierung

Wie in den vorangegangenen Abschnitten bereits ausführlich aufgezeigt wurde, haben Untersuchungen und Analysen zum ersten Betriebsjahr mit Solaranlage noch einen relativ hohen Anteil der Gaskessel an der Wärmeversorgung der AdKM von ca. 70 % ergeben. Da auf Grund der relativ geringen thermischen COP der AdKM von ca. 0.5 ein Betrieb über die Gaskessel aus primärenergetischer Sicht nicht sonderlich sinnvoll ist, wurde die Regelung seitens Festo bereits auf einen überwiegend nachhaltigen Betrieb, d.h. über die Wärmerückgewinnung und über die Solaranlage umgestellt. Mit Hilfe der entwickelten Simulationsmodelle werden vom zafh.net derzeit neue Regelstrategien zum Betrieb der AdKM unter der Bedingung der ausschließlichen Versorgung mit den beiden „nachhaltigen“ Energiequellen (Solaranlage und Wärmerückgewinnung der Kompressorabwärme) unter besonderer Berücksichtigung eines Teillastbetriebs für die drei AdKM entwickelt [8]. Ein besonderes Augenmerk gilt in diesem Zusammenhang der Regelung der vorhandenen Hybridrückkühltürme, da diese zu einem erheblichen Teil zum Gesamtstromverbrauch der Anlage beitragen und

damit hauptverantwortlich für den noch relativ geringen elektrischen COP der Anlage von ca. 3,5 sind.

Während der Nacht bewegt sich die Grundkühlleistung der AdKM in der Regel in einem Bereich für den selbst der Betrieb einer AdKM noch zu hoch ist und somit bislang zu einem ineffizienten getakteten Betrieb der Anlage führt. In Bild 10 sind Messdaten zum COP und zur Kälteleistung der AdKM für typische Betriebsbedingungen während des Sommers 2008 als Stundenmittelwerte dargestellt.

Demnach hat eine Anhebung der Kühlwassertemperaturen zur Reduktion der Kälteleistung nur sehr geringe Auswirkungen auf den thermischen COP der Anlage. Die Idee ist daher zur Deckung der Grundkühlleistung nur eine AdKM im Nachtzeitraum mit höherer Rückkühltemperatur (Reduktion der Ventilatorleistung am Kühlturm) zur Drosselung der Kälteleistung zu betreiben. Da eine Reduktion der Ventilatorleistung der Kühltürme um 50 % bereits eine Stromeinsparung von 85 % ermöglicht, lässt sich allein durch diese Maßnahme bereits ein ordentliches Stromeinsparpotential erschließen.

In typischen Sommernächten liegen die Außentemperaturen nachts im Bereich zwischen 14 und 16 °C bei relativen Feuchten von 70 bis 90%. In Bild 11 ist die simulierte Kühlturmaustrittstemperatur bei 50% der nominalen Ventilatorleistung bei 80% relativer Feuchte der Umgebungsluft dargestellt.

Mit Hilfe des dynamischen Simulationsmodells der AdKM wurde der Einfluss der Zykluszeiten der AdKM auf den thermischen COP ermittelt. Die Ergebnisse sind in Bild 12 dargestellt. Hier zeigt sich sehr schön, dass durch eine Verdopplung der Zykluszeit unter Teillast der thermische COP von 0,45 auf ca. 0,58 gesteigert werden kann. Durch eine Anpassung der Zykluszeiten könnte also der durch die geringere Antriebsleistung etwas verminderte COP der Anlage mehr als kompensiert werden.

Fazit

Die bisherige Betriebserfahrung zeigt, dass die Kollektoranlage einen sinnvollen Beitrag zur Einsparung an Primärenergie und zur Vermeidung von CO₂-Emissionen leistet. Die vom Kollektorhersteller abgegebene Ertragsgarantie von 500 MWh in den Solarspeicher einzuspeisende Wärme, bei einem Nutzungsgrad von 33,4%, wurde mit 543 MWh bei einem Nutzungsgrad von 34,7% eingehalten. Durch bereits durchgeführte Optimierungen an der Regelung der Speicherentladung und der Betriebsweise der AdKM sind zukünftig geringere Wärmeverluste im Bereich der Frostschutzschaltung sowie seltener Stagnationsphasen und damit höhere Nettoerträge zu erwarten. Bei einer Überprüfung der bisherigen Regelstrategie sind zusätzliche Einsparungen durch eine Verringerung der Antriebsleistung aus fossilen Wärmequellen möglich. Die AdKM lassen sich mit guten Ergebnissen mit einer solarthermischen Antriebsquelle koppeln. Die Maschinen selbst arbeiten auch nach sieben bis acht Jahren nahe an den vom Hersteller angegebenen Werten.

Für die Solaranlage und die AdKM der Festo AG & Co. KG wurden detaillierte Simulationsmodelle entwickelt, die zur automatisierten Betriebsüberwachung als Online-Tools mit entsprechender Schnittstelle zum Gebäudeleitsystem eingesetzt werden. Darüber hinaus wurden mit Hilfe der Simulationsmodelle detaillierte Untersuchungen zur Optimierung insbesondere des Teillastverhaltens der AdKM im Zusammenspiel mit den Rückkühltürmen, mit dem Ziel einer deutlichen Verbesserung des elektrischen COP durchgeführt. Die daraus resultierende Regelungsstrategie sieht eine Anhebung der Rückkühltemperaturen unter Teillastbedingungen vor, was zu deutlichen Einsparungen an elektrischer Energie durch verringerte Ventilatorleistung der Kühltürme führt. Gleichzeitig wird der thermische COP der Anlage nur relative geringfügig verschlechtert. Diese Verschlechterung des thermischen

COP ließe sich allerdings durch eine Verlängerung der Zykluszeiten der AdKM mehr als kompensieren.

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. bis 25. April 2008
- [2] E. Bollin, K. Huber, E. Scheck, D. Jödicke; Erste Ergebnisse und Betriebserfahrungen des Detailmonitorings einer solarthermischen Anlage zur Unterstützung der Kälteversorgung eines Büro- und Verwaltungsgebäudes, 19. Symposium Thermische Solarenergie, Bad Staffelstein, 6. bis 8. Mai 2009
- [3] Requirements on the design and configuration of small and medium sized solar air-conditioning applications – Guidelines. Veröffentlicht im Rahmen des IEE-Projektes SOLAIR. Abrufbar unter www.solair-project.eu
- [4] E. Wiemken, J. W. Wewiör; Solare Kühlung im Förderprogramm Solarthermie2000plus – Stand der Demonstrationsvorhaben und erste Betriebsergebnisse, 19. Symposium Thermische Solarenergie, Bad Staffelstein, 6. bis 8. Mai 2009
- [5] E. Wiemken, J. W. Wewiör; Solar air-conditioning in the German Solarthermie 2000plus programme: installed plants and first monitoring results; 3rd International Conference Solar Air-Conditioning, Palermo, Italy, 30. September bis 2. Oktober 2009
- [6] Dalibard, A., Pietruschka, D., Eicker, U., Schumacher. "Performance analysis and optimisation through system simulations of renewable driven adsorption chillers". 2nd SAC, Tarragona, Spain, 2007.
- [7] Dalibard A., Pietruschka D., Eicker, U., "Simulation of a large solar adsorption cooling plant", Eurosun 2008, Lisbon, Portugal.
- [8] Dalibard A., Pietruschka D., Biesinger A., "Optimisation potential of a large solar adsorption cooling plant" 3rd International Conference Solar Air-Conditioning, Palermo, Italy, 30. September bis 2. Oktober 2009