

Solare Kühlung in Gebäuden

Dr. Uli Jakob¹, Prof. Dr. Ursula Eicker²

¹SolarNext AG, Nordstraße 10, 83253 Rimsting, e-mail: uli.jakob@solarnext.de

²Forschungszentrum Nachhaltige Energietechnik - zafh.net, Hochschule für Technik Stuttgart, Schellingstr.24, 70174 Stuttgart, e-mail: ursula.eicker@hft-stuttgart.de

1. Einleitung

Aktive Kühlung von Gebäuden unter deutschen Klimaverhältnis wird erforderlich, wenn hohe interne Lasten nicht über eine effiziente Nachtlüftung abgeführt werden können oder andere Niedrigenergie-Kühltechniken über Erdsonden oder Erdreichkollektoren nicht verfügbar oder leistungsmäßig ausreichend sind. Unbehagliche sommerliche Raumzustände stellen sich auch dann ein, wenn externe Lasten der Sonneneinstrahlung nicht durch effektiven Sonnenschutz abgefangen und die Fensterflächenanteile von heutigen Glasbauten sehr hoch sind. Detaillierte Untersuchungen an einem Passivenergie-Verwaltungsbau haben gezeigt, dass für die Abfuhr von etwa $250 \text{ Wh m}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$ Wärmelast ein etwa achtfacher Luftwechsel erforderlich ist, der nur mit großen Öffnungsquerschnitten und Querlüftung erzielt werden kann. Muss aktiv gekühlt werden, sind lange Laufzeiten der Kältemaschine entscheidend für die Wirtschaftlichkeit der Anlage. Während im Wohnungsbau in Mitteleuropa nur etwa 50 – 200 Kühlstunden auftreten, sind im südlichen Mittelmeerraum sowie in einigen Industrie- und Verwaltungsbauten etwa 1.000 Volllaststunden erforderlich. Spezielle räumliche Nutzungen mit ständig hohem Kühlbedarf wie Computer-Serverräume können zu einer deutlichen Verbesserung der Wirtschaftlichkeit führen.

Sowohl der Kälte- als auch der solarthermische Markt in Europa und Weltweit weist jährliche Wachstumsraten von mehreren Prozent auf, im ersten Fall verursacht durch steigende Komfortansprüche, im zweiten durch zunehmendes Umweltbewusstsein oder politische Vorgaben. Der Markt für solarthermische Kühlung ist dagegen noch klein: insgesamt sind in Europa heute etwa 6,3 MW Kälteleistung installiert [1], das entspricht rund 70 Anlagen. Das Potential ist jedoch hoch - alleine in Deutschland fallen etwa 40.000 GWh Stromverbrauch alleine für die Klimatisierung von Bürogebäuden an [2]. Die Technologien der solarthermischen Kühlung im mittleren und großen Leistungsbereich sind ausgereift, nur bei den kleinen Leistungen unter 10 kW wird noch verstärkt entwickelt. Die begrenzte Anzahl der solaren Kühlprojekte ist daher in erster Linie auf die mangelnde Wirtschaftlichkeit zurückzuführen, die nicht zuletzt durch die hohen Wärmegestehungskosten der solarthermischen Wärme verursacht wird. Hier sind Förderinstrumente dringend erforderlich, um zu einer schnelleren Marktdurchdringung zu gelangen. Unter günstigen Randbedingungen, d.h. langen Maschinenlaufzeiten und geringen Wärmekosten, die heute schon bei erneuerbarer Kraft-Wärmekopplung möglich sind, kann thermische Kühlung durchaus mit elektrischer Kompressionskälte konkurrieren, bei den zu erwartenden steigenden Strompreisen wird sich die Situation in Zukunft eher verbessern.

2. Übersicht solarthermischer Kühlverfahren

Die Technologie des solaren Kühlens wird seit einigen Jahrzehnten schon eingesetzt, aber es gibt bisher wenig kommerziell erhältliche Solare Kühlung Komplettsysteme. Hauptsächlich finden Absorptionskältemaschine und sorptionsgestützte DEC-Anlagen (Desiccant and Evaporative Cooling) Verwendung in der Gebäudeklimatisierung. Vereinzelt werden nun auch Adsorptionskältemaschinen und Flüssigsorptionsanlagen für die Gebäudeklimatisierung verwendet. Die solarthermisch betriebenen Kühlverfahren lassen sich grundsätzlich in zwei Hauptgruppen einteilen, die geschlossenen Systeme zur Kaltwassererzeugung und die offenen Systeme zur Klimatisierung der Luft (Abb. 1).

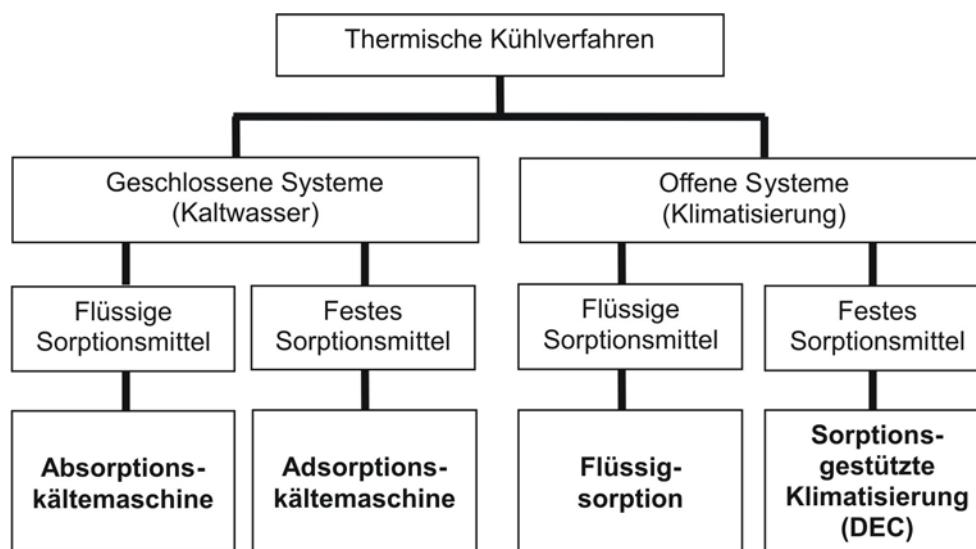


Abb. 1: Prinzipielle Einteilung thermischer Kühlverfahren

Für die marktgängigen Kühlverfahren sind in der Tabelle 1 die verwendeten Arbeitsstoffpaare, Kälte-träger, Temperatur- und Kälteleistungsbereiche sowie Leistungszahlen (COP = Coefficient of Performance, definiert das Verhältnis von Kälteleistung zu eingesetzter Heizleistung) aufgelistet.

Tabelle 1: Übersicht über solarthermische beheizbare Kälte- und Klimatisierungsverfahren

Technologie	Absorption			Adsorption	DEC
	einstufig	zweistufig	einstufig		
Kältemittel	Wasser	Wasser	Ammoniak	Wasser	–
Sorptionsmittel	Lithiumbromid	Lithiumbromid	Wasser	Silikagel	Silikagel oder Lithiumchlorid
Kälte-träger	Wasser	Wasser	Wasser-Glykol	Wasser	Luft
Kälte-temperaturbereich	6 – 20°C	6 – 20°C	-30 – +20°C	6 – 20°C	16 – 20°C
Heiz-temperaturbereich	80 – 100°C	130 – 160°C	100 – 180°C	55 – 100°C	55 – 100°C
Kühl-wasser-temperatur	30 – 50°C	30 – 50°C	30 – 50°C	25 – 35°C	nicht erforderlich
Kälte-leistungsbereich pro Einheit	15 – 20.500 kW	170 – 23.300 kW	15 – 1.000 kW	70 – 350 kW	6 – 300 kW
Leistungszahl (COP)	0,6 – 0,7	1,1 – 1,4	0,5 – 0,6	0,6 – 0,7	0,5 – 1,0

2.1 Absorptionskältemaschine

Marktdominierend sind einstufige Absorptionskältetechniken mit den Stoffpaaren Wasser/ Lithiumbromid ($\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$) bzw. Ammoniak/Wasser ($\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$), welche über einen geschlossenen, kontinuierlichen Kreisprozess Kälte erzeugen. Die Verdampfer Temperatur kann bei Ammoniak Absorptionskältemaschinen bis auf minus 60°C gesenkt werden, so dass industrielle Kälteprozesse möglich sind. Bei der Verwendung von Wasser als Kältemittel ist die Verdampfer Temperatur auf Temperaturen oberhalb des Gefrierpunktes von minimal 5 bis 6°C beschränkt. Zweistufige Absorptionskältemaschinen (double-effect) haben höhere Leistungszahl von 1,1 bis 1,4, da die bei einer hohen Heiztemperatur zugeführte Wärme im Prozessablauf ein zweites Mal auf niedrigerem Temperaturniveau genutzt wird. Grundsätzlich finden Absorptionskältemaschinen Verwendung als zentrale Klimatisierungsgeräte oder als Kühlsysteme mit dezentralen Umluftgeräten (fan-coils) oder Kühldecken für die Klimatisierung der zu kühlenden Räume.

Bei der Absorptionskältetechnik wird das Kältemittel (Wasser oder Ammoniak) in einem flüssigen Lösungsmittel (LiBr oder Wasser) absorbiert und durch direkte oder indirekte Beheizung in einem Austreiber bei hohen Temperaturen desorbiert und auf den erforderlichen Kondensatordruck gebracht. Bei der Absorption wird Lösungswärme frei, die über einen Kühlkreis abgeführt werden muss. Die Antriebstemperaturen für die Austreibung liegen je nach Technologie zwischen 80 und 180°C .



Abb. 2. Wasser/Lithiumbromid Absorptionskältemaschine der Firma EAW Energieanlagenbau Westenfeld (Quelle: ILK Dresden)

Eine spezielle Absorptionskältemaschine stellt die Diffusions-Absorptionskältemaschine (DAKM) dar, welche keine beweglichen Teile wie Lösungspumpe und Drosseln besitzt. Das dabei verwendete Stoffpaar ist Ammoniak/Wasser mit Helium oder Wasserstoff als Hilfsgas zum Druckausgleich zwischen Hoch- und Niederdruckbereich. Die DAKM gibt es als so genannte Absorber-Kühlschränke im Camping- oder Hotelbereich oder für die Klimatisierung von Einfamilienhäusern oder einzelnen Büroräumen im kleinen Leistungsbereich mit $2,5$ kW Kälteleistung.

2.2 Adsorptionskältemaschine

Bei der geschlossenen Adsorptionstechnik wird das Kältemittel Wasser an einem Festkörper wie Silikagel unter Freisetzung von Bindungswärme an der Oberfläche adsorbiert. Die Bindungswärme sinkt bei steigender Anlagerung von Wassermolekülen gegen Null, so dass nur noch Verdampfungswärme abgeführt werden muss. Die Desorption des angelagerten Wassers und die Druckerzeugung für die Kondensation erfolgt bereits bei niedrigen Antriebstemperaturen von 60 bis 70°C, so dass diese Technologie besonders für den Einsatz von Solarenergie geeignet ist. Bei Verwendung von Zeolith als Adsorptionsmittel erfolgt die Desorption des angelagerten Wassers bei hohen Antriebstemperaturen von 250 bis 350°C, die mittels einem konzentrischen Parabol-Kollektor bereitgestellt werden.



Abb. 3. Adsorptionskältemaschine an der Uniklinik Freiburg
(Quelle: Fraunhofer ISE)

Von geschlossenen Adsorptionskältemaschinen wird durch den periodischen Kreisprozess Kaltwasser von minimal 5 bis 6°C erzeugt. Diese Kältemaschinen können ebenfalls als Kühlsysteme mit dezentralen Umluftgeräten (fan-coils) oder Kühldecken sowie als zentrale Klimatisierungsgeräte eingesetzt werden.

2.3 Offene sorptionsgestützte Klimatisierung

Offene Adsorptionsanlagen, so genannte DEC-Anlagen (Desiccant and Evaporative Cooling), verwenden die Zuluft direkt als Kälteträger. Die physikalische Adsorption von Wasser an Silikagel oder Lithiumchlorid (LiCl) dient in diesem Prozess zur Trocknung der Luft. Gekühlt wird anschließend mit einer direkten Verdunstungsbefeuchtung der getrockneten und über einen Wärmetauscher vorgekühlten Luft. Die thermische Antriebsenergie ist zur Regeneration des Sorptionsmittels, d.h. zur Desorption des adsorbierten Wassers, erforderlich. Mit offener Adsorption werden prozessbedingt Lufttemperaturen von minimal etwa 16°C erreichen, so dass der Einsatzbereich auf die Klimatisierung beschränkt ist. Die Antriebstemperaturen können auch bei diesem Verfahren sehr niedrig (60 bis 70°C) gewählt werden.



Abb. 4. Solarunterstützte DEC Anlage in einem Fabrikgebäude in Althengstett
(Quelle: zafh.net)

2.4 Flüssigsorption

In offenen Sorptionskälteanlagen (DEC) werden neben festen Adsorptionsmitteln wie Silikagel oder Zeolithe auf Grund des hohen Entfeuchtungspotentials zunehmend auch flüssige Absorbentien aus wässrigen Lithiumchlorid- oder Calciumchloridsalzlösungen zur Lufttrocknung eingesetzt. Die Kälteerzeugung erfolgt auch hier rein über Verdunstungsbefeuchtung der getrockneten und über einen Wärmetauscher vorgekühlten Luft. Zur Entfeuchtung der Luft wird die konzentrierte Salzlösung über einen Kontaktkörper mit möglichst großer Oberfläche verrieselt, der von der zu trocknenden Luft durchströmt wird. Durch das relativ hohe Partialdampfdruckgefälle zwischen Luft und Salzlösung nimmt die Salzlösung Wasser aus der Luft auf, wodurch ihre Konzentration und damit auch ihr Absorptionspotential abnimmt.



Abb. 5. Aufbau der Wärmetauscherabsorptionseinheit WTAH der Flüssigsorption
(Quelle: zafh.net)

Um einen kontinuierlichen Prozess aufrecht zu erhalten, ist es erforderlich die Salzlösung zu regenerieren, d.h. das aufgenommene Wasser aus der Salzlösung auszutreiben. Hierzu wird die Salzlösung z.B. über solarthermisch erzeugte Wärme auf 60 bis 90°C erhitzt, bevor sie einem mit Luft durchströmten Regenerator zugeführt wird. Neben dem höheren Absorptionspotential liegt der wesentliche Vorteil der Salzlösungen gegenüber festen Adsorbentien in ihrer Pumpbarkeit, die eine verlustfreie Speicherung der konzentrierten Salzlösung ermöglicht. Die Abhängigkeit von der momentanen Sonneneinstrahlung ist bei diesen Systemen somit deutlich geringer als bei festen Adsorbentien die üblicherweise in Sorptionsrädern eingesetzt werden.

3. Marktsituation Kälte- und Solartechnik

Weltweit werden heute etwa 100 Millionen stationäre elektrische Kälteanlagen verkauft, dazu kommen 35 Millionen mobile Einheiten [3]. Im Gegensatz dazu werden nur etwa 10.000 Absorptionskältemaschinen weltweit produziert, 85% davon in Asien (Japan, China, Indien und Korea).

Italien dominiert in den Absatzzahlen sowie in der Eigenproduktion von elektrisch angetriebenen Kältemaschinen: im kleinen Leistungsbereich bis 12 kW Kälteleistung wurden 1996 etwa 460.000 Geräte hergestellt und knapp 450.000 Einheiten verkauft mit 4,25 GW Spitzenleistung und 4.394 GWh elektrischem Energiebedarf; insgesamt waren über 2 Millionen Einheiten im Einsatz [4]. Die Absatzzahlen vor allem kleiner Mini-Splitt Geräte steigt rasant: in Griechenland hat sich die Anzahl verkaufter Einheiten von 1996 bis 2000 auf 400.000 verdreifacht und der Stromverbrauch steigt jährlich um 3-4% [5]. Der europäische Gesamtmarkt für Raumklimatisierung umfasste 1996 insgesamt 1,6 Millionen verkaufte Geräte. Die japanische Refrigeration and Air Conditioning Industry Association (JRAIA) gibt für Kältemaschinen im kleinen Leistungsbereich von 2-4 kW für Wohn- sowie Verwaltungsgebäude einen weltweiten Absatz von 62,97 Millionen Geräten im Jahr 2006 an, davon 5,38 Millionen in Europa [6]. Für das Jahr 2008 wird ein Anstieg auf 68,65 Millionen Geräten weltweit bzw. 6,12 Millionen in Europa prognostiziert. Im Wohnungsbau ist die Marktdurchdringung von Kältemaschinen in Europa mit etwa 2% der Haushalte sehr gering verglichen mit 70% aller Haushalte in Japan und 55% in den USA.



Abb. 6: Anzahl der Stunden mit Klimatisierungsbedarf im Wohnungsbau [4]

Zentrale Kälteanlagen werden vor allem im Verwaltungs- und Industriebau sowie in kommerziellen Gebäuden eingesetzt. In Deutschland werden jährlich etwa 1.000 Gebäude mit Vollklimaanlagen ausgestattet, von denen etwa 1/3 Altanlagen ersetzen. Dieses entspricht einer jährlich installierten Kälteleistung von 500 MW_{th}. Die gesamte bisher installierte Kälteleistung inklusive Industrie wird auf etwa 20 GW_{th} geschätzt [7]. Insgesamt werden knapp 1.000 Absorptionskälteanlagen mit einer Gesamtkälteleistung von 1 GW_{th} betrieben, davon etwa die Hälfte in Industrie-

betrieben mit billiger Abwärmenutzung. In Griechenland werden jährlich etwa 250 MW_{th} zugebaut mit einer gesamten installierten Kälteleistung von 2,5 GW [8]. Der hohe Zuwachs sommerlicher elektrischer Spitzenleistungen erfordert einen teuren Ausbau der Stromversorgung, da die Verteilungsnetze immer häufiger überlastet werden (Blackouts Griechenland, Italien, Kalifornien...).

Der stark wachsende weltweite Kältemarkt führt aufgrund der dominierenden elektrischen Anlagentechnik zu steigenden Stromverbräuchen insbesondere im Sommer. Nach einer Studie für die Europäische Kommission ist der Stromverbrauch durch Gebäudeklimatisierung mit kleinen Kältemaschinen von 1990 bis 1996 von jährlich etwa 1.500 GWh auf 11.000 GWh gestiegen, mit konservativen Annahmen bezüglich Marktwachstum werden 2010 knapp 30.000 GWh verbraucht und 2020 bereits 44.000 GWh. Die damit verbundenen CO₂ Emissionen steigen damit im Zeitrahmen des Kyoto-Protokolls von 1990 bis 2010 um einen Faktor 20 auf 12 Millionen Tonnen jährlich [4].

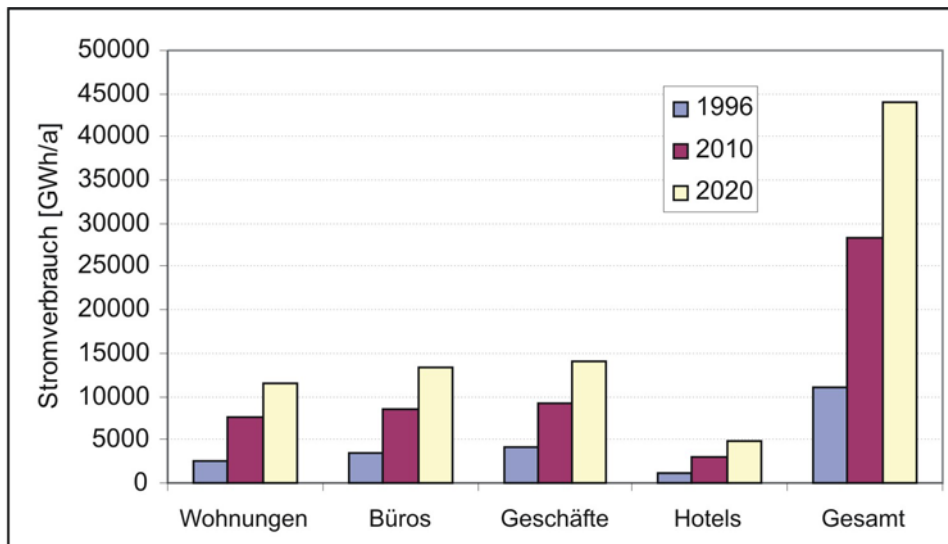


Abb. 7: Prognostizierte Entwicklung des jährlichen Stromverbrauchs für Raumklimatisierung nach Gebäudetypen in Europa (nur Kälteleistungen kleiner 12 kW) [4]

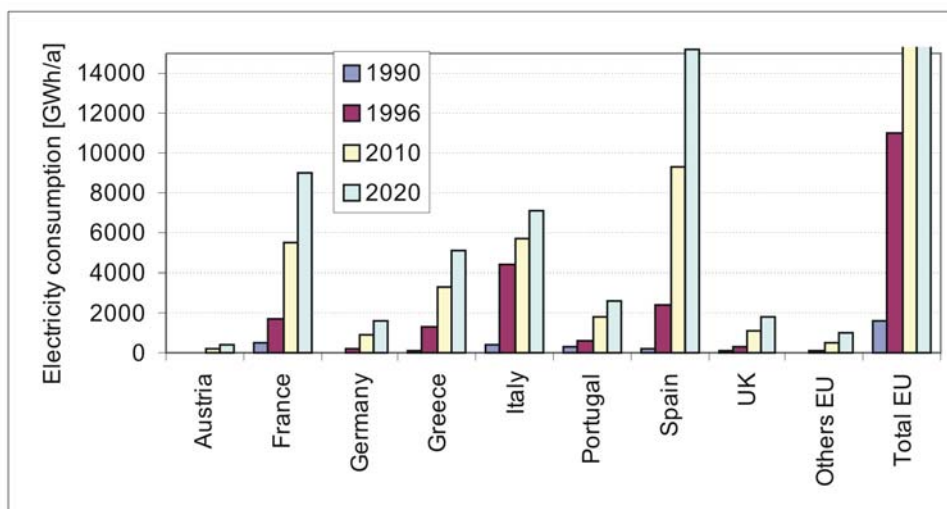


Abb. 8: Entwicklung des Stromverbrauchs durch Raumklimatisierung in europäischen Ländern (nur Kälteleistungen kleiner 12 kW) [4]

Während die besten wassergekühlten elektrischen Kompressionskältemaschinen Leistungszahlen von 5 bis 6 erreichen, liegt der europäische Durchschnitt der etwa 7,5 Millionen Kleinkälteanlagen deutlich unter 3. Die Splitgeräte mit etwa 70% Marktanteil haben luftgekühlt durchschnittliche Leistungszahlen von 2,5 und wassergekühlt von 2,75. Durchschnittliche Leistungszahlen aller elektrischer Klimaanlageanlagen in den USA liegen bei 2,93 [9]. Bei einem Umwandlungswirkungsgrad des elektrischen Stroms aus Primärenergie von 35% liegen die Primärenergie-Leistungszahlen konventioneller Anlagentechnik somit knapp unter 1,0 und bei Einsatz bester Technik maximal bei 2,0. Da die herkömmlichen Kältemittel wegen der Ozonschichtbelastung bzw. der Klimaerwärmung im nächsten Jahrzehnt auslaufen werden, muss eher mit einer Verschlechterung der heutigen Leistungszahlen gerechnet werden. Nach dem Montreal Protokoll 1987 und der EU Richtlinie 2037/2000 sind CFC bereits komplett und HCFC für Neuanlagen verboten. Zwischen 2010 und 2015 werden dann HCFC's auch in der Wartung ausgeschlossen [8].

Solar betriebene Kältemaschinen sind jedoch noch nicht wirtschaftlich. Die solarthermische Anlage ist der größte Kostenfaktor, die Betriebs- und Wartungskosten sind niedriger als bei konventionellen Anlagen, die Investitionskosten aufgrund der geringen Stückzahlen höher [10]. Allerdings liegen die Mehrkosten teilweise nur noch geringfügig über den Kosten einer konventionellen Anlage: für eine sorptionsgestützte Klimaanlage in einer Spritzgussfabrik in Althengstett wurden Mehrkosten von nur 6% ermittelt [11]. Aufgrund des hohen Kostenanteils der solarthermischen Anlage sind hohe Nutzungsdauern entscheidend für die Anlagenwirtschaftlichkeit. Typische Volllaststunden von nur 800 bis 1.000 h in Verwaltungsbauten und kommerziellen Gebäuden für die Klimatisierung sind gering gegenüber den Heizstunden von etwa 2.500 h. Eine ganzjährige Energienutzung der erneuerbaren Energiequellen ist unabdingbar.

4. Entwicklungen thermischer Kältetechnik

4.1 Absorptionskälte

Absorber im mittleren und großen Leistungsbereich (> 35 kW) werden seit Jahren in solaren Kühlprojekten eingesetzt. Für die solarthermischen Anlagen werden sowohl effiziente Flachkollektoren oder Vakuumröhren verwendet.

Neben diesen großen Absorbern gibt es die ersten kommerziellen Kleinanlagen. Im kleinen Leistungsbereich unter 20 kW ist mittlerweile von einer deutschen Firma Wasser/LiBr Absorber marktverfügbar. Die Firma EAW Westenfeld bietet Absorber mit 15 kW und 30 kW Kälteleistung an, welche im Auslegungszustand mit 15°C Verdampfertemperatur, 32°C Rückkühltemperatur und 90°C Heißwassertemperatur eine Leistungszahl von 0.75 erzielen. Soll die Rückkühlung trocken erfolgen, so dass Temperaturen bis zu 40°C entstehen können, dann kann dies über eine Generatortemperaturerhebung auf 100°C kompensiert werden. Niedrige Generatortemperaturen zwischen 70 und 80°C sind möglich bei entsprechend reduzierter Kälteleistung [12].

Interessant ist die Entwicklung von Komplettpaketen für die Heizungsbranche. Die Moosburger Firma CitrinSolar stellt ein vorinstalliertes Absorptionskältesystem zur Verfügung, welches durch die solarerzeugter Wärme angetrieben wird. Eine integrierte Regelung vereinfacht das Zusammenspiel von thermischer Solaranlage und Kältemaschine und vermeidet Funktionsfehler. Konkrete Messdaten eines

CitrinSolar Projektes ergaben einen COP von 0.6 unter Teillastbedingungen und Temperaturrandbedingungen von 75,8°C/13,4°C/30,7°C [13].

Die Firma Phönix Sonnenwärme aus Berlin führt Feldtests an verschiedenen europäischen Standorten mit einer 10 kW Lithiumbromidanlage mit guten Leistungszahlen und niedrigen Antriebstemperaturen von 75°C (bei gleichzeitig hohen Verdampfeintrittstemperaturen von 18°C) durch. Die Markteinführung steht kurz bevor [14]. Während für die Vermeidung von Kristallisation in konventionellen Absorptionskältemaschinen ein hoher Aufwand getrieben wird, nutzt die Firma ClimaWell AB aus Schweden genau dieses Prinzip der Kristallisation von hochkonzentrierter LiBr Lösung zur Erhöhung der internen Speicherdichte. Erste Prototypen im Leistungsbereich 1-7 kW sind seit 2005 im Feldtest in Spanien [15]. Eine weitere LiBr Maschine kleiner Kälteleistung wird seit einigen Jahren von der Firma Rotartica in Spanien entwickelt und in Feldtests analysiert. Mit gemessenen 4 kW Kälteleistung werden Leistungszahlen zwischen 0.6 und 0.7 erzielt, wobei durch den eingesetzten rotierenden Absorber mit trockener Rückkühlung gearbeitet werden kann – ein wichtiger Vorteil bei kleinen Installationen [16].



Abb. 9: Dritter Prototyp einer Diffusions-Absorptionskältemaschine
(Quelle: zafh.net)

Vom ITW der Universität Stuttgart wird derzeit eine Ammoniak/Wasser Absorptionskälteanlage von 10 kW maximaler Kälteleistung entwickelt. Die Beförderung der Lösung auf den hohen erforderlichen Druck erfolgt mit einer Membranpumpe [17]. Eine NH₃/H₂O Absorptionskälteanlage die ohne mechanische Lösungspumpe auskommt, ist die am zafh.net der HfT Stuttgart entwickelte solar betriebene Diffusions-Absorptionskältemaschine (DAKM) mit 2,5 kW Kälteleistung [18]. Die aktuellen Messergebnisse des dritten Prototyps der DAKM kleiner Leistung ergaben bisher Leistungszahlen von 0,12 bis 0,38 und Kälteleistungen von 0,8 kW bis 3,0 kW bei Verdampfertemperaturen von 12/6°C bzw. 18/15°C.

Zweistufige Absorptionskältemaschinen mit Parabolrinnenkollektoren sind in ersten Projekten der Firma Solitem in der Türkei im Betrieb. Gemessene Leistungsdaten liegen noch nicht vor [19].

4.2 Adsorptionskälte

Ein wesentliches Problem der Adsorptionsanlagen ist der schlechte Wärmetransport zwischen Feststoff-Adsorbieren, beispielsweise in Form von Packungen um einen Wärmetauscher, und dem flüssigen Wärmeträger. Erst die Beschichtung von Wärmetauschern mit Adsorptionsmaterialien, die zudem hohe Beladungsdifferenzen ermöglichen, erlaubt die Konstruktion von Adsorptionskältemaschinen mit sehr kurzen Zyklusdauern im Minutenbereich. Die Firma SorTech AG entwickelt derzeit einen Prototypen mit 10 kW Kälteleistung, der modular aufgebaut bis zu 100 kW erweiterbar ist [20]. Größere Feldtests sind für 2006 geplant.

Größere Adsorptionsanlagen der japanischen Hersteller Nishyodo und Mayekawa laufen in verschiedenen Demonstrationsanlagen mit zuverlässigem Betrieb. Mittlere thermische Leistungszahlen von 43% eines 70 kW Adsorbers wurden am Uniklinikum Freiburg gemessen, wobei der solare Deckungsgrad der 171 m² Vakuumröhrenanlage aufgrund langer Laufzeiten nachts nur 28% jährlich erreicht [21].

4.3 Offene sorptionsgestützte Klimatisierung

Offene sorptionsgestützte Klimaanlage sind technisch ausgereift, nur die Regelungstechnik muss jeweils auf die projektspezifischen Anforderungen angepasst werden und sorgfältig geplant und ausgeführt werden. Wenige solarthermisch betriebene offene sorptionsgestützte Klimaanlage verfügen über eine detaillierte Messdatenerfassung und -auswertung. Die vom Fraunhofer ISE in Freiburg vermessene Sorptionsanlage mit 10.200 m³ h⁻¹ Volumenstrom und rein solarem Regenerationsbetrieb ergaben jährliche Kollektorserträge der Luftkollektoranlage von maximal 100 kWh m⁻² a⁻¹ [1]. Dieser geringe Ertrag ist vor allem durch die niedrige Laufzeit der Anlage verursacht, die für nur temporär genutzte Seminarräume verwendet wird. Die mittlere jährliche Leistungszahl liegt bei 43%.

4.4 Flüssigsorption

Verschiedene Forschungseinrichtungen arbeiten an der Realisierung von Flüssigsorptionsabsorbieren und – Desorbieren: das Zentrum für angewandte Energieforschung (ZAE) Bayern entwickelt und betreibt Flüssigsorptionsanlagen im Labor und der Praxis, die University of South Australia arbeitet an Regeneratoren/Absorbieren mit Kunststoff-Plattenwärmetauschern und Baumwollmatten für die Verteilung der Flüssigkeit, das zafh.net Stuttgart entwickelt für den kleinen Leistungsbereich eine sensible Zuluftkühlung mit Flüssigsorptionstrocknung rein auf der Abluftseite [22].



Abb. 10: Feldtest Flüssigsorptionssystem OA-6000 mit Kühlturm und Heizkessel [25]

Erste positive Feldtests wurden mit Flüssigsorptionssystemen durchgeführt: mittlere thermische Leistungszahlen von knapp 1,1 wurden während der ersten Messphase 2005 eines Flüssigsorptionssystems der Firma Menerga erzielt [23]. Die Firma L-DCS installiert ein 350 kW großes Flüssigsorptionssystem in Singapur, basierend auf den Entwicklungsarbeiten am ZAE Bayern [24]. Auch in den USA werden Flüssigsorptionssysteme mit besonders geringen Durchflussmengen entwickelt und derzeit im Feldtest geprüft [25].

5. Realisierte Projekte

Die ersten Anlagen des solaren Kühlens zur Raumklimatisierung wurden in Europa und den USA schon in den 70er Jahren des 20. Jahrhunderts unter anderem von den Firmen Dornier-Prinz Solartechnik GmbH [26,27] und Arkla Industries Inc., USA (heute Robur SpA, Italien) [10] entwickelt und in Demonstrationsprojekten verwirklicht. Aufgrund des mangelnden Absatzes wurde die Produktion dieser solaren Kühlsysteme eingestellt.

In den letzten Jahren wurden aber wieder vermehrt Demonstrationsprojekte in Deutschland und Europa installiert. Von dieser Vielzahl von ausgeführten Projekten werden zunehmend Betriebserfahrungen gesammelt, die zur Verbesserung der Regelstrategien führen und die Planung der Anlagen erleichtern. Bei sorgfältiger Planung, Ausführung und Anlagenüberwachung können schon heute solarthermische Kühlanlagen mit Contractingmodellen finanziert werden [28].

Heute sind rund 70 Anlagen installiert, die solarthermische Kollektoren für die solare Gebäudeklimatisierung verwenden. Die meisten der Anlagen wurden in Deutschland und Spanien realisiert. Die insgesamt installierte Kälteleistung beträgt rund 6,3 MW und die hierfür installierte Kollektorfläche beträgt knapp 17.500 m². Rund 60% der Anlagen verwenden Absorptionskältemaschinen, etwa 12% Adsorptionskältemaschinen und rund 27% offene Kühlverfahren, wobei hier die Anlagen mit Sorptionsrotoren (DEC, Sorptionsrotor) dominieren und bislang nur wenige Systeme mit offener Flüssigsorption arbeiten [29].

5.1 Kennwerte

Der Mittelwert der spezifischen Kollektorfläche aller Anlagen beträgt rund 2,9 m² kW⁻¹. Ein Wert von 3-3,5 m² kW⁻¹ kann als Anhaltspunkt für thermisch angetriebene Kältemaschinen gelten. Bei den offenen Verfahren ist eine Angabe bezogen auf die Luftmenge üblicher; hier hat sich ein Wert zwischen 8 und 10 m² pro 1.000 m³ h⁻¹ installierter Luftleistung als sinnvolle Größenordnung herausgestellt [29]. Diese Werte sind aber nur grobe Anhaltspunkte und ersetzen keinesfalls eine detaillierte Anlagenauslegung. Über das Verhältnis von Kollektorfläche zur erforderlichen Kälteleistung oder zur gekühlten Nutzfläche besteht noch keine Einigung, hier können Simulationsprogramme wertvolle Planungshilfen bieten [30].

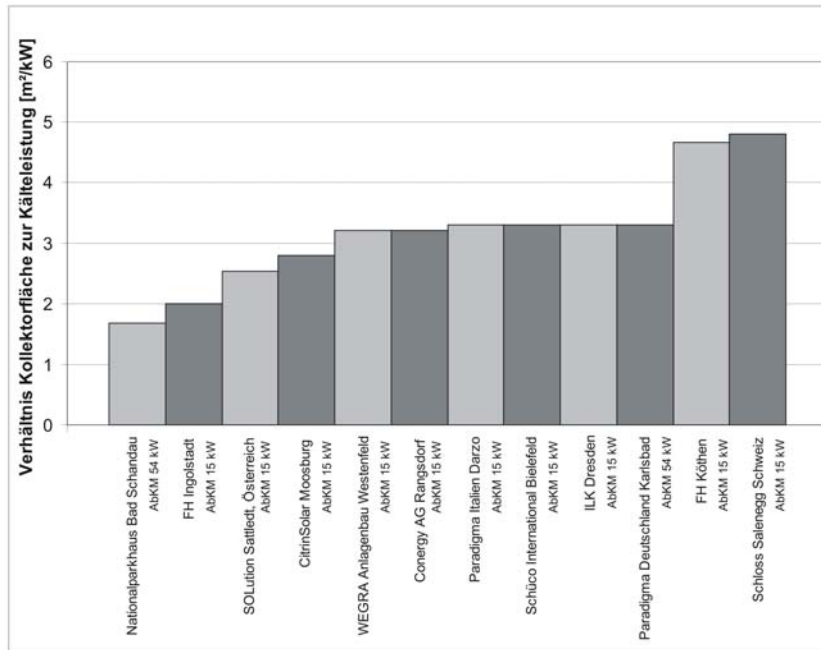


Abb. 11: Verhältnis installierter Kollektorfläche zur Kälteleistung bei Demonstrationsprojekten solarer Kühlung (Quelle: EAW Energieanlagenbau)

Die spezifischen Gesamtkosten von installierten solaren Kühlungsanlagen liegt bei der Verwendung von Absorptionskältemaschinen (35 bis 170 kW) in einem Bereich zwischen 2.515 und 6.000 € kW⁻¹. Mit Fördergeldern reduzierten sich die Kosten auf 1.258 bis 3.400 € kW⁻¹. Werden Adsorptionskältemaschinen verwendet ergeben sich je nach Größenordnung der Anlagen (700 zu 70 kW) Gesamtkosten in einem Bereich von 1.866 bis 5.029 € kW⁻¹ ohne und 933 bis 1286 € kW⁻¹ mit Fördergeldern. Bei den offenen Systemen (36-108 kW) wurden spezifische Gesamtkosten von 2.066 bis 3.500 € kW⁻¹ ermittelt, wobei mit Fördergeldern Kosten von 1.119 € kW⁻¹ erzielt wurden.

5.2 Betriebserfahrungen und Potentiale von DEC-Anlagen

Zwei Projekte mit sorptionsgestützter Klimatisierung wurden vom zafh.net Stuttgart initiiert, dimensioniert und messtechnisch betreut: in einer Fabrikhalle in Althengstett wird eine 100 m² große Luftkollektoranlage zur Regeneration eines LiCl getränkten Sorptionsrotors genutzt und damit eine solare Kühlanlage mit 18.000 m³ h⁻¹ Volumenstrom betrieben.



Abb. 12: 100 m² solare Luftkollektoranlage zur Regeneration der Sorptionsanlage in der Produktionshalle Althengstett (Quelle: zafh.net)

Detaillierte Untersuchungen zeigen, dass der Kollektorwirkungsgrad während des Regenerationsbetriebs mit Werten um 50% durchaus gut ist, die Regenerationsstunden und damit der Kollektorenergieertrag ebenfalls mit unter 100 kWh m⁻² im Sommer niedrig liegen [31]. Die gemessene mittlere Leistungszahl für den Betriebsmonat Juli für vollen Regenerationsbetrieb liegt bei 50%. Hier wurde die Kühlleistung aus der Enthalpiedifferenz zwischen Raumabluft und Zuluft berechnet, die unter deutschen Klimaverhältnissen höher als die Enthalpiedifferenz zwischen Aussenluft und Zuluft liegen kann. Bei Bezug auf die Aussenluft ergibt sich eine mittlere Leistungszahl für den reinen Regenerationsbetrieb von 33%. Werden alle Zustände der Kühlung, also auch die reine Befeuchtung, zusammengerechnet, verdoppeln sich die Leistungszahlen. Wichtig für effizienten solaren Kühlbetrieb sind daher vor allem hohe Regenerationsstunden oder eine parallele Nutzung der Kollektorwärme für Warmwasserbereitung o.ä. Die Energiebilanz über eine komplette Sommerperiode zeigt, dass die mittlere Leistungszahl knapp unter 1.0 liegt. Um den Primärenergieverbrauch zu reduzieren, wurde die Nachheizung 2003 komplett auf Abwärmenutzung umgestellt.

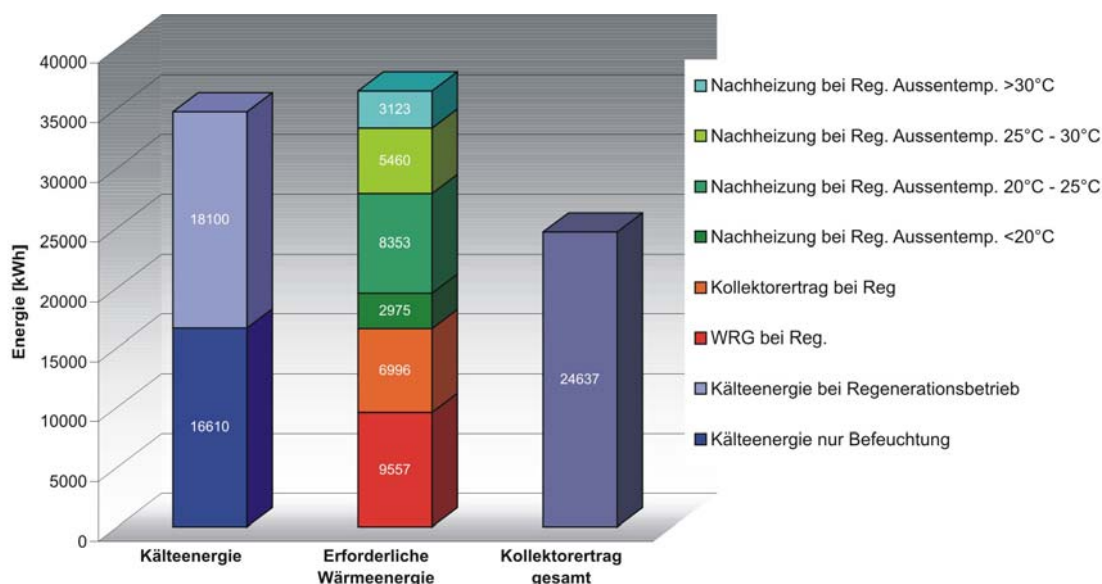


Abb. 13: Energiebilanz für eine Sommerperiode (März bis September 2003) der solarunterstützten DEC-Anlage in Althengstett (Quelle: zafh.net)

In Mataró, Spanien wird ein 105 m² großes Luftkollektorfeld mit vorgewärmter Warmluft einer hinterlüfteten Photovoltaikfassade zur Regeneration eines Silikagel-Sorptionsrotors genutzt, um eine Bibliothek zu klimatisieren. Im Gegensatz zu der Althengstett-Anlage wird hier ein Nachkühler als Hilfsenergiequelle genutzt, die Regenerationsluffterhitzung erfolgt rein solar. Die gemessenen Leistungszahlen bei vollem Regenerationsbetrieb liegen auch hier zwischen 0.5-0.6 [31]. Vor allem die Wärmeüberträger erreichen nicht die vom Hersteller angegebenen Rückwärmzahlen.



Abb. 14: Elementkonstruktion einer 6,5 m hinterlüfteten Photovoltaikfassade (Luftspalt 0,14 m Bautiefe) als Regenerationsluftherhitzer der DEC-Anlage in Mataró (Quelle: zafh.net)

Aus der Analyse der Messwerte während des Betriebs der DEC-Anlage in Althengstett wurde deutlich, dass Einsparungen im Bereich von 10-15% der Gesamtinvestitionskosten vor allem im Bereich Regelungstechnik, Planung und optimierter Anlagentechnik zu erreichen sind. Im Verlauf der Optimierungsarbeiten konnten weiter die Betriebskosten nachhaltig gesenkt werden. So konnte der Wasserbedarf über eine Optimierung der Regelungsstrategie auf die Hälfte gesenkt werden. Exakte Daten über Nachheizbedarf und Strombedarf wurden in der Kühlphase 2004 messtechnisch erfasst, ausgewertet und als reale Größen in die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung integriert. Weiter stellte sich heraus, dass der Wartungsaufwand für die DEC-Anlage weit unter dem in der VDI-Berechnung zugrunde gelegten Bedarf von 2.666 € (2% der Investition) liegt. In den ersten zwei Betriebsjahren mussten lediglich die Außenluft- und Abluftfilter mit einem Finanzbedarf von 700 € Jahr⁻¹ gewechselt werden. Störfälle beim Betrieb der Anlage liegen seit Beginn 2003 keine vor.

Bis jetzt nicht monetär erfasst wurden die vom Betreiber mittlerweile als Hauptargument für den Betrieb der DEC-Anlage angeführten stabilen klimatischen Fertigungsparameter, die zum einem den Anteil an Ausschussware und zum anderen den Zeitaufwand für die Maschineneinstellung auf nahezu null reduzieren konnten. Nach den vorliegenden Ergebnissen und Analysen kann davon ausgegangen werden, dass sich zuverlässig arbeitende, solargestützte DEC-Anlagen als wirtschaftlich zumindest gleichwertige, ökologisch weit überlegene Alternative zu den konkurrierenden Kompressionskälte-Vollklimaanlagen, speziell im gewerblichen Bereich, realisieren lassen.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Die aktive Klimatisierung von Gebäuden ist auch unter deutschen Klimabedingungen im gewerblichen und industriellen Bereich erforderlich, wenn innere und äußere Lasten nicht mehr mit passiver Nachtkühlung entfernt werden können und wenn hohe Komfortansprüche an das sommerliche Raumklima gestellt werden. Der Energiebedarf für Kälte und Klimatisierung steigt in Deutschland, Europa und weltweit. In Deutschland werden bereits 14 % des Stromverbrauchs für Kühlung eingesetzt (77.000 GWh_{el}), was 5,8 % des Primärenergiebedarfs entspricht.

Thermische Kühlung mit Solarthermie Antrieb kann zu einer deutlichen Reduktion des Energieverbrauchs und der CO₂ Emissionen führen. Voraussetzung vor allem bei einstufigen thermischen Kältemaschinen ist ein sehr hoher solarer Deckungsgrad oder besser ein vollständig solares Heizsystem, da die niedrigen Leistungszahlen

schnell zu hohen Primärenergieverbräuchen bei Nachheizung führen. Für einen wirtschaftlichen Anlagenbetrieb müssen die zusätzlichen Investitionskosten der thermischen Kältetechnik noch reduziert werden, was bei höheren Stückzahlen durchaus zu erwarten ist. Bei sehr geringen Wärmepreisen, z.B. in Biomasse-KWK Anlagen oder bei ohnehin vorhandenen solarthermischen Anlagen zur Heizungsunterstützung, können heute thermische Kühlanlagen nahezu mit elektrischer Kompressionskälte konkurrieren. Bei einem generellen Trend zu größeren solarthermischen Anlagen bieten dann kleine thermische Kältemaschinen gute Möglichkeiten, sommerliche Wärme effizient zu nutzen.

Viele Konzepte aus Absorption, Flüssigsorption und Adsorptionstechnik sind mittlerweile aus dem Prototypentwicklungsstadium in den Feldtest und die Produktion übergegangen, so dass in den nächsten Jahren vermehrt Projekte auch im kleinen Leistungsbereich zu erwarten sind.

7. Literatur

- [1] Henning H.-M.: Solar assisted air conditioning of buildings – an overview. In: Proceedings of the Heat SET 2005, Grenoble, France, 2005 April 5-7
- [2] Nick-Leptin J.: Political framework for research and development in the field of renewable energies. Proceedings of the 1st International Conference Solar Air-Conditioning, Bad Staffelstein. Regensburg: Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V. (OTTI), 2005 Oktober 6-7, Seite 16-20, ISBN 3-934681-41-7
- [3] Reichelt J.: Wo steht die Kältetechnik in Deutschland und weltweit? Die Kälte & Klimatechnik 2000, Vol. 53, Nr. 10, Seite 22-32
- [4] Adnot J.: Energy Efficiency of Room Air-Conditioners (EERAC). Final Report of Contract DGXVII4.1031/D/97.026, 1999
- [5] Tsoutsos T., Anagnostou J., Pritchard C., Karagiorgas M., Agoris D.: Solar cooling technologies in Greece - An economic viability analysis. Applied Thermal Engineering 2003, Vol 23, Seite 1427-1439
- [6] JRAIA: Estimates of World Demand for Air Conditioners (2000-2008). The Japan Refrigeration and Air Conditioning Industry Association 2006, <http://www.jraia.or.jp/>
- [7] Schönberg I., Noeres P.: Kraft-Wärme-Kältekopplung. BINE Profiinfo II/1998, ISSN 1436-2066
- [8] Papadopoulos A.M., Oxizidis S., Kyriakis N.: Perspectives of solar cooling in view of the developments in the air conditioning sector. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2003, Vol. 7, Seite 419-438
- [9] Guiney B.: Solar thermal for cooling, heating and power generation. Renewable Energy World 2003, March-April, Seite 92-98
- [10] Grossman G.: Solar-powered systems for cooling, dehumidification and air-conditioning. Solar Energy 2002, Vol. 72, Nr. 1, Seite 53-62
- [11] Schneider D.: Energie- und Wirtschaftlichkeitsanalyse einer industriellen sorptionsgestützten Klimaanlage mit solaren Luftkollektoren. Tagungsband 2. Symposium Solares Kühlen in der Praxis, Stuttgart. HfT Stuttgart: 2002 Juni 10-11, Band 56, Seite 17-36
- [12] Safarik M, Richter L., Otto M.: Entwicklung einer 30 kW H₂O/LiBr Absorptionskältemaschine für den Einsatz in der solaren Kühlung. Tagungsband 4. Symposium Solares Kühlen in der Praxis, Stuttgart. HfT Stuttgart: 2006 April 3-4, Band 74, Seite 143-149

- [13] Aubele R.: Erfahrungen mit einem Komplettpaket zum solaren Kühlen unter Einsatz einer 15 kW H₂O/LiBr Absorptionskälteanlage. Tagungsband 4. Symposium Solares Kühlen in der Praxis, Stuttgart. HfT Stuttgart: 2006 April 3-4, Band 74, Seite 115-122
- [14] Petersen S., Caporal S., Kühn A., Mittermaier M., Ziegler F.: Untersuchungsergebnisse einer 10 kW H₂O/LiBr Absorptionskälteanlage. Tagungsband 4. Symposium Solares Kühlen in der Praxis, Stuttgart. HfT Stuttgart: 2006 April 3-4, Band 74, Seite 115-122
- [15] Bales C., Bolin G., Nordlander S., Settenwall F.: Solar driven chemical heat pump with integral storage – the thermo-chemical accumulator. Proceedings of the 1st International Conference Solar Air-Conditioning, Bad Staffelstein. Regensburg: Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V. (OTTI), 2005 Oktober 6-7, Seite 63-67, ISBN 3-934681-41-7
- [16] Gorritxategi X., Usabiaga M., Egilegor B., Aldecoa-Otalora I.: Innovation in solar domestic air-conditioning. Proceedings of the 1st International Conference Solar Air-Conditioning, Bad Staffelstein. Regensburg: Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V. (OTTI), 2005 Oktober 6-7, Seite 75-79, ISBN 3-934681-41-7
- [17] Brendel T., Spindler K., Müller-Steinhagen H.: Entwicklung einer 10 kW Absorptionskälteanlage mit Ammoniak/Wasser. Tagungsband 4. Symposium Solares Kühlen in der Praxis, Stuttgart. HfT Stuttgart: 2006 April 3-4, Band 74, Seite 189-207
- [18] Jakob U., Eicker U.: Simulation and performance of diffusion absorption cooling machines for solar cooling. Proceedings of the 9th World Renewable Energy Congress, 2006 August 21-25; Florence. Reading: World Renewable Energy Network (WREN)
- [19] Lokurlu A.: Solare Kühlung auf der Basis der Parabolrinnenkollektoren kombiniert mit einer zweistufigen Absorptionskälteanlage. Tagungsband 4. Symposium Solares Kühlen in der Praxis, Stuttgart. HfT Stuttgart: 2006 April 3-4, Band 74, Seite 29-33
- [20] Paulußen S., Braunschweig N., Mittelbach W.: A novel compact adsorption chiller in the range of 10 kW cooling power. Proceedings of the 1st International Conference Solar Air-Conditioning, Bad Staffelstein. Regensburg: Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V. (OTTI), 2005 Oktober 6-7, Seite 34-38, ISBN 3-934681-41-7
- [21] Wiemken E., Henning H.-M.: Solar Assisted Cooling at the University Hospital Klinikum Freiburg. Proceedings of the 1st International Conference Solar Air-Conditioning, Bad Staffelstein. Regensburg: Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V. (OTTI), 2005 Oktober 6-7, Seite 178-182, ISBN 3-934681-41-7
- [22] Pietruschka D., Eicker U., Huber M., Schumacher J.: Experimental performance analysis and modelling of liquid desiccant cooling systems for air conditioning in residential buildings. International Journal of Refrigeration 2006, Vol. 29, Nr. 1, Seite 110-124
- [23] Hindenburg C.: Solare Kälte im Sommer. Sonne wind & Wärme 2006, Vol. 30, Nr. 8, Seite 52-55
- [24] Lävemann E., Hublitz A., Pelzer M.: Betriebsergebnisse einer solarunterstützten Flüssigsorptionsanlage in Singapur. Tagungsband 4. Symposium Solares Kühlen in der Praxis, Stuttgart. HfT Stuttgart: 2006 April 3-4, Band 74, Seite 53-58

- [25] Lowenstein A., Slayzak S., Kozubal E.: A zero carry over liquid desiccant air conditioner for solar applications. ASME/SOLAR06, 2006 July 8-13, Denver, USA, ISEC2006-99079
- [26] Schubert K., Dreyer J.: Kühlen mit Sonnenenergie. Dornier Post 1977, Nr. 1, Seite 9-11
- [27] Solarwärme sorgt für angenehme Kühlung. Sonnenenergie & Wärmetechnik 1993, Nr. 1, Seite 29
- [28] Holter C.: Erfolgreiches Contracting mit solarer Kühlung. Tagungsband 4. Symposium Solares Kühlen in der Praxis, Stuttgart. HfT Stuttgart: 2006 April 3-4, Band 74, Seite 21-28
- [29] Henning H.M.: Solare Klimatisierung – Stand der Entwicklung. erneuerbare energien 2005, Nr. 2, Seite 7-11
- [30] Pietruschka D., Eicker U., Schumacher J.: Simulation based design methods and economical analysis for solar driven absorption cooling systems. Proceedings of the Eurosun 2006, Glasgow. ISES-Europe, 27.-30. Juni 2006
- [31] Eicker U., Schürger U., Schumacher J.: Betriebserfahrungen und Potentiale sorptionsgestützter Klimaanlage mit Solarluftkollektoren: Optimierung des solaren Ertrags durch Simulation unterschiedlicher Regelungsstrategien. Tagungsband 16. Symposium Thermische Solarenergie, Bad Staffelstein. Regensburg: Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V. (OTTI), 2006 Mai 17-19, Seite 404-409, ISBN 3-934681-45-X