

**Sorptionsgestütztes Klimatisierungssystem mit 100 m²
Solarluftkollektoren - vier Jahre Betriebserfahrungen mit
Solarenergie als einziger Wärmequelle im Sommer**



Impressum

Herausgeber:

IHK Südlicher Oberrhein
Geschäftsbereich Umwelt, Energie und Raumordnung
Schnewlinstraße 11-13 • 79098 Freiburg
gb-uer@freiburg.ihk.de • www.suedlicher-oberrhein.ihk.de

Redaktion:

Werner Reif (verantw.)/ Andrea Steuer

Autoren:

Carsten Hindenburg,
SolCoolAirCon Consulting Services
Consulting for Energy Efficient Buildings -
SolarThermal - SolarCooling – SolarAirConditioning
zuvor langjähriger Projektleiter am Fraunhofer ISE
(u.a. Projekt der IHK Südlicher Oberrhein)
Brühlweg 13 • 79291 Merdingen
carsten.hindenburg@web.de • www.solcoolaircon.com

Lena Schnabel
Fraunhofer Institut für Solare Energie Systeme ISE
Heidenhofstr. 2 • 79110 Freiburg
lena.schnabel@ise.fhg.de • www.ise.fraunhofer.de

Bilder und Grafiken:

Carsten Hindenburg,
sowie
IHK Südlicher Oberrhein

Druck:

Kniebühler Druck
Gottlieb-Daimler-Str. 1 • 79331 Teningen

– vier Jahre Betriebserfahrungen mit Solarenergie als einziger Wärmequelle im Sommer

Inhalt

	<i>Seite</i>
Einführung	4
Gebäudecharakteristik und Konzeption der Anlage	4
Technik der solar autarken sorptionsgestützten Klimatisierung der IHK-Anlage	6
Messtechnische Begleitung	7
Anlagenbetrieb	8
Raumluftzustände und Zufriedenheit der Nutzer	9
Stromverbrauch	10
Effektivität des Kollektorsystems	11
Kälteleistung und Effektivität der sorptionsgestützten Klimaanlage	12
Kostenaspekte	13
Betriebserfahrungen – wertvoll für zukünftige Anlagen	14
Zusammenfassung und Ausblick	15
Danksagung	16
Literatur	17

Einführung

In den letzten 10 Jahren wurden intensive Forschungsarbeiten zum Thema solare sorptionsgestützte Klimatisierungsanlagen (SSGK) am Fraunhofer Institut für Solare Energie Systeme ISE, Freiburg durchgeführt. Aufgrund der niedrigen Antriebstemperatur von nur 45°C bis 80°C ist diese Technologie sehr aussichtsreich für eine wirtschaftliche Anwendung von solarthermischen Systemen. Darüber hinaus zeichnet sich die SGK-Technologie durch eine völlige Freiheit von klassischen Kältemitteln und den damit verbundenen Umweltproblemen aus. Als Kältemittel kommt Wasser zum Einsatz. Für vorwiegend tagsüber genutzte Bürogebäude, insbesondere für solche mit großen Fensterflächen, gibt es eine hohe zeitliche Übereinstimmung zwischen Kühllasten im Gebäude und der verfügbaren solaren Einstrahlung. Daher wurde eine Machbarkeitsstudie für ein solar autarkes SSGK - System durchgeführt. Solar autark in diesem Zusammenhang bedeutet, dass die im Kühlfall benötigte thermische Antriebsenergie zu 100 % durch die Solaranlage zur Verfügung gestellt wird. In der Studie wurde basierend auf detaillierten Systemsimulationen ein Seminarraum betrachtet /1/. Die positiven Simulationsergebnisse der Machbarkeitsstudie führten schließlich zur Installation der ersten Pilotanlage im Gebäude der Industrie- und Handelskammer (IHK) Südlicher Oberrhein in Freiburg. Die Inbetriebnahme erfolgte im Sommer 2001.

Gebäudecharakteristik und Konzeption der Anlage

Das Gebäude der IHK Südlicher Oberrhein wurde 1992 neu erbaut. Im Dachgeschoss befinden sich zwei repräsentative Versammlungsräume. Beide Räume sind sehr großzügig verglast und haben einen sehr transparenten, leichten Charakter mit viel Tageslicht. Der große Sitzungssaal bietet bis zu 100 Personen Platz und ist nach Osten und Westen hin komplett verglast. Der Raum hat eine Fläche von 148 m² und ein Raumvolumen von 565 m³. Der kleinere Raum – die sogenannte Cafeteria – ist für ca. 15-20 Personen konzipiert und wird für Sitzungen, Prüfungen und für kleine Empfänge genutzt. Die Cafeteria ist sogar nach Osten, Süden und Westen hin komplett verglast. Der Raum hat eine Grundfläche von 65 m² und ein Raumvolumen von 250 m³. Abbildung 1 gibt einen Eindruck der Struktur der Räume anhand der Cafeteria.



Abbildung 1: Innenansicht der „Cafeteria“ im Dachgeschoss

– vier Jahre Betriebserfahrungen mit Solarenergie als einziger Wärmequelle im Sommer

Beide Räume sind mit außen liegenden Verschattungen ausgestattet, welche in der Kühlsaison nahezu immer geschlossen sind. Vor dem Beginn des Pilotprojektes waren beide Räume jeweils mit einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung, aber ohne Kühl-, Befeuchtungs- oder Entfeuchtungsfunktion ausgestattet. Die resultierenden sommerlichen Bedingungen in den beiden Räumen waren zum Teil sehr unangenehm mit Temperaturspitzen bis deutlich über 30°C bei gleichzeitig hohen relativen Raumluftfeuchten von über 50 %. Aufgrund der hohen zeitlichen Übereinstimmung von solarer Einstrahlung und abzuführenden Kühllasten und der bereits vorhandenen Lüftungskanäle, bot sich das Dachgeschoss der IHK sehr gut für ein Demonstrationsprojekt zur solaren sorptionsgestützten Klimatisierung an.

Die Anlage wurde im Juni 2001 in Betrieb genommen. Mit dem Einbau der neuen Anlage wurde das Lüftungskonzept dahingehend geändert, dass die beiden Räume nunmehr von einer gemeinsamen Anlage versorgt werden. Der Nennluftvolumenstrom der Klimaanlage beträgt 10.200 m³/h. Das Kollektorfeld besteht aus 100 m² (Bruttofläche) bzw. 92 m² (Absorberfläche) selektiv beschichteter Solarluftkollektoren (Fa. Grammer-Solar, Amberg), die in 4 parallelen Reihen mit je 10 seriell angeordneten Kollektoren verschaltet sind (siehe Abbildung 2). Am Anfang jeder Reihe befindet sich ein Filterkollektor, bei dem auf der Unterseite des Kollektors die Außenluft angesaugt und gleichzeitig gefiltert wird. Der Filterwechsel kann mit wenigen Handgriffen bewerkstelligt werden. Am Ende der vier Reihen befindet sich ein Sammelkanal, durch den der gesamte Regenerationsluftstrom von 8.000 m³/h zur Klimaanlage gefördert wird. Die Kollektorreihen sind sehr flach (ca. 15°) in der Ebene des Flügeldachs angeordnet. Bedingt durch die (im wesentlichen) Nord-Süd-Ausrichtung der Längsachse des Gebäudes zeigen jeweils zwei Kollektorstränge in Ost- bzw. Westrichtung. Diese Ausrichtung vereinfachte die Unterkonstruktion sehr stark (nur eine Schiene pro 2,5 m² Kollektorfläche) und führte somit zu einer wesentlichen Kostenreduktion. So konnte das komplette Solarluftkollektorfeld inklusive Unterkonstruktion in weniger als 2 Tagen montiert werden.



Abbildung 2:
Kollektorfeld auf dem Dach der
IHK Südlicher Oberrhein

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 nur geringfügig vergrößerter Kollektorfläche wirtschaftlich interessant sein.

Technik der solar autarken sorptionsgestützten Klimatisierung der IHK-Anlage

Innerhalb der letzten 10-15 Jahre wurden durch Forschungsarbeiten verschiedene Systemschaltungen zur solaren sorptionsgestützten Klimatisierung entwickelt und auch teilweise in Pilotanlagen in die Praxis umgesetzt. Die solare Antriebswärme wird in vielen Projekten durch flüssigkeitsdurchströmte Solarkollektoren (Flachkollektoren) in das System eingebracht (siehe Abbildung 2b).

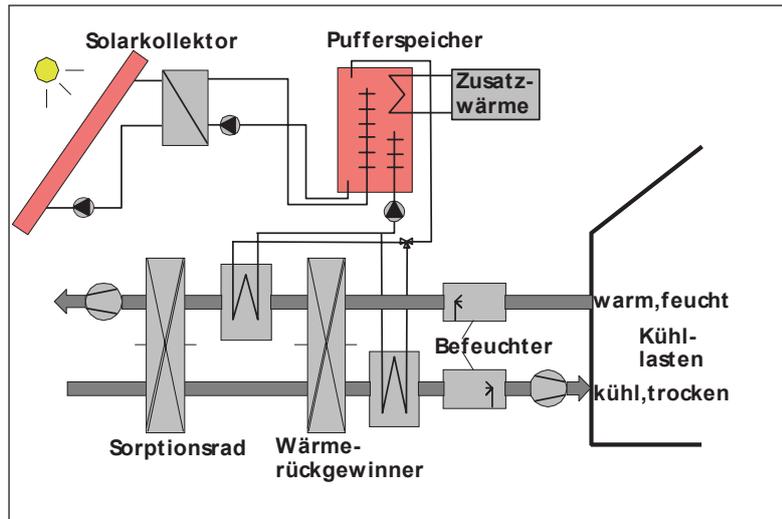


Abbildung 2b:
SSGK-System mit Puffer-
speicher und Flachkollektoren

Da zur Regeneration des Sorptionsrades heiße Luft von 45°C bis 80°C zum Einsatz kommt, ist eigentlich der Einsatz von Solarluftkollektoren naheliegend. Die Idee, das Solarsystem bei der IHK Südlicher Oberrhein durch den Einsatz von Solarluftkollektoren sowie den gleichzeitigen Verzicht auf einen Pufferspeicher *und* ein Nachheizsystem so einfach wie möglich zu halten, wurde durch die positiven Ergebnisse der Simulationsstudie unterstützt. Daher kommt bei der Pilotanlage in Freiburg ein solches solar autarkes System mit Solarluftkollektoren zum Einsatz. Das System war das erste dieser Art in Deutschland bzw. in Europa.

Eine der Besonderheiten der Pilotanlage der IHK ist die solarautarke Wärmeversorgung im Sommerfall. Dies bedeutet, dass die gesamte thermische Antriebsenergie im Sommer ausschließlich durch die Solarluftkollektoranlage zur Verfügung gestellt wird. Darüber hinaus ist das Kollektorfeld mittels Luftkanäle so an die Klimaanlage angebunden, dass die Solaranlage auch im Heizfall einen nennenswerten Beitrag zur Beheizung der Räume leistet. Damit geht dieses Konzept deutlich weiter als andere Anlagen der solarunterstützten Klimatisierung, in denen oft nur ein Teil der thermischen Antriebsenergie im Kühlfall durch die Sonne zur Verfügung gestellt wird.

Bei solar autarken Anlagen ist die Stundenzahl pro Jahr, an denen gewisse Behaglichkeitsgrenzen im Raum nicht eingehalten werden können, von großer Bedeutung. Dies gilt insbesondere für Anlagen, bei denen nicht nur auf die Nachheizung, sondern darüber hinaus auch noch auf den Pufferspeicher (zur Zwischenspeicherung von zeitweise solaren Überschüssen) verzichtet wird. In diesen Anlagen kann also von sehr kurzfristigen Kapazitätseffekten abgesehen, nur dann Wärme für den Klimatisierungsprozess bereit gestellt

– vier Jahre Betriebserfahrungen mit Solarenergie als einziger Wärmequelle im Sommer

werden, wenn auch zeitgleich die Sonne scheint. Daher kommt in diesen Anlagen einer speziellen Eigenschaft von SGK-Anlagen eine besondere Bedeutung zu: In SGK-Anlagen kann auch ohne die Zufuhr von Antriebswärme eine gewisse Temperaturabsenkung der Zuluft erreicht werden! Die Anlagen können also im Teillastbereich Kälteleistung bereitstellen, ohne dass thermische Antriebsenergie zugeführt wird. Allerdings kann die Außenluft dann nicht mehr entfeuchtet werden.

Die vorab durchgeführte Simulationsstudie konnte für die IHK zeigen, dass an weniger als 100 Stunden pro Jahr mit einer Überschreitung der Grenztemperatur von 27°C im Raum zu rechnen sei. Damit war eine wesentliche Verbesserung gegenüber dem vorherigen Ist-Zustand in Aussicht, auch wenn nicht für jede einzelne Stunde feste Raumluftzustände zugesagt werden konnten. Daher entschied sich die IHK, mit Unterstützung durch die wissenschaftliche Begleitung durch das Fraunhofer ISE und einer finanziellen Förderung der Pilotanlage (siehe Danksagung am Ende dieses Artikels), ein solches solar autarkes System einzusetzen.

Abbildung 3a zeigt das Prinzipschaltbild der IHK-Anlage im Kühlfall, Abbildung 3b die zugehörigen verschiedenen Prozessschritte im Temperatur-Feuchte-Diagramm. Auf der x-Achse ist die absolute Luftfeuchte in g/kg und auf der y-Achse die Temperatur in °C aufgetragen. Zunächst wird Außenluft im Sorptionsrad getrocknet und erwärmt sich dabei durch die freiwerdende Adsorptionswärme (1-2). Um die freigewordene Adsorptionswärme aus der Zuluft abzuführen, ist ein Wärmerückgewinnungsrads (WRG-Rad) nachgeschaltet. Im WRG-Rad wird auf der einen Seite die Zuluft abgekühlt (2-3) und dabei gleichzeitig die Raumabluft erwärmt (7-8).

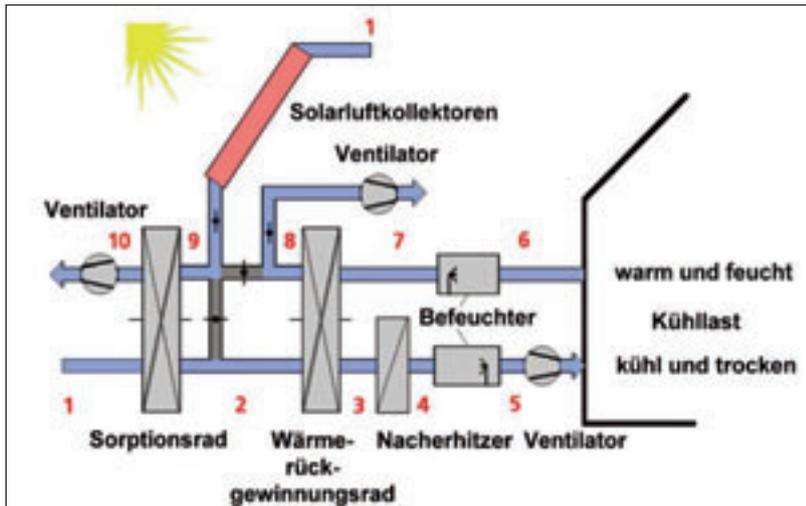


Abbildung 3a:
Systemskizze der IHK-Anlage

Damit möglichst niedrige Temperaturen in der Zuluft nach dem WRG-Rad erreicht werden können, wird die Raumabluft vor Eintritt in das WRG-Rad durch Verdunstungskühlung abgekühlt (6-7). Um die Zuluft nach dem WRG-Rad noch weiter abkühlen zu können, ist auch in der Zuluft eine adiabatische Verdunstungskühlung vorgesehen (4-5). Die Größe der erreichbaren Abkühlung (4-5) hängt stark von den Außenluftbedingungen und den Feuchtequellen im Raum ab, da die Zuluft nur so stark befeuchtet werden kann, dass die Raumluftfeuchte innerhalb der gewünschten Komfortgrenzen bleibt.

Für die Regeneration des Sorptionsrades (9-10) wird Luft möglichst hoher Temperatur und möglichst niedriger relativer Luftfeuchte benötigt. Die Regeneration wird dadurch realisiert, dass vom Kollektorfeld kommende, erwärmte Luft durch das Sorptionsrad ventiliert wird (1-9). Je nach Lastanforderung durch die klimatisierten Räume genügen Regenerationstemperaturen von 45°C bis 80°C. In Abbildung 3b ist beispielhaft ein Prozessverlauf mit einer Regenerationstemperatur von 70°C dargestellt.

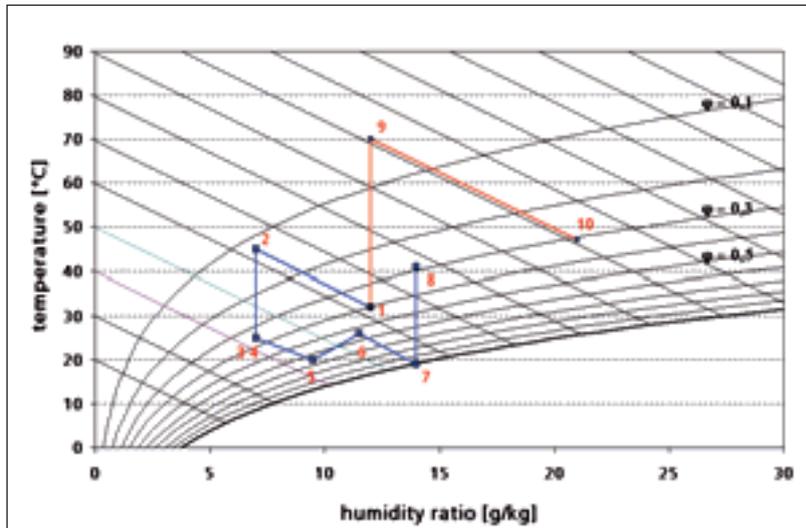


Abbildung 3b:
T-x –Diagramm für den Kühlfall

Eine richtige Dimensionierung der Anlagenkomponenten vorausgesetzt, können für die Auslegungswerte von mitteleuropäischen Standorten (zumeist 32-34°C und 12-14 g/kg) die typischen Zuluftswerte für Temperatur und Feuchte (20-22°C und 8-10 g/kg) mit monovalenten SGK-Anlagen erreicht werden. Für sehr feucht-warme Klimata (wie z.B. in küstennahen Regionen in Südeuropa) können die gewünschten Zuluftbedingungen mit monovalenten SGK-Anlagen, unabhängig davon ob solar oder fossil beheizt, an vielen Stunden nicht erreicht werden. In diesen Fällen ist eine Kombination von sorptiver Entfeuchtung und einer nach- und/oder vorgeschalteten additiven Kühlung (z.B. mit einem dann deutlich kleinerem Kompressionskälteaggregat) der Zuluft sinnvoll.

Wie bereits erwähnt, können Solarkollektorfelder auch so in SGK-Anlagen eingebunden werden, dass diese zu einer energieeffizienten Heizungsunterstützung beitragen. Dies ist für einen möglichst ökonomischen Einsatz von Solarkollektoren in Systemen der Solaren Klimatisierung von großer Bedeutung. Diese Aussage gilt insbesondere unter mitteleuropäischen Klimabedingungen, da in unseren Breiten die Heizperiode deutlich länger ist als die Kühlperiode.

In der folgenden Abbildung 4 (siehe nächste Seite) ist die Verschaltung der SGK-Anlage der IHK mit dem Solarluftkollektorfeld im Heizfall dargestellt. Die Solarluftkollektoren sind so in die Anlage eingebunden, dass bei solarer Einstrahlung (linke Graphik in Abbildung 4) im Heizfall die Außenluft über die Kollektoren angesaugt wird und sich dabei erwärmt. Aufgrund der niedrigen Wärmekapazität von Luft kann so auch eine geringe Einstrahlung schon genutzt werden. Wenn z.B. bei Außentemperaturen von 0°C die Luft mit 30°C in den Raum eingeblasen werden soll, genügt schon eine Temperaturerhöhung von 10 K im Solarluftkollektorfeld, um 30 % der zur Aufheizung der Außenluft notwendigen Energie einzusparen.

– vier Jahre Betriebserfahrungen mit Solarenergie als einziger Wärmequelle im Sommer

In der rechten Graphik von Abbildung 4 ist die interne Anlagenverschaltung für die Stunden ohne solare Einstrahlung dargestellt. In diesem Fall kann das Sorptionsrad als zusätzlicher Wärmerückgewinner betrieben werden und damit eine sehr große Effektivität des Systems erreicht werden.

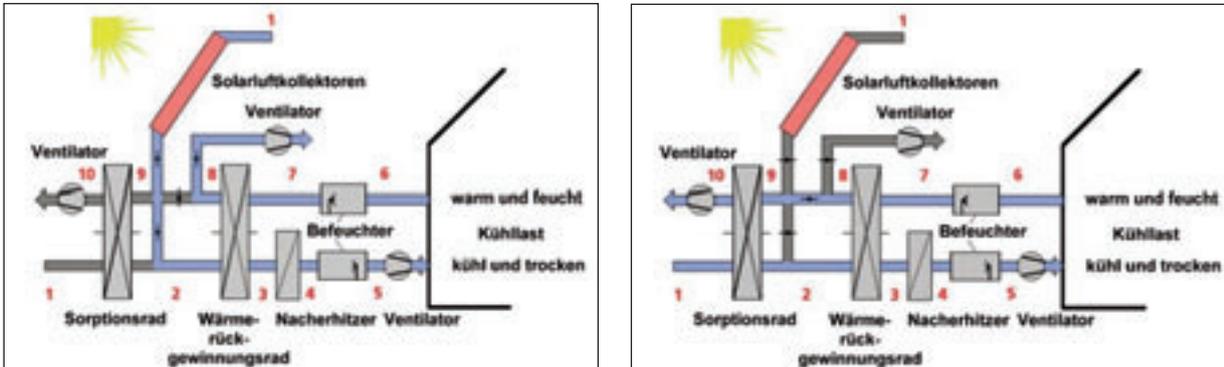


Abbildung 4: Systemverschaltung der IHK-Anlage für den Heizfall (links mit Kollektor)

Eine noch genauere Beschreibung des hier vorgestellten Systems und weitere Details zu den Betriebsmodi kann in [2] nachgelesen werden.

Messtechnische Begleitung

Die Anlage wurde über den Zeitraum von 4 Jahren kontinuierlich durch die Aufzeichnung mit ca. 70 Messwerten überwacht. Alle wesentlichen Prozessdaten wie Temperaturen und Feuchtwerte in der Anlage und in den Räumen sowie die Volumenströme in der Anlage wurden aufgezeichnet. Darüber hinaus wurden die wichtigen Regulationssignale der Befeuchter, Ventilatoren, beiden Räder wie auch der Volumenstromregler und der verschiedenen Luftklappen registriert und gespeichert. Der Gesamtstromverbrauch der Anlage wurde ebenfalls gemessen und aufgezeichnet.

Die zeitliche Auflösung der Messwerte war mit 10 Sekunden sehr hoch. Für die meisten Auswertungen war eine geringere zeitliche Auflösung ausreichend. Daher wurden die Daten in 1-Minuten Mittelwerte umgerechnet. Zur Bewertung des Systems ist wie bereits erwähnt, die Anzahl der Überschreitungsstunden von Temperaturen und Luftfeuchten in den beiden Räumen von großer Bedeutung. Ferner wird die energetische Effizienz der Anlage im folgenden durch die Energieverbräuche (Strom und Wärme) und die erreichten Solarerträge im Kühl- und Heizfall charakterisiert.

Anlagenbetrieb

Die beiden klimatisierten Räume im Dachgeschoss werden hauptsächlich für Sitzungen, Prüfungen sowie Empfänge genutzt und sind daher diskontinuierlich besetzt. Aus Gründen der Energieeinsparung wird die Anlage nur eingeschaltet, wenn mindestens einer der beiden Räume belegt ist. Um die Räume bereits bei guten Raumluftbedingungen vorzufinden, wird die Anlage ca. 1 Stunde vor der eigentlichen Nutzung von den Hausmeistern eingeschaltet bzw. die Laufzeiten für die kommende Woche eingegeben. Die Anlage wird zumeist nur tagsüber genutzt. Tabelle 1 zeigt die Stunden, an denen die Anlage in Betrieb war (nur ca. 1.300

Stunden pro Jahr) und die Zeiten an denen die Räume tatsächlich genutzt wurden. Dies wurde in den Jahren 2002 bis 2004 von den Hausmeistern der IHK Südlicher Oberrhein dankenswerter Weise sehr genau aufgezeichnet.

	Anlagen-Betriebsstunden	Cafeteria eingeschaltet	Cafeteria belegt	Sitzungssaal eingeschaltet	Sitzungssaal belegt
2002	1.335	681	506	901	623
2003	1.289	517	336	962	731
2004	1.305	709	525	919	710

Tabelle 1: Vergleich Anlagen-Betriebsstunden und Raum-Belegungsstunden, 2002 bis 2004

Raumlufzustände und Zufriedenheit der Nutzer

Die erreichten Raumlufzustände können mit der - während der Projektlaufzeit noch gültigen - DIN 1946 Teil II /3/ verglichen werden. In dieser Norm ist ein Bereich von Temperaturen und Feuchten definiert, in dem die Raumbedingungen als behaglich angesehen werden. Das Behaglichkeitsfeld nach DIN 1946 Teil II ist in Abbildung 5 rot dargestellt.

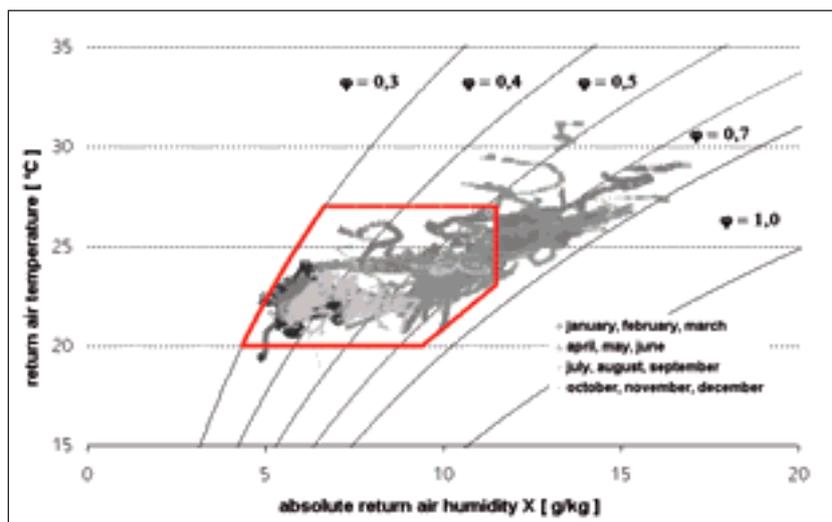


Abbildung 5: Behaglichkeitsfeld und Messwerte „Sitzungssaal“, 2003

Natürlich ist das Behaglichkeitsempfinden von verschiedenen Personen sehr unterschiedlich und so gibt es eine relative große Bandbreite von Temperatur-/Feuchtwerten, die innerhalb des sog. Behaglichkeitsfeldes liegen. Alle Wertepaare innerhalb des roten Feldes werden als behaglich definiert. Auf der y-Achse sind die Ablufttemperaturen aufgetragen und auf der x-Achse die absoluten Feuchten der Raumabluft. Die Linien gleicher relativer Luftfeuchte sind als Kurvenscharen eingetragen ($\varphi=1,0$ entspricht 100% rel. Feuchte).

Jeder Datenpunkt in Abbildung 5 repräsentiert einen 1-Minuten Mittelwert der Ablufttemperatur und Abluftfeuchte des Sitzungssaals. Es sind alle Minutenwerte eingetragen, an denen der Sitzungssaal im Jahr 2003 belegt war. Der Raumabluftzustand wurde gewählt, da dieser den mittleren Raumlufzustand gut beschreibt und auch durch die Anlagenregelung geregelt wurde. Die verschiedenen Jahreszeiten sind mit unterschiedlichen Symbolen dargestellt. Man erkennt gut, dass der Großteil der Messwerte innerhalb des Behaglichkeitsfeldes liegt. Im Frühling und

– vier Jahre Betriebserfahrungen mit Solarenergie als einziger Wärmequelle im Sommer

im Sommer liegen einige Werte (Minutenwerte !!) außerhalb des Komfortbereichs. Von diesen weisen fast alle Temperaturen unter 27°C und relative Feuchten unter 65 % auf. Nur der Grenzwert der absoluten Feuchte von 11,5 g/kg wird häufiger deutlich überschritten. Die Messwerte lagen dennoch innerhalb der Erwartungen, da in 2003 die Regelung so eingestellt war, dass der Wert der relative Feuchte von 65 % als Obergrenze maßgebend war. Die im Sitzungssaal erreichten maximalen Temperaturwerte sind angesichts des Jahrhundertssommers 2003 mit Temperaturspitzen der Außenluft (Schattentemperatur !!) von bis zu 40°C für eine Anlage, die nur von der Sonnenwärme angetrieben wird sehr beachtlich.

Um die Anzahl der Stunden an denen die Temperatur- und/oder Feuchtegrenzwerte überschritten wurden auch quantitativ zu bewerten, sind in Tabelle 2 die Werte im einzelnen dargestellt. Es sind jeweils die Werte für den Sitzungssaal und für die Cafeteria dargestellt. Aufgrund der Inbetriebnahme Ende Juni 2001, beziehen sich in 2001 nur auf den Zeitraum Juli bis Dezember. Es wird deutlich, dass die Bedingungen in der Cafeteria ungünstiger waren als im Sitzungssaal. Dies war auch aufgrund der Systemsimulationen erwartet worden, da die Cafeteria durch die fast vollständige Verglasung der Fassade, trotz außen liegender Verschattung, noch stärker durch die externen solaren Kühllasten beeinflusst wird als der Sitzungssaal.

Sitzungssaal/ Cafeteria	belegt [h]	Überschreitung Temperaturgrenze [h]	Überschreitung Feuchtegrenzen [h]
2001 (Juli bis Dezember)	287 / 278	6,1 / 37,5	22,8 / 93,4
2002	623 / 506	12,0/ 30,0	55,3 / 142,0
2003	731 / 336	11,0 / 27,8	93,6 / 81,2
2004	610 / 525	2,1 / 2,9	213,0 / 168,9

Tabelle 2: Überschreitung der Temperatur/Feuchtegrenzen, 2001 - 2004

In einer anderen Untersuchung /4/ wird nachgewiesen, dass in den Sommern 2002 bzw. 2003 die Werte der Außentemperatur um 1,5 bzw. sogar 5,2 Kelvin höher lagen als dies im Testreferenzjahr für Freiburg angenommen wird. Da in den Systemsimulationen für die IHK das Wetter des Testreferenzjahres zugrunde gelegt worden war, ist die sehr geringe Stundenzahl an denen die Temperatur von 27°C überschritten wurde sehr positiv zu bewerten.

Stromverbrauch

Der Gesamtstromverbrauch für den Monitoringzeitraum betrug 35.462 Kilowattstunden (kWh). Dieser Wert wurde durch einen zentralen Stromzähler gemessen, der alle elektrischen Verbraucher der Anlage erfasst. Für den Zeitraum Mai bis Oktober 2003 gab es leider einen Defekt des Stromzählers. Daher wurde der Stromverbrauch für diese Periode nachträglich durch Systemsimulationen, in die die Messwerte der anderen Zeiträume einfließen, ermittelt. In Tabelle 3 sind die Stromverbräuche für die verschiedenen Jahre dargestellt.

	07 – 12/ 2001	01 - 12/2002	01 – 12/ 2003	01 – 12/ 2004	gesamt
Stromverbrauch [in kWh]	6.652	9.577	9.620	9.613	35.462

Tabelle 3: Stromverbrauch Juli 2001 – Dezember 2004

Die Stromverbräuche sind generell deutlich höher, als dies basierend auf den Systemsimulationen vor Beginn der Inbetriebnahme erwartet worden war. Die Hauptgründe /5/ für den gegenüber den Simulationen erhöhten Verbrauch sind:

- Die Anlage hat einen hohen Stillstandsstromverbrauch. Dieser schwankt je nach Jahreszeit zwischen 0,2 und 0,5 kW. Der größere Wert wird durch Sicherheitsfunktionen im Winterfall verursacht (Heizungspumpe läuft auch wenn die Anlage ausgeschaltet ist, um das Zuluftheizregister gegen Frost zu schützen). Für das ganze Jahr summieren sich der Stillstandsstromverbrauch auf durchschnittlich 2.600 kWh !!
- Die Wirkungsgrade der Ventilatoren waren in den Simulationen überschätzt worden. In den Systemsimulationen während der Planungsphase wurde von einer konstanten Effektivität von 0,6 (hydraulisch zu elektrisch) ausgegangen. Diese Annahme ist zutreffend für große Volumenströme, zeitweise kann der Wirkungsgrad dann sogar noch höher sein. Aufgrund der schwankenden Raumlaster wird die Anlage aber oft mit einem wesentlich geringeren Volumenstrom gefahren. Die Detailanalyse der Messdaten ergab, dass der Zuluftvolumenstrom in den Jahren 2002 und 2003 mehr als 60 % der Betriebszeit unter 4.000 m³/h lag. Bei 4.000 m³/h beträgt der Wirkungsgrad des Ventilators aber nur noch 0,45 und bei 2.000 m³/h sogar nur noch 0,25.

Es ist wichtig zu betonen, dass die Gründe für den über der Erwartung liegenden Stromverbrauch nicht durch die Solarkomponenten begründet sind. Dies zeigt, dass die sehr hohen Stromverbräuche bei Anlagenstillstand ein generelles Thema für die energetische Optimierung von Klimaanlageanlagen ist. Dies betrifft sowohl klassisch beheizte sorptionsgestützte Klimatisierungsanlagen als auch konventionelle Klimaanlageanlagen. Insbesondere bei Anlagen wie die der IHK Südlicher Oberrhein mit nur geringeren Betriebsstunden im Jahr, sollte in Zukunft dem Stand-By Stromverbrauch besondere Beachtung geschenkt werden.

Effektivität des Kollektorsystems

Der jährliche Nutzungsgrad des Kollektorfeldes wird durch die jährliche Einstrahlung auf die Kollektorfläche und die gewonnene nutzbare Energie charakterisiert. Für ein System, in das weder ein Speicher noch eine Nachheizung eingebunden ist, ist auch die Einstrahlung nur während der Betriebszeiten von Interesse. Der Nutzungsgrad für das Solarkollektorfeld im solar autarken Klimatisierungssystem kann also auf zwei Arten definiert werden:

$$\eta_{gesamt} = \frac{Q_{solar}}{Q_{IRR,gesamt}} \quad (1)$$

$$\eta_{Betrieb} = \frac{Q_{solar}}{Q_{IRR,Betrieb}} \quad (2)$$

In Gleichung (1) ist der erzielte Solarertrag auf die Gesamteinstrahlung während des betrachteten Zeitraums bezogen. In Gleichung (2) ist der erzielte Solarertrag nur auf die Einstrahlungsenergie während der Betriebszeit der Anlage bezogen. In der folgenden Tabelle 4 sind diese Werte für die Jahre 2001 bis 2004 gegeben.

– vier Jahre Betriebserfahrungen mit Solarenergie als einziger Wärmequelle im Sommer

	gesamte Einstrahlung [kWh/ m ²]	Einstrahlung Betriebszeit [kWh/ m ²]	Kollektorsertrag [kWh/ m ²]	Kollektor-nutzungsgrad, Gesamtzeit	Kollektor-nutzungsgrad, Betrieb
07 – 12/ 2001	480	194	30	0,06	0,15
2002	1.092	371	74	0,07	0,20
2003	1.296	414	101	0,08	0,24
2004	1.092	361	102	0,09	0,28

Tabelle 4: Einstrahlungswerte und Nutzungsgrad des Kollektorfeldes

Der Nutzungsgrad des Kollektorfeldes bezogen auf die Gesamteinstrahlung ist sehr gering. Bezogen auf die Einstrahlung während der Betriebszeiten liegen die Nutzungsgrade für die kompletten Kalenderjahre zwischen 20 und 28 %. Bedenkt man, dass Kollektorserträge nur in den Betriebsmodi „Heizung“ und „Entfeuchtung“ nutzbar sind, ist das Ergebnis akzeptabel. Würde die IHK-Anlage jeden Tag von 8-18 Uhr laufen, wären die Nutzungsgrade auch signifikant höher. Dies bedeutet, dass die gleiche Technologie in typischen, ganztägig genutzten Bürogebäuden ein größeres Nutzungspotential aufweist.

Für energetische Betrachtungen ist es ferner wichtig zu bewerten, wie viel elektrische Energie aufgewendet werden musste, um die Wärme der Sonne nutzbar zu machen. Daher wurde ein elektrischer Koeffizient definiert, bei dem die Solarerträge durch den Aufwand für den Ventilator des Kollektorfeldes geteilt wurden. Dieser Koeffizient wurde für den Zeitraum Juli 2001 bis April 2003 mit 32,4 berechnet. An dieser Stelle muss betont werden, dass der Regenerationsventilator (siehe Abb. 3a/b), der die Luft durch das Solarkollektorfeld fördert, auch den erheblichen Druckverlust des Sorptionsrades überwinden muss. Dessen Druckverlust ist mindestens so groß wie der des gesamten Solarluftkollektorfeldes. Daher würde sich der Koeffizient eigentlich mindestens verdoppeln, wenn man sich nur auf den Transport der Wärme bezieht.

Kälteleistung und Effektivität der sorptionsgestützten Klimaanlage

Die Kälteleistung der Klimaanlage wird über die Bilanzierung des Außenluft- und des Zuluftzustands berechnet. Da die notwendige thermische Antriebsenergie im Kühl- und/oder Entfeuchtungsfall nur durch die Solarluftkollektoren bereitgestellt wird, ist die solare Deckungsrate im Sommer immer gleich 100%. Der thermisch angetriebene Klimatisierungsprozess kann durch den sog. „Coefficient of Performance“ kurz COP charakterisiert werden. Dieser berechnet sich aus dem Verhältnis der Kälteleistung der Klimaanlage und der Antriebsenergie zur Kühlung. Das Kürzel „thermal“ in Gleichung (3) deutet an, dass für den COP_{thermal} nur die thermische Antriebsenergie herangezogen wurde, nicht aber die elektrischen Hilfsenergien.

$$COP_{thermal} = \frac{Q_{cooling}}{Q_{solar,cooling}} = \frac{\dot{V}_{inlet} \cdot \rho \cdot (h_{ambient} - h_{inlet})}{Q_{solar,cooling}} \quad (3)$$

In Tabelle 5 sind die Werte des thermischen COP der Pilotanlage für die Jahre 2002 bis 2004 dargestellt.

	Gesamt Kälteenergie der Klimaanlage [kWh]	Kollektorerträge im Kühlfall [kWh]	COP, thermisch
01 - 12/ 2002	1.263	6.039	0,21
01 - 12/ 2003	3.068	7.982	0,38
01 - 12/ 2004	3.525	8.156	0,43

Tabelle 5: Thermischer COP der Anlage

Die Werte des durchschnittlichen thermischen COP variieren von 21% bis 43%. Der Unterschied zwischen 2002 und 2003 ist zum Teil durch die unterschiedlichen Außenbedingungen erklärbar. Der Jahrhundertssommer 2003 war zwar extrem warm, die Luftfeuchtigkeit in der Außenluft war jedoch relativ niedrig. Dies hat eine positive Auswirkung auf die Verdunstung des Wassers im Klimagerät, was wiederum zu einer Verbesserung des COP führt. Die weitere Verbesserung des COP in 2004 kommt durch weitere Regelungsverbesserung zu Stande, die basierend auf der wissenschaftlichen Begleitung vom Fraunhofer ISE empfohlen und umgesetzt worden waren.

Kostenaspekte

Die ökonomische Betrachtung von solar autarken Anlagen ist anders als die für solar unterstützte Anlagen. Durch das Ziel der solaren Vollversorgung bezüglich der Antriebswärme im Sommer muss das Kollektorfeld in Tendenz größer ausgelegt werden. Das führt wiederum tendenziell zu höheren solaren Wärmegebungskosten, da der potentielle Ertrag pro m² Kollektorfläche bei sehr großen Flächen abnimmt. Bei der IHK Südlicher Oberrhein konnten die Solarluftkollektoren mit einer einfachen, kostengünstigen Unterkonstruktion (siehe Abb. 2) auf der Dachkonstruktion befestigt werden. Dies trug, neben der einfachen Kollektorfeldhydraulik und dem Verzicht auf Nachheizung und Pufferspeicher, zu einer weiteren Reduktion der solaren Systemkosten bei. Auf diese Art und Weise konnten die Systemkosten für das Solarkollektorfeld deutlich reduziert werden.

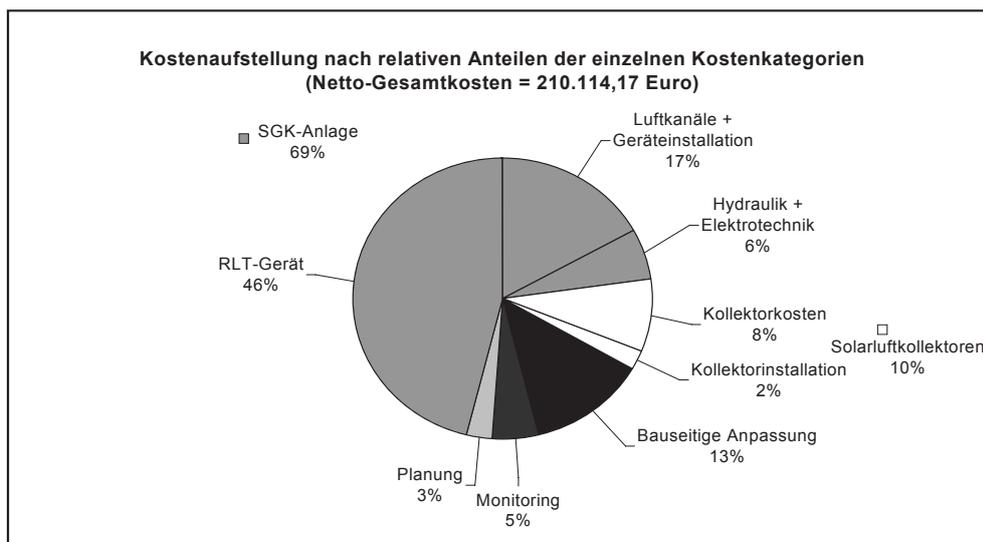


Abbildung 6: Kostenkategorien und -anteile

Wie aus Abbildung 6 ersichtlich, liegen die Kosten für die Solarluftkollektoren bei nur 10 % der Gesamtinvestitionskosten. Dies entspricht Systemkosten für die fertig installierte

– vier Jahre Betriebserfahrungen mit Solarenergie als einziger Wärmequelle im Sommer

Kollektoranlage von nur € 210 pro m² Bruttokollektorfläche. Bezogen auf die Absorberfläche des Kollektors (92 m²) ergibt sich ein Systempreis von € 228 pro m². Dies ist ein viel versprechender Wert für eine Kollektoranlage dieser Größenordnung, insbesondere unter dem Gesichtspunkt der solarautarken Wärmeversorgung im Kühlfall.

In Abbildung 6 ist ferner die Verteilung der Investitionskosten auf verschiedene Kostenkategorien dargestellt. Die Gesamtkosten von ca. € 210.000 sind Nettopreise. Dies bedeutet Kosten von € 20,6 pro m³/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. Aufgrund des Umbaus von zwei kleineren zu einem größeren Klimagerät fielen Kosten für die bauseitige Anpassung von ca. € 27.000 an. Dies entspricht 13 % der Gesamtkosten. Insbesondere die räumliche Enge im Technikraum wirkte sich kostensteigernd aus. Für die Planung (Ausführungsplanung, Bauleitung) fielen ca. 3 % der Kosten an. Dieser Wert ist bedingt durch den Pilotcharakter kleiner als üblich ausgefallen (siehe Danksagung). Die Zusatzkosten für das Monitoring der Anlage belaufen sich auf ca. 5 % der Kosten, wobei ein Teil der Kosten für die zusätzlichen Monitoringsensoren bereits in den Kosten für das RLT-Gerät enthalten ist.

Unter dem Aspekt, dass eine Entscheidung für eine sommerliche Raumklimatisierung niemals streng wirtschaftlich gegenüber dem Verzicht auf die Klimatisierung sein kann, sollen die eventuell resultierenden solaren Wärmegestehungskosten nicht im Detail diskutiert werden. Hier sei unter Berücksichtigung des genannten Systempreises von € 210 auf die Ausführungen in /1/ verwiesen. Legt man diesen Preis zu Grunde, so würde demnach bereits ein spezifischer Jahreskollektorsertrag von 200 kWh/m² Kollektorfläche zu spezifischen solaren Wärmegestehungskosten von ca. € 0,10 führen. Ein weiterer interessanter Aspekt von solar autarken Anlagen ist die Möglichkeit, tatsächlich Kosten auf der konventionellen Seite zu reduzieren, da auf das Nachheizsystem (für den Sommerfall !!) verzichtet werden kann. Das System bei der IHK Südlicher Oberrhein zeigt, dass solar autarke Klimatisierungsanlagen machbar sind, in denen das Kollektorfeld nur ca. 10 % der Gesamtinvestitionskosten ausmacht. Damit kommt man fast in den Bereich des Verhandlungsgeschicks des Einkäufers und bekommt die komplette Wärmeversorgung im Sommer „kostenlos“ mit dazu.

Betriebserfahrungen – wertvoll für zukünftige Anlagen

Aufgrund der Betriebserfahrungen und der Ergebnisse der wissenschaftlichen Begleitung durch das Fraunhofer ISE können folgende Punkte als Erfahrungen zusammengefasst werden:

- 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.
- Die thermische Kapazität des Luftkanalnetzes zwischen Solarluftkollektorfeldaustritt und Anlageneintritt macht sich in der Regelung stärker bemerkbar als erwartet. Die Führungsgröße zur Regelung der Regenerationstemperatur sollte daher direkt nach dem

Kollektorausstritt und nicht in der Anlage vor dem Sorptionsrad gemessen werden. Generell sollte wie bei der IHK geschehen auf kurze Luftleitungswege geachtet werden.

- Bei solar autarken Anlagen mit einer stark schwankenden Kühllast ist für zukünftige Anlagen auf jeden Fall über eine lastabhängige, möglichst stetig regelbare Kollektorleistung nachzudenken. Auf diese Art und Weise können zu hohe Zulufttemperaturen vermieden werden.
- Eine Erhöhung des Kollektorertrags durch Einbeziehung von Solarwärme zur Raumbeheizung außerhalb der Nutzungszeiten der Räume ist sinnvoll. Bei der Anlage der IHK können im Winter, trotz nicht für den Winterfall optimierter Aufstellung der Kollektoren, ca. 20-25 % der für die Zulufterhitzung benötigten Wärme eingespart werden.
- Die Regelung von Klimaanlage unter Einbeziehung von CO₂-Raumgrenzwerten ist energetisch sinnvoll. Für die Wahl der Grenzwerte muss jedoch dringend die lokale Luftbelastung beachtet werden, da sonst eine ständige zu hohe Luftwechselrate mit hohem Ventilatorstromverbrauch droht. Insbesondere bei Objekten im innerstädtischen Bereich ist dies zu beachten.
- Der Stromverbrauch ist bei der Auslegung und Regelungskonzeption von sorptionsgestützten Klimatisierungssystemen als kritische Größe mit in Betracht zu ziehen. Die Regelung sollte so konzipiert werden, dass die Anlage so häufig wie möglich mit einem geringem Volumenstrom betrieben wird. Der Stromverbrauch zur Durchströmung der Solarluftkollektoren ist im Vergleich zum Stromverbrauch für die Klimaanlage geringfügig, wenn das Solarluftkollektorfeld in mehrere parallel verschaltete Kollektorreihen aufgeteilt wird.
- Eine intensive Inbetriebnahmephase, deutlich über das am Markt übliche Maß hinaus, ist auch für „nichtsolare“ Klimaanlage im Sinne einer Energiesparung dringend anzuraten.
- Das Konzept der solarautarken sorptionsgestützten Klimatisierung mit Solarluftkollektoren ist für stark verglaste Versammlungsräume mit vorwiegender Tagnutzung sehr gut geeignet.

Zusammenfassung und Ausblick

Die erste solar autarke sorptionsgestützte Klimatisierungsanlage in Deutschland ist seit 2001 durchgehend in Betrieb und hat sich als technisch machbar erwiesen. Die Anlage kann im Sommer die komplette Wärme für die Kühlung ohne Nachheizung und ohne Zwischenspeicherung von thermischer Solarenergie bereitstellen. Darüber hinaus kann die Anlage auch im Heizfall ca. 20-25% der notwendigen Wärme zur Beheizung der Räume zur Verfügung stellen. Die Nutzer und Inhaber des Gebäudes, die IHK Südlicher Oberrhein sind mit der Anlage und den erzielbaren Raumluftzuständen zufrieden.

Der Ansatz, eine im Kühlfall solar autarke Klimatisierungsanlage bei trotzdem kostengünstigen Investitionskosten für das Solarsystem zu realisieren, hat sich bewährt. Insbesondere der Schritt zu einer radikal vereinfachten Solarsystemtechnik hat sich stark kostensenkend ausgewirkt. Die Kosten für das komplette Kollektorfeld inklusive Installation liegen bei nur 210 €/m² Bruttokollektorfläche, diese entspricht nur ca. 10% der Investitionskosten des Projektes. Die Kollektorfläche ist mit nur 100 m² für eine 10.000 m³/h Klimaanlage erfreulich klein. Trotzdem kommt es selbst bei extremen Außenbedingungen nur sehr selten und dann nur für wenige Stunden zu einer Überschreitung von 27°C in den Räumlichkeiten. Es hat sich bewährt,

– vier Jahre Betriebserfahrungen mit Solarenergie als einziger Wärmequelle im Sommer

die Anzahl der Überschreitungsstunden von bestimmten Temperatur- und Feuchtgrenzen vorher mit Systemsimulationen abzuschätzen und das Gespräch mit dem Betreiber hinsichtlich der Akzeptanz bezüglich weniger Überschreitungsstunden zu suchen.

In zukünftigen Anlagen sollte die Regenerationsleistung vom Solarkollektorfeld von Anfang an stetig regelbar sein, dies kann zu einer weiteren Verbesserung der Anlagenperformance beitragen. Der Stromverbrauch der Anlagen kann und sollte noch reduziert werden. Dies gilt erfreulicherweise nicht für die Einbindung der Solartechnik, sondern für den „konventionellen“ Teil der Technik. Insbesondere der Stand-By Verbrauch ist sehr groß. Es kann weder sinnvoll noch energieeffizient sein, wenn eine Klimaanlage mehr als 25 % des Jahresstromverbrauchs im Stillstand verbraucht. Hier ist die Klimatechnikbranche gefragt !

Der COP der Anlagen ist ebenfalls noch verbesserungsfähig. Verbesserungen in der Regelung als auch in der internen Verschaltung der SGK-Anlagen sind noch möglich. Beim Vergleich mit den COP-Werten von thermisch angetriebenen Kaltwassersätzen ist auf die unterschiedliche Definition des COP zu achten.

Das Projekt bei der IHK Südlicher Oberrhein ist ein gutes Beispiel dafür, dass solar autarke Klimatisierungsanlagen mit einfacher solarer Systemtechnik unter geeigneten Randbedingungen nicht nur technisch machbar, sondern auch ökonomisch darstellbar sind. Die Solartechnik ist bezüglich der Gesamtprojektkosten mit einem Kostenanteil von 10 % wahrscheinlich nicht wirklich entscheidungsrelevant!! Für Gebäude mit einem hohen Glasanteil in der Fassade und hauptsächlich Tagnutzung sind solar autarke Klimatisierungssysteme auf jeden Fall eine viel versprechende Option.

Danksagung

Die Installation der Anlage und die ersten beiden Jahre der wissenschaftlichen Begleitung wurden durch die Europäische Kommission im 5. Forschungsrahmenprogramm gefördert (DGTREN „ASODECO“ NNE5-1999- 531). Darüber hinaus wurde die IHK Südlicher Oberrhein bei der Realisierung des Projektes durch das Ministerium für Umwelt des Landes Baden-Württemberg finanziell unterstützt. Die beiden Firmen GWE Gesellschaft für wirtschaftliche Energieversorgung mbH aus Freiburg sowie das Ingenieurbüro Bühler aus Bahlingen am Kaiserstuhl haben das Projekt ebenfalls finanziell unterstützt. Nach Beendigung des ASODECO - Projektes konnte die wissenschaftliche Begleitung der Anlage durch die finanzielle Unterstützung des Bundeswirtschaftsministeriums als Demonstrationsprojekt des IEA Task 25 „Solar Air Conditioning“ bis Ende 2004 fortgesetzt werden. Das Fraunhofer ISE, die Autoren und die IHK danken hiermit der Europäischen Kommission, den Ministerien und den Unternehmen, die das Projekt unterstützt und es so erst ermöglicht haben.

Literatur

- /1/ Einsatz von Solarluftkollektoren in sorptionsgestützten Klimatisierungssystemen; Carsten Hindenburg, Hans-Martin Henning, Gerhard Schmitz; 8. Symposium thermische Solarenergie; Kloster Banz 1998; Otti Kolleg
- /2/ C. Hindenburg, L. Schnabel, T. Geucke, M. Motta. First thermally solar autonomous air conditioning system in Germany – Simulations, operation experience and economic aspects. Proceedings of the ISES Conference, Gothenborg/Sweden, June 2003.
- /3/ Deutsches Institut für Normung DIN 1946 Teil 2: Raumluftechnik/ Gesundheitstechnische Anforderungen (VDI-Lüftungsregeln), Beuth - Verlag 1994.
- /4/ J. Pfafferott, S. Herkel, A. Wagner. Sommer 2003: Müssen unsere Bürogebäude klimatisiert werden? HLH 55 (2004)
- /5/ L. Schnabel, C. Hindenburg, T. Geucke. Detailed monitoring results of the first thermally solar autonomous air conditioning system in Germany, Proceedings of the EuroSun Conference, Freiburg/Germany, June 2004.

Weiterführende Literatur

Planungshandbuch Solar Air Conditioning of Buildings des IEA Task25, Springer-Verlag, ISBN 3-211-00647-8, in englischer Sprache.

Leitfaden „Thermische Solarenergie“ der Deutschen Gesellschaft für Sonnenenergie, 7. Auflage

– vier Jahre Betriebserfahrungen mit Solarenergie als einziger Wärmequelle im Sommer

Industrie- und Handelskammer Südlicher Oberrhein

Sitz und Hauptstelle: Schnewlinstr. 11-13 | 79098 Freiburg | Postfach 8 60 | 79008 Freiburg

Tel. +49(0)761 3858-0 | Fax +49(0)761 3858-222 | E-Mail: info@freiburg.ihk.de | www.suedlicher-oberrhein.ihk.de

Hauptgeschäftsstelle: Lotzbeckstr. 31 | 77933 Lahr | Postfach 1547 | 77905 Lahr

Tel. +49(0)7821 2703-0 | Fax +49(0)7821 2703-777 | E-Mail: info@lr.freiburg.ihk.de | www.suedlicher-oberrhein.ihk.de