



## **Solare Klimatisierung von Gebäuden – eine Übersicht**

Hans-Martin Henning

Solar unterstützte Klimatisierung stellt eine vielversprechende Nutzung der Solarenergie in Gebäuden – insbesondere im Nicht-Wohnungsbau – dar. Sommerliche Gebäudeklimatisierung hat zwei Hauptaufgaben zu erfüllen: die Kontrolle der Raumlufttemperatur durch die angepasste Abfuhr von sensiblen Wärmelasten und die Kontrolle der Raumluftfeuchte durch die angepasste Abfuhr von latenten Lasten. Zugleich ist immer eine ausreichende Zufuhr von Frischluft zu gewährleisten.

Während die Temperaturkontrolle sowohl durch den Austausch von Luft als auch über entsprechend gekühlte Flächen wie z.B. Kühldecken erfolgen kann, ist die Abfuhr von Feuchtelasten generell nur durch die Luftbehandlung möglich [1].

Beide genannten Anforderungen können durch Kältemaschinen in Verbindung mit entsprechender Klima-Anlagen-Technik erfüllt werden. Insofern ist ein möglicher Weg zur solaren Gebäudeklimatisierung der Betrieb von thermisch angetriebenen Kältemaschinen mit Solarwärme. Alternativ sind aber auch thermisch angetriebene Verfahren möglich, die über offene sorptive Prozesse direkt eine Luftbehandlung erlauben. Diese Verfahren werden als sorptionsgestützte Klimatisierung (SGK) bezeichnet. Tabelle 1 fasst die wichtigsten Charakteristika der verschiedenen Verfahren zusammen.

Bei den geschlossenen Verfahren mit festem Sorptionsmittel ist ein quasi-kontinuierlicher Betrieb nur durch die Verwendung von mindestens zwei parallel betriebenen Sorptionsbehältern möglich. Die Anlagen, die mit dem Stoffsystem Silikagel-Wasser arbeiten, bestehen aus zwei Adsorbern, einem Verdampfer und einem Kondensator. Während die eine Sorptionskammer durch Heißwasser regeneriert wird (d.h. das am Silikagel gebundene Wasser wird desorbiert), nimmt die andere Kammer den im Verdampfer in die Gasphase überführten Wasserdampf auf. Die dabei freiwerdende Sorptionswärme muss ebenso wie die Wärme des kondensierenden Desorbats abgeführt werden. Bislang gibt es Adsorptionskältemaschinen nur von zwei japanischen Herstellern. Ein Nachteil der Maschinen ist das große Gewicht und Volumen. Verfahren, die Salz-Ammoniak-Komplexe oder auch Salz-Hydrate verwenden, befinden sich seit vielen Jahren in der Entwicklung, allerdings sind bislang keine Anlagen marktverfügbar bzw. als Prototypen in Pilotanwendungen im Einsatz.

Tabelle 1: Übersicht über die wichtigsten Verfahren zur solaren Klimatisierung bzw. Kaltwassererzeugung. Definition Wärmeverhältnis: gelieferte Kälte pro dafür aufgewendete Wärme

Verfahren	geschlossen		offen	
	fest	flüssig	fest	flüssig <sup>1)</sup>
<b>Kältemittelkreislauf</b>	geschlossener Kältemittelumlauf		Kältemittel (Wasser) in Kontakt mit Atmosphäre	
<b>Verfahrensprinzip</b>	Kaltwassererzeugung		Luftentfeuchtung + Verdunstungskühlung	
<b>Sorptionsmittel</b>				
<b>typische Stoffsysteme (Kälte-/Sorptionsmittel)</b>	Wasser/Silikagel, Ammoniak/Salz <sup>1)</sup>	Wasser/Wasser-Lithiumbromid, Ammoniak/Wasser	Wasser/Silikagel, Wasser/Lithiumchlorid-Zellulose	Wasser/Calciumchlorid, Wasser/Lithiumchlorid
<b>marktverfügbare Technik</b>	Adsorptionskältemaschine	Absorptionskältemaschine (1-stufig, 2-stufig)	sorptionsgestützte Klimatisierung	-
<b>marktverfügbare Leistung [kW Kälte]</b>	70 - 1050 kW	50 kW - >5 MW (1-stufig) 250 kW - >5 MW (2-stufig)	20 kW - 350 kW (pro Modul)	-
<b>Wärmeverhältnis (COP)</b>	0,3 - 0,7	0,6 - 0,75 (1-stufig) 1,0 - 1,2 (2-stufig)	0,5 - >1	> 1
<b>typische Antriebstemperaturen</b>	60 - 90°C	80 - 110°C (1-stufig) 140 - 180 °C (2-stufig)	45 - 95°C	45 - 70°C
<b>Solartechnik</b>	Vakuum-Röhren, Flachkollektoren	Vakuum-Röhren	Flachkollektoren, Solarluftkollektoren	Flachkollektoren, Solarluftkollektoren

1) noch in Entwicklung

Geschlossene Kältemaschinen mit flüssigem Sorptionsmittel sind in einem breiten Leistungsbereich und in unterschiedlichen Bauformen verfügbar. Derzeit liegt die Hauptanwendung in Europa im Betrieb in Kombination mit Kraft-Wärme-Kopplung (BHKW, Fernwärme). Für die Klimatisierung werden in aller Regel Anlagen mit Wasser-LiBr eingesetzt. Neben den einstufigen Maschinen sind auch zweistufige Anlagen erhältlich, die zwar höhere Antriebstemperaturen benötigen, damit jedoch höhere Wärmeverhältnisse erreichen (ca. 1,1-1,2). Die meisten Hersteller befinden sich in den USA und Asien (Japan, China, Süd-Korea). In Europa gibt es vor allem einige Hersteller, die große Anlagen projektbezogen fertigen.

Das Verfahren der Sorptionsgestützten Klimatisierung (SGK) (engl. desiccant cooling) ist in der Literatur seit vielen Jahren bekannt. In Europa wurde es dennoch erst in den vergangenen 15 Jahren zunehmend angewendet, wobei die FCKW-Problematik ein wichtiges Argument für den Einsatz lieferte. Derzeit sind überwiegend Anlagen mit rotierenden Sorptionsrädern im Einsatz, es sind aber auch Anlagen mit periodisch geschalteten Festbettepeichern erhältlich. Die Verfahren mit flüssigen Sorptionsmitteln befinden sich dagegen noch in der Entwicklung.

### Primärenergetische Betrachtung

Das Hauptziel des Einsatzes von Solarenergie zur Gebäudeklimatisierung ist es, im Vergleich zu herkömmlichen Verfahren Energie einzusparen, ohne eine inakzeptable Verschlechterung des Raumkomforts zu bewirken. Eine einfache Betrachtung zeigt die Möglichkeiten und Grenzen der Primärenergieeinsparung durch den Einsatz solarer Klimatisierung. In die Betrachtung gehen lediglich die Arbeitszahlen bzw. Wärmeverhältnisse der verglichenen Kälteerzeugungsverfahren sowie der Umwandlungsfaktor von Primärenergie in elektrische Energie ein. Das Wärmeverhältnis einer thermisch angetriebenen Kälteerzeugung ist definiert als das Verhältnis aus erzeugter Kälte und dafür aufgewendeter Wärme. Für eine einstufige thermisch angetriebene Kälteerzeugung wurde als Wärmeverhältnis (englisch Coefficient of Performance, COP) ein Wert von 0,7 angenommen, wie es sowohl für einstufige Absorptionskältemaschinen als auch für übliche SGK-Verfahren mit Rotationsentfeuchtern typisch ist. Für zweistufige, thermische Verfahren wurde ein COP von 1,1 angesetzt. Als primärenergetischer Gesamtwirkungsgrad für die Stromerzeugung wurde 0,36 kWh Strom pro kWh Primärenergie angesetzt.

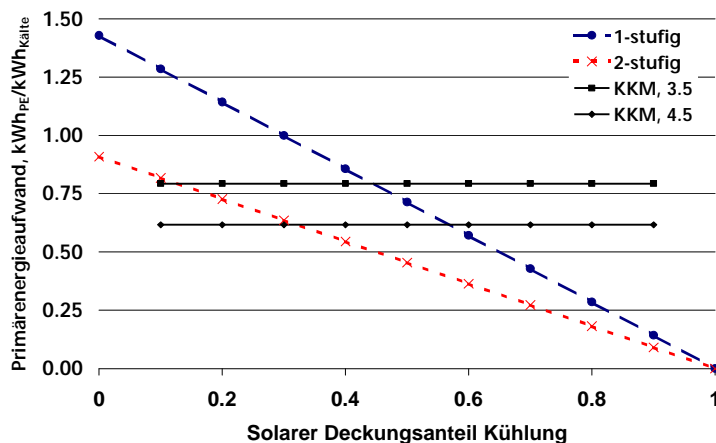


Abbildung 1: Primärenergetischer Vergleich zwischen konventioneller Kälteerzeugung und solar unterstützter thermisch angetriebener Kälteerzeugung (KKM = Kompressionskältemaschine)

Die Darstellung in Abbildung 1 zeigt den Primärenergieeinsatz für die Kältebereitstellung verschiedener Verfahren im Vergleich, wobei bei den thermischen Verfahren die Abszisse den solaren Deckungsanteil angibt. Der Abbildung ist zu entnehmen, dass alle dargestellten Verfahren bei reinem Betrieb mit Primärenergie (z.B. Erdgasbefeuerung) primärenergetisch schlechter abschneiden als konventionelle Kälteerzeugung mit modernen Kompressionskältemaschinen (dargestellte Arbeitszahl 3,5 bzw. 4,5). Dies entspricht in der Darstellung einem solaren Deckungsbeitrag von 0%. Je nach Vergleichssystem und eingesetzter thermischer Kältetechnik müssen bei den thermisch angetriebenen Verfahren zwischen 10% und 55% der Antriebswärme von der Solaranlage geliefert werden, um primärenergetisch mit moderner, konventioneller Kältetechnik gleich zu ziehen. Nur bei solaren Deckungsanteilen darüber ist eine Primärenergieersparnis erzielbar. Für den Erfolg von Techniken der solaren Klimatisierung ist es entscheidend, diesen Sachverhalt bei der Auslegung von Anlagen zur berücksichtigen.

Aus der oben dargestellten primärenergetischen Betrachtung ergibt sich, dass es vor dem Einsatz von Solarenergie zur Gebäudeklimatisierung einer behutsamen Konzipierung unter Berücksichtigung der Energiebilanz bedarf, um das Ziel einer Energieeinsparung tatsächlich zu erreichen. Hier sind unterschiedliche Ansätze bzw. Konzepte möglich, die im folgenden näher beschrieben werden. Zusätzlich sollten bei einer Planung generell weitere Wärmeverbraucher wie Heizung und Warmwasser in das Versorgungskonzept einbezogen werden, um eine möglichst hohe Ausnutzung der Solaranlage und somit zusätzliche Einspareffekte zu gewährleisten.

### Thermisch solarautarke Systemlösung

Bei einem solchen Ansatz wird auf jegliches Backup zur Klimatisierung verzichtet. Die Devise ist ‚Take, what you get‘, d.h. es wird immer soviel ‚Klimatisierung‘ bereit gestellt, wie mit der aktuell vorherrschenden Einstrahlung möglich ist, wobei natürlich durch Integration eines Speichers ein gewisser zeitlicher Ausgleich zwischen Kühllasten und Solargewinnen möglich ist. Ein solcher Ansatz ist umso erfolgversprechender, je stärker die Raumlasten durch solare Einstrahlung bedingt sind, also z.B. bei großflächig verglasten Räumen. Eine Bewertung bzw. Auslegung des Systems kann hier nicht über eine Energiebilanz oder den solaren Deckungsanteil erfolgen, sondern anhand einer statistischen Analyse der erwarteten Raumluftzustände.

Ein Beispiel für eine Anlage, die nach diesem Konzept erstellt ist, ist die mit einem Solarluftkollektor betriebene SGK-Anlage zur Klimatisierung des Seminarraums der

Industrie- und Handelskammer Südlicher Oberrhein in Freiburg (siehe weiteren Artikel von Henning, Seite 9).

## Kompressionskältemaschine als Backup

Wird eine Kompressionskältemaschine anstelle eines thermischen Backup-Systems gewählt, so ist sicher gestellt, dass nur zu den Zeiten die thermisch angetriebene Kältetechnik verwendet wird, zu denen ein Betrieb mit Solarwärme möglich ist. Damit wird die primärenergetisch ungünstige Verwendung von fossilen Brennstoffen zur thermisch angetriebenen Klimatisierung vermieden. Ein solches Verfahren wurde beispielsweise im Rahmen einer Anlagenplanung für ein Bürogebäude in Sizilien untersucht. Dabei wird entsprechend Abbildung 2 eine solar betriebene SGK-Anlage um einen nachgeschalteten Luftkühler ergänzt, der in Fällen unzureichender Temperaturabsenkung bzw. Luftentfeuchtung die Erreichung des erforderlichen Zuluftzustands sicherstellt.

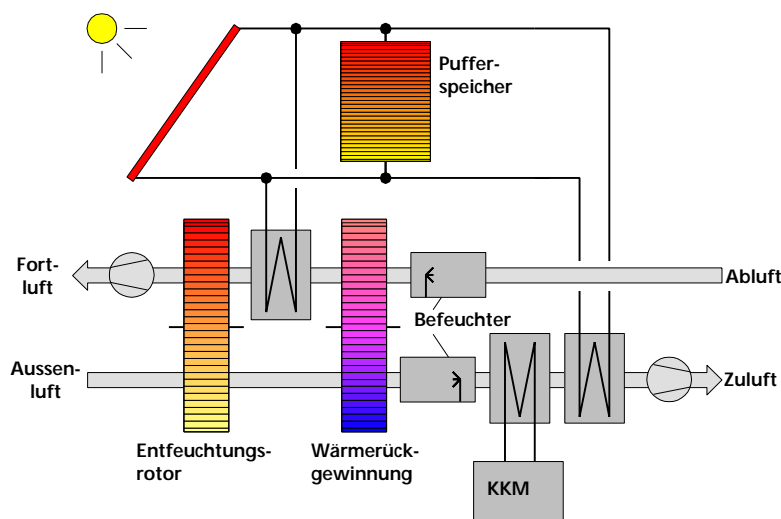


Abbildung 2: Schema einer solar betriebenen SGK-Anlage mit nachgeschaltetem Kühler, der mit Kaltwasser einer Kompressionskältemaschine (KKM) versorgt wird

In Abbildung 3 ist das Ergebnis einer Vergleichsrechnung für ein konkretes Bürogebäude, eine SGK-Lüftungsanlage mit einem festen Volumenstrom von  $1500 \text{ m}^3/\text{h}$  und unterschiedliche Auslegungsvarianten des Solarsystems dargestellt /2/. Es zeigt sich, dass bei einem solchen Konzept für alle untersuchten Solarvarianten eine deutliche Einsparung an Primärenergie im Vergleich zu einem konventionellen Referenzsystem (Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung, adiabater Kühlung und Kompressionskältemaschine) möglich ist. Zugleich wird die Bedeutung der Integration eines Pufferspeichers deutlich, insbesondere bei kleinen Kollektorflächen. Bei einer Kollektorfläche von  $30 \text{ m}^2$  bewirkt eine Verdoppelung des Speichervolumens von  $1,5 \text{ m}^3$  auf  $3 \text{ m}^3$  eine Reduktion im Primärenergieverbrauch um fast 40%.

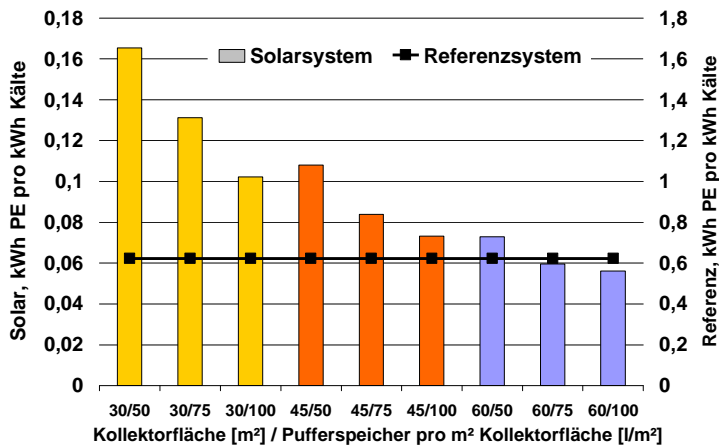


Abbildung 3: Primärenergieaufwand des Solarsystems und des Referenzsystems pro kWh bereit gestellter Luftkonditionierung. Ergebnis der Auslegung eines SGK-Systems mit Backup-Kältemaschine für ein Bürogebäude in Sizilien (Wetterdaten Catania)

### Auslegung von Systemen mit hohem solaren Deckungsanteil

Ein wesentlicher Vorteil der Nutzung von Solarenergie für die Klimatisierung im Vergleich zu anderen Anwendungen im Gebäude wie z.B. Heizung ist eine Zeitgleichheit von Lasten und Solargewinnen – zumindest im saisonalen Maßstab. Welcher solare Deckungsanteil allerdings im Einzelfall erzielbar ist, hängt jedoch entscheidend von der zeitlichen Übersteinstimmung von Kühllasten und Solargewinnen im kleineren Zeitmaßstab ab. Eine exakte Auskunft über den solaren Deckungsanteil kann im Rahmen einer Anlagenplanung nur durch eine aufwändige Simulation des Gesamtsystems bestehend aus Gebäude, Klimatisierungssystem und Solaranlage gewonnen werden. Ein entsprechendes Auslegungsprogramm wird derzeit im Rahmen von Task 25 ‚Solar Assisted Air Conditioning of Buildings‘ des Internationalen Energieagentur Solar Heating & Cooling Programmes (IEA SHC) entwickelt (siehe Artikel von Franzke, Seite XY). Die Schlüsselfrage der Übereinstimmung zwischen Solargewinnen und Kühllasten kann allerdings auch schon mit einfacheren Mitteln geklärt werden. Ein vereinfachtes Verfahren, das ebenfalls im Zusammenhang von Task 25 entstanden ist, benötigt lediglich eine Gebäudesimulation sowie eine Berechnung des Solarertrags für eine angenommene Solaranlage basierend auf einem erweiterten Brutto-Wärmeertragsverfahren.

Bei Anwendung des Verfahrens wird für einen gegebenen Kollektortyp und eine gegebene Kollektormitteltemperatur für jede Stunde des Jahres der mögliche Wärmegewinn errechnet, wobei die Kollektortemperatur je nach Anforderung (Heizung, Kühlung) unterschiedlich zu wählen ist. Die verfügbare Solarwärme wird der zur Raumklimatisierung benötigten Wärme gegenüber gestellt. Für jede Jahresstunde ergibt sich die benötigte Wärme beispielsweise aus einer einfachen thermischen Gebäudesimulation mit idealer Kühlung/Heizung, d.h. einer Kühlung/Heizung, die sicher stellt, dass in jeder Stunde der aktuelle geforderte Raumluftzustand eingehalten wird (z.B. entsprechend DIN 1946 Teil 2). Wird die für jede Stunde resultierende benötigte Wärme- bzw. Kältemenge mit einem entsprechenden Konversionsfaktor, der den globalen Wirkungsgrad der Anlagentechnik (Heiznetz, Kälte-/Klimaanlage) beschreibt, multipliziert, so resultiert die in jeder Stunde benötigte Wärmeleistung. Aus der Gegenüberstellung von Solargewinnen und Wärmelast (benötigter Wärmeleistung für Heizung bzw. sommerliche Klimatisierung) resultiert bei Auftragung aller Werte eines Jahres eine Punkteschar entsprechend Abbildung 4. Durch eine einfache Analyse dieser Daten kann der für eine gegebene Kollektorfläche erreichbare solare Deckungsbeitrag sowie die jährlichen Kollektorerträge errechnet werden. Diese beiden Größen erlauben bereits eine wichtige Vorentscheidung über die Sinnhaftigkeit der Anwendung solarer Kühlung, da eine sinnvolle Anwendung sowohl einen hohen solaren Deckungsbeitrag als auch einen vernünftigen solaren Systemertrag erfordert.

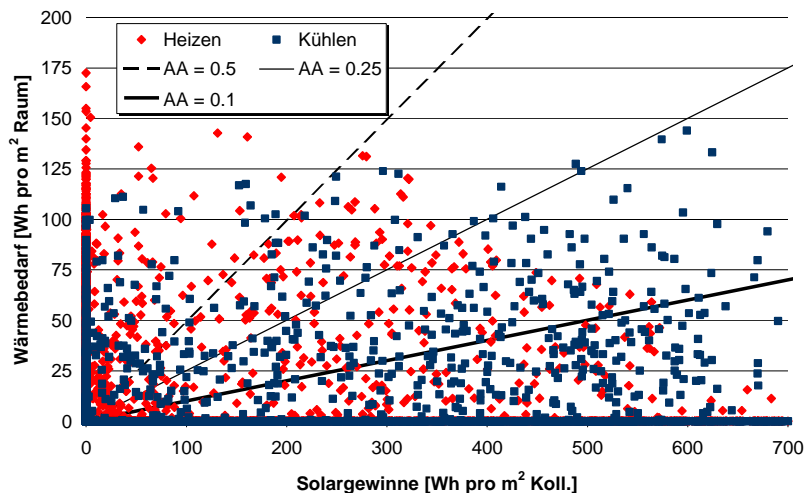


Abbildung 4: Gegenüberstellung von Solargewinnen und Wärmelast für die Klimatisierung eines Versammlungsraumes in Freiburg (Stundenwerte). Die verschiedenen Geraden gelten für unterschiedliche Werte der spezifischen Kollektorfläche AA. Punkte unterhalb einer Geraden charakterisieren einen Zustand mit höherem Solarertrag als erforderlich, Punkte oberhalb solche mit nicht ausreichendem Solarertrag.

Das Verfahren kann erweitert werden, um den Einfluss der Integration eines Speichers zu untersuchen. Dazu werden nicht mehr stündliche Werte bilanziert sondern Summenwerte mehrerer Stunden /3/.

### Systeme mit zweistufiger Kältetechnik und hocheffizienten Kollektoren

Wie Abbildung 1 zeigt, kann bei Anwendung von 2-stufiger Kältetechnik mit entsprechend höherem COP auch schon bei niedrigen solaren Deckungsanteilen eine Primärenergieeinsparung realisiert werden. Entsprechende Absorptionskältemaschinen mit einem COP im Bereich 1,1 bis 1,2 sind marktverfügbar. Allerdings gibt es keine Geräte im kleinen Leistungsbereich bis ca. 250 kW Kälteleistung und es werden generell deutlich höhere Antriebstemperaturen oberhalb von 140°C benötigt. Insofern kommen für solche Anlagen zur Wärmebereitstellung nur hocheffiziente Solarkollektoren in Frage. Eine interessante Möglichkeit ergibt sich beispielsweise in Verbindung mit vergleichsweise preisgünstigen, einachsigen konzentrierenden Parabolrinnenkollektoren, für die im Bereich von Temperaturen für solare Prozesswärme relativ günstige Wärmegestehungskosten möglich sind /4/. Solche Systeme bieten sich insbesondere in strahlungsreichen Regionen mit hohem Direktstrahlungsanteil an.

### Zusammenfassung und Ausblick

Bei entsprechender Auslegung bzw. Konzeption von Anlagen der solaren Klimatisierung können merkliche Energieeinsparungen erzielt werden. Allerdings ist bei Systemen mit einer Kopplung aus Solarkollektor und fossil befeuerter zweiter Wärmequelle zum Antrieb der Systeme ein hoher solarer Deckungsanteil notwendig, um Primärenergie einzusparen. Hier ist eine detaillierte Analyse der zeitlichen Übereinstimmung von Kühllasten und Solargewinnen erforderlich, da hierdurch wesentlich der erzielbare solare Deckungsanteil beeinflusst wird. Hier besteht ein Bedarf an geeigneten Planungshilfsmitteln für die Praxis. Im Rahmen der IEA SHC-TASK 25 unter Leitung des Fraunhofer ISE werden deshalb geeignete Auslegungsregeln und Planungsverfahren sowie ein Handbuch für Anwender erarbeitet. Zusammenfassend scheinen insbesondere Systemlösungen interessant, bei denen mit einer konventionellen, elektrisch angetriebenen Kälteerzeugung gearbeitet wird, wenn nicht solar gekühlt werden kann. Insbesondere im Verbund mit offener

Sorptionstechnik ergeben sich hier sowohl hinsichtlich der Energiebilanz als auch der Wirtschaftlichkeit aussichtsreiche Konzepte /5/.

Für die Weiterentwicklung der Systemtechnik kommt es insbesondere darauf an, hydraulisch einfache, robuste Verschaltungen einzusetzen, die regelungstechnisch gut beherrscht werden. Zugleich sind regelungstechnische Verfahren zu entwickeln, die zu jedem Zeitpunkt eine optimale Ausnutzung der verfügbaren Solarenergie sicherstellen und damit eine Minimierung des Primärenergieeinsatzes bewirken.

## **Literatur**

- /1/ Hans-Martin Henning, Aktive solarthermische Systeme für die Gebäudeklimatisierung. in: Thermische Solarenergienutzung an Gebäuden (Hrsg. Marko/Braun), Springer-Verlag 1997
- /2/ Mario Motta: Thermodynamic design and optimisation of solar assisted desiccant cooling cycles for Italian climates. PhD-Thesis Universita di Genova, 2002. Produced in cooperation with Fraunhofer ISE, Freiburg
- /3/ Hans-Martin Henning, Heino Wolkenhauer, Uwe Franzke: Auslegung von Anlagen der solaren Klimatisierung. HLH Bd. 53 (2002), Nr. 1, S. 42-49
- /4/ Solar Heat for Industrial Processes. POSHIP-Broschüre. European Commission, DG TREN, veröffentlicht 2002 (<http://www.aiguasol.com/poship.htm>)
- /5/ Hans-Martin Henning, Carsten Hindenburg: Economic study of solar assisted cooling systems. BMBF-Abschlussbericht TOS1-HMH-9905-E01

## **Autor:**

Dr. Hans-Martin Henning leitet am Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE die Gruppe 'Thermische Anlagen und Komponenten'. Seine wichtigsten Tätigkeitsgebiete sind neben der solaren Kühlung thermische Speicher (Phasenwechsel, sorptiv) und Sorptionstechnik.