Foto: H.-G. Oed/www.bmu.de

Solar autark mit Luftkollektoren

Sorptionsgestützte Klimatisierung

Im Juni 2001 wurde die erste solar autarke sorptionsgestützte Klimaanlage in Deutschland bei der Industrie- und Handelskammer Südlicher Oberrhein (IHK-SO) in Freiburg in Betrieb genommen. Die vom Freiburger Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE konzipierte Anlage hat einen Nennvolumenstrom von 10 200 m³/h. Die thermische Antriebsleistung wird im Sommer ausschließlich von einem 100 m² großen Solarluftkollektorfeld zur Verfügung gestellt.

Sorptionsgestützte Klimatisierung (SGK) ist eine der aussichtsreichsten thermisch angetriebenen Klimatisierungstechnologien zur Einbindung thermischer Solarenergie. Insbesondere das niedrige Antriebstemperaturniveau – je nach Teillastzustand zwischen 45 und 90 °C – machen diese Technologie für die Einbindung solarthermisch bereit gestellter Wärme interessant. Darüber hinaus zeichnet sich die SGK-Technologie aufgrund des Kältemittels Wasser durch eine völlige Freiheit von klassischen Kältemitteln und den damit verbundenen Umweltproblemen aus. In [1] ist der Zyklus in einer SGK-Anlage detailliert beschrieben. Hier soll der Unterschied zu den Zustandsänderungen der Zuluft einer klassischen Klimaanlage genauer betrachtet werden. In Bild 1 sind beide Prozesse in einem Temperatur-Feuchte-Diagramm eingetragen.

Grundlagen

In einer klassischen Klimaanlage (roter Pfad) finden die Abkühlung und die Entfeuchtung zeitgleich an einem Bauteil – dem Zuluftkühler – statt. Die Entfeuchtung der Außenluft geschieht durch Taupunktunterschreitung und (lokale) Kondensation überschüssiger Luftfeuchte. Bei dieser Entfeuchtung wird die Luft deutlich unter die erforderliche Zulufttemperatur abgekühlt und muss daher vor dem Raumeintritt nacherwärmt werden. In einer klassischen Klimaanlage wird also auch im Sommer der Zuluft im letzten Prozessschritt Wärme zugeführt.

Im Gegensatz dazu finden die Entfeuchtung und die Abkühlung in einer SGK (blauer Pfad) getrennt statt. Im ersten Schritt wird die Außenluft am Sorptionsrad getrocknet und danach im zweiten Schritt am Wärmerückgewinner abgekühlt. Die noch fehlende Abkühlung erreicht man durch adiabatische Befeuchtung der Zuluft. Der energetische Vorteil des Verfahrens liegt in der geringeren Gesamtenthalpiedifferenz, die bei der Zustandsänderung vom Außen- zum Zuluftzustand überwunden werden muss.

In [1] ist das prinzipielle Schema zur Einbindung von flüssigdurchströmten Solarkollektoren und eines Pufferspeichers sowie einer fossilen Nachheizung in die Systemtechnik einer SGK-Anlage dargestellt. Da in SGK-Anlagen zur Regeneration des Sorptionsrades warme bzw. heiße Luft benötigt wird, bietet sich hier auch die Anwendung von Solarluftkollektoren an. Diese erwärmen die Regenerationsluft direkt, so dass Temperaturverluste durch Wärmeübertrager eingespart werden können. In [2] wurden Untersuchungen zur Einbindung von Solarluftkollektoren in SGK-Systeme vorgestellt

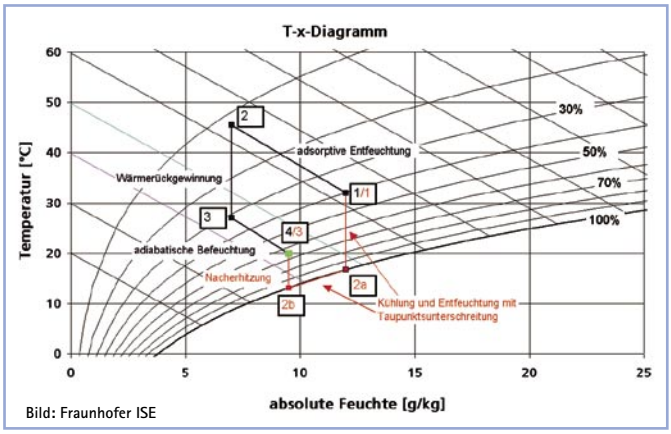

Bild: Fraunhofer ISE

Bild 1 Vergleich der Zuluftkonditionierung im SGK-Prozess und in einer klassischen Klimaanlage

Konzeption und Auslegung

Das Verwaltungsgebäude der IHK-SO wurde 1992 in zentraler Lage Freiburgs neu erbaut. Im Dachgeschoss befinden sich zwei repräsentative Versammlungsräume. Der größere Raum wird vorwiegend als Sitzungssaal genutzt und bietet auf 148 m² Platz für 100 Personen. Der kleinere Raum („Cafeteria") wird für Prüfungen, Sitzungen und kleinere Empfänge verwendet und bietet auf einer Fläche von 65 m² bis zu 20 Personen Platz. Beide Räume zusammen haben ein Raumvolumen von 815 m³.

Bild: Fraunhofer ISE

Bild 2 Innenansicht des Sitzungssaales

Die sehr transparente Architektur mit viel Tageslicht erlaubt zwar beeindruckende Aussichten über die Dächer von Freiburg hinweg bis zum Schwarzwald und in die französischen Vogesen, beeinflusst aber über die verglaste Fassade wesentlich die thermische Behaglichkeit in den Räumen bei Strahlungswetter. Während der Sitzungssaal (Bild 2) nach Osten und Westen hin komplett verglast ist, ist die Cafeteria zusätzlich auch noch nach Süden komplett verglast.

Die großen Fensterflächen beider Räume lassen sich mit außen liegenden Jalousien verschatten. Diese Verschattungseinrichtungen sind während der Kühlsaison nahezu immer geschlossen, werden aber manuell gesteuert. Zu Beginn des Pilot-Projektes waren beide Räume jeweils mit einer getrennten Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung und Zulufterhitzung, aber ohne Kühl-, Befeuchtungs- oder Entfeuchtungsfunktion ausgestattet. Aus finanziellen Gründen war beim Neubau auf eine Vollklimaanlage verzichtet worden.

Die resultierenden sommerlichen Bedingungen erforderten aber weitergehenden Handlungsbedarf. In beiden Räumen kam es nach Berichten der IHK-SO zum Teil zu sehr unangenehmen Bedingungen mit Temperaturspitzen bis zu 35 °C, bei gleichzeitig hoher relativer Raumluftfeuchte von über 50 %. Aufgrund der hohen zeitlichen Korrelation von solarer Einstrahlung und abzuführenden Kühllasten und der bereits vorhandenen Lüftungskanäle lagen sehr gute Voraussetzungen für ein Demonstrationsprojekt zur solaren sorptionsgestützten Klimatisierung vor.

Eine der Besonderheiten der Anlage ist die solarautarke Wärmeversorgung im Sommerfall. Dies bedeutet, dass die gesamte thermische Antriebsenergie im Sommer ausschließlich durch die 100 m² Solarluftkollektoranlage zur Verfügung gestellt wird. Damit geht dieses Konzept weiter als andere Anlagen der solarunterstützten Klimatisierung, in denen nur ein Teil der thermischen Antriebsenergie im Kühlfall durch die Sonne zur Verfügung gestellt wird. Darüber hinaus liefert die Solarluftkollektoranlage auch im Heizfall einen nennenswerten Beitrag zur Beheizung der Räume.

Konzeption und Auslegung der Anlagengröße erfolgten durch Simulationsrechnungen mit dem Programm TRNSYS. Dazu wurden am Fraunhofer ISE entwickelte Module für SGK-Systeme eingesetzt. Aus Investitions- und Platzgründen war es klar, dass statt der bisher zwei getrennten Lüftungsanlagen nur eine SGK-Anlage realisiert werden kann. Die vorhandenen Lüftungskanäle sollten weiterhin genutzt werden. Die maximalen Volumenströme ergaben sich daher entsprechend der vorhandenen Anlagentechnik. Der Nennvolumenstrom der SGK-Anlage beträgt 10 200 m³/h, aufgeteilt auf 7800 m³/h für den Sitzungssaal und 2400 m³/h für die Cafeteria.

In den Auslegungssimulationen wurden sowohl verschiedene Kollektorflächen, als auch die Ausrichtung der Kollektoren sowie mögliche Pufferspeicher für überschüssige Solarwärme und deren Größe untersucht. Es wurden Simulationsrechnungen mit flüssigdurchströmten Flachkollektoren und mit Solarluftkollektoren durchgeführt. Sie ergaben, dass bei einer Bruttokollektorfläche von 100 m² selektiv beschichteter Solarluftkollektoren eine solarautarke Klimatisierung der Räume mit nur geringen Überschreitungsstunden bzgl. der Temperatur- und Feuchtegrenzen nach DIN 1946-2 möglich sind.

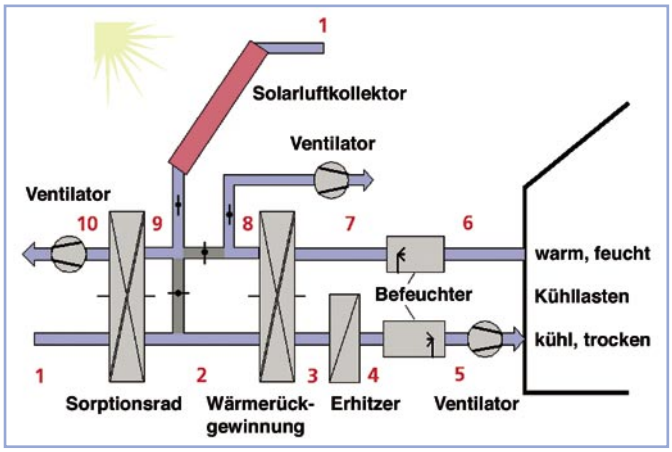

Bild 3 Prinzipschema der solaren SGK-Anlage im Sommerfall

Für das spezielle Gebäude der IHK-SO in Kombination mit der überwiegenden Tagnutzung zeigten die Simulationsrechnungen auch, dass der Verzicht auf eine Nachheizung und auf die Speicherung von überschüssiger Solarwärme möglich ist. Dadurch konnte die solare Systemtechnik stark vereinfacht und kostengünstig realisiert werden. Bild 3 zeigt das vereinfachte Schema der realisierten solaren SGK-Anlage im Sommerfall.

Die IHK-SO als Eigentümer und Nutzer der Räume zeigte sich offen für dieses neue Konzept, bei dem aus prinzipiellen, systemtechnischen Gründen klar war, dass es an einzelnen Stunden des Jahres zu einer Überschreitung der Grenzwerte nach DIN 1946-2 kommen kann.

Installation der Anlage

Die Solarluftkollektoren, Grammer Solar + Bau, Amberg, sind in vier parallelen Reihen à 25 m² angeordnet (Bild 4). Das Kollektorfeld wird mit einer maximalen Luftmenge von 8000 m³/h durchströmt. Durch die Parallelschaltung sind die Druckverluste im Kollektorfeld gering. Zur Regeneration des Sorptionsrades genügt es, auf der Regenerationsluftseite mit ca. 60 bis 80 % des Zuluftvolumenstromes zu regenerieren. Am Anfang jeder Kollektorreihe befindet sich ein Filterkollektor, an dessen Unterseite die Außenluft

Bild 4 Solarluftkollektorfeld auf dem Dach der IHK-SO

angesaugt und gefiltert wird. Die vier Reihen sind sehr flach (ca. 15°), direkt in der Ebene des Flügeldachs angeordnet. Bedingt durch die Nord-Süd-Ausrichtung der Längsachse des Gebäudes zeigen jeweils zwei Kollektorstränge in Ost- bzw. Westrichtung.

Diese Ausrichtung vereinfacht die Unterkonstruktion sehr stark (nur eine Schiene pro 2,5 m^2 Kollektorfläche) und führt somit zu einer wesentlichen Kostenreduktion. So konnte das komplette Solarluftkollektorfeld inkl. Unterkonstruktion in weniger als zwei Tagen montiert werden. Die thermische Leistung der Solarkollektoren ist im Sommerhalbjahr nur geringfügig kleiner gegenüber einer leistungsoptimierten Aufstellung im Winkel von ca. 30° nach Süden. Gerade für die sommerliche Klimatisierung kann also die flache Aufstellung der Solarkollektoranlage bei geringfügig vergrößerter Kollektorfläche wirtschaftlich interessant sein. Ferner konnten die Kollektoren auf diese Weise sehr gut in das architektonische Erscheinungsbild des Gebäudes eingefügt werden. Dieser Aspekt ist für die Akzeptanz von größeren Solarkollektorflächen nicht nur bei Architekten von großer Bedeutung.

Betriebserfahrungen

Die Inbetriebnahme der Anlage inklusive der Regelung erfolgte im Juni 2001. Die Regelung wurde vom Fraunhofer ISE in Zusammenarbeit mit dem Lüftungsgerätehersteller und einer Regelungstechnikfirma konzipiert. Die Anlage wird kontinuierlich durch die Aufzeichnung von ca. 70 Messpunkten (Temperatur, Feuchte, Volumenströme, Einstrahlung etc.) überwacht. Die Daten werden in Abständen von einer Minute aufgezeichnet und im Rahmen einer wissenschaftlichen Begleitung vom Fraunhofer ISE ausgewertet. Durch die gesammelten Erfahrungen kann in späteren Anlagen der Aufwand für Messtechnik und Monitoring deutlich reduziert werden.

Das Betriebsjahr 2002 war das erste Jahr in dem die Anlage von Januar bis Dezember komplett lief und für das auch vollständig ausgewertete Daten für das ganze Jahr vorliegen. Die Anlage war in diesem Zeitraum insgesamt 1363 Stunden in Betrieb. Diese niedrige Betriebsstundenzahl ergibt sich aus der unregelmäßigen Nutzung der Räume und der Abschaltung der Anlage zur Energieeinsparung, wenn beide Räume nicht genutzt werden.

Eine der entscheidenden Bewertungsgrößen ist die thermische Behaglichkeit (Temperatur und Feuchte), die sich in den Räumen einstellt. Im Sitzungsaal lagen in 2002 nur 56 Stunden außerhalb des Behaglichkeitsfeldes nach DIN 1946-2. Die Temperaturen im Sitzungssaal überschritten außer an zwei extrem heiße Tagen mit Außentemperaturen von bis zu 37 °C die Grenze von 27 °C nicht. Dies ist für eine solar autarke Anlage ein sehr erfreuliches Ergebnis. Die IHK-SO als Nutzer der Räume ist mit der Anlage sehr zufrieden, auch wenn durch das Fraunhofer ISE noch Verbesserungspotential durch eine weitere Optimierung der Regelung und Betriebsführung gesehen wird.

Aufgrund der Erfahrungen der ersten zwei Betriebsjahre und der Ergebnisse des wissenschaftlichen Monitorings können folgende Ergebnisse festgehalten werden, die für Planer solcher Anlagen von Bedeutung sind:

- Eine detaillierte Auslegung der Anlagen unter Einbeziehung einer gekoppelten Gebäude- und Anlagensimulation ist sehr empfehlenswert. Dies gilt insbesondere im Fall von solarautarken Konzepten.
- Das Konzept der solarautarken sorptionsgestützten Klimatisierung mit Solarluftkollektoren ist für stark verglaste Versammlungsräume mit vorwiegender Tagnutzung sehr gut geeignet. Vor einer Realisierung sollten aber im ersten Schritt die Möglichkeiten der Reduktion der Kühllasten (z. B. Anbringung einer außen liegenden Verschattung) geprüft werden. Dies kann sich für den Bauherrn mehrfach bezahlt machen, da sonst das Solarkollektorfeld unverhältnismäßig groß und unwirtschaftlich werden kann.
- Eine intensive Inbetriebnahmephase deutlich über das am Markt übliche Maß hinaus ist auch für „nichtsolare“ Klimaanlagen im Sinne einer Energiesparung dringend anzuraten.
- Regelung von Klimaanlagen unter Einbeziehung von CO_2-Raumgrenzwerten ist energetisch sinnvoll. Für die Wahl der Grenzwerte muss jedoch dringend die lokale Luftbelastung (z. B. hohes Straßenverkehrsaufkommen in der Nähe des Objektes) beachtet werden, da sonst eine ständige zu hohe Luftwechselrate hohen Hilfsenergiebedarf für die Ventilatoren nach sich zieht.
- Die sommerliche Drehzahl des Sorptionsrades ist kritisch für die Anlagenleistung. Eine zu hohe Drehzahl des Sorptionsrades kann eine suboptimale Entfeuchtungsleistung zur Folge haben. Dies sollte bei zukünftigen Anlagen unbedingt bei der Inbetriebnahme überprüft und dokumentiert werden. Je nach Typ des Sorptionsrades sind herstellerabhängig unterschiedliche Drehzahlen für den Sommerbetrieb zu wählen.
- Durch die Nutzung des Sorptionsrades im Winter als zusätzlicher Wärmerückgewinner wird eine stark erhöhte Drehzahl im Winter notwendig. Damit ergibt sich ein sehr großes Verhältnis zwischen Sommerdrehzahl (ca. 10-12 pro Stunde für viele Sorptionsräder) und Winterdrehzahl (ca. 10 pro Minute). Die mit den Rädern ausgelieferten Motoren und deren Regelung sind teilweise nicht in der Lage dieses große Drehzahlverhältnis von ca. 1:60 zu realisieren. Um eine optimale Performance sowohl im Winterfall als auch im Sommerfall zu gewährleisten, ist es daher aus Sicht des Planers zu empfehlen, diese Anforderungen bereits in das LV und später in das Abnahmeprotokoll mit aufzunehmen. Dies gilt generell für SGK-Anlagen unabhängig von der Einbindung der Solarenergie.
- Die thermische Kapazität des Luftkanalnetzes zwischen Kollektorfeldaustritt und Anlageneintritt macht sich auch bei kurzen Kanalstrecken in der Regelung stärker bemerkbar als zunächst erwartet. Die Führungsgröße zur Regelung der Regenerationstemperatur sollte daher direkt nach dem Kollektoraustritt und nicht in der Anlage vor dem Sorptionsrad gemessen werden.
- Für zukünftige Anlagen mit sehr stark schwankenden Raumanforderungen scheint eine mögliche zeitweise Teilabschaltung (z. B. mit motorischen Jalousieklappen) von Solarkollektorreihen sinnvoll, da ein potentielles Überangebot an Regenerationswärme durch das Solarkollektorfeld zu verschlechterten Zuluftbedingungen führen kann.
- Eine Erhöhung des Kollektorertrags durch Einbeziehung von Solarwärme zur Raumbeheizung außerhalb der Nutzungszeiten der Räume ist sinnvoll.
- Eine Einsparung von 20 bis 30 % der konventionellen Energie des Zulufterhitzers im Winterfall kann auch bei ungünstiger Ausrichtung der Solarluftkollektoren erreicht werden.

Ökonomische Gesichtspunkte

Die Anlage bei der IHK-SO in Freiburg ist in vielerlei Hinsicht eine besondere Anlage. Dies gilt auch für die Investitionskosten. So sind beispielsweise durch den Umbau von vormals zwei getrennten Lüftungsgeräten für die beiden Räume zu nun einem Lüf-

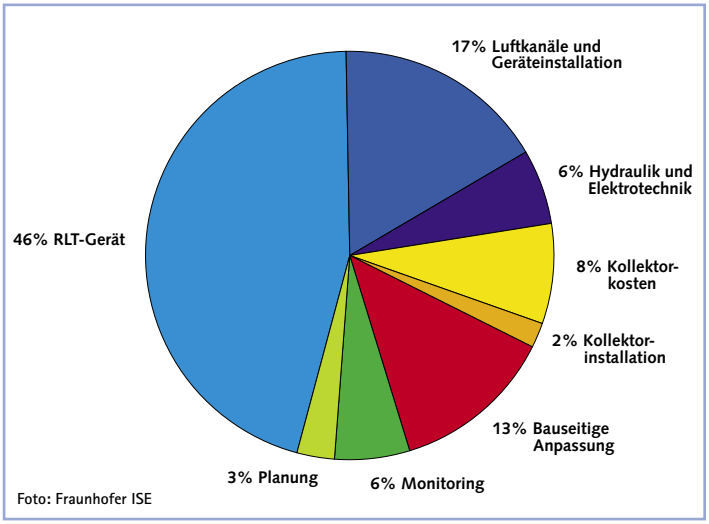

Bild 5 Verteilung Investitionskosten bei der IHK-SO-Anlage auf Kostenkategorien

tungsgerät Zusatzkosten durch aufwendige Umbauten im Technikraum entstanden. Andererseits war das komplette Lüftungskanalnetz schon vorhanden. Trotz der Besonderheiten sollen die wichtigsten ökonomischen Randdaten hier kurz dargestellt werden, da das Projekt auch in Hinblick auf die Kostensituation richtungsweisende Punkte aufzeigen kann.

Bild 5 zeigt die Verteilung der Investitionskosten auf verschiedene Kostenkategorien. Die Gesamtkosten von ca. 210 000 Euro sind Nettopreise ohne MwSt. Dies bedeutet Kosten von 20,59 Euro/(m^3/h) Nennvolumenstrom für eine Vollklimaanlage mit allen vier thermodynamischen Behandlungsfunktionen (Heizen, Kühlen, Befeuchten, Entfeuchten). Die Kosten für die SGK-Anlage dominieren mit einem Anteil von 69 % die Gesamtkosten. Davon entfallen 46 % auf das Klimagerät, 17 % auf die Geräteinstallation und die Luftkanäle und 6 % auf die Hydraulik und die Elektrotechnik.

Durch den Umbau von zwei kleineren zu einem größeren Klimagerät fielen Kosten für die bauseitige Anpassung von ca. 27 000 Euro an. Dies entspricht 13 % der Gesamtkosten. Insbesondere die räumliche Enge im Technikraum wirkte sich Kosten steigernd aus. Die Zusatzkosten für das Monitoring der Anlage belaufen sich auf ca. 5 %, wobei ein Teil der zusätzlichen Sensoren bereits beim RLT-Gerät berücksichtigt sind. Für die Planung (Ausführungsplanung, Bauleitung) fielen nur ca. 3 % der Kosten an. Dieser Wert ist bedingt durch den Pilotcharakter – ein erheblicher Teil des Planungsleistungen wurden im Projekt durch das Fraunhofer ISE geleistet – wodurch das Engagement des Planungsbüros Bühler aus Bahlingen kleiner als üblich ausfiel.

Die Kosten für die Solarluftkollektoren liegen bei nur 10 % der Gesamtinvestitionskosten. Dies entspricht durchaus der Größenordnung, die in anderen Projekten von einem guten Einkäufer noch zusätzlich ausgehandelt werden. Dieser Preis entspricht Systemkosten für die fertig installierte Kollektoranlage von 210 Euro/m^2 Bruttokollektorfläche. Bezogen auf die Absorberfläche des Kollektors (92 m^2) ergibt sich ein Systempreis von 228 Euro/m^2 was ein viel versprechender Wert für eine Kollektoranlage dieser Größenordnung, insbesondere unter dem Gesichtspunkt der solarautarken Wärmeversorgung im Kühlfall ist.

Eine kostengünstige solare Systemtechnik ist einer der Knackpunkte, um die solare Klimatisierung an die Schwelle der Wirtschaftlichkeit heranführen zu können. In diesem Projekt haben die sehr kostengünstige Unterkonstruktion und der Verzicht auf die Solarenergiespeicherung sehr deutlich zu den niedrigen Systemkosten beigetragen.

Unter dem Aspekt, dass eine Entscheidung für eine sommerliche Raumklimatisierung niemals streng wirtschaftlich gegenüber dem Verzicht auf die Klimatisierung sein kann, sollen an dieser Stelle bewusst nicht die in diesem Projekt resultierenden solaren Wärmegestehungskosten im Detail diskutiert werden. Hier sei unter Berücksichtigung des genannten Systempreises auf die Ausführungen in [2] verwiesen. Legt man diesen Preis zu Grunde, so würde nach [2] bereits ein spezifischer Kollektorertrag von 200 kWh/(m^2 a) Kollektorfläche zu spezifischen solaren Wärmegestehungskosten von ca. 0,10 Euro/kWh führen.

Nach den Erfahrungen im hier vorgestellten Pilotprojekt sind durchaus Anwendungen mit hohen Anlagenbetriebsstunden denkbar (z. B. Klimatisierung von Büroräumen die jeden Tag von 8 bis 18 Uhr genutzt werden) bei denen sogar Solarenergieerträge von ca. 400 kWh/(m^2 a) Kollektorfläche möglich sind. In diesem Pilot-Projekt lagen die Erträge bisher aufgrund der geringen Anlagenbetriebsstunden unter 150 kWh/m^2 Kollektorfläche.

Es sei an dieser Stelle dankend erwähnt, dass die GWE Gesellschaft für wirtschaftliche Energieversorgung aus Freiburg die Erstellung der Anlage durch ein Spende an die IHK-SO unterstützt hat.

Literatur

[1] Fachinstitute bieten Unterstützung an – Solare Klimatisierung eine Aufgabe für den Planer; Interview; TGA Fachplaner 9-2003, Seite 18–20

[2] Einsatz von Solarluftkollektoren in sorptionsgestützten Klimatisierungssystemen; Carsten Hindenburg, Hans-Martin Henning, Gerhard Schmitz; 8. Symposium thermische Solarenergie; Kloster Banz 1998; Otti Kolleg

Dipl. Ing. Carsten Hindenburg ist Projektleiter Solare Kühlung am Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg, und als freiberuflicher Berater tätig,
E-Mail: carsten.hindenburg@ise.fraunhofer.de

→ **FGK**

Solarunterstützte Klimatisierung

Die Querschnittsauswertung „Solarunterstützte Klimatisierungsanlagen in Deutschland" – QASUK diskutiert und bewertet die Erfahrungen aus dem praktischen Betrieb solarunterstützter Klimasysteme in Deutschland. Es werden Simulationswerkzeuge vorgestellt und der aktuelle Stand der Technik dargestellt. Der Forschungsbericht QASUK, A4, 165 Seiten, wurde jetzt vom FGK, Fachinstitut Gebäude-Klima e. V., veröffentlicht. Bestellung: FGK, Danziger Straße 20, 74321 Bietigheim-Bissingen, Telefax (0 71 42) 6 12 98, Bestellnummer 88, 13,30 Euro zzgl. MWSt. und Versandkosten. Online-Shop: www.fgk.de