

Ursula Eicker

Solare Kühlung: Technologien und Betriebserfahrungen in Büro- und Gewerbegebäuden

Solarthermie 2011 - Heizen und Kühlen mit der Sonne

Tagungsband 4.VDI-Fachtagung, 27./28. September 2011, Ludwigsburg

Solare Kühlung: Technologien und Betriebserfahrungen in Büro- und Gewerbegebäuden

Prof. Dr. habil. Ursula Eicker

Hochschule für Technik, Forschungszentrum nachhaltige Energietechnik zafh.net

Schellingstr. 24, 70174 Stuttgart, ursula.eicker@hft-stuttgart.de

Kurzfassung

Solar thermische Kühlung im Nichtwohnungsbau erfordert Sorptionsanlagen mittlerer und großer Leistung. Die Betriebserfahrungen mit sehr großen solarthermischen Anlagen sind sehr gut und Netto Jahresnutzungsgrade von 30% können selbst bei ganzjährig hohen Betriebstemperaturen von 80°C erreicht werden. Die marktverfügbaren thermischen Kältemaschinen erbringen unter Nennbedingungen meist die angegebenen thermischen Leistungszahlen und Kälteleistungen. Unter realen Betriebsbedingungen führen vor allem Teillastsituationen zu häufigem Takten, dementsprechenden Wärmeverlusten und niedrigeren Leistungszahlen, die zukünftig durch bessere Dimensionierung und optimiertes Lastmanagement verbessert werden sollten.

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 1,3 möglich wären.

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 Nachtlüftung oder Wärmesenken in Erdreich oder Grundwasser abgeführt werden können. Die konventionelle

Kältetechnik wird durch netzbetriebene Kompressionskältemaschinen dominiert. Absorptionskältemaschinen nehmen in Deutschland einen Anteil von nur 1%, weltweit etwa 8% von den jährlich verkauften Einheiten ein (Lamers et al, 2008). 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 (2007) ergab, dass 47% aller Büros in Deutschland klimatisiert werden, in den USA sind etwa 76% der Büros aktiv gekühlt (EIA, 2000). Bei den Nichtwohnungsbau Neubauten werden in Europa etwa 90% klimatisiert (AEA, 2005). Im deutschen Wohnungsbau sind etwa 266.000 Klimageräte im Einsatz (Rolles, 2004).

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 (Schubert, 2011). In einem der ersten solaren Kühlprojekte eines

Niedrigenergie Gebäudes in Shanghai/China wurde bei geringeren Kollektorkosten ein spezifischer Preis von 1750 € pro kW erreicht (Wisions, 2007).

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 (Henning, 2008).

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 die folgende Tabelle.

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 (Lamers et al 2008).

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 (Wiemken et al, 2005). Eine Verlängerung der Zykluszeiten von 6.5 auf knapp 13 Minuten führte zu einer Leistungszahlsteigerung Werte zwischen 0.5 und 0.6 (Glaser, 2005).

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.

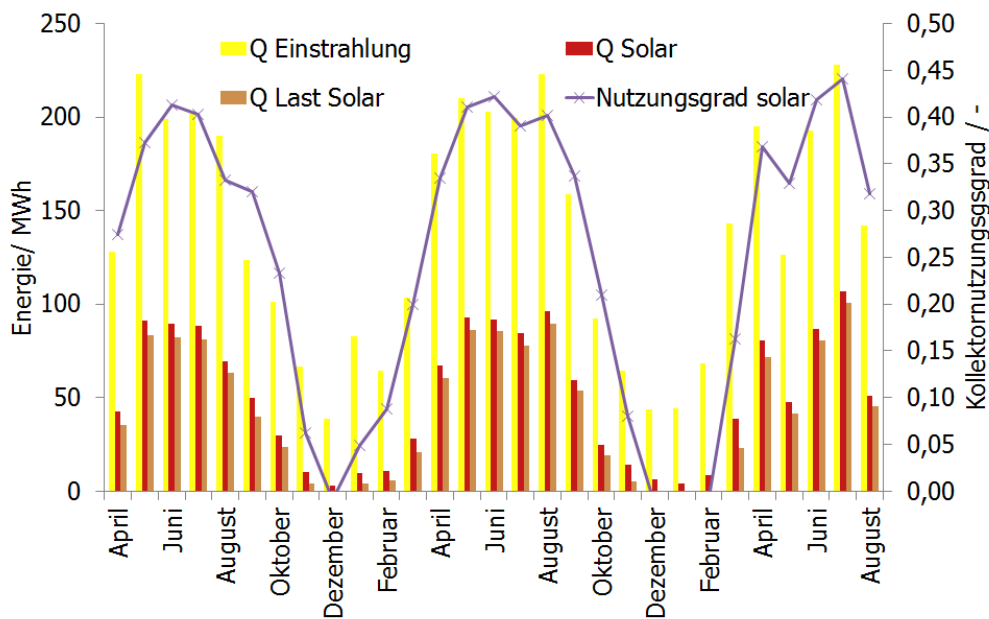


Abbildung 1: Eingestrahelte Solarenergie (Q Einstrahlung), Kollektorertrag (Q Solar), entnommene Wärme aus dem Speicher (Q Last solar) und Netto-Kollektornutzungsgrad, welcher den elektrischen Energieaufwand vom thermischen Ertrag abzieht und auf die Einstrahlung normiert.

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.

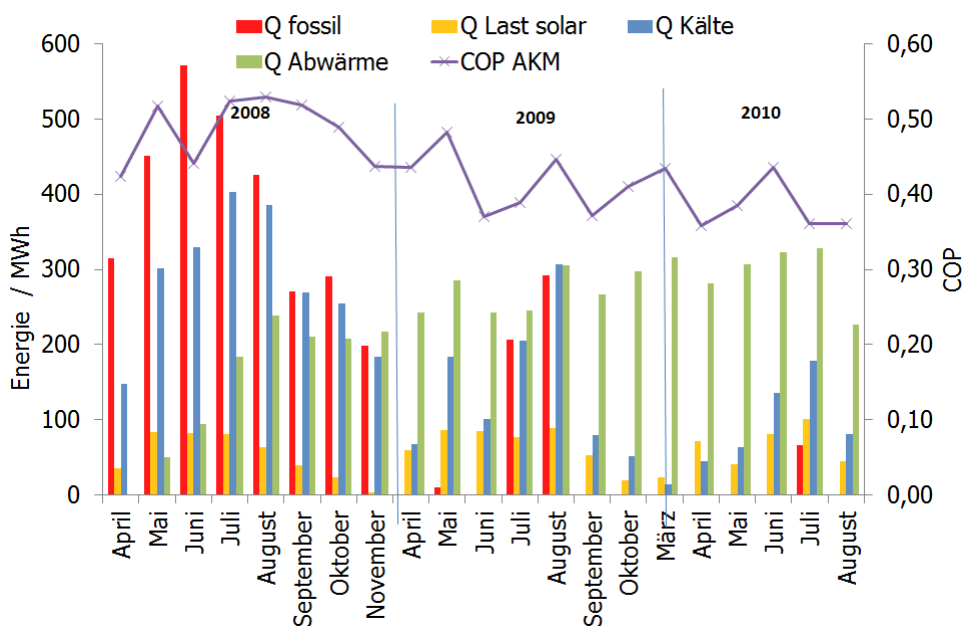


Abbildung 2: Wärmequellen für Heizen und Kühlen und thermische Leistungszahlen.

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.

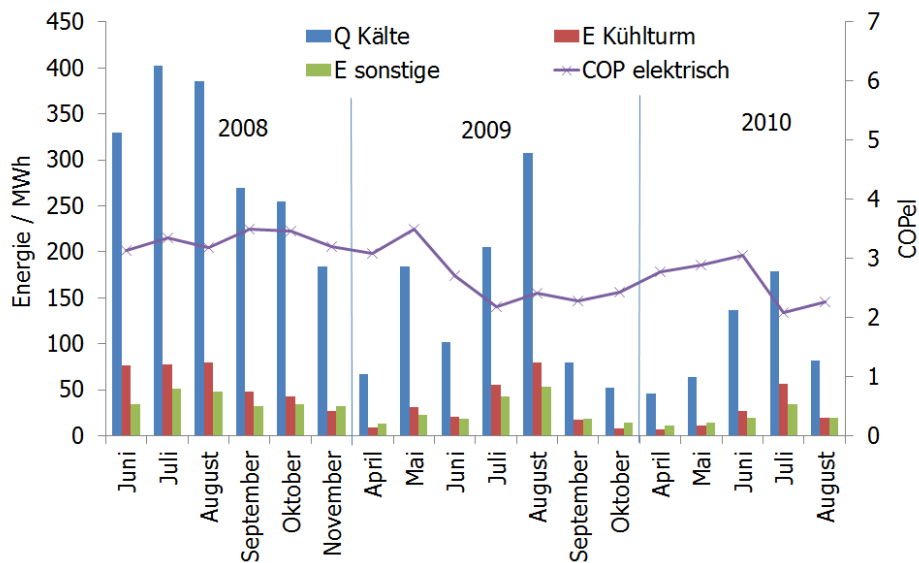


Abbildung 3: elektrischer Energieaufwand für Kühltürme und sonstige Stromverbraucher (Pumpen in den Verteilkreisen und Kältemaschine).

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 Übergangsmoaten und im Winter fallen die Leistungszahlen jedoch bis auf 0.3 ab. Auch hier zeigt sich, dass eine

größzügigere 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.

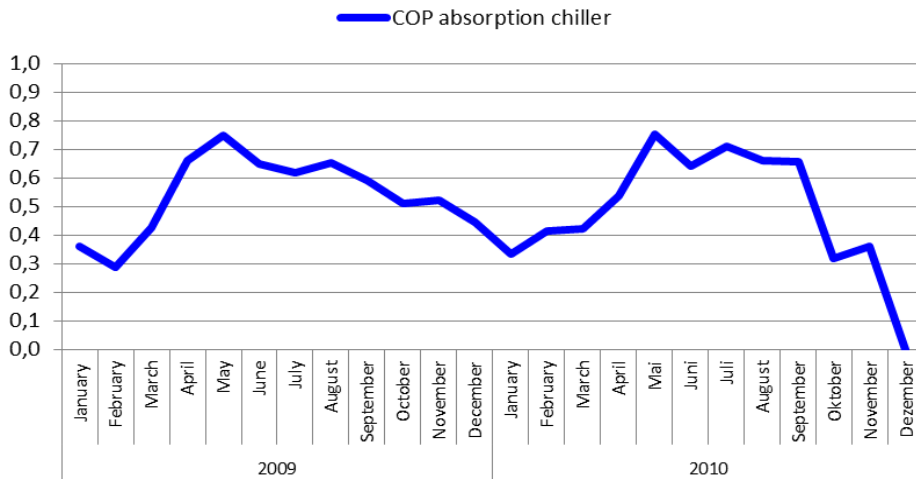


Abbildung 4: Monatliche Arbeitszahlen einer 105 kW Kältemaschine.

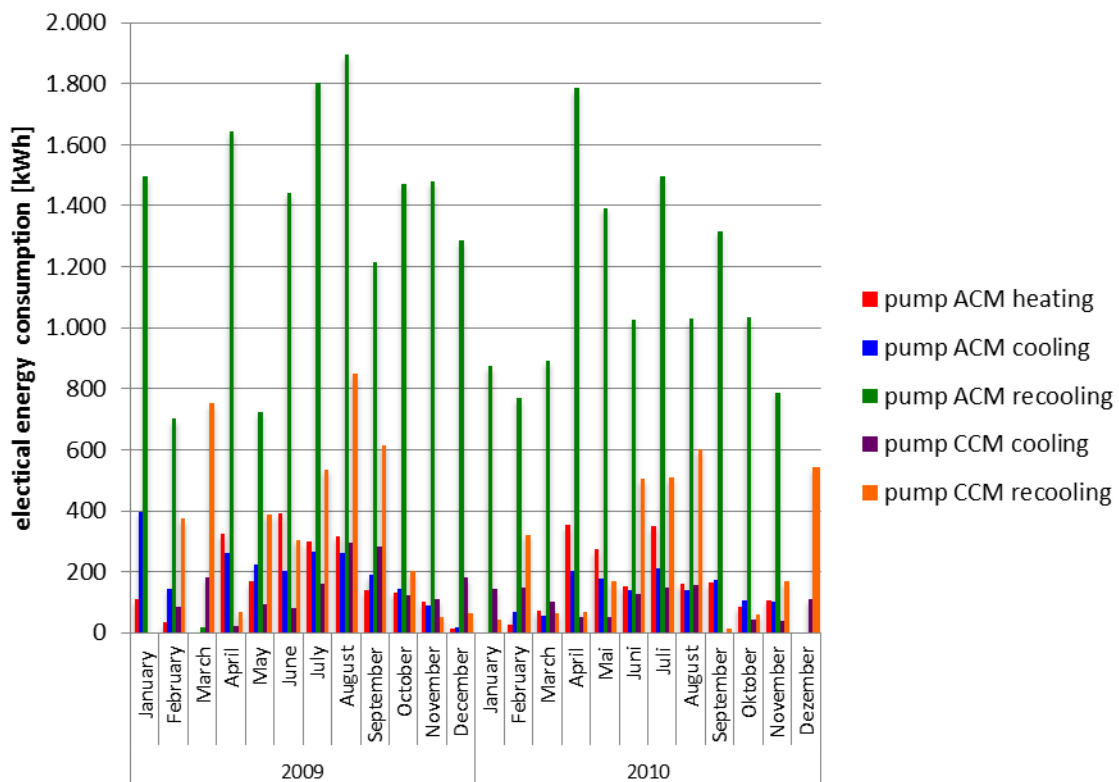


Abbildung 5: Elektrischer Stromverbrauch für Absorptions- und Kompressionskältemaschinenpumpen im Elekror Gebäude.

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 zaeh.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

Austrian Energy Agency (AEA), 2005: Klimatisierung, Kühlung und Klimaschutz:

Technologien, Wirtschaftlichkeit und CO2 Reduktionspotentiale. Authors: Simader, G. R. & Rakos, C., Österreichische Energieagentur, Wien.

Energy Information Administration (2000): Commercial Buildings Energy Consumption Survey 1999, <http://www.eia.doe.gov>

Glaser, Hendrik (2005) Beiträge zur Betriebsoptimierung solarthermisch betriebener Adsorptionskälteanlagen, Hamburg: Diplomica Verlag

Henning, H.M. (2008), Solar cooling –components and systems – Overview, Intersolar International Seminar „Solar Air-Conditioning - Experiences and practical application“, June 11th 2008, Munich

Jones Lang LaSalle (2008), Büronebenkostenanalyse OSCAR 2006, <http://www.joneslanglasalle.com> ,

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>

Rolles, W. (2004) Daikin, Es gibt viel zu kühlen – packen wir´s an, CCI.Print 2/2004, pp 18-19

Schubert, M. “3rd International Symposium on renewable cooling, Clean Energy Power Stuttgart 2/2011

Wiemken, E., Henning, H.-M. (2005) Solar Assisted Cooling at the University Hospital
Klinikum Freiburg, International Conference Solar Air conditioning, Staffelstein

VISIONS (2007) Solar cooling – using the sun for Climatisation, III. Issue 2007, Publisher:
Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy, www.wisions.net