

Entwicklungstendenzen solarthermischer Kühlverfahren

Prof.Dr.Ursula Eicker

Fachhochschule Stuttgart-Hochschule für Technik, Fachbereich Bauphysik

Schellingstr.24, 70174 Stuttgart

Tel: 0711 1212831, Fax: 0711 121 2698, email: eicker.fbp@fht-stuttgart.de

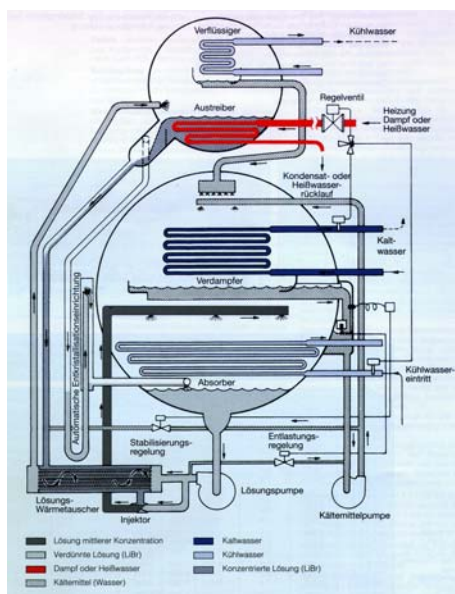
1 Einleitung

Thermisch angetriebene Kühlverfahren sind für eine effiziente Solarenergienutzung sehr gut geeignet, da Kühlbedarf und Solarenergieangebot mit nur geringen zeitlichen Phasenverschiebungen anfallen, somit Langzeitwärme- bzw. Kältespeicherung entfällt und potentiell kostengünstige Anlagen erstellt werden können.

Die wichtigsten Technologien für die solarthermische Kühlung sind Absorptionsverfahren mit den Stoffpaaren $H_2O/LiBr$ oder NH_3/H_2O , geschlossene Adsorptionskälte mit Feststoff- oder flüssigen Adsorbentien und offene sorptionsgestützte Klimaanlage mit kombinierter Luftentfeuchtung/Verdunstungskühlung.

Während Gas- oder dampfbefeuerte Absorptionskältemaschinen derzeit etwa 10% Marktanteil bei kommerziellen Installationen innehaben¹, sind solarthermisch betriebene Kälte- und Klimaanlage in noch überschaubarer Anzahl vertreten und verlieren nur langsam den Pilot- und Demonstrationsprojekt-Charakter.

Seit der ersten speziell für den Solarbetrieb Ende der 70er Jahre entwickelten Absorptionsmaschine „Arkla Solaire“ (Arkla Industries), die in einer Reihe von Demonstrationsprojekten eingesetzt wurde^{2,3}, wurden kostengünstigere und optimierte Wasser-Lithiumbromid Absorber gebaut (Yazaki), die mit Vakuumröhren- bzw. Flachkollektoren angetrieben werden.



Trotz zum Teil zehnjähriger Betriebserfahrung liegen kaum veröffentlichte Leistungskennzahlen vor, der Betrieb wird jedoch allgemein als zuverlässig und unproblematisch beurteilt. Die minimale Kälteleistung der gängigen Absorptionskältemaschinen liegt allerdings mit 35 kW recht hoch für die Koppelung mit einer solarthermischen Anlage, die bei Leistungszahlen zwischen 0.5 und 0.7 mindestens die doppelte Wärmenennleistung haben sollte. Aufgrund fehlender Absatzmärkte wurde eine 7kW Maschine von Yazaki wieder vom Markt genommen, obwohl bereits einige hundert Systeme insbesondere für Solaranwendungen verkauft waren.

Abbildung 1: Prinzipskizze Absorptionskälte



Abbildung 2: Absorptionskältemaschine Firma Yazaki

Eine Reihe von Forschungsprojekten befassen sich weiterhin mit der Entwicklung von Kältemaschinen kleinerer Leistung, die eine Alternative zu den elektrisch betriebenen Kompressions-Splitgeräten bieten könnten (Absorptionskälte, Sorptionsanlagen etc.).

Für Solaranwendungen vermehrt im Gespräch sind zweistufige Absorptionskältemaschinen auf Wasser-Lithiumbromidbasis, die den grossen Vorteil hoher Leistungszahlen (COP grösser 1.2) bieten. Die erforderlichen hohen Antriebstemperaturen von etwa 150°C können mit konzentrierenden Parabolrinnenkollektoren, eventuell auch mit guten Vakuumröhrenkollektoren bereitgestellt werden. Kostengünstige Parabolrinnenkollektoren auch kleinerer Abmessungen für den Gebäudebereich gekoppelt mit zweistufigen Absorbern können bei klimatischen Bedingungen mit hohem Direktstrahlanteil eine wirtschaftlich interessante Variante solarer Kühlverfahren darstellen.

Mit der geschlossenen Adsorptionskälte als einer weiteren Kühltechnologie, die für die Kaltwassererzeugung geeignet ist, wurden in den letzten Jahren umfangreiche Betriebserfahrungen in Deutschland gewonnen. Im Gegensatz zu den Absorptionskältemaschinen werden die Adsorber nur in Japan gebaut und auch hier sind kleine Kälteleistungen nicht auf dem Markt verfügbar.

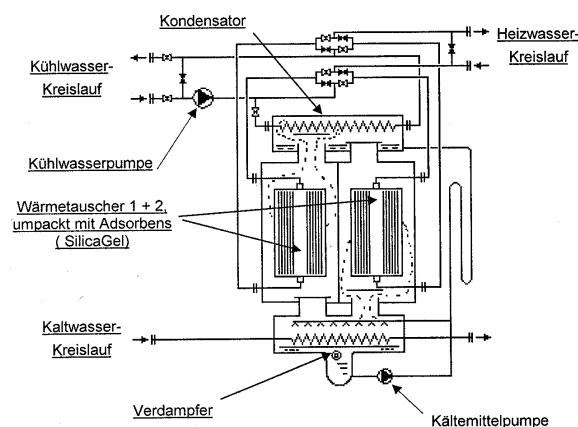


Abbildung 3: Geschlossene Adsorptionskältemaschine

Weitere Verbreitung hat die sorptionsgestützte Klimatisierung erfahren, die als offenes luftgeführtes System direkt mit Solarluftkollektoren als thermischem Antrieb betrieben werden kann und sich bei günstigen Projektrandbedingungen (hoher Frischluftbedarf) als kostengünstige Variante anbietet.

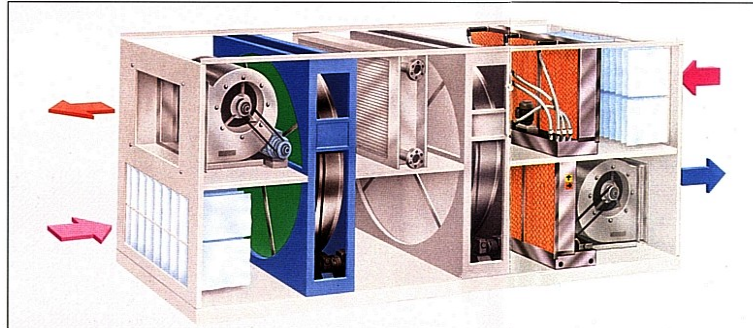


Abbildung 4: Prinzipskizze sorptionsgestützter Klimatisierung

Die Skalierbarkeit auf kleine Leistungen ist prinzipiell denkbar, sofern kostengünstige Lösungen für den sorptiven Entfeuchter gefunden werden können. Ein innovatives Konzept stellt die Flüssigsorption dar, die den Vorteil einer kontinuierlichen Entfeuchtung mit der Möglichkeit der Adsorptions-Wärmeabfuhr verbindet. Alle Anwendungen haben derzeit noch Pilotcharakter mit kleinen bis mittleren Kälteleistungen zwischen 20 und 110kW, insgesamt sind europaweit weniger als 20 solarbetriebene SGK-Anlagen in Betrieb.

Nahezu allen solaren Kühlprojekten gemeinsam sind Probleme mit der Regelungsstrategie, die aus dem ungewohnten Zusammenspiel von solarthermischer Anlage und Kältemaschine, jedoch auch aus dem Betrieb einer neuartigen Kälte-/Klimatechnik resultieren. Eine gut ausgearbeitete Funktionsbeschreibung, eine intensive Inbetriebnahme und Optimierungsphase, und eine möglichst kontinuierliche Anlagenüberwachung sind Voraussetzung für einen energetisch sinnvollen Anlagenbetrieb.

Im folgenden wird detaillierter auf die Entwicklungen in den verschiedenen Technologiebereichen eingegangen. Die physikalischen Grundlagen sind in vorangegangenen Veröffentlichungen nachzulesen^{4,5}.

2 Sorptionsgestützte Klimatisierung

2.1 Rotortechnologie

Rotoren in sorptionsgestützten Klimaanlage nehmen bei laminarer Durchströmung in engen Luftkanälen Feuchte aus der Aussenluft auf. Als Trägermaterial wird Zellulose mit kristallinem Lithiumchlorid als Adsorptionsmaterial oder ein Keramikfaservlies aus SiO_2 mit eingelagertem Silikagel verwendet. Bei Einbindung von Metallsilikat in die Rotorträgermasse werden höhere Entfeuchtungsleistungen und extrem geringe Restfeuchtegehalte (bis zu 0.01g/kg) erzielt⁶. Bei der neuen amerikanischen Entwicklung der Firma Hexcore wird Metallsilikat mit dem Spezialpolymer Nomex als Trägermaterial in einer Hexagonalstruktur eingesetzt.

Für die Beurteilung der Sorptionsrotoren sind die Entfeuchtungsleistung und die Betriebssicherheit / Wartung entscheidende Kriterien:

Das in kristalliner Form vorliegende Lithiumchlorid (LiCl) kann durch zu hohe Wasserdampfaufnahme in Lösung gehen und aus dem Trägermaterial austreten. Bei einer inhomogen verarbeiteten Zellulose-Speichermatrix können Schrumpfungen und Dehnungen zu Rissen führen, die das Verhalten beeinträchtigen. Die zulässigen Regenerationstemperaturen sind auf 70°C beschränkt.

Die Silikagel- und Metallsilikatrotoren stellen dagegen geringere Anforderungen an eine Maximaltemperaturbegrenzung, das Sorptionsmaterial ist dauerhaft fest mit dem Trägermaterial verbunden und der Polymerrotor zeichnet sich zusätzlich durch leichte Reinigungsmöglichkeit mit Wasser oder Lösungsmitteln aus.

Die Entfeuchtungsleistungen wurden unter verschiedenen Temperatur-, Feuchte- und Strömungsrandbedingungen am Teststand sorptionsgestützte Klimatisierung der Fachhochschule Stuttgart gemessen. Generell unterscheidet sich der Hexcore-Rotor durch deutlich höhere optimale Drehzahlen von den anderen marktverfügbaren Technologien. Die absoluten Werte der Entfeuchtungsleistung bei gleichen Regenerationstemperaturen sind jedoch vergleichbar mit dem LiCl-Rotor.



Tabelle 1: Untersuchte Sorptionsrotoren am Teststand Solares Kühlen der HfT Stuttgart

Hersteller Rotortyp	Klingenburg SECO 1000	Munters MCC-1-870-Si	Engelhard HexCore, LP DES-H-Hexcore- DC15/N
<i>Trägermaterial</i>	Zellulose	Keramikfaservlies	Hexcore Nomex™
<i>Adsorptionsmaterial</i>	Lithiumchlorid	Silikagel	Hexcore ETS™ (Titansilikat)
<i>Matrixstruktur</i>	Konzentrische und dazwischen liegende wellen- förmige Schichten	Konzentrische und dazwischen liegende wellen- förmige Schichten	Hexagonalstruktur
<i>Rotortiefe [mm]</i>	250	200	140
<i>Rotordurchmesser [mm]</i>	895	850	870
<i>Maximale Regeneration- temperatur [°C]</i>	70	95	120

Die Entfeuchtungsleistungen bei gleicher Regenerationslufttemperatur sind bei den verglichenen Sorptionsrotoren nicht wesentlich verschieden. Die optimalen Entfeuchtungsleistungen werden jedoch bei verschiedenen Rotationsgeschwindigkeiten des Sorptionsrades erzielt.

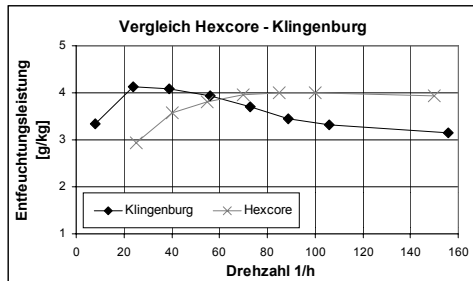


Abbildung 5: Entfeuchtungsleistung als Funktion der Drehzahl bei konstanter Regenerationslufttemperatur von 60°C für den Klingenburg LiCl und Hexcore Metallsilikatorotor.

Der Volumenstrom der Regenerationsluft kann ohne Reduzierung bzw. sogar mit Verbesserung der Entfeuchtungsleistung auf 75% der Prozessluft abgesenkt werden. Weitere Reduzierungen des Regenerationsluftvolumenstroms verringern deutlich die Entfeuchtungsleistung.

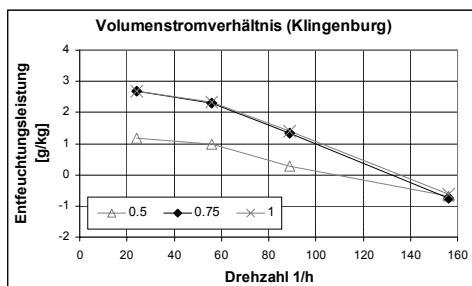


Abbildung 6: Entfeuchtungsleistung des LiCl Rotors als Funktion der Drehzahl für verschiedene Volumenstromverhältnisse Regenerationsluft zu Prozessluft bei 60°C Regenerationslufttemperatur.

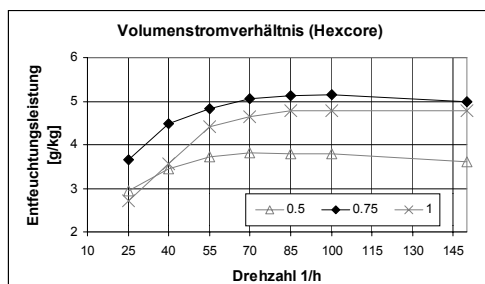


Abbildung 7: Entfeuchtungsleistung des Titansilikat Rotors für verschiedene Volumenstromverhältnisse.

Bei vernachlässigbarer Adsorptionsenthalpie ist der Adsorptionsprozess im günstigsten Fall isenthalp, sofern keine Schleppwärmeübertragung stattfindet. Bei hohen Regenerationstemperaturen ist jedoch auch bei den Titansilikat Rotoren eine Enthalpiezunahme bei der Entfeuchtung festzustellen (90°C Regenerationstemperatur), bei den LiCl Rotoren bereits bei geringeren Regenerationstemperaturen.

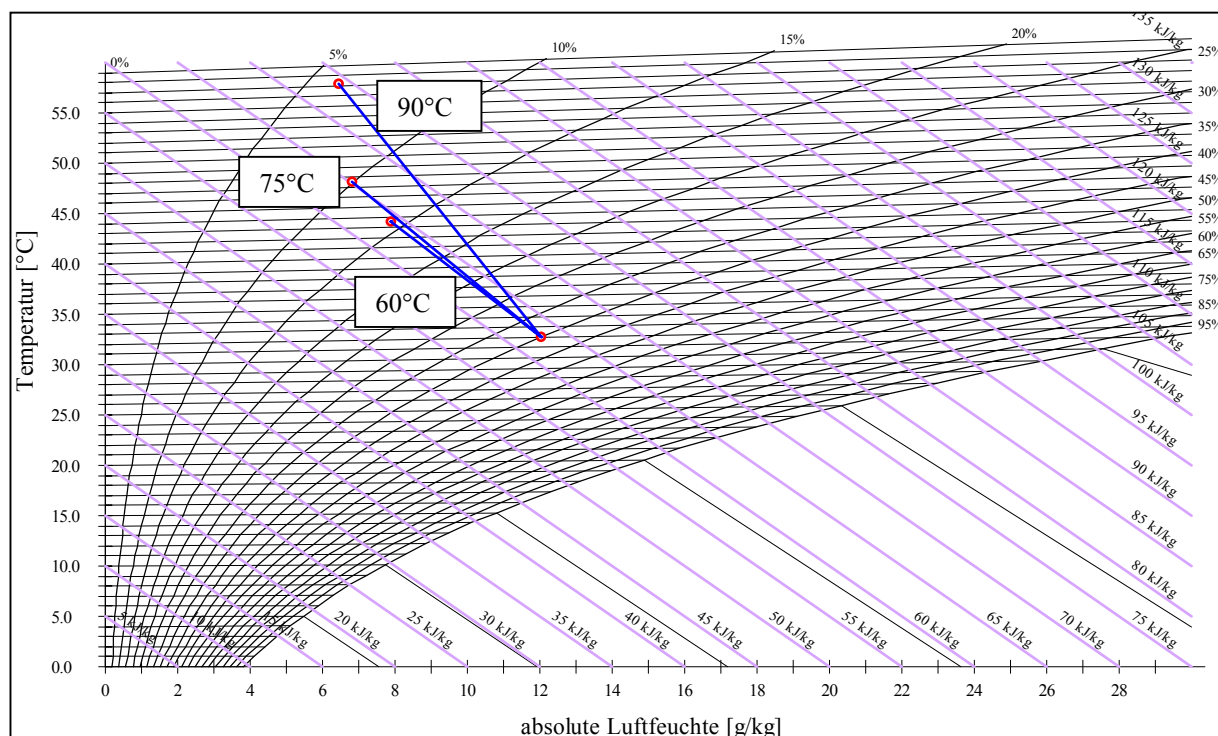


Abbildung 8: Zustandsänderungen des Titansilikat Rotors während des Entfeuchtungsprozesses.

Aussenluft: 32°C/40%, Regenerationsluft = 60°C/75°C/90°C, Volumenstrom Prozessluft 2000m³/h, Volumstromverhältnis: 0.75, Drehzahl: 85 h⁻¹.

2.2 Betriebserfahrungen und Anlagenkonzepte

Die Betriebserfahrungen mit sorptionsgestützten Klimaanlage haben die Relevanz der Regelungsstrategie bezüglich des energetischen Verhaltens, jedoch auch der Komponentenlebensdauer aufgezeigt. Zunehmend gehen Hersteller dazu über, keine Einzelkomponenten, sondern integrierte Systeme mit Regelungstechnik zu vertreiben.

Der Sorptionsrotorstillstand bei gleichzeitiger Durchströmung sollte wegen der möglichen Anlagerung von Verunreinigungen oder Geruchsstoffen vermieden werden, so dass sich eine minimale Drehzahl zur Selbstreinigung empfiehlt. Durch die Verwendung von Aussenluft für die Regenerationsluft bei offener Ablufführung werden weiterhin Geruchsübertragungen von belasteter Abluft sicher vermieden.

Bei den Anlagenkonzepten haben sich Systeme mit rein solarthermischer Regenerationsluftherhitzung ohne Zusatzheizung gut bewährt, sofern keine strengen Anforderungen an die Raumlufttemperatur bestehen (SGK-Anlagen in Althengstett und Freiburg). Insbesondere der Wunsch des Betreibers nach rein solarem Betrieb im Sommer lässt zeitweilige Raumtemperaturüberschreitungen zu (kein Verständnis, dass im Sommer die Heizungsanlage anspringt!).



Abbildung 9: 100 m² solare Luftkollektoranlage zur Regeneration in der Produktionshalle Althengstett.

Die Verwendung von Warmluft aus einer hinterlüfteten Photovoltaikanlage in einem Bibliotheksgebäude in Mataró ist ein innovatives Konzept zur solarthermischen Kühlung. Erste Betriebserfahrungen werden im Sommer 2002 erwartet.



Abbildung 10: Elementkonstruktion einer 6.5m hinterlüfteten Photovoltaikfassade (Luftspalt 0.14m Bautiefe) als Regenerationslufferhitzer.

Als neue Komponente spart die integrierte Abluftbefeuchtung im Plattentauscher Kosten und Platz und verbessert die Wärmeübertragungseigenschaften des Tauschers. Der Zuluftbefeuchter kann unter geeigneten klimatischen Bedingungen durch einen Kühlturm ersetzt werden, welcher jedoch nur eine Temperaturabsenkung von etwa 3K über Feuchtkugeltemperatur zusätzlich der Temperaturdifferenz des Wärmetauschers erreichen kann. Ein solcher Ersatz des Zuluftbefeuchters ist insofern nur in gemäßigten Klimatas möglich. Bei einer Nachkühlung durch eine konventionelle Kältemaschine ist energetisch günstig die Sorptionsanlage für die Entfeuchtung, der Kühl

mentsystem übertragen, um besseren Zugriff auf das Anlagenverhalten zu ermöglichen. Werden im Teillastbereich höhere Zykluszeit von 10-12 Minuten pro Zyklus gewählt, kann die Leistungszahl bei geringerer Kälteleistung deutlich erhöht werden.

Zur weiteren Reduzierung der Antriebstemperaturen für die Desorption implementiert die japanische Firma Mayekawa eine mechanische Booster-Pumpe zwischen Desorber und Kondensator. Durch die mechanische Druckabsenkung im Desorber kann bereits bei geringeren Temperaturen von etwa 55°C desorbiert werden. Für 30kW Kälteleistung werden zusätzlich etwa 3-4kW elektrische Leistung benötigt, so dass sich eine elektrische Leistungszahl $COP_{\text{elektrisch}}$ von 10 ergibt.

Weiterhin ist eine 4-Kammer Maschine für die Adsorptions-/Desorptionszyklen in der Entwicklung: die 19kW Anlage erreicht eine Leistungszahl von 0.6 bei 14°C/9°C Kaltwassertemperaturen und einer Zykluszeit von 15 Minuten.

Eine neue Großanlage mit 250kW Kälteleistung und 2000m² Kollektorfläche ist beim Landesamt für Umweltschutz in Augsburg in Betrieb gegangen. Von den geplanten 60% Gesamtdeckungsgrad für Heizung und Kühlung wurden bisher 42% für die Kühlung erreicht, entsprechend 148 MWh Solarenergieeintrag von 352 MWh Gesamtkühlbedarf im Jahr 2001.

Für die Desorption sind Kollektortemperaturen von 65-70°C ausreichend, da höhere Temperaturen die Kälteleistung nicht verbessern, jedoch den Kollektorwirkungsgrad reduzieren.

4 Absorptionskälte

Die für solarthermische Anwendungen besonders interessanten Maschinen kleiner und mittlerer Kälteleistung sind derzeit in der Entwicklung und noch nicht am Markt verfügbar:

Im Rahmen eines EU-Forschungsvorhabens wurde am ZAE Bayern eine LiBr-Wasser Anlage mit 10kW Kälteleistung entwickelt, die Leistungszahlen bei Kühldeckenanwendung von 0.7 erreicht (Abmessungen 80cmx80cmx180cm). Im Gegensatz zu der Gasblasenpumpe des japanischen Herstellers Yazaki werden hier mechanische Pumpen eingesetzt. Ein erstes Jahr Betriebserfahrung der Anlage in Frankreich liegt vor mit vielversprechendem Ergebnis.

An der Fachhochschule Stuttgart wurde ebenfalls im Rahmen eines EU-Forschungsvorhabens eine Diffusions-Absorptionskältemaschine im kleinen Leistungsbereich von 2.5kW entwickelt. Derzeit bestehen noch technische Probleme mit dem thermosyphonisch angetriebenen Hilfgasumlauf, die in weiteren Prototypen mit geringeren Druckverlusten reduziert werden müssen. Durch ungenügende Hilfgaszirkulation sinkt die Kälteleistung durch Sättigung mit Kältemitteldampf langsam ab und reduziert die Leistungszahl.

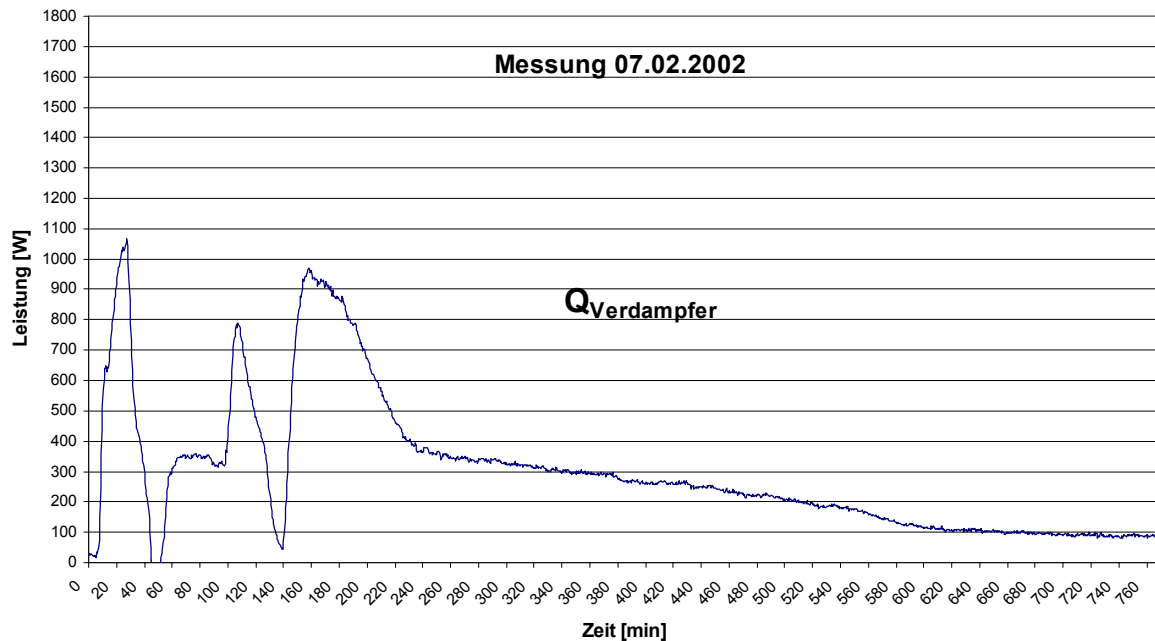


Abbildung 13: Zeitlicher Verlauf der Kälteleistung einer Diffusions-Absorptionskältemaschine (DAKM)

Aus Österreich sind Entwicklungen im Kühlschrankbereich (400W) auf Diffusions-Absorptionstechnik bekannt, die bei äussert geringen Antriebstemperaturen von 80°C Leistungszahlen von 0.7 angeben⁸.

Die mit Abstand umfangreichsten Betriebserfahrungen solarer Kühlung liegen mit den Wasser/Lithiumbromid Absorptionskältemaschinen der Firma Yazaki vor. Seit 1992 wird in Südfrankreich (Banyuls) ein Weinkeller mit einer 50kW Maschine und 130m² Vakuumröhrenkollektoren bei nur 1m³ Speichergröße betrieben, geplant und betreut von der Firma Tecsol SA. Zur Erhöhung der Anlagenlebensdauer sind niedrige heizseitige Antriebstemperaturen zu vermeiden, so dass die Kollektoranlage erst bei 80°C auf die Kältemaschine geschaltet und bei 75°C wieder weggeschaltet wird. Die Betriebserfahrungen werden als sehr positiv angegeben.

In Frankreich und Spanien sind eine Reihe weiterer Absorptionskältemaschinen kürzlich in Betrieb gegangen, jedoch liegen noch keine Betriebsdaten vor (Perpigan: 35kW Kältemaschine, 70m² Vakuumröhren, CSTB Valbonne: 35kW Kältemaschine, 60m² Kollektoren, Viessmann Fertigung Madrid: 105kW Kältemaschine, 105m² Kollektoren)

Die indirekt beheizte 35kW Yazaki Maschine WFC 10 ist von den Investitionskosten von 26700 Euro entsprechend 763 €/kW vergleichbar mit den gasbefeuerten Maschinen von Robur, die bei vergleichbarer Leistung (zwei 17.5kW Anlagen) Investitionskosten von 718€/kW verursachen.

Interessant sind die zweistufigen Absorptionskältemaschinen auf Wasser/LiBr Basis, die in großen Stückzahlen von der chinesischen Firma Broad hergestellt werden. Bei Vollast werden Leistungszahlen von 1.3 angegeben, bei 60% Teillast sogar 1.5. Die

Leistungszahlen werden bei Generatortemperaturen von 144°C und 4bar Druck, Kaltwassertemperaturen von 6.7°C/12.2°C und Kühlwassertemperaturen von 35.4°C/29.4°C erzielt. Die ersten Projekte werden derzeit in der Südtürkei zusammen mit DLR Köln realisiert. Die hierfür erforderlichen Hochtemperatur-Kollektoren werden nur von wenigen Herstellern produziert. In den USA ist die Firma Industrial Solar Technologies der einzige Parabolrinnen-Kollektorhersteller. Prototypkollektoren werden von der Firma Solitem in Aachen entwickelt, Knopf Design aus Wien produziert kompakte Parabolrinnenkollektoren von 0.5m x 4m für Gebäudeanwendungen. Typische Temperaturniveaus liegen bei 100-150°C, erreichbar sind 400-500°C und 50bar.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Für die wichtigsten solarthermischen Kühlverfahren liegen aus einzelnen Projekten detaillierte Betriebserfahrungen vor. Insbesondere im kleinen und mittleren Kältebereich bis 35kW Kälteleistungen sind bisher nur Prototypverfahren vorhanden, auf dem Markt sind jedoch keine Maschinen verfügbar. Einstufige LiBr-Wasser Absorptionskältemaschinen mit 35kW oder mehr Leistung weisen einen zuverlässigen Betrieb auf und können mit leistungsfähigen Vakuumröhrenkollektoren effizient betrieben werden. Aufgrund hoher Leistungszahlen werden zunehmend zweistufige Absorptionskältemaschinen für Solaranwendungen mit Temperaturen bis 150°C interessant, Betriebserfahrungen liegen jedoch noch nicht vor.

Geschlossene Adsorptionskältemaschinen auf Wasser-Silikagelbasis sind ebenfalls zuverlässig im Betrieb. Eine optimierte Regelung mit verlängerten Zykluszeiten im Teillastbereich führt hier zu höheren Leistungszahlen.

Bei den offenen sorptionsgestützten Klimaanlageanlagen können Luftkollektoren systemtechnisch einfach eingebunden werden. Auch hier ist die regelungstechnische Optimierung und Betriebsüberwachung wichtig für eine optimale Solarenergienutzung. Bei einigen Pilotprojekten ist die erste sommerliche Betriebsphase für die Einregulierung notwendig, so dass kontinuierliche Energiedaten erst in weiteren Jahren erfasst werden können.

¹ Faseyitan, S.O. "Absorption cooling: an overview of the technology", Journal of Engineering Technology, Fall 1998

² Best, R. Ortega, N. "Solar refrigeration and cooling", Renewable Energy 16, 1999

³ Grossmann, G. "Solar powered systems for cooling, dehumidification and air conditioning" Solar Energy Vol 72, No.1, 2002

⁴ Eicker, U. „Solare Technologien für Gebäude“, Teubner Verlag 2001

⁵ FH Stuttgart, Tagungsband „Erstes Symposium Solares Kühlen in der Praxis 2001“, erhältlich FH Stuttgart, Sekretariat Bauphysik, Schellingstr.24, 70174 Stuttgart

⁶ Hagenbruch, D., Firma Alko-Therm GmbH „Unterlagen zur sorptionsgestützten Klimatisierung“ 2002

⁷ Produktunterlagen Paul Wurth GmbH Luxemburg, <http://www.paulwurth.com>

⁸ Kunze, G. "A Breakthrough in solar refrigeration technology", Group of Appropriate Technology at the University of Technology Vienna, <http://members.aon.at/solarfrost>