

Mit der
Sonne
zu mehr
Raum-
komfort

IEA-SHC TASK 25



Solar Assisted
Air Conditioning
of Buildings

Inhalt

Impressum

Österreichisches Forschungs- und
Prüfzentrum Arsenal Ges.m.b.H.
Geschäftsfeld Nachhaltige
Energiesysteme
Giefinggasse 2
A-1210 Wien, Austria

Telefon: 0043/1/50 550-6353
Internet: www.arsenal.ac.at


arsenal research
Ein Unternehmen der Austrian Research Centers

 **ENERGIE**
SYSTEME
der Zukunft

IEA-SHC TASK 25

Einleitung	3
1. Marktinformation zu Kälte- und Klimatechnik.....	3
2. Energie und Umwelt.....	3
3. Raumkomfort im Gebäude.....	5
Überblick der verfügbaren solar unterstützten Verfahren zur Klimatisierung	6
1. Geschlossene Verfahren (Kaltwassererzeugung).....	6
2. Offene Verfahren (sorptionsgestützte Verfahren).....	8
Ausgeführte Anlagen und Erfahrungen (ausgewählte Beispiele)	10
1. Absorptionskältemaschine.....	10
Anlage mit Absorptionskältemaschine: Bürogebäude in Guadeloupe.....	12
2. Adsorptionskältemaschine.....	14
Anlage mit Adsorptionskältemaschine: Universitätsklinikum Freiburg.....	15
3. Offene Verfahren mit Sorptionsrotoren.....	17
Anlage mit Sorptionsrotor: Pompeu Fabra Library in Matarò	18
4. Verfahren mit flüssigen Sorptionsmitteln.....	19
Planung, Kosten, Integration	20
1. Energiebilanz, Primärenergieeinsparung.....	20
2. Wichtigste Planungsrichtlinien, Integration in TGA.....	21
3. Planungshilfen: Task 25 Design Tool.....	22
4. Wirtschaftlichkeit.....	23
Perspektiven	25
Weitere internationale Forschungsaktivitäten.....	25
Literatur	26

E inleitung

1. Marktinformation zu Kälte- und Klimatechnik

Ein beachtliches Marktwachstum im Bereich der Gebäudeklimatisierung ist weltweit beobachtbar. Abbildung 1 zeigt die Verkaufszahlen von Raumklimatisierungsgeräten (RAC-Geräte) unterschiedlicher Regionen der Welt. Die Zahl verkaufter Geräte stieg weltweit von etwa 26 Millionen Stück im Jahre 1998 auf über 40 Millionen Stück im Jahr 2006 (Prognose) an. Im gleichen Zeitraum blieben die Verkaufszahlen großer zentraler Klimaanlage beinahe unverändert.

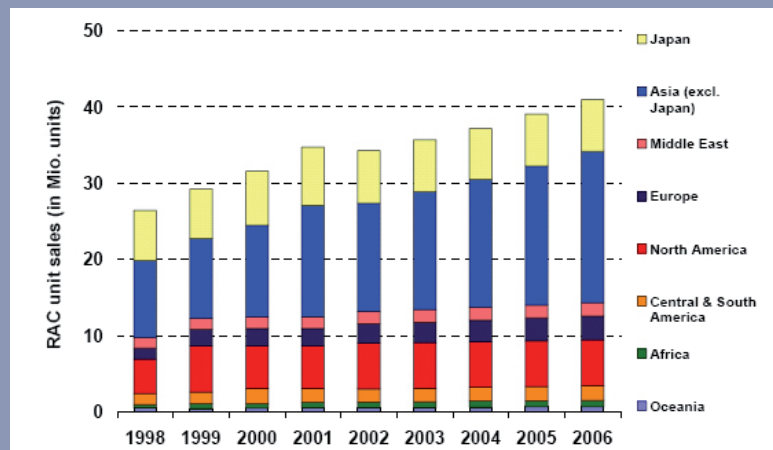
Welche dieser unterschiedlichen Technologien zur Gebäudeklimatisierung zum Einsatz kommt – kleine RAC Splitgeräte, Multi-Splitsysteme, Systeme mit zentraler Kaltwassererzeugung oder Zentralklimaanlagen - hängt im Wesentlichen von lokalen Klimaverhältnissen, vom Kühllastprofil, vom Gebäude und von den speziellen Kundenwünschen ab. ■

2. Energie und Umwelt

Die elektrisch angetriebenen Kälte- bzw. Klimageräte dominieren eindeutig den Markt für Raumklimatisierung. Folglich entstehen bei ihrer Anwendung beachtliche zusätzliche Stromverbräuche und Betriebskosten zur Gewährleistung von Raumkomfort. Derzeit wird zunehmend das Thema der sommerlichen Spitzenlasten im öffentlichen Stromnetz, die durch die Gebäudeklimatisierung verursacht werden, in die öffentliche Diskussion einbezogen. In Regionen mit signifikant hohem Kühlbedarf kann dies sogar die Sicherheit der

Abbildung 1: Verkaufszahlen von Raumklimageräten (RAC-Geräte) unterschiedlicher Regionen der Welt. (Quelle: F. Butera: The use of environmental energies for sustainable building in mediterranean climates; Intelligent Building Middle East, Bahrain, December 2005)

IEA-SHC TASK 25



Einleitung

elektrischen Energieversorgung gefährden. In jüngster Vergangenheit stieg die Zahl der auftretenden Engpässe der öffentlichen Stromversorgung aufgrund der sommerlichen Nutzung von elektrisch betriebenen Klimageräten. Dazu illustriert Abbildung 2 die jährlich neu installierte elektrische Leistung, die sich aufgrund der Verwendung von RAC-Geräten im Jahr ergibt (Annahme 10% Altgeräte werden durch neue ersetzt und haben durchschnittlich eine elektrische nominelle Leistung von 1.2 kW). Dies unterstreicht deutlich die Notwendigkeit, neue technische Lösungen bei geringerem Stromverbrauch auf den Weg zu bringen. Insbesondere sind effektive Konzepte zur Verminderung der elektrischen Spitzenlast im öffentlichen Netz von hohem Interesse. Thermisch angetriebene Kälte- bzw. Klimatisierungsverfahren sind hier attraktive Alternativtechnologien.

Ein zusätzlicher umweltrelevanter Aspekt betrifft das Potenzial globaler Erwärmung aufgrund der eingesetzten Kältemittel. Nicht vernachlässigbare Leckagen von Kältemittel zur Klimatisierung – insbesondere im Sektor Automotive – führten zu einzelnen Gesetzesinitiativen, die eine Limitierung oder sogar ein Verbot klassischer fluorierte Kältemittel zum Ziel haben. Thermisch angetriebene Kälte- und Klimatisierungsverfahren verwenden Kältemittel gänzlich ohne Potenzial zur Globalerwärmung.

Folglich reagiert der Klimamarkt und jüngst lässt sich ein wachsendes Interesse an thermisch angetriebenen Kühl- und Klimatisierungsverfahren beobachten. Große Marktanteile, insbesondere in den USA und Japan, erreichen direkt mit Gas befeuerte Absorptionskältemaschinen. Diese nutzen freie Kapazitäten des Gasnetzes im Sommer und reduzieren so die Spitzenlasten des Stromnetzes. Mit dem hohen Temperaturniveau der Gasfeuerung sind Kälteleistungen bis zum 1,2 fachen der eingesetzten Wärmeleistung erreichbar. Betreiber von Fernwärmenetzen suchen nach Möglichkeiten ihre Heizwerkkapazitäten ganzjährig durch den Antrieb von thermischen Kühlprozessen besser zu nutzen. ■

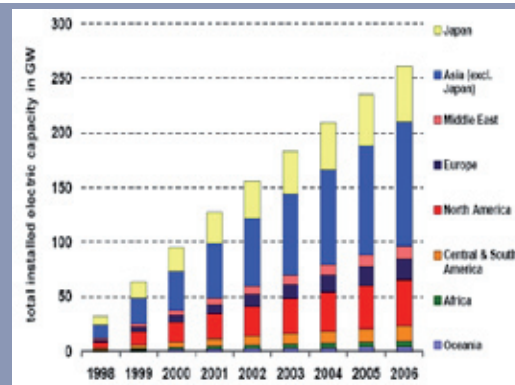


Abbildung 2: Neu installierte elektrische Leistung aufgrund Verwendung von RAC-Geräten (Quelle: F. Butera: The use of environmental energies for sustainable building in mediterranean climates; Intelligent Building Middle East, Bahrain, December 2005)

3. Raumkomfort im Gebäude

Das Wohlbefinden und die Leistungsfähigkeit von Menschen hängen entscheidend von raumklimatischen Bedingungen ab. Neben sauberer und frischer Luft sind Temperatur und Feuchte der Raumluft wichtige Parameter. Aufgabe der Klimatechnik ist deshalb nicht nur die Begrenzung der Raumtemperatur sondern auch die Kontrolle der Raumluftfeuchte. In einigen humiden Regionen der Erde ist die Luftentfeuchtung eine zentrale Aufgabe klimatechnischer Anlagen.

Unter mitteleuropäischen Klimabedingungen sollten neue Gebäude mit der Idee der »schlanken Architektur« geplant und realisiert werden. Das heißt im Zuge einer energetisch intelligenten Architektur kann weitestgehend auf den Einsatz aktiver Kühlsysteme verzichtet werden, indem passive Kühltechniken und Effizienzmaßnahmen zur Vermeidung von hohen Kühllasten als oberste Prämisse im Planungsprozess berücksichtigt werden. Im Gegensatz dazu ist bei vielen bestehenden Gebäuden oder Gebäudezonen der Bedarf aktiv zu kühlen hoch, um akzeptable Raumkomfortbedingungen zu gewährleisten. Einerseits trifft dies für Gebäude oder Räume mit unvermeidbar hohen internen Wärmelasten (Versammlungsbereiche, Büroräume mit reichlich elektronischen Geräten) zu und andererseits bewirkt dies eine Architektur mit hohen transparenten Glas-Anteilen (Atrien, moderne Bürohäuser etc.) in der Gebäudehülle.

Für den Einsatz aktiver Kühlsysteme stehen neben dem klassischen Kompressionskälteprozess einige unterschiedliche thermische Kälte- bzw. Klimatisierungsverfahren am Markt zur Verfügung. Im Wesentlichen werden diese Verfahren mit Wärme auf niedrigem Temperaturniveau ($< 90\text{ °C}$) – das heißt die Verwendung von Fernwärme, Prozessabwärme und solarer Wärme ist prinzipiell möglich – zur Erzeugung von Kühlenergie angetrieben. Es existieren sowohl geschlossene Verfahren (Ad- und Absorptionskältemaschinen) als auch offene Klimatisierungsverfahren (sorptionsgestützte Klimatisierung- SGK).

Seit 1990 wurden im Rahmen von nationalen und internationalen Forschungsanstrengungen vermehrt Demonstrationsanlagen zur solaren Gebäudekühlung bzw. -klimatisierung realisiert. Die technische Machbarkeit solcher thermisch angetriebene Kühl- und Klimatisierungssysteme insbesondere unter Verwendung von Sonnenenergie als Antriebswärme – wurde nachgewiesen. Dies gilt für zentrale Anlagen zur solaren Gebäudekühlung bzw. -klimatisierung, kleine dezentrale solare Kühl- bzw. Klimatisierungsanlagen mit Kühlleistungen kleiner 20 kW sind bisher nicht am Markt verfügbar oder in Betrieb. ■



Abbildung 3: Derzeit größte Anlage zur solaren Kühlung, Griechenland (Anlagenbetreiber: SARANTIS S.A.): 2500 m² Kollektorfläche, 2x350 kW Adsorptionskältemaschine (Quelle: SOLE S.A. - Konstruktion und Installation)



Überblick der verfügbaren solar unterstützten Verfahren zur Klimatisierung

Thermisch angetriebene Anlagen zur Raumklimatisierung können grundsätzlich nach zwei Verfahren unterteilt werden. In geschlossenen Verfahren wird Kaltwasser bereitgestellt, während im offenen Verfahren direkt Luft konditioniert wird, das bedeutet eine gleichzeitige Kontrolle von Temperatur und Feuchte.

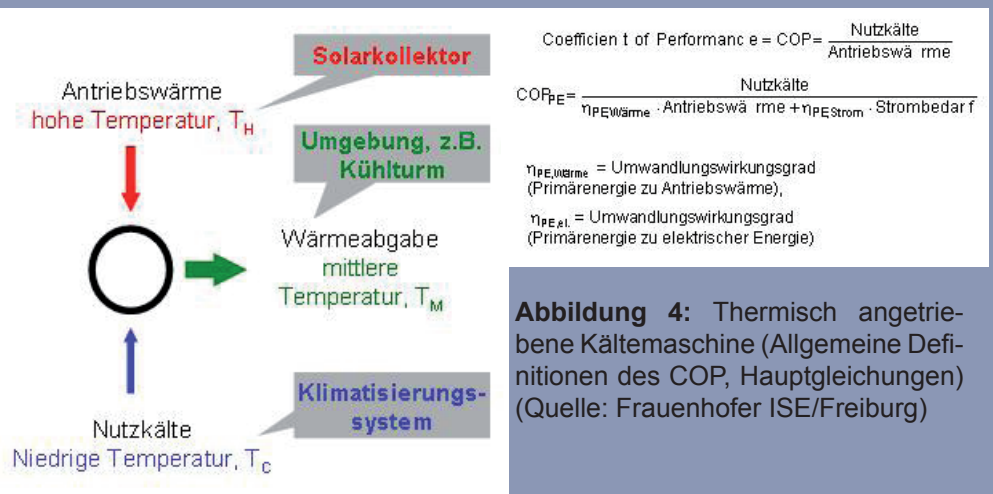
IEA-SHC TASK 25

1. Geschlossene Verfahren (Kaltwassererzeugung)

Bei geschlossenen Verfahren erzeugen Ab- oder Adsorptionskältemaschinen Kaltwasser, das in unterschiedlicher Weise für die Raumklimatisierung eingesetzt werden kann. Dabei hängt die bereitzustellende Kaltwassertemperatur entscheidend davon ab, ob eine Luftentfeuchtung (latente Lasten) erreicht werden soll oder ob eine reine Temperaturkontrolle (Abfuhr sensibler Lasten) ausreichend ist.

In Umluftgeräten – wie beispielsweise die klassischen Fan-coils - wird die Luftentfeuchtung durch Taupunktunterschreitung ermöglicht. Um eine ausreichende Luftentfeuchtung zu realisieren, sind Kaltwassertemperaturen im Bereich von 6 bis 9°C erforderlich. Wird die Kältemaschine rein zur Abfuhr von sensiblen Lasten eingesetzt, so reichen höhere Kaltwassertemperaturen im Bereich von 15 bis 20°C aus. Beispiele für entsprechende raumseitige Komponenten sind Flächenkühlsysteme wie Kühldecken, Fußbodenkühlung, Wandflächen mit integrierten Kapillarrohrmatten, die Betonkernkühlung oder andere Systeme der stillen Kühlung wie beispielsweise Umluftkühler, die mit natürlicher Luftzirkulation arbeiten.

Jede thermisch angetriebene Kältemaschine ist durch drei Temperaturniveaus charakterisiert (siehe Abbildung 4). Auf hohem Temperaturniveau wird die Antriebswärme bereitgestellt, auf niedrigem Temperaturniveau die Nutzkälte und auf einem mittleren Temperaturniveau findet die Rückkühlung statt. Für diese Wärmeabfuhr werden in den meisten Fällen Kühltürme verwendet.



Eine Schlüsselgröße zur Beschreibung der Effizienz von thermisch angetriebenen Kältemaschinen ist der thermische COP (engl. Coefficient of Performance). Er ist definiert als Verhältnis von Kälteleistung zu benötigter Antriebswärmeleistung (siehe Abbildung 4).

Je kleiner der COP, desto mehr Antriebswärme muss dem Kälteverfahren bereitgestellt werden, um die gleiche Kühlenergie zu erzeugen. Dementsprechend wird hierbei auch pro erzeugte Kälte mehr Wärme an die Umgebung abgeführt und dementsprechend steigt der spezifische elektrische Aufwand im System (Pumpenbetrieb im Kühlwasserkreis, Ventilatorleistung im Kühlturm).

Ein Vergleich der unterschiedlichen Verfahren bei einer ganzheitlichen energetischen Effizienzbetrachtung muss auch die elektrischen Hilfsenergien (MSR, Pumpen, Ventilatoren etc.) berücksichtigen. Die wichtigsten Eigenschaften der Verfahren zur Kaltwassererzeugung werden in Tabelle 1 aufgelistet und gegenübergestellt. Eine detaillierte Beschreibung erfolgt anhand von Anlagenbeispielen. ■

Tabelle 1: Übersicht zu den wichtigsten Verfahren zur Kaltwassererzeugung mittels Absorptions- und Adsorptionskältemaschine für die Gebäudeklimatisierung (Temperaturen, COP, Marktverfügbarkeit, Leistungsbereich, Hersteller: ohne Gewähr auf Vollständigkeit) (Quelle: Fraunhofer ISE/Freiburg)

Verfahren	Absorptionskältemaschine			Adsorptionskältemaschine
	1-stufig	2-stufig	1-stufig	
Anzahl Stufen	1-stufig	2-stufig	1-stufig	1-stufig
Sorptionsmittel	Lithiumbromid		Wasser	Silikagel
Arbeitsstoff	Wasser		Ammoniak	Wasser
Antriebstemperatur	75 °C - 100 °C	140 °C - 160 °C	80 °C - 120 °C	60 °C - 95 °C
Antrieb durch	Heißwasser (evtl. Dampf, einige auch mit Direktbefeuerung)	Heißwasser, Dampf, Direktbefeuerung	Heißwasser, Dampf, Direktbefeuerung	Heißwasser
COP	0,6 - 0,8	0,9 - 1,2	0,3 - 0,7	0,4 - 0,7
Leistungsbereich, marktverfügbar	wenige Hersteller > 20 kW (Heißwasser), viele Hersteller > 100 kW	wenige Hersteller > 50 kW, mehrere Hersteller > 100 kW	kleine Anlagen nur direkt befeuert, große Anlagen kundenspezifisch	50 - 350 kW (Mayekawa), 250 - 500 kW (Nishyodo)
Hersteller	York, Yazaki, EAW, Trane, Carrier, Broad, Ebara, LG Machinery, Sanyo-McQuay, Sulzer-Escher Wyss, Entropie, Century		Direkt befeuert: Robur, Colibri, AWT, Mattes; Heißwasser, Dampf: ABB, Colibri, Mattes	Mayekawa, Nishyodo

Überblick der verfügbaren solar unterstützten Verfahren zur Klimatisierung



Abbildung 5a: Prüfstand zur solaren Klimatisierung (Quelle: Fraunhofer ISE/Freiburg)

2. Offene Verfahren (sorptionsgestützte Verfahren)

Offene Verfahren basieren generell auf einer Kombination aus sorptiver Luftentfeuchtung und Verdunstungskühlung. Sie werden im deutschsprachigen Raum als sorptionsgestützte Klimatisierung (SGK) und im Englischen als ‚Desiccant Cooling (DC)‘ oder ‚Desiccant and Evaporative Cooling (DEC)‘ bezeichnet. Das Kältemittel – Wasser – ist dabei in direktem Kontakt mit der Atmosphäre – deshalb wird das Verfahren als ‚offenes Verfahren‘ charakterisiert.

Da bei Anlagen dieser Art meistens Luft behandelt wird, handelt es sich generell um Lüftungsanlagen. Eine Lüftungsanlage hat primär die Aufgabe, einen Raum mit gefilterter Frischluft zu versorgen. Die Technologie der Sorptionsgestützten Klimatisierung ermöglicht es, mit Hilfe von thermischer Antriebsenergie, diese Frischluft zu konditionieren, das heißt ihre Temperatur und Feuchte in einem komfortablen Bereich zu halten. Dies macht es schwierig das offene mit dem geschlossenen Verfahren direkt zu vergleichen.

Ob eine solche Lüftungsanlage ausreichend Kühlleistung liefert, um als alleinige Komponente unter allen Bedingungen den erwünschten Raumkomfort zu garantieren, hängt einerseits von den auftretenden Kühllasten und andererseits vom möglichen Volumenstrom der Anlage ab. Generell gilt, dass aus energetischer Sicht eine Begrenzung des Volumenstroms der Lüftungsanlage auf die hygienischen Erfordernisse, also den hygienischen Luftwechsel, sinnvoll ist.

Mit dem hygienischen Luftwechsel sollten alle Feuchtelasten abgeführt werden können. Darüber hinaus gehende sensible Kühllasten können mit zusätzlichen raumseitigen Komponenten - wie Flächenkühlsystemen – abgeführt werden. In der praktischen Umsetzung scheitert eine solche Lösung allerdings häufig – insbesondere bei kleinen Anlagen – an den höheren Investitionskosten, da hier in zwei Systeme – eine Lüftungsanlage und ein Kaltwassersystem – investiert werden muss.

Die Definition des COP für offene Klimatisierungsverfahren sowie die Definition der Kälteleistung und der Raumkühlleistung ist in Abbildung 5 zusammengefasst.

Eine ganzheitliche energetische Effizienzbetrachtung muss auch bei diesem Verfahren die elektrischen Hilfsenergien berücksichtigen. Insbesondere ist bei den offenen Verfahren vor allem die elektrische Energie zum Antrieb der Ventilatoren von Bedeutung.

Die sorptionsgestützte Klimatisierung verwendet zusätzliche Anlagenkomponenten (Sorptionsrotor, zwei Befeuchter, Zusatzheizregister), die in einer konventionellen Lüftungsanlagen nicht installiert sind. Folglich resultiert dies in höheren Druckverlusten bei gleicher Luftfördermenge, die die Ventilatoren über höhere elektrische Anschlussleistung kompensieren.

Eine detaillierte Verfahrensbeschreibung der sorptionsgestützten Klimatisierung erfolgt anhand von Anlagenbeispielen auf den nachfolgenden Seiten. ■

$$\text{Kälteleistung } R_{\text{Kälte}} = \dot{V} \cdot \rho_L \cdot (h_{\text{AuL}} - h_{\text{ZuL}})$$

$$\text{Kühlleistung } R_{\text{Kühl}} = \dot{V} \cdot \rho_L \cdot (h_{\text{AbL}} - h_{\text{ZuL}})$$

$$\text{spezifische Enthalpie } h = (c_L + c_{w,v} \cdot x) \cdot T_L + x \cdot r_0$$

$$\text{Coefficient of Performance} = \text{COP} = \frac{\text{Kälteleistung}}{\text{Antriebswärme}}$$

\dot{V} =Luftvolumenstrom, ρ_L =Dichte trockener Luft,
 c_L =spezifische Wärmekapazität (feuchte Luft),
 $c_{w,v}$ =spezifische Wärmekapazität von Wasserdampf,
 T_L =Temperatur, x =absolute Feuchte
 r_0 =spezifische Verdampfungsenthalpie

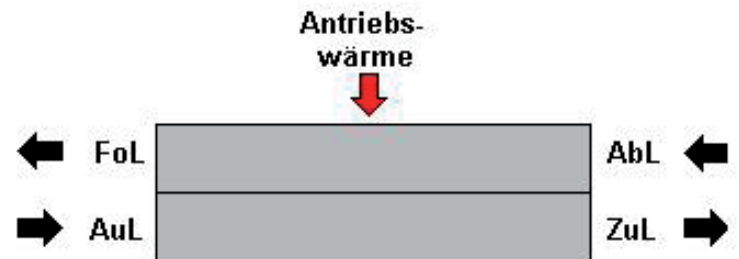


Abbildung 5b: Definition von Kälteleistung, Raumkühlleistung und COP bei offenen Verfahren (Quelle: Fraunhofer ISE/Freiburg)

Ausgeführte Anlagen und Erfahrungen (ausgewählte Beispiele)

Derzeit sind in Europa rund 100 Anlagen zur solaren Gebäudeklimatisierung mit einer Gesamtkollektorfläche von mehr als 17 000 m² und einer Gesamtkälteleistung von geschätzten 6 MW installiert. Die meisten Anlagen sind im Rahmen von geförderten Projekten entstanden und vielfach wurde eine wissenschaftliche Begleitung durchgeführt. Im Folgenden werden die wichtigsten Technologien und jeweils ein ausgeführtes Beispiel dargestellt.

IEA-SHC TASK 25

1. Absorptionskältemaschinen

Absorptionskältemaschinen sind die am weitesten verbreitete Technik thermisch angetriebener Kälteerzeugung. Ihr Haupteinsatzgebiet ist die Kältebereitstellung unter Verwendung von Fernwärme, industrieller Abwärme oder von Abwärme eines Blockheizkraftwerkes (BHKW).

Bei Absorptionskälteanlagen wird wie bei Kompressionsmaschinen die Abhängigkeit des Siede- und Taupunkts eines Kältemittels vom Druck ausgenutzt. Durch Einsatz eines Sorptionsmittels wird eine thermische Verdichtung des Kältemittels mit Wärme als Antriebsenergie erreicht, so dass keine exergetisch hochwertige Energie – wie es die Elektrizität ist - für die Kälteerzeugung verwendet wird.

Die Stoffpaare (Kälte-/Sorptionsmittel), die üblicherweise in diesen thermisch angetriebenen Kälteverfahren eingesetzt werden, sind $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ und $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$. Für Anwendungen oberhalb von ca. 4°C (Gebäudeklimatisierung) wird üblicherweise $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ eingesetzt. In $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ -Anlagen können auch Nutzttemperaturen deutlich unterhalb von 0°C erreicht werden. Beide Stoffpaarungen haben keine klimarelevanten Auswirkungen. Im Folgenden wird das Prinzip einer Absorptionskältemaschine unter Verwendung von $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ betrachtet.

Der Verdampfer (E) befindet sich auf niedrigem Druckniveau (siehe Abbildung 6). Das Kältemittel Wasser verdampft daher bereits bei 4–7°C und erzeugt durch die Aufnahme der notwendigen Verdampfungsenergie die nutzbare Kälteenergie. Der entstehende Kältemitteldampf wird im Absorber (A) durch konzentrierte LiBr-Lösung absorbiert und kann – da er sich jetzt im flüssigen Zustand befindet – durch geringen Energieaufwand mit einer Lösungsmittelpumpe (LP) auf das höhere Druckniveau gefördert werden.

Durch die Zufuhr von solar erzeugter Antriebswärme mit einer Temperatur von ca. 60° bis 95°C wird der Kältemitteldampf im Generator (G) wieder aus der $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ -Lösung ausgetrieben und im Kondensator durch zugeführtes Kühlwasser bei ca. 30 bis 40°C verflüssigt. Das Kältemittel kann nun im Verdampfer erneut verdampft werden. Die im Generator entstandene konzentrierte Lösung wird über einen Lösungswärmeüberträger (LWT) in den Absorber zurückgeführt und kann erneut Kältemittel aufnehmen.

Durch die Abkühlung der konzentrierten Lösung und Vorwärmung der verdünnten Lösung im Lösungswärmetauscher wird die Effizienz der Anlage deutlich verbessert. Damit ergeben sich in der Regel COP-Werte von 0,6 bis 0,8 für einstufige Anlagen. Zweistufige Systeme erreichen höhere COP-Werte im Bereich bis zu 1,2, benötigen allerdings Wärme auf einem höheren Tempera-

turniveau von rund 140° bis 160°C zum thermischen Antrieb.

Bisher wurden Absorptionskältemaschinen vor allem mit Kälteleistungen größer 200-300 kW eingesetzt. Für Anwendungen im kleinen Leistungsbereich war bisher lediglich eine Anlage eines japanischen Herstellers mit einer Nennleistung von 35 kW marktverfügbar, wobei die minimale Antriebstemperatur mit 75°C angegeben wurde. Jüngst arbeiten einige Unternehmen daran, thermisch angetriebene Kältemaschinen im kleinen Leistungsbereich unter 20 kW am Markt anzubieten.

Im Hinblick auf die speziellen Anforderungen von solarthermisch angetriebenen Kälteanlagen, die gutes Teillastverhalten (hohe COP-Werte) bei gleichzeitig geringen und zeitlich variablen Antriebstemperaturen einfordern, sind einige wertvolle Weiterentwicklungen erzielt worden. ■

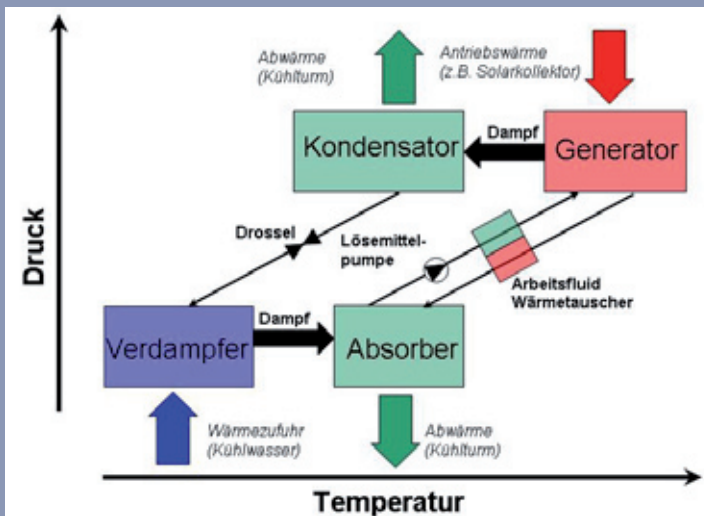


Abbildung 6: Prinzip der Absorptionskältemaschine (Quelle: Fraunhofer ISE/Freiburg)

Ausgeführte Anlagen und Erfahrungen (ausgewählte Beispiele)

Anlage mit Absorptionskältemaschine: Bürogebäude in Guadeloupe

Das Bürogebäude wurde in Guadeloupe bei Basse Terre errichtet und ist seit 2003 in Betrieb. Dieses Gebäude mit seinem hohen Umwelt Qualitätsstandard hat ein solar unterstütztes Kühlsystem auf Basis einer Absorptionskältemaschine.

Abbildung 7 zeigt das Anlagenschema. Die Kühlleistung wird über einen Kühlwasserkreislauf verteilt und gemäß nachfolgendem Prinzip bereitgestellt:

- Vorkühlung des Kühlwasserkreislaufs (Nenntemperaturen: 7 – 12 °C) mittels Absorptionskältemaschine (30 kW), angetrieben über Vakuumröhren-Kollektoren und Einsatz eines offenen Nasskühlturms.
- Zusätzliche Kühlenergie wird von einer Dampf Kompressionskältemaschine (Kühlanlage auf Flüssigkeitsbasis mit einer Leistung von 55 kW) und luftgekühltem Kondensator geliefert. Ohne Absorptionskältemaschine wäre die Kompressionskältemaschine mit einer Anschlussleistung von 90 kW zu dimensionieren.

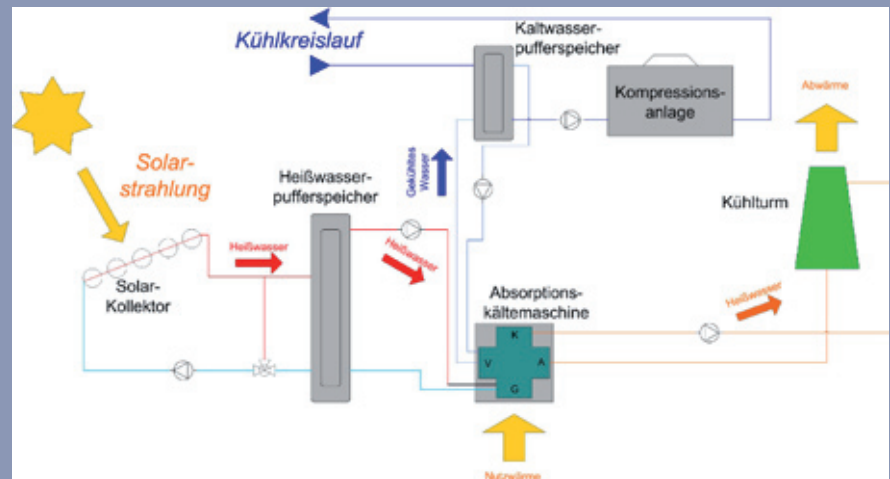
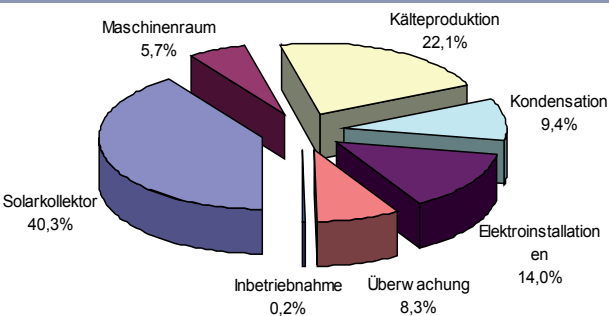


Abbildung 7: Anlagenschema des solar unterstützten Kühlsystems mit Absorptionskältemaschine im Bürogebäude in Guadeloupe (Quelle: Tecsol)

Für den Betrieb der Absorptionskältemaschine wird Wärme in einem Temperaturbereich von 85 – 95 °C benötigt. Diese hohen Antriebstemperaturen erfordern den Einsatz von hocheffizienten aber kostenintensiven Vakuumröhren-Kollektoren.

Die Kollektoren sind lediglich durch einen kleinen Pufferspeicher (< 100 Liter) mit dem Generator der Absorptionskältemaschine verbunden. Die Nutzkälte (30 kW) wurde so dimensioniert, dass sie zu jeder Zeit während der Sonnenscheinperiode geringfügig kleiner als die Kühllast ist. Dadurch kann die Absorptionskältemaschine überwiegend unter Sonnenantrieb genutzt werden, ohne dass es zu unerwünschte Stillstandzeiten der Kollektoranlage kommt. Steigt der Kältebedarf weiter an, so wird die konventionelle Kältemaschine zur Spitzenlastdeckung dazugeschaltet.

Durch diese Systemkonfiguration wird im Vergleich zur Variante mit konventioneller Kompressionskältemaschine (Leistung von 90 kW) eine Kostenreduktion der jährlichen Stromrechnung um ein Drittel erwartet. Stellt man sowohl die Kostenverteilung als auch die Aufschlüsselung der Investitionskosten für dieses solar unterstützte Kühlsystem dar, zeigt sich eine Mehrinvestition in Höhe von € 18.000, wobei etwa 40% der Gesamtkosten auf die hocheffizienten Vakuumröhren-Kollektoren entfallen. ■



Komponente	Kosten, €
Solarkollektor	39.365,00 €
Maschinenraum	5.616,00 €
Kälteproduktion	21.614,00 €
Kondensation	9.224,00 €
Elektroinstallationen	13.644,00 €
Überwachung	8.093,00 €
Inbetriebnahme	203,00 €
Gesamt	97.759,00 €
spezifische Kosten € pro kW Kälteleistung	2.794,00 €
spezifische Kollektorkosten, € pro m²	635,00 €

Abbildung 8: Kostenverteilung und Aufschlüsselung der Gestehungskosten des gesamten Systems (Quelle: Tecsol)

Ausgeführte Anlagen und Erfahrungen (ausgewählte Beispiele)

2. Adsorptionskältemaschinen

Adsorptionskältemaschinen sind bislang durch zwei japanische Hersteller kommerziell erhältlich. Ihr Hauptanwendungsgebiet ist mit dem von Absorptionsanlagen mit dem Stoffpaar $H_2O/LiBr$ vergleichbar.

Adsorption ist die reversible Anlagerung von Gasmolekülen in den Poren eines hochporösen Adsorptionsmittels wie zum Beispiel Silikagel. Bei Adsorptionskältemaschinen wird der im Verdampfer erzeugte Dampf des Kältemittels in derartigen Adsorptionsmitteln angelagert.

Um einen kontinuierlichen Betrieb zu gewährleisten, sind deshalb – außer dem Verdampfer und dem Kondensator – mindestens zwei getrennte Kammern mit Adsorptionsmittel erforderlich. Jede der gleichartigen Kammern enthält eine Schüttung aus Sorptionsmaterial, das in thermischen Kontakt mit den internen Wärmetauscherflächen steht. Während die eine Kammer den im Verdampfer erzeugten Kältemitteldampf adsorbiert und somit den Kälteprozess aufrecht erhält, wird die andere Kammer regeneriert. Dazu wird die zweite Kammer von einem heißen Wärmeträger, zum Beispiel solar erwärmtem Wasser, durchströmt. Der Kältemitteldampf wird ausgetrieben und kondensiert im Kondensator.

Sowohl zur Kühlung des Kondensators als auch zur Abfuhr der Adsorptions-

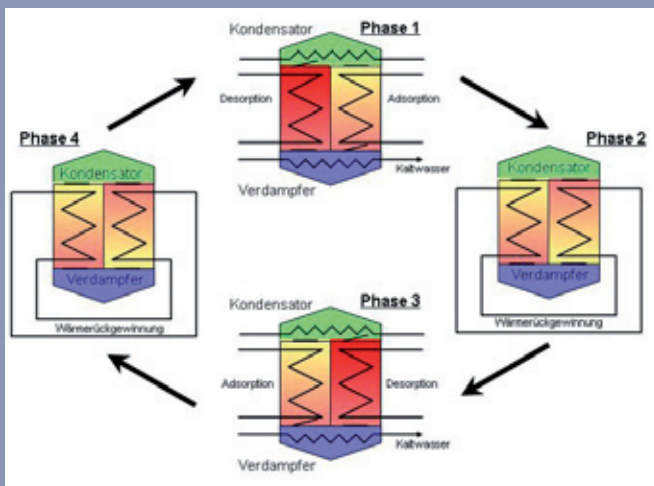


Abbildung 9: Betriebs-Zyklus einer Adsorptionskältemaschine (Quelle: Fraunhofer ISE/Freiburg)

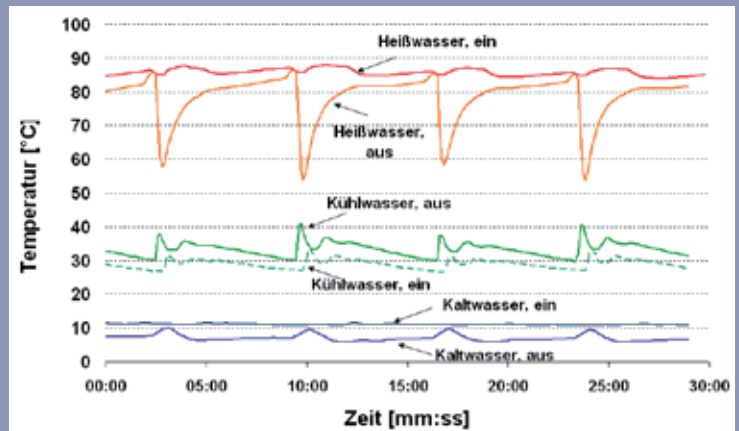


Abbildung 10: Temperaturverlauf (Heißwasser, Kaltwasser, Kühlwasser) einer Adsorptionskältemaschine

wärme, die während des Adsorptionsprozesses frei wird, ist eine Rückkühlung erforderlich. Nach einer typischen Dauer von etwa sieben Minuten kommt der Adsorptionsprozess zum Erliegen und die Funktion der Kammern wird gewechselt. Dann kommt es zu einer kurzen Phase der Wärmerückgewinnung und des thermischen Ausgleichs zwischen den Kammern. Ein vollständiger Zyklus ist in Abbildung 9 dargestellt und der resultierende Temperaturverlauf ist in Abbildung 10 enthalten.

Adsorptionskältemaschinen sind sowohl größer und schwerer als auch teurer als vergleichbare einstufige Absorptionskältemaschinen. Allerdings hat die Adsorptionstechnik einige wesentliche Eigenschaften, die für einen Einsatz im Bereich der Klimakälte interessant sind. So werden keinerlei bewegte Teile im Vakuumbereich benötigt und nachteilige Kristallisationsereignisse wie sie im Absorptionsverfahren auftreten können, finden nicht statt. Optimierungen hinsichtlich der Wärmetauschergestaltung, neue Materialien und Behältertechnologien versprechen für die Zukunft deutlich höhere Leistungsdichten und lassen für die solarthermisch angetriebene Adsorptionskaltwassererzeugung Positives erhoffen. ■

Anlage mit Adsorptionskältemaschine: Universitätsklinikum Freiburg

1999 wurde im Rahmen eines durch das BMWA geförderten Vorhabens eine Anlage zur solar unterstützten Klimatisierung eines Laborgebäudes am Universitätsklinikum Freiburg installiert.

Die Adsorptionskältemaschine kühlt Wasser des Kältekreises von 14°C auf 10°C ab und versorgt damit die Kühlregister in zwei Lüftungsanlagen. Das Solarkollektorfeld besteht aus 170 m² direkt durchströmten Vakuumröhrenkollektoren, die in zwei Hauptfeldern ausgeführt sind. Eines der Felder (90 m²) ist mit 45° nach Süden geneigt, das andere Feld (80 m²) mit 30°. Bei Sonnenmangel kann ein Wärmetauscher mit Anschluss an das betriebseigene Dampfnetz zugeschaltet werden.

Innerhalb des Projektes wurden fortwährend Anpassungen und Optimierungen vorgenommen, die sowohl die hydraulische Verschaltung als auch die Regelung betreffen.

Wärmeversorgung	Kollektortyp	Vakuumröhrenkollektor (direkt durchströmt)
	Kollektorfläche	153 m ² (Absorber), 230 m ² (brutto)
	Heißwasserspeicher	6 m ³ parallel installiert, 2 m ³ in Serie zum Heißwasserrücklauf von der Kältemaschine
	Zusatzheizsystem	Fernwärme
Kälteversorgung	Kältemaschinentyp	Adsorptionskältemaschine Typ NAK20/70 (Nishyodo/Japan)
	Kälteleistung	70 kW
	Zusatzkältemaschine	-

Tabelle 2: Schlüsseldaten der Anlage am Universitätsklinikum Freiburg (Quelle: Fraunhofer ISE/Freiburg)

Ausgeführte Anlagen und Erfahrungen

(ausgewählte Beispiele)



Abbildung 11: Adsorptionskältemaschine im Universitätsklinikum Freiburg (Quelle: Fraunhofer ISE)

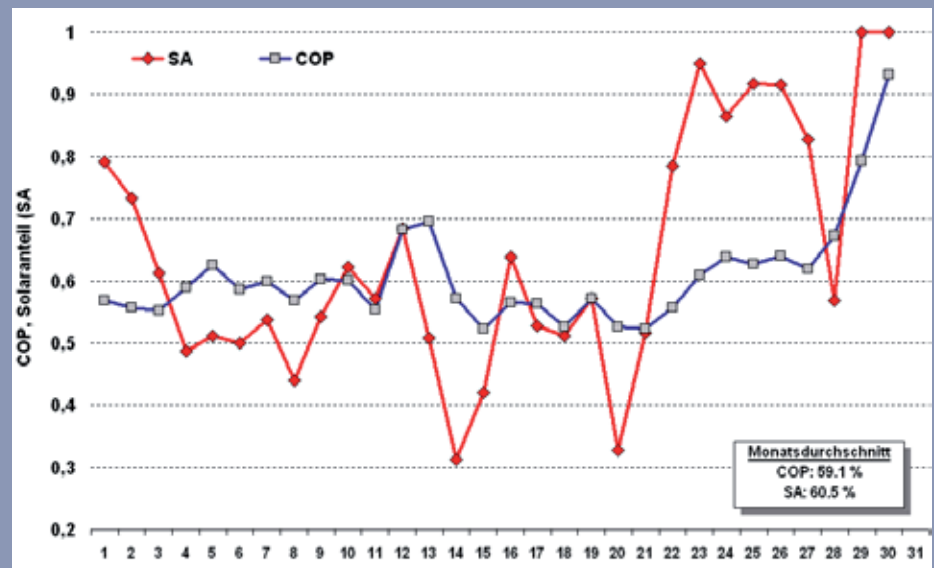
Abbildung 12: COP und solarer Deckungsbeitrag der Anlage am Universitätsklinikum Freiburg (Sommer 2003) (Quelle: Fraunhofer ISE/Freiburg)

IEA-SHC TASK 25

Die wichtigsten Modifikationen, die auch als allgemeine Planungshinweise gelten können, waren:

- Die Integration eines seriellen Pufferspeichers in den Rücklauf der Kältemaschine ist wichtig, um einen stabilen Betrieb zu erhalten. Dies bedingt sich durch die periodische Betriebsweise der Adsorptionskältemaschine und die daraus resultierenden Temperaturschwankungen (siehe Abbildung 10).
- Der Pufferspeicher darf nur durch überschüssige Solarwärme und nicht durch den Rücklauf der Kältemaschine bei Dampfbetrieb geladen werden.
- Eine lastabhängige Regelung der Antriebstemperatur, beginnend bei einem niedrigen Wert, erhöht den solaren Deckungsbeitrag; bei nicht ausreichender Kälteleistung wird die Antriebstemperatur erhöht.
- Das Teillastverhalten kann durch Betrieb mit einer variablen Periodenlänge deutlich verbessert werden. Dies ist eine Modifikation gegenüber der Regelung, wie sie vom Hersteller eingestellt ist.

Im Laufe der kontinuierlichen wissenschaftlichen Begleitung des Anlagenbetriebs konnte die Leistungsfähigkeit deutlich verbessert werden. Mittlerweile erreicht die Kältemaschine COP-Werte entsprechend den Herstellerangaben. ■



3. Offene Verfahren mit Sorptionsrotoren

Marktübliche offene Verfahren verwenden so genannte Sorptionsrotoren zur Luftentfeuchtung. Dies sind Rotoren, bei denen das Sorptionsmittel – Silikagel oder Lithiumchlorid - in eine Trägermatrix eingebracht ist und von Luft durchströmt werden kann.

Durch die Rotation der Trägermatrix wird das Material kontinuierlich mit der Ab- und der Zuluft in Kontakt gebracht. Im Zuluftkanal wird die angesaugte Außenluft entfeuchtet und auf der Abluftseite wird das angelagerte Wasser unter Zufuhr von warmer Luft wieder desorbiert. Die gängigste Verschaltung und der Zustandsverlauf im T-x-Diagramm feuchter Luft sind in Abbildung 13 dargestellt.

Der COP hängt stark von den Außenluftbedingungen ab. Typische Werte des COP und der Kälteleistung sind in Abbildung 14 dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass bei moderaten Außenluftbedingungen sehr hohe COP-Werte erreicht werden können. Dies ist damit zu begründen, dass das Verfahren mit reiner ‚passiven Kühlung‘ durch die Verdunstungskühlung sowohl auf der Abluft als auch auf der Zuluftseite arbeitet. In diesem Fall findet keine sorptive Luftentfeuchtung statt und demzufolge wird keine Antriebswärme benötigt. Neben der dargestellten Verschaltungsweise sind auch andere Varianten möglich. ■

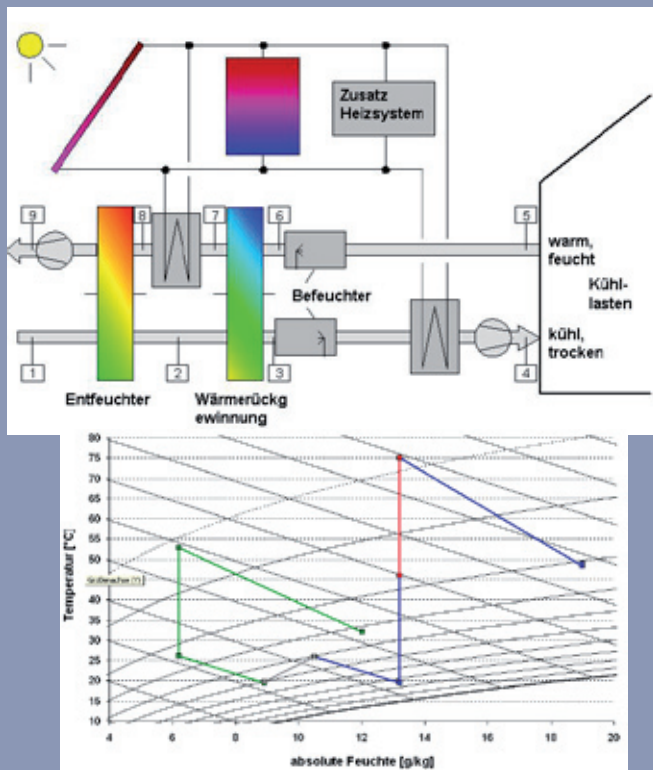


Abbildung 13: Standardverfahren der sorptionsgestützte Klimatisierung mit Trocknungsrad und Zustandsverlauf im T-x-Diagramm feuchter Luft (Quelle: Fraunhofer ISE/Freiburg)

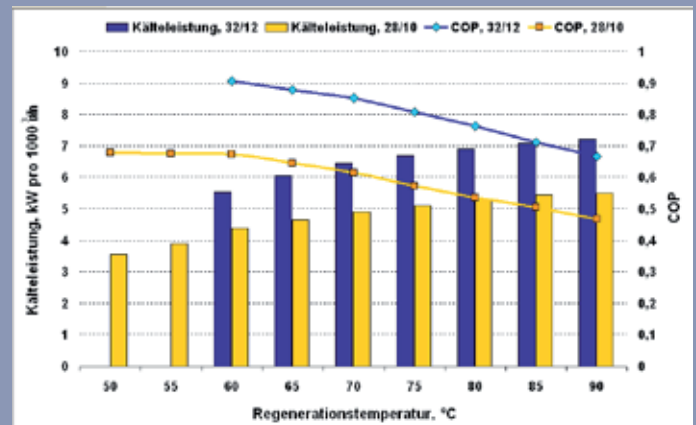


Abbildung 14: COP und Kälteleistung des Standardverfahrens für unterschiedliche Bedingungen der Außenluft (Quelle: Fraunhofer ISE/Freiburg)

A

usgeführte
Anlagen und
Erfahrungen
(ausgewählte Beispiele)



Abbildung 15: Sorptionsgestützte Klimatisierung in Außenaufstellung auf dem Dach der Bibliothek in Matarò (Quelle: FH Stuttgart)

Abbildung 16: Messdaten vom installierten Sorption rotor in Matarò (Quelle: Aiguaso/enginyeria)

IEA-SHC TASK 25

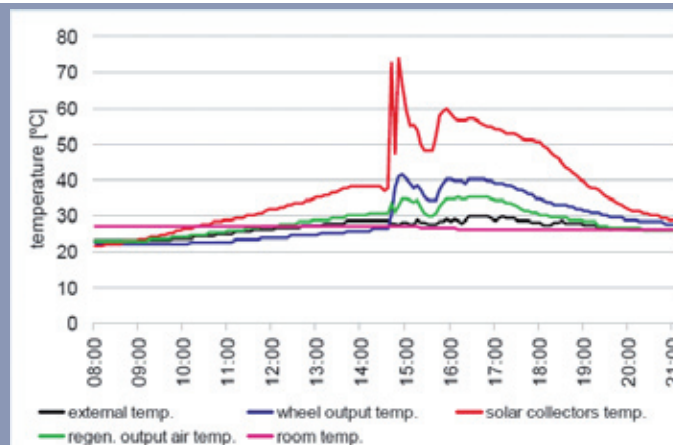
Anlage mit Sorptionsrotor: Pompeu Fabra Library in Matarò

In der öffentlichen Bibliothek in Matarò /Spanien wurde eine Anlage mit Sorptionsgestützter Klimatisierung gebaut. Diese Klimaanlage arbeitet ausschließlich mit Luft als Wärme- und Kälteübertragungsmedium. Es gibt Solarluftkollektoren und eine hinterlüftete PV-Anlage, die die Außenluft erwärmen. Diese Anlage arbeitet entsprechend den Hauptjahreszeiten nach folgendem Prinzip:

- **Sommer:** Die Anlage mit sorptionsgestützte Klimatisierung arbeitet mit thermischer Solarenergie für die Regeneration (Entfeuchtung durch erhitzen).
- **Winter:** Unter Verwendung des Trocknungsrades als rotierender Wärmerückgewinner wird Solarenergie indirekt zum Heizen genutzt.
- Zusätzlich verfügt diese Anlage über unterstützende Wärmetauscher sowohl zum Heizen als auch zum Kühlen, für den Fall, dass die Solarenergie den Energiebedarf nicht decken kann bzw. außergewöhnliche Lastspitzen auftreten.

Folgende Schlussfolgerungen haben sich durch die Ergebnisse des Anlagen-Monitorings während der Sommerperiode 2002 ergeben:

- Der hohe Wasserverbrauch macht den Einsatz einer Wasseraufbereitungsanlage notwendig.
- Die Steuerung für den Betrieb der rotierenden Entfeuchtungsräder hat Optimierungsbedarf.
- Die Luftbehandlungseinheit, die Solaranlage und die Steuer- und Regelungssysteme arbeiten wie in der Auslegungsperiode vorgesehen. ■



4. Verfahren mit flüssigen Sorptionsmitteln

Sorptionsgestützte Klimatisierungssysteme mit flüssigen Sorptionsmitteln arbeiten nach dem gleichen Prinzip wie offene Verfahren mit Trocknungsrad und Befeuchter. Die Umgebungsluft wird durch Einsatz von hygroskopischen Flüssigkeiten entfeuchtet und durch Wasserverdunstung gekühlt. Abbildung 17 zeigt ein für den solaren Betrieb optimiertes System. Im Absorber wird Umgebungsluft mit einem konzentrierten flüssigen Sorbens in Kontakt gebracht und somit entfeuchtet. Die hygroskopische Flüssigkeiten wird über gekühlte Kontaktflächen verrieselt. Die Bindungswärme des Sorptionsprozesses wird über ein Kreislaufverbundsystem und einen indirekten Verdunstungskühler an die Abluft abgeführt, so dass die Umgebungsluft gleichzeitig entfeuchtet und gekühlt wird. In einem nachfolgenden Kühler wird die trockene Luft auf die erforderliche Zulufttemperatur gesenkt.

Die konzentrierte Sorptionsflüssigkeit wird durch die Aufnahme von Wasser verdünnt. In einem luftdurchströmten Regenerator wird es auf 60 bis 80°C erwärmt und wieder aufkonzentriert. Eine integrierte Wärmerückgewinnung zwischen Lufteintritt und -austritt um den Regenerator erhöht dabei den Wirkungsgrad und reduziert die erforderliche Kollektorfläche. Durch getrennte Lagerung von verdünntem und konzentriertem Sorbens kann Energie gespeichert werden. Bei Verwendung der üblichen wässrigen Lithiumchloridlösung als Sorbens kann durch einen speziellen, intern gekühlten Absorber eine Energiespeicherdichte von bis zu 280 kWh/m³ erreicht werden, ohne das Entfeuchtungspotenzial der konzentrierten Lösung zu reduzieren.

Sorptionsgestützte Klimatisierungssysteme mit flüssigem Sorbens sind vergleichsweise komplex und die Zahl der notwendigen Systemkomponenten steigt. Einige prinzipielle Vorteile wie ein potentiell höherer Gesamtwirkungsgrad aufgrund der Verwendung von Wärme- und Kälterückgewinnung, geringere Regenerationstemperatur bei gleichem Entfeuchtungspotenzial, die Machbarkeit einer effizienten Energiespeicherung - die eine Entkopplung von solarem Angebot und auftretender Kühllast ermöglicht - und nicht zuletzt die Möglichkeit einer räumlichen Trennung von Zu- und Abluftkanälen, können dieser solar gestützten Technologie zur Gebäudeklimatisierung zum Durchbruch verhelfen. Diese offenen Verfahren mit flüssigen Sorptionsmitteln sind derzeit für den Anwendungsbereich der Gebäudeklimatisierung kommerziell nicht verfügbar, aber es gibt vielversprechende Weiterentwicklungen und der Markteintritt ist in naher Zukunft zu erwarten. ■

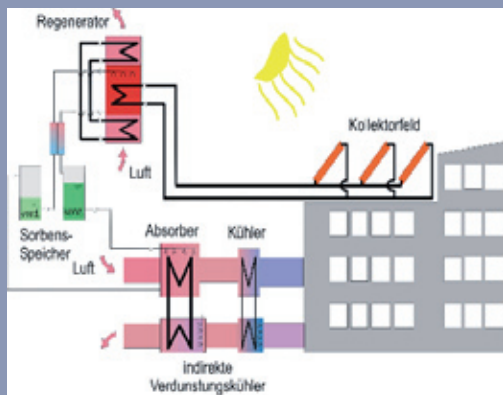


Abbildung 17: Funktionsprinzip einer Anlage mit Flüssigsorption und solarer Regenerierung (Quelle: ZAE Bayern)



Abbildung 18: 20 kW Flüssigsorptionsanlage, Energietechnik Forschungszentrum, Haifa (Quelle: G. Grossman, Technion Haifa/Israel)

P lanung K osten I ntegration

1. Energiebilanz, Primärenergieeinsparung

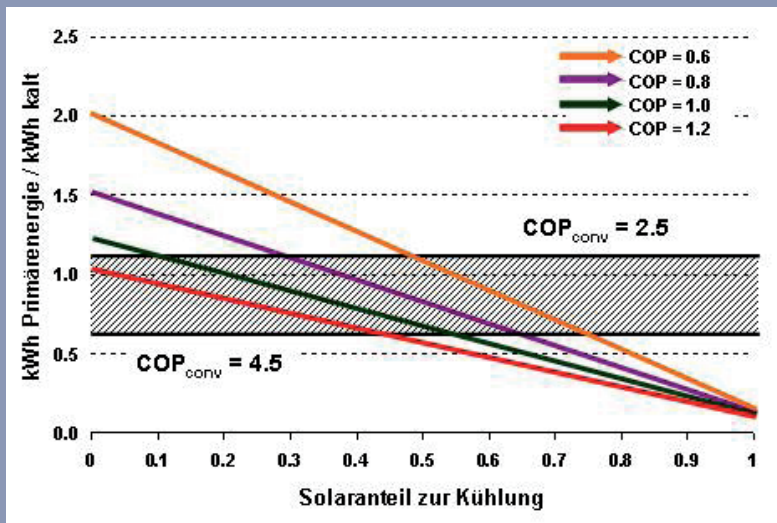
Hauptziel der Nutzung von Solarenergie ist die Einsparung von Primärenergie. Eine Bilanzierung des Energieverbrauchs von Anlagen der solar unterstützten Klimatisierung muss alle Energieflüsse berücksichtigen, um ein realistisches Bild zu liefern. In diese Energiebilanz fließt die Energie für alle Pumpen, zum Beispiel im Solarkreis und im Rückkühlkreis, die elektrische Energie zum Antrieb des Ventilators im Kühlturm und die Energie zur Kältebereitstellung, wenn nicht ausreichend Solarwärme zur Verfügung steht, mit ein.

Für eine 100 %ige Gewährleistung der Komfortparameter werden konventionelle Backup-Systeme in die Gesamtanlage integriert. Generell sind hier zwei Möglichkeiten denkbar. Es kann eine zweite Wärmequelle (Gaskessel, Fernwärme) zum Antrieb des Kälteverfahrens genutzt werden oder es kann eine zweite konventionelle Kältemaschine die Komfortparameter garantieren.

Eine grundlegende Darstellung des Primärenergieverbrauchs für ein Verfahren der Kaltwassererzeugung unter Verwendung von Sonnenenergie und fossilen Brennstoffen zeigt Abbildung 19. In die Betrachtung gehen lediglich die Arbeitszahlen bzw. Wärmeverhältnisse der verglichenen Kälteerzeugungsverfahren sowie der Umwandlungsfaktor von Primärenergie in elektrische Energie ein.

Abbildung 19: Primärenergiebilanz von solar unterstützter Klimatisierung mit fossiler Wärmequelle als Backup (Quelle: Fraunhofer ISE/Freiburg)

IEA-SHC TASK 25



Die Darstellung zeigt die pro kWh Kälte benötigte Primärenergie als Funktion des solaren Deckungsbeitrages für unterschiedliche Werte des COP der thermisch angetriebenen Kältemaschine. Der primärenergetische Gesamtwirkungsgrad zur Stromerzeugung wurde mit 0,36 kWh Strom pro kWh Primärenergie angesetzt und zur Bereitstellung der Antriebswärme für fossile Energieträger wurden 0,9 kWh Primärenergie pro kWh Nutzwärme eingerechnet.

Daneben zeigt das Diagramm im markierten Bereich den typischen Primärenergieverbrauch von elektrisch angetriebenen Kompressionskältemaschinen. Die untere Kurve repräsentiert moderne, effiziente Anlagen mit einer Arbeitszahl von 4,5 (Quotient aus Nutzkälte zu elektrischem Aufwand) und die obere Kurve steht für Altanlagen mit einer Arbeitszahl von 2,5.

Der Abbildung 19 ist zu entnehmen, dass das thermische Verfahren ohne Nutzung der Sonnenenergie - das heißt der Solaranteil zur Kühlung ist Null – primärenergetisch schlechter abschneiden als die konventionelle Kälteerzeugung mit modernen Kompressionskältemaschinen (Arbeitszahl 4,5). Je nach Konfiguration der Vergleichssysteme müssen die solarthermisch angetriebenen Verfahren mindestens rund 50% solaren Deckungsbeitrag erzielen, um primärenergetisch gleich zu ziehen. Nur bei solaren Deckungsanteilen darüber ist eine Primärenergieersparnis garantiert.

Diese Betrachtung liefert nur eine erste Abschätzung zum primärenergetischen Verhalten von solarthermisch angetriebenen Kälteverfahren, denn hier ist weder das Teillastverhalten der Anlagenkomponenten berücksichtigt, noch wird die Nutzung der Solarenergie für andere Zwecke (Heizungsunterstützung, Warmwasserbereitung) eingerechnet. Deutlich wird hier, dass im Vorfeld einer Anlagenprojektierung eine eingehende und intensive Energiebilanzierung für den Einzelfall unbedingt durchgeführt werden sollte. ■

2. Wichtigste Planunsrichtlinien, Integration in TGA

Aus der oben dargestellten Energiebilanz lassen sich einige grundlegende Richtlinien für die Anlagenauslegung ableiten:

- Bei solarthermisch betriebenen Kühlverfahren mit niedrigem COP und fossilen Brennstoffen als Backup ist ein hoher solarer Deckungsbeitrag erforderlich.
- Ein niedrigerer solarer Deckungsbeitrag ist ausreichend bei thermisch angetriebenen Kühlverfahren mit hohem COP.
- Eine Alternative ist die Verwendung einer konventionellen Kältetechnik (Kompressionskältemaschine) als Backup; dies ist in der Regel bei Anlagen mit hoher installierter Leistung akzeptabel.
- Eine Primärenergieersparnis ist grundsätzlich bei Verwendung von solarthermisch autonomen Systemen möglich; dann ist allerdings keine Garantie für die Einhaltung vorgegebener Raumluftzustände möglich.
- Auf alle Fälle sollte die Ausnutzung der Solaranlage durch die Einbeziehung anderer thermischer Verbraucher (Heizung, Brauch-Warmwasser) maximiert werden.

Daneben hat sich in der Praxis gezeigt, dass viele Anlagen unterhalb der möglichen Energieersparnis bleiben. Grund hierfür sind einerseits zu komplexe hydraulische Schemen und andererseits die oft nur unzureichend arbeitende Regelung. Daraus folgt für die Auslegung und den Betrieb:

- Das hydraulische Schema sollte so einfach wie möglich und so komplex wie nötig sein.
- Sowohl bei der Solaranlage als auch beim thermischen Kälte- oder Klimatisierungsverfahren besteht eine Abhängigkeit der Effizienz und der Leistung von den anliegenden Betriebstemperaturen. Durch eine bedarfsabhängige Regelung sowohl der Antriebstemperatur, der Temperatur des Kältemediums als auch der Rückkühltemperatur kann die Gesamteffizienz deutlich erhöht werden. Dies bedarf allerdings einer komplexen Regelung, die nur nach intensivem Test implementiert werden sollte.
- Eine ausführliche Inbetriebnahmephase mit anschließender Aufzeichnung und Analyse von Betriebsdaten ist unabdingbar, wenn die angestrebten Energieeinsparungen erreicht werden sollen. ■

3. Planungshilfen: Task 25 Design Tool

Das Fehlen von geeigneten Planungshilfsmitteln hat sich als eine wesentliche Hürde für die Installation von Anlagen der solar unterstützten Kühlung bzw. Klimatisierung erwiesen. Deshalb wurden in verschiedenen, öffentlich geförderten Projekten entsprechende Werkzeuge entwickelt.

Im Zuge der Arbeiten der Task 25 ‚Solar-Assisted Air-Conditioning of Buildings‘ des Solar Heating & Cooling Programme der Internationalen Energie-Agentur (IEA) wurde unter deutscher Beteiligung des ILK Dresden (Bundesdeutsche Förderung durch das BMWA) ein Simulationsprogramm entwickelt. Die Simulationssoftware SOLAC soll während der Entwurfs- und Planungsphase wertvolle Hinweise zur Auslegung und zum Betriebsverhalten von Anlagen zur solaren Kühlung bzw. Klimatisierung liefern.

Ein Schwerpunkt der Programmentwicklung lag vor allem auf der detaillierten Darstellbarkeit der Leistungsfähigkeit der solaren Kühlung bzw. Klimatisierung. Bei der Simulation des gesamten Anlagensystems wird zunächst im Stundenschritt aufgrund der eingelesen Lastprofile eine Vordimensionierung der Kälte- und Klimaanlage (Vorwärtsrechnung) vorgenommen. Durch die Bestimmung

der solaren Erträge der Kollektoranlage und der Leistungen und Austrittszustände aufgrund der ausgewählten Anlagenkomponenten wird eine Rückwärtsrechnung durchgeführt. Dadurch werden Fehldimensionierungen der Komponenten sichtbar. Beispielweise wird die Auswirkung einer nicht beabsichtigten Unterdimensionierung durch das Aufzeigen der Stunden mit einer gewissen, zeitlich begrenzten Nichteinhaltung der geforderten Komfortparameter erkennbar und kann dem Projektteam frühzeitig vermittelt werden.

Da in der frühen Phase der Konzeptentwicklung von Anlagen der solar unterstützten Kühlung bzw. Klimatisierung häufig kaum belastbare Daten zu den Systemkomponenten vorliegen, wurde die Anzahl der erforderlichen Eingabewerte für die Software SOLAC auf ein praktikables Minimum reduziert. Während im Bereich der Kälteerzeugung eine direkte Maschinenauswahl möglich ist, wurde für die anderen Bereiche auf eine produktunabhängige Beschreibung mittels Kennliniencharakteristik zurückgegriffen.

Das Gesamtsystem besteht aus einer Solaranlage mit Speicher und Backup-System, einer Kälteerzeugungseinheit, einer RLT-Anlage und den Raumkomponenten. Eingangsgrößen der Simulation sind stündliche Klimadaten (Wetterdaten, z.B. Testreferenzjahr) sowie der stündliche Kühl- und Heizenergiebedarf des Gebäudes. Der Vorteil des Simulationsprogramms besteht vor allem in der schnellen Berechnung sinnvoller Systemkonfiguration, um diese rasch vergleichen und für die konkrete Anwendung eine optimale Lösung herausarbeiten zu können.

Die Berechnungen durch die Software SOLAC lassen Aussagen zu folgenden Bedarfsgrößen zu:

- Strombedarf für Ventilatoren und Kompressoren
- Energiebedarf des Backup-Systems
- Wasserverbrauch des Kühlturms
- Wasserverbrauch bei Brunnenwassernutzung
- Wasserverbrauch der Befeuchter

Das Programm wird über das ILK Dresden vertrieben. Nach intensiver Erprobung durch die Teilnehmer der Arbeitsgruppe Task 25 steht das Programm für interessierte Nutzer kostenlos zur Verfügung.

4. Wirtschaftlichkeit

Der technische Aufwand für Anlagen der solar unterstützten Kühlung bzw. Klimatisierung ist höher als bei konventionellen Anlagen. Einerseits ist im Vergleich zu einer konventionellen Anlage der gesamte Teil der thermischen Solartechnik zusätzlich erforderlich und andererseits wird bei thermisch angetriebenen Kältemaschinen eine aufwendigere hydraulische Verschaltung notwendig.

Das Rückkühlwerk ist im Falle der thermischen angetriebenen Variante bei gleicher Kälteleistung im Vergleich zur elektrisch angetriebenen Kompressionsanlage größer, da die abzuführende Wärmemenge im Rückkühlkreis größer ist. Nicht zuletzt sind die spezifischen, auf die Kälteleistung bezogenen, Kosten thermisch angetriebener Kältemaschinen höher als im Falle der konventionellen Anlagentechnik.

All dies bedingt höhere Investitionskosten für die solarthermische Kühlung. Auf der anderen Seite sind die Betriebskosten der solarthermischen Anlage durch erzielbare Energieeinsparungen niedriger. Dies wirkt sich insbesondere dann stark aus, wenn der maximale Strombezug eines Gebäudes bei Verwendung konventioneller klimatechnischer Anlagen

durch die Kälte-/Klimatechnik bedingt ist. Hier können die solarthermisch angetriebenen Verfahren – je nach Höhe des tariflich vereinbarten Leistungspreises für den Strom – zu deutlichen Reduktionen der Betriebskosten führen.

Wenngleich bindende Aussagen zur Wirtschaftlichkeit einer solarthermischen Kühlung bzw. Klimatisierung stets vom konkreten Einzelfall abhängen, ist bei derzeitigen Energiepreisen in aller Regel mit höheren Jahreskosten - Gesamtkosten einschließlich der Kapitalkosten, Betriebskosten und Wartungskosten - für solarthermische Verfahren im Vergleich zu konventioneller Technik zu rechnen.

Um für ein konkretes Projekt unter gegebenen Randbedingungen eine erste Bewertung zu einer solarthermischen Kühlung bzw. Klimatisierung durchführen zu können, wurde in Task 25 ‚Solar-Assisted Air-Conditioning of Buildings‘ (siehe /Henning 2003/) eine Kennzahl eingeführt. Diese berücksichtigt die energetisch-ökonomischen Performance beider Varianten und beschreibt die Kosten die pro eingesparter Primärenergie $C_{\text{Primärenergie}}$ anfallen:

$$C_{\text{Primärenergie}} = \frac{\text{Jahreskosten der Solarvariante} - \text{Jahreskosten der Vergleichsvariante}}{\text{Primärenergieverbrauch der Vergleichsvariante} - \text{Primärenergieverbrauch der Solarvariante}} \quad (\text{€/KWh})$$

Für das Beispiel eines Hotels in Spanien ist in Abbildung 20 diese Größe als Funktion der Kollektorfläche und des Speichervolumens dargestellt. Es zeigt sich ein deutliches Minimum bei einer Anlagenauslegung von 140 m² Kollektorfläche und einem Volumen des Heißwasserspeichers von 90 m³. Das heißt der Betreiber einer solchen Auslegungsvariante zur solaren Klimatisierung spart im Vergleich zur konventionellen Variante etwa 36% Primärenergie und etwa 8 €-Cent pro kWh Primärenergieeinsparung. ■

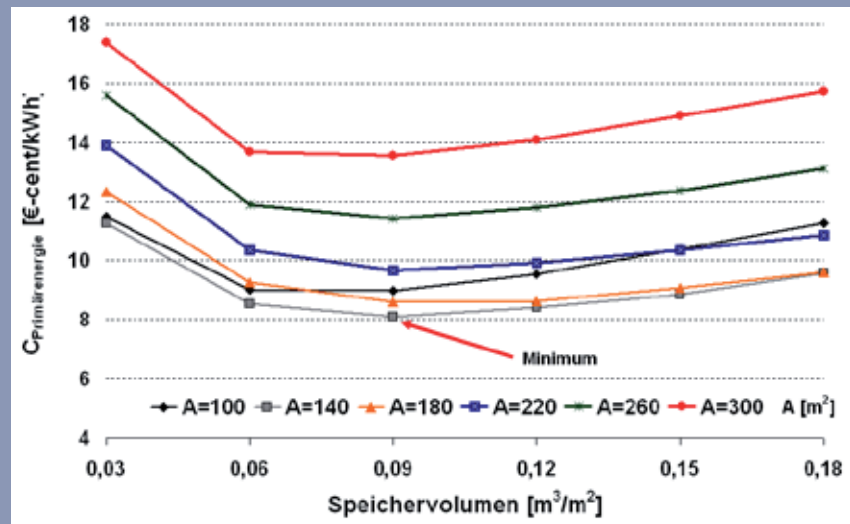


Abbildung 20: Kosten der eingesparten Primärenergie als Funktion der Kollektor- und Speichergröße für das Hotel in Spanien (Quelle: Fraunhofer ISE/Freiburg)

Perspektiven

Bereits heute stehen Komponenten zur Verfügung, die die Nutzung der thermischen Solarenergie für die Gebäudeklimatisierung ermöglichen. Dies gilt allerdings nur für Zentralanlagen, wie sie üblicherweise im Nichtwohnungsbau zum Einsatz kommen. Die Technik steckt in einem gewissen Grad noch in den Kinderschuhen, ihr ist aber großes Marktinteresse gesichert. In naher Zukunft sind interessante technologische Neuentwicklung zu erwarten und einige Unternehmen bieten solares Heizen und Kühlen bereits in kompletten Systempaketen an.

IEA-SHC TASK 25

Es sind bislang nur relativ wenige Anlagen der solar unterstützten Klimatisierung realisiert worden. Die Erfahrungen zeigen dabei, dass insbesondere Optimierungspotenzial hinsichtlich der hydraulischen Verschaltung wie auch der Regelungstechnik vorhanden ist. Es gibt keine standardisierten Anlagenkonzepte. Weitere Projekte mit eingehender wissenschaftlicher Begleitung sind erforderlich, um zu einem zuverlässigen, robusten und energieoptimierten Anlagenbetrieb mit entsprechender intelligenter Regelungsstrategie zu gelangen.

Insofern liegt ein Schwerpunkt der zukünftigen Entwicklung auf der Systemtechnik. Aber auch im Bereich der Komponentenentwicklung sind noch erhebliche Innovationen für die Zukunft zu erwarten. So werden in den nächsten Jahren kleine thermisch angetriebene Kältemaschinen – sowohl auf der Basis der Absorption als auch der Adsorptionstechnik – mit Leistungen unterhalb 20 kW auf den Markt kommen, mit denen ganz neue Anwendungsbereiche erschlossen werden können.

Für Anlagen im größeren Leistungsbereich können hocheffiziente Kältemaschinen wie zum Beispiel zweistufige Absorptionsanlagen oder Dampfstrahlkältemaschinen in Kombination mit hocheffizienten Kollektoren wie Vakuumröhren-Kollektoren oder einachsige nachgeführten Parabolrinnenanlagen eine interessante Option darstellen.

Bei den offenen Sorptionsverfahren wird insbesondere die Entwicklung von gekühlten Sorptionsprozessen zu relevanten Effizienzverbesserungen führen.

All die genannten Entwicklungen im Bereich der Systemtechnik sowie der Komponenten werden in Verbindung mit zuverlässigen, einfach handhabbaren Planungswerkzeugen zu einer deutlichen Verbreitung der Anwendung der solarthermischen Klimatisierung führen ■

Weitere internationale Forschungsaktivitäten

Unter österreichischer Beteiligung liegen mit dieser Broschüre die wesentlichen Ergebnisse der IEA SHC Task 25 »Solar-Assisted Air-Conditioning of Buildings« vor. Im Rahmen der fünfjährigen Arbeit in diesem internationalen Forscherforum wurden einige wichtige Erfahrung mit Anlagen zur solaren Kühlung bzw. Klimatisierung gesammelt.

Es zeigte sich einerseits das große Marktpotential dieser Technologien zur Gebäudeklimatisierung – insbesondere in sonnigen Regionen – und andererseits die Notwendigkeit zur Fortsetzung der Forschungsarbeit, um die Entwicklung

Perspektiven

von Systemen mit hohen Qualitätsstandards und zuverlässigem Anlagenbetrieb über viele Jahre zu forcieren.

Heute findet die Solartechnologie wachsende Beachtung aufgrund des kontinuierlichen Wachstums der globalen Energienachfrage und ambitionierte Zielsetzungen werden vereinbart, die Beteiligungen von erneuerbaren Energiequellen im Allgemeinen und Solarenergie im Speziellen an der zukünftigen Energieversorgung zu fördern. Diese Ziele werden nur dann erreichbar sein, wenn alle Bereiche der Energienachfrage, also auch Kühlung und Klimatisierung, berücksichtigt werden.

Angesichts dieser Herausforderungen wurde unter dem Dach der Internationalen Energie Agentur die Fortsetzung der Forschungsarbeiten zur solar Kühlung und Klimatisierung beschlossen. Mit Herbst 2006 nimmt die nachfolgende Arbeitsgruppe im Rahmen der IEA-SHC TASK 38 „Solar Air-Conditioning and Refrigeration“ ihre internationalen Forschungsaktivitäten wieder auf und setzt auf den Erkenntnissen der abgeschlossenen IEA SHC Task 25 auf.

Die neue Task 38 ist in vier Subtasks strukturiert:

- Subtask A: Kompaktsysteme für Wohngebäude und kommerzielle Anwendungen im kleinen Leistungsbereich
- Subtask B: Kundenspezifische Systeme für Anwendungen im großen Nicht-Wohnbau und in der Industrie
- Subtask C: Modellbildung und Grundlagenuntersuchungen
- Subtask D: Markttransfer

Österreich ist durch die Forschungsinstitutionen AEE INTEC, Austria Solar Innovation Center, das Institut für Wärmtechnik der TU Graz und Österreichisches Forschungs- und Prüfzentrum Arsenal Gesellschaft mbH vertreten. ■

Literatur

IEA-SHC TASK 25

Task 25: International Energy Agency, Implementing Agreement on Solar Heating and Cooling, Task 25 - Solar Assisted Air Conditioning in Europe.
Internet: www.iea-shc-task25.org

Henning 2003: Henning, H-M. (Hrsg.): Solar Assisted Air Conditioning in Buildings - Handbook for Planners. Springer, Wien, Dezember 2003

Diese Broschüre basiert teilweise auf einem Vorlagetext herausgegeben von BINE Informationsdienst in Deutschland.

Notizen

www.iea-shc-task25.org

IEA-SHC TASK 25



© SCI Cristal/St. Denis la Reunion