

Ursula Eicker

Technologien und Betriebserfahrungen mit solarer Kühlung im Nichtwohnungsbau

KI Kälte Luft Klimatechnik, November 2011, S. 16-19

Technologien und Betriebserfahrungen mit solarer Kühlung im Nichtwohnungsbau

Technologies and operating experiences of solar cooling systems in non residential buildings

BILD FOLGT

Prof. Dr. habil. Ursula Eicker,

Hochschule für Technik, Forschungszentrum nachhaltige Energietechnik, Stuttgart,

Vorspann

Solare Kühlung gewinnt an Bedeutung durch die möglichen Primärenergieeinsparungen und sinkenden Gesamtkosten. Voraussetzung ist eine optimierte Auslegung aller Kreisläufe zur Reduzierung von Stromverbrauch und damit der Betriebskosten. Die Betriebserfahrungen mit großen solarthermischen Anlagen über 1000 m² Kollektorfläche sind sehr gut und Jahresnutzungsgrade über 30 % können selbst bei ganzjährig hohen Betriebstemperaturen von 80 °C erreicht werden. Der elektrische Energieaufwand für Pumpen und Rückkühlung wird noch nicht konsequent minimiert und führt in der Praxis zu gemessenen elektrischen Leistungszahlen um 3.0, während bei entsprechend optimierter Regelung Werte von 13 möglich wären.

Solar cooling is gaining importance due to high primary energy savings and reducing costs. An optimum design of all external circuits is crucial to reduce auxiliary electricity consumption and operating costs. The operating experiences with large solar thermal systems above 1000 m² of collector surface are good and annual efficiencies over 30% can be reached even at high operating temperatures of about 80°C. The electrical energy consumption of pumps and heat rejection system is not always as low possible and can result in annual electrical coefficients of performance of 3, while optimized systems could deliver values of 13.

Keywords: Absorptionskälte, solare Kühlung, Primärenergieeinsparung

Absorption cooling, solar cooling, primary energy savings

Technologien und Marktsituation

Aktive Kühlung mit elektrischen oder thermisch angetriebenen Kältemaschinen ist notwendig zur Aufrechterhaltung komfortabler Innenraumbedingungen, wenn interne und externe Lasten in Gebäuden nicht mehr durch passive Maßnahmen wie Nachlüftung oder Wärmesenken in Erdreich oder Grundwasser abgeführt werden können.

Die konventionelle Kältetechnik wird durch Kompressionskältemaschinen dominiert. Jedoch liegen der Primärenergieeinsatz und damit die CO₂-Bilanz für die Kälteerzeugung im Vergleich zu solar oder Abwärme betriebenen thermischen Systemen bei solchen konventionellen Kältemaschinen höher.

Absorptionskältemaschinen nehmen in Deutschland einen Anteil von nur 1 %, weltweit etwa 8 % von den jährlich verkauften Einheiten ein [6]. Jedoch liegen der Primärenergieeinsatz und CO₂-Emissionen für die Kälteerzeugung im Vergleich zu solar thermisch oder Abwärme betriebenen thermischen Systemen bei elektrischen Kältemaschinen höher.

Klimatechnik wird in Deutschland hauptsächlich im kommerziellen Bereich eingesetzt. Eine Studie von Jones Lang LaSalle [5] ergab, dass 47 % aller Büros in Deutschland klimatisiert werden, in den USA sind etwa 76 % der Büros aktiv gekühlt [2]. Bei den Nichtwohnungsbau Neubauten werden in Europa etwa 90 % klimatisiert [1]. Im deutschen Wohnungsbau sind etwa 266.000 Klimageräte im Einsatz [7].

Die größte Barriere für die Verbreitung solarer Kühlung sind die noch hohen Kosten bei gleichzeitig niedrigen Strompreisen. Dieser Nachteil kann kurzfristig nur über gesetzliche Regelungen und Marktanreizprogramme kompensiert werden.

Das im Mai 2011 in Kraft getretene erweiterte erneuerbare Energiengesetz Wärme (EEWärmeG, Umsetzung der europäischen Richtlinie 2009/28/EG) enthält nun eine Nutzungspflicht zur Deckung des Kälteenergiebedarfs: bei Neubauten und bei „grundlegend renovierten öffentlichen Gebäuden“ gilt laut §5 der Mindestdeckungsanteil bei Nutzung von Solarenergie bei 15 %, bei gasförmiger Biomasse bei 30 % und bei flüssiger/fester Biomasse bei 50 %. Das Gesetz verfolgt das Ziel, den Anteil Erneuerbarer Energien am Endenergieverbrauch für Wärme **und Kälte** bis zum Jahr 2020 auf 14 Prozent zu erhöhen (§1).

Weltweit sind etwa 500 solar thermische Kühlsysteme bekannt, davon etwa 70 % Absorptionskältemaschinen und jeweils etwa 15 % Adsorption und offene Sorptionsanlagen. Die meiste Leistung wurde von asiatischen Herstellern wie Yazaki, Broad, Thermax, LG, Ebara installiert, bei den Stückzahlen dominieren die kleinen Leistung unter 20 kW durch meist europäische Hersteller wie ClimateWell, Rotartica, Sortech, Yazaki, EAW etc.

Bei sorgfältiger Planung, Ausführung und Anlagenüberwachung können schon heute solarthermische Kühlanlagen mit Contractingmodellen finanziert werden. Die Systemkosten solar thermischer Kühlung liegen heute bei kleinen und mittleren Leistungen bis etwa 100 kW bei etwa 3-4000 € pro kW installierter Leistung, erst im Megawatt Bereich werden etwa 2000 €/kW erreicht [8]. In einem der ersten solaren Kühlprojekte eines Niedrigenergie Gebäudes in Shanghai/China wurde bei geringeren Kollektorkosten ein spezifischer Preis von 1750 € pro kW erreicht [10].

Leistungs- und Jahresarbeitszahlen

Einstufige Ad- und Absorptionskältemaschinen erzeugen etwa 0.6 bis 0.7 kW Kälteleistung pro Kilowatt eingesetzter Heizleistung. Das Verhältnis aus Kälteleistung zu Heizleistung wird als Leistungszahl oder englisch COP (coefficient of performance) bezeichnet. Bei Wasser/Lithiumbromid-Absorptionsanlagen sind zweistufige Austreiber mit einem Hochtemperaturteil für die direkte Erdgasbeheizung und Nutzung der Kondensationswärme für einen Niedertemperaturgenerator auf dem Markt verfügbar. Die Leistungszahl steigt bei einem zweistufigen Prozess auf 1.1 bis 1.3. Daikin entwickelt derzeit dreistufige wassergekühlte Absorptionskältemaschinen auf LiBr-Wasser-Basis mit Antriebstemperaturen von 270°C und gemessenen Leistungszahlen von 1.6. Die japanische Firma Kawasaki Thermal Engineering vertreibt ebenfalls direkt befeuerte oder Heißwasser betriebene dreistufige Anlagen mit Kälteleistungen zwischen 600 und 1100 kW, die bei maximal 265 °C Dampftemperaturen und 30 °C Kühlwasser Leistungszahlen von 2.0 erreichen. Für diese Temperaturbereiche sind konzentrierende Kollektoren (Fresnel- oder Parabolrinnen) erforderlich, die zunehmend auf dem deutschen Markt produziert werden (z.B. Industrial Solar GmbH, Solera Sunpower).

Bei der offenen sorptionsgestützten Klimatisierung beeinflusst der Luftzustand der Außenluft die Leistungszahl. Bei trockener Außenluft kann die Klimaanlage rein über die Verdunstungskühlung betrieben werden, so dass keine thermische Energie erforderlich ist und die Leistungszahl gegen Unendlich geht. Bei sehr feuchter Außenluft ist das Trocknungspotential des Sorptionsmaterials möglicherweise nicht ausreichend und eine konventionelle Kühlung muss nachgeschaltet werden. Typische mittlere Leistungszahlen liegen zwischen 0.5 und 1.0.

Zum Anlagenvergleich kann die eingesetzte Primärenergie pro kW Kälteleistung betrachtet werden (primary energy resource factor nach Europäischer Norm EN 15316-4-5).

$$PER = \frac{Q_{Kälte}}{Q_{el,aux} \cdot PEF_{elektrisch} + Q_{h,aux} \cdot PEF_{heizung}}$$

Elektrische Kompressionskältemaschinen mit einer typischen Leistungszahl von 3.0 und einem Primärenergiefaktor ($PEF_{elektrisch}$) von 2.7 ergeben ein Primärenergieverhältnis von etwa 1.0, bei Berücksichtigung des Hilfsenergieverbrauchs von Ventilatoren und Pumpen unter 1.0. Um 1 kW Kälte mit einer einstufigen thermischen Anlage zu erzeugen, muss etwa 1.4 kW Heizwärme aufgewendet werden. Werden 80 % der Heizwärme solar erzeugt und die verbleibende Kälte primärenergetisch vorteilhafter mit elektrischer Kühlung erzeugt, können somit theoretisch 80 % Primärenergieeinsparungen erzielt werden. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass bei obigem Beispiel bei der thermischen Kühlung 2.4 kW Abwärme pro kW Kälte abgeführt werden muss, bei der elektrischen Kühlung dagegen nur 1.33 kW. Für die Wärmeabfuhr ist typisch ein elektrischer Energieaufwand von 0.03 kWh_{el} pro kWh_{th} erforderlich [4].

Heutige solar thermische Kühlsysteme erreichen oft nur Primärenergiefaktoren zwischen 1 und 1.7. Wird der Hilfsenergieverbrauch minimiert, sind jedoch Primärenergiefaktoren von 4 bis 5 möglich.

Einen Überblick über die Technologien gibt Tabelle 1

Technologie	Absorptionskälte Wasser-Lithiumbromid	Absorptionskälte Ammoniak-Wasser	Geschlossene Adsorption H ₂ O-Silikagel	Offene sorptionsgestützte Klimatisierung
Kältemittel	H ₂ O	NH ₃	H ₂ O	-
Sorptionsmittel	LiBr	H ₂ O	Silikagel	Silikagel / LiCl
Kälte Träger	Wasser	Wasser-Glykol	Wasser	Luft
Kältetemperaturbereich	6-20 °C	-60° bis +20 °C	6-20 °C	16-20 °C
Heiztemperaturbereich	70-110 °C	80-140 °C	55-100 °C	55-100 °C
Kühlwassertemperatur	25-40 °C	25-50 °C	25-35 °C	nicht erforderlich
Kälteleistungsbereich pro Einheit	10 - 12000 kW	5 - 10.000 kW	5 - 350 kW	6 - 300 kW
Leistungszahlen [-]	0.6 - 0.8	0.5 - 0.7	0.6 - 0.7	0.5 - 1.0
Investitionskosten Maschine pro kW Kälteleistung	1200-200 €/kW	1250 - 400 €/kW	1500 - 350 €/kW	1500 – 2000 €/kW (ca. 6000 €/1000m ³ /h)

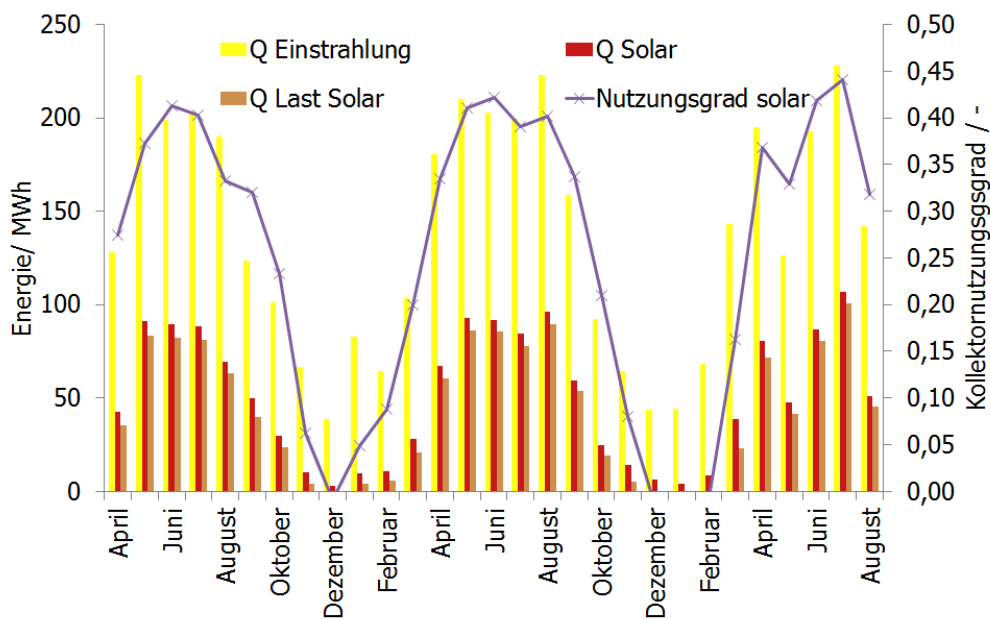
--	--	--	--	--

Tabelle 1: Übersicht über solarthermisch beheizbaren Kälte- und Klimatisierungsverfahren. Kostenübersicht teilweise aus einer neuen EU Studie des Programms Intelligent Energy for Europe [6]

Betriebserfahrungen Adsorption

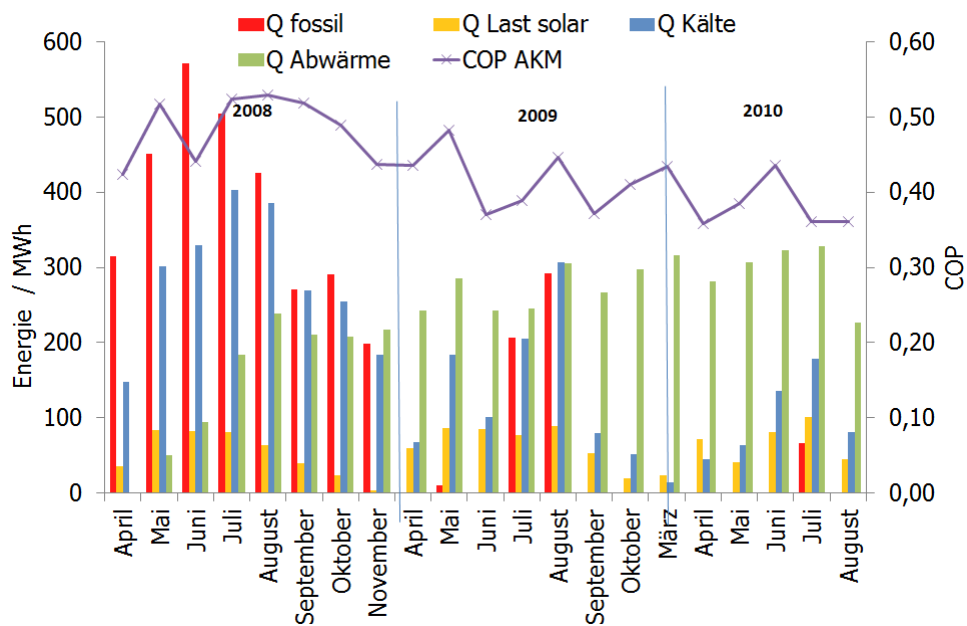
Größere Adsorptionsanlagen der japanischen Hersteller Nishyodo und Mayekawa laufen in verschiedenen Demonstrationsanlagen in zuverlässigem Betrieb. Mittlere thermische Leistungszahlen von 0.43 wurden für einen 70 kW Adsorber am Uniklinikum Freiburg gemessen, wobei der solare Deckungsgrad der 171 m² Vakuumröhrenanlage aufgrund langer Laufzeiten nachts nur 28 % jährlich erreicht [9]. Eine Verlängerung der Zykluszeiten von 6.5 auf knapp 13 Minuten führte zu einer Leistungszahlsteigerung Werte zwischen 0.5 und 0.6 [3].

Bei der Firma Festo in Esslingen werden seit 2008 drei Mayekawa Adsorptionskältemaschinen mit je 350 kW Kälteleistung detailliert vermessen. Die Antriebsenergie wird durch eine Vakuumröhrenanlage mit 1330 m² Brutto-Kollektorfläche (1218 m² Aperturfläche) sowie durch Abwärme bereitgestellt. Bei einer Einstrahlung von 1284 kWh/m² (Intensiv-Messjahr 2009-2009) erzeugt das Kollektorfeld 377 kWh/m² Nutzenergie aus dem Speicher. Vom Kollektorkreisnutzungsgrad von 34.7 % verbleiben Brutto 29.4 % und Netto abzüglich des Stromverbrauchs im Solarkreis 29.2 % Solarsystemnutzungsgrad. Im Messjahr 2009/2010 konnte der Nutzenergieertrag auf 434 kWh/m²a gesteigert werden und insgesamt knapp 9 % des Gesamtwärmebedarfs für Heizen und Kühlen gedeckt werden. Durch die ganzjährige Nutzung wird ein sehr guter solarer Systemwirkungsgrad erreicht, obwohl die Temperaturniveaus um 80 °C im Gegensatz zur Trinkwasserbereitung ganzjährig sehr hoch liegen.



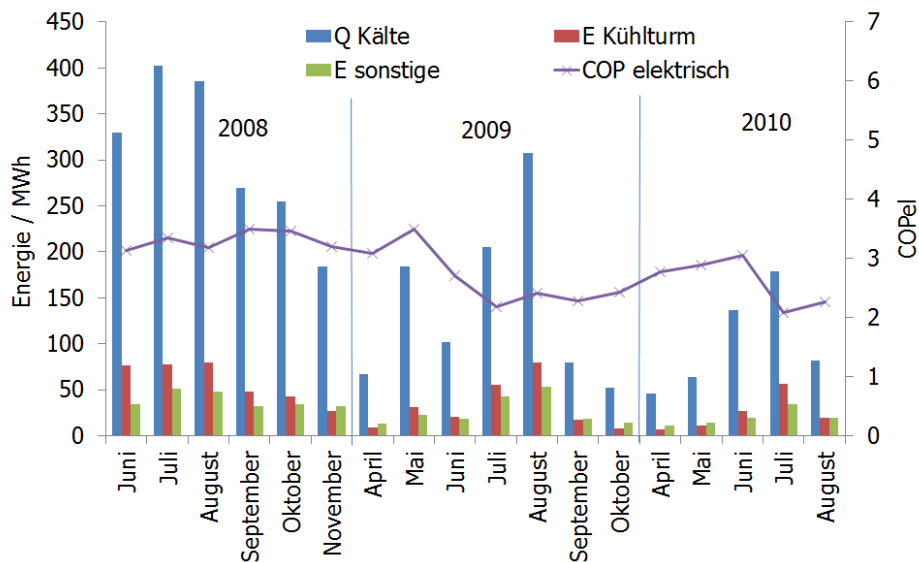
1 **Eingestrahlte Solarenergie (Q Einstrahlung), Kollektorertrag (Q Solar), entnommene Wärme aus dem Speicher (Q Last solar) und Netto-Kollektornutzungsgrad, welcher den elektrischen Energieaufwand vom thermischen Ertrag abzieht und auf die Einstrahlung normiert.**

Während im ersten Betriebsjahr 2008 ein hoher fossiler Beitrag für die Kühlung durch Gaskessel bereitgestellt wurde mit sehr niedrigen Primärenergiefaktoren, wurden die Adsorptionskältemaschinen ab 2009 vorwiegend durch Abwärme von Druckluftkompressoren sowie die solarthermische Anlage betrieben und mit Kompressionskälte nachgekühlt. Einschaltkriterium für die Kältemaschinen war daher eine minimal verfügbare Energiemenge von Solarfeld und Abwärme (zunächst 500 kW, später zur Reduzierung von Stagnation 350 kW). Nur bei hohem Kältebedarf (Sommer 2009) werden die Adsorber auch fossil betrieben. Die durchschnittlichen monatlichen Leistungszahlen der Anlage liegen zwischen 0.37 und 0.53. Die mit der Zeit abnehmenden Leistungszahlen werden hauptsächlich durch häufigeres Takten der Adsorber verursacht.



2 Wärmequellen für Heizen und Kühlen und thermische Leistungszahlen

Für den Kühlturbetrieb und Pumpenstrom der Anlage ergibt sich eine elektrische Leistungszahl zwischen 2,7 und 3,5, der Stromaufwand für das Solarfeld liegt dabei lediglich zwischen 0,6 und 1,1 % des Gesamtstromverbrauchs.



3 Elektrischer Energieaufwand für Kühltürme und sonstige Stromverbraucher (Pumpen in den Verteilkreisen und Kältemaschine)

Simulationen des Gesamtsystems zur Reduzierung des Stromverbrauchs ergaben neben der Zyklusverlängerung insbesondere Optimierungsmöglichkeiten durch eine Verkürzung des Kühlturbetriebs jeweils nur zu Beginn der Adsorptionsphase. Nur bei maximal erforderlicher Rückkühlleistung zu Beginn des Zyklus wird der Kühlturmventilator mit voller Leistung betrieben und dann reduziert. Dadurch können 60 % des Stromverbrauchs für den Kühlturm eingespart werden und der elektrische COP steigt auf 6.7.

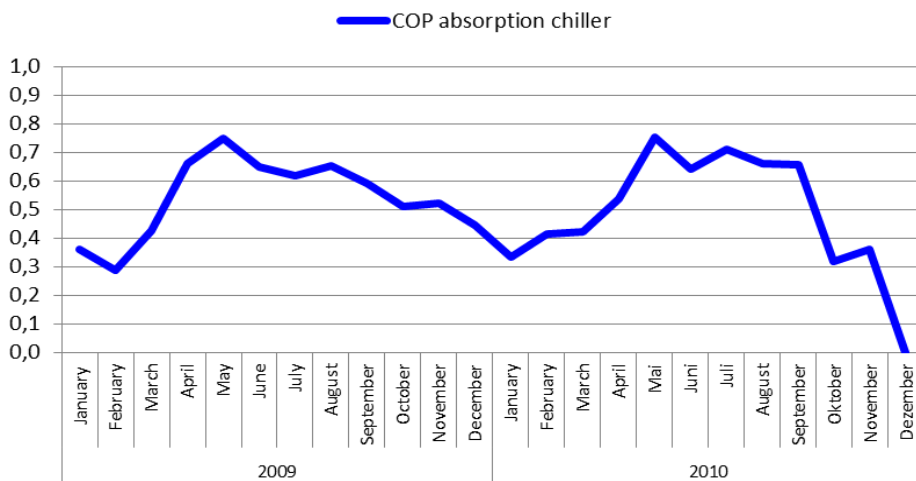
Betriebserfahrung Absorption

Neue Betriebserfahrungen mit Absorptionskältemaschinen großer Leistung wurden im Rahmen des europäischen Demonstrationsvorhabens POLYCITY in Bürobauten in Ostfildern/Deutschland und in Cerdanyola/Spainen gewonnen.

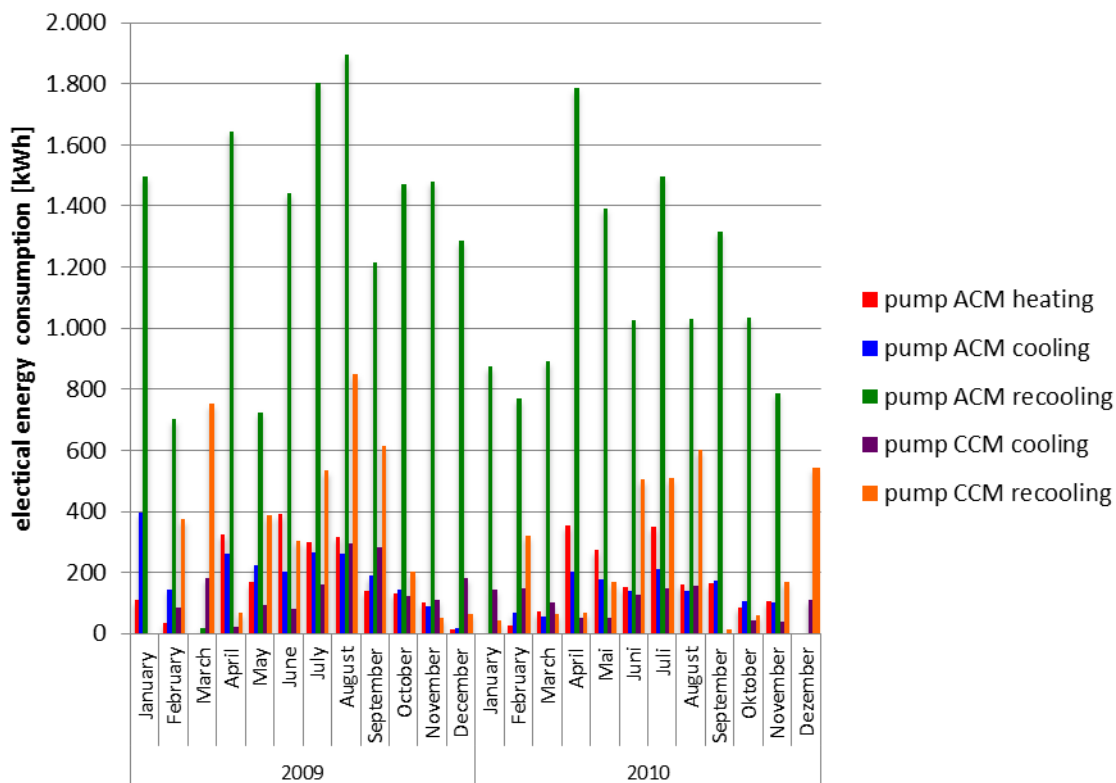
Bei der Firma Elektror in Ostfildern wurde 2008 eine 105 kW Yazaki Absorptionskältemaschine in Betrieb genommen. Der Gebäude Heizwärmeverbrauch von etwa 320 MWh liegt in derselben Größenordnung wie der Wärmebedarf für Kühlung von 280 MWh.

Die monatlichen thermischen Arbeitszahlen im Sommer liegen erwartungsgemäß zwischen 0.6 und 0.73 bei Antriebstemperaturen aus einem Biomasse-Nahwärmenetz von nur 75 °C.

Bei diesen Antriebstemperaturen und Kühlwassertemperaturen zwischen 27 und 32 °C liegen die Kälteleistungen zwischen 40 und 85 kW. Unter Teillast in den Übergangsmonaten und im Winter fallen die Leistungszahlen jedoch bis auf 0.3 ab. Auch hier zeigt sich, dass eine großzügigere Speicherdimensionierung bzw. ein verbessertes Speichermanagement zu geringerem Takten und höheren Leistungszahlen führen würden. Trotz eines offenen Kühlturmpumpkreises zwischen Absorptionskältemaschine im Keller und Kühlturm auf dem Dach des fünf geschossigen Gebäudes mit Pumpenenergieverbrauch von 15 MWh jährlich liegen die elektrischen Leistungszahlen mit 6.9 (2009) und 7.1 (2010) in einem vernünftigen Bereich.



4: Monatliche Arbeitszahlen einer 105 kW Kältemaschine



5 Elektrischer Stromverbrauch für Absorptions- und Kompressionskältemaschinenpumpen im Elektror Gebäude

In Cerdanyola wurde 2011 eine 2 MW einstufige Absorptionskältemaschine und eine 2stufige 5 MW Absorptionskältemaschine, welche mit Abgas einer KWK Anlage beheizt wird, in Betrieb genommen. Auch hier führte eine geringe Kältemengenabnahme zu etwas geringeren monatlichen Arbeitszahlen als geplant zwischen 0.6 und 0.67 für die einstufige und 1.1 bis 1.2 für die zweistufige Maschine.

Detaillierte Untersuchungen an einer 15 kW Absorptionskältemaschine für einen kleineren Bürobau mit 566 m² Nutzfläche in Rimsting zeigten, dass bei optimierter Regelung und Nasskühlturmen eine maximale elektrische Leistungszahl von 13 erreichbar ist. Dafür wurde zunächst die Kältemaschine selber verbessert (von ursprünglich 2 Lösungspumpen wurde durch ein integriertes Behälterdesign die Stromaufnahme um 30 % gesenkt). Der Kühlturmventilator ist drehzahl geregelt, so dass der Hauptenergieaufwand bei den Pumpen für Absorber und Kondensatorkühlkreis sowie der Kollektorpumpe bleibt.

Weitere Optimierungsmöglichkeiten bestehen vor allem bei den Einschaltzeiten der Absorptionskältemaschine. Durch einen Speicherbypass ist es möglich, die typische späte Einschaltzeit der Absorptionskältetechnik zwischen 11.00h und 12.00h um circa 2 Stunden abzusenken, indem die solarthermische Anlage direkt auf die Kältemaschine geschaltet wird.

Zusammenfassung

In einer Vielzahl von ausgeführten Demonstrationsprojekten in Deutschland und Europa werden zunehmend Betriebserfahrungen gesammelt, die zur Verbesserung der Regelstrategien führen und die Planung der Anlagen erleichtern. Wichtig ist, dass die solaren Kühlanlagen nicht überdimensioniert werden, um häufiges Takten und damit geringe Leistungszahlen zu vermeiden. Bei Vollastbedingungen werden dagegen die thermischen Leistungen und Leistungszahlen laut Herstellerangaben meist gut erreicht. Die elektrischen Hilfsenergiemengen können nicht vernachlässigt werden und müssen sorgfältig optimiert werden, um Primärenergieeinsparungen von 50 % oder mehr erreichen zu können. Anzustreben sind elektrische Leistungszahlen größer als 10.

Danksagung

Die messtechnischen Analysen am Technologiezentrum Festo wurden von der Hochschule Offenburg im Rahmen der Begleitforschung des Förderprogramms Solarthermie2000plus - Solar unterstützte Klimatisierung Esslingen, Förderkennzeichen: 032 9605 F durchgeführt, die Betriebsoptimierung der Festo Anlage von Antoine Dalibard vom zafh.net. Die Arbeiten wurden unterstützt durch die Facility Management Abteilung der Festo AG unter Leitung von Bernd Bruy. Dirk Pietruschka hat die Absorptionsanlage bei SolarNext in Rimsting untersucht.

Literatur

- [1] Austrian Energy Agency (AEA), 2005: Klimatisierung, Kühlung und Klimaschutz: Technologien, Wirtschaftlichkeit und CO₂ Reduktionspotentiale. Authors: Simader, G. R. & Rakos, C., Österreichische Energieagentur, Wien
- [2] Energy Information Administration (2000): Commercial Buildings Energy Consumption Survey 1999, <http://www.eia.doe.gov>
- [3] Glaser, Hendrik (2005) Beiträge zur Betriebsoptimierung solarthermisch betriebener Adsorptionskälteanlagen, Hamburg: Diplomica Verlag

- [4] Henning, H.M. (2008), Solar cooling –components and systems – Overview, Intersolar International Seminar „Solar Air-Conditioning - Experiences and practical application“, June 11th 2008, Munich
- [5] Jones Lang LaSalle (2008), Büronebenkostenanalyse OSCAR 2006,
<http://www.joneslanglasalle.com>
- [6] Lamers, P., Thamling, N. (2008) Technology Report, Berliner Energieagentur GmbH, EU Project Summerheat, Intelligent Energy for Europe, Contract EIE-06-194,
<http://www.eu-summerheat.net>
- [7] Rolles, W. (2004) Daikin, Es gibt viel zu kühlen – packen wir´s an, CCI.Print 2/2004, pp 18-19
- [8] Schubert, M. “3rd International Symposium on renewable cooling, Clean Energy Power Stuttgart 2/2011
- [9] Wiemken, E., Henning, H.-M. (2005) Solar Assisted Cooling at the University Hospital Klinikum Freiburg, International Conference Solar Air conditioning, Staffelstein
- [10] WISIONS (2007) Solar cooling – using the sun for Climatisation, III. Issue 2007,
Publisher: Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy, www.wisions.net