

REALISIERTE SOLARE KÜHLANLAGEN UND NUTZUNGSPOTENTIALE

Dr. Hans-Martin Henning
 Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
 Heidenhofstr. 2, D-79110 Freiburg
 Tel.: +49 (0) 761-4588-5134, Fax: +49 (0) 761-4588-9000
 E-Mail: hans-martin.henning@ise.fraunhofer.de

1 Einleitung

Im vorliegenden Beitrag wird auf ausgeführte Anlagen der solar unterstützten Klimatisierung eingegangen und es werden beispielhaft Ergebnisse einer umfangreichen Wirtschaftlichkeitsstudie vorgestellt.

2 Realisierte Anlagen

Auf der Folgeseite wird in Tab. 1 eine Übersicht über ausgeführte Anlagen der solaren Klimatisierung in Europa gegeben (ohne Anspruch auf Vollständigkeit) /CLIMASOL 2004/. Die meisten der insgesamt 61 Anlagen wurden in Deutschland und Spanien realisiert. Insgesamt ist eine Kälteleistung von rund 5.5 MW installiert und die hierfür installierte Kollektorfläche beträgt knapp 15700 m². Rund 60 % der Anlagen verwenden Absorptionskältemaschinen (AbKM), etwa 13 % Adsorptionskältemaschinen (AdKM) und rund 26 % offene Kühltechnik, wobei hier die Anlagen mit Sorptionsrotoren (SGK, Rotor) dominieren und bislang nur wenige Systeme mit offener Flüssigsorption (SGK, flüssig) arbeiten (siehe Abb. 1). Bei der Kälteleistung sieht die Verteilung anders aus, da die Anlagen mit Adsorptionskältetechnik im Mittel eine größere Kälteleistung aufweisen. Knapp 30 % der insgesamt installierten Kälteleistung entfallen auf Anlagen mit Adsorptionskältemaschinen. So verwenden die beiden größten Einzelanlagen Adsorptionskältemaschinen: die Anlage der Fa. Sarantis, einer Kosmetikfabrik in Griechenland sowie die Anlage des Landesamts für Umweltschutz in Augsburg, Deutschland.

Eine Verteilung der spezifischen Kollektorfläche, definiert als die Kollektorfläche pro kW installierter Kälteleistung zeigt Abb. 2. Es wird deutlich, dass eine erhebliche Schwankungsbreite der spezifischen Kollektorfläche besteht, die zwischen Werten von kleiner 1 m² pro kW bis zu 10 m² pro kW liegt. Dabei sind allerdings folgende Gesichtspunkte zu berücksichtigen:

- ♦ Die angegebene Kollektorfläche ist nicht einheitlich definiert, d.h. bei manchen Angaben bezieht sich der angegebene Wert auf die Absorberfläche, bei manchen Anlagen auf die Aperturfläche und bei anderen auf die Bruttofläche; bereits die Ermittlung einheitlicher Daten für diese Schlüsselgröße ist sehr aufwändig.
- ♦ Bei einigen Anlagen hat die Solaranlage weitere Funktionen neben dem Antrieb der thermischen Kältetechnik und dementsprechend wurde der Kollektor größer dimensioniert.
- ♦ Bei einigen Anlagen ist die Solarenergie nur eine von mehreren verwendeten regenerativen Wärmequellen. So gibt es Anlagen, bei denen z.B. ein Holzpellet-Heizkessel als primäre Wärmequelle Verwendung findet. Bei einigen Anlagen ergänzt die Solaranlage auch die Wärmebereitstellung durch ein Blockheizkraftwerk.

Dennoch sind auch Anlagen installiert, bei denen ein fossil befeuerter Kessel als Hauptwärmequelle dient und die Solaranlage nur einen vergleichsweise kleinen Beitrag

zur Antriebswärme liefert; hier ist die primärenergetische Sinnhaftigkeit kritisch zu sehen (siehe vorangehenden Beitrag /Henning 2004-I/).

| Land | Anlage, Ort | Anwendung | Kältetechnik, Kälteleistung (kW) | | | | | Solartechnik, Kollektorfläche (m ²) | | | |
|-----------------------------------|---|-----------------------------------|----------------------------------|------|------------|--------------|----------|---|------|-----|-----|
| | | | AbKM | AdKM | SGK, Rotor | SGK, flüssig | sonstige | FK | VRK | CPC | SLK |
| Deutschland | Wolfferts, Köln | Büroräume | 70 | | | | | | 176 | | |
| | Ott & Spies, Langenau | Büroräume | 35 | | | | | | 22 | | |
| | Bundespresseamt, Berlin | Büroräume | 70 | | | | | | 244 | | |
| | Fraunhofer-Institut Umsicht, Oberhausen | Büro- und Laborräume | 58 | | | | | | 108 | | |
| | Bundesverkehrsministerium, Berlin | Kältenetz | 70 | | | | | 209 | | | |
| | ZAE Bayern, Garching | Büro- und Laborräume | 7 | | | | | | 20 | | |
| | M+W Zander, Stuttgart | Büroräume | 143 | | | | | | 260 | | |
| | Technologiezentrum, Köthen | Büroräume | 15 | | | | | | 79 | | |
| | Universitätsklinikum, Freiburg | Laborräume | | 70 | | | | | 170 | | |
| | Stadtwerke, Remscheid | Büroräume | | 105 | | | | 150 | | | |
| | Bautzener Str., Dresden | Büroräume | | 71 | | | | | 156 | | |
| | Götz, Würzburg | Büroräume | | 70 | | | | | 70 | | |
| | Landesamt für Umweltschutz, Augsburg | Computerräume, Büros, Seminarraum | | 352 | | | | | 2000 | | |
| | Malteser-Krankenhaus, Kamenz | Krankenhaus | | 105 | | | | | 116 | | |
| | Industrie- und Handelskammer, Freiburg | Seminarraum | | | 60 | | | | | | 100 |
| | Ecotec, Bremen | Büroräume | | 70 | 30 | | | | 120 | | |
| | Stadtwerke, Bückeburg | Seminarraum, Foyer | | | 30 | | | | | | 100 |
| | Institut für Luft- und Kältetechnik, Dresden | Seminarraum | | | 18 | | | 20 | | | |
| | Technologieorientiertes Gründerzentrum, Riesa | Seminarraum | | | 18 | | | 20 | | | |
| | Fachhochschule, Stuttgart | Ausstellungssaal | | | 18 | | | | | | 20 |
| Fa. Maier, Alt-Hengstett | Fabrikgebäude | | | 108 | | | | | | 100 | |
| Fraunhofer-Institut ISE, Freiburg | Testanlage | | | 24 | | | 20 | | | 20 | |
| Email-Fabrik, Amberg | Büroräume | | | | 75 | | 70 | | | | |
| Griechenland | American College, Athen I | Ausbildungsräume | 168 | | | | | | 615 | | |
| | American College, Athen II | Ausbildungsräume | | | | | 7 | | 30 | | |
| | Solar Lab. Demokritos, Athen | Büro- und Laborräume | 35 | | | | | 160 | | | |
| | Rethymno Village Hotel, Rethymno | Hotel | 105 | | | | | 450 | | | |
| | Lentzakis Crete, Rethymno | Hotel | 105 | | | | | 450 | | | |
| Sarantis SA, Inofyta, Viota | Fabrikgebäude | | 700 | | | | | 2700 | | | |
| Spanien | Social and Cultural Centre Clara Campoamor, Barakaldo | Auditorium, Ausstellungsraum, ... | 229 | | | | | 150 | | | |
| | Education Department Regional Government, Toledo | Büroräume | 252 | | | | | | 750 | | |
| | Farbrica del Sol Building, Barcelona | Büroräume | 105 | | | | | | 120 | | |
| | Fundación Metrópoli Building, Madrid | Büroräume | 105 | | | | | | 72 | | |
| | Daoiz y Velarde Sports Centre, Madrid | Sportcenter | 170 | | | | | | 507 | | |
| | Head Offices of Inditex, Arteixo (La Coruna) | Büroräume | 170 | | | | | 1500 | | | |
| | Old Peoples Home, Fustinana (Navarra) | verschiedenes | 105 | | | | | | 102 | | |
| | University Rovira i Virgili, Tarragona | Büroräume | 35 | | | | | | 96 | | |
| | Head Offices of Viessmann Spain, Pinto (Madrid) | Büroräume | 105 | | | | | 105 | 6 | | |
| | Belroy Palace Hotel, Benidorm (Alicante) | Hotel | 125 | | | | | | 345 | | |
| | University of Sevilla (School of Engineers), Sevilla | Laborräume | 35 | | | | | 151 | | | |
| | University Carlos III, Leganés (Madrid) | Laborräume | 35 | | | | | 50 | 50 | | |
| | Lala Hotel, Derio (Bizkaia) | Hotel | 105 | | | | | | 160 | | |
| | CARTIF, Boecillo Technology Park, Valladolid | Büro- und Laborräume | 35 | | | | | 37.5 | 40 | | |
| | Siemens Contromatic, Corneliá del Vallés | Büroräume | 105 | | | | | | | 214 | |
| | National Institute of Aerospace Techniques INTA, Huelva | Laborräume | 10 | | | | | 25 | 18 | | |
| | FONTEDOSO, El Oso (Ávila) | Industriegebäude | 105 | | | | | | 504 | | |
| | Stella-Feuga Building, Santiago de Compostela | Büroräume | 115 | | | | | | 60 | | |
| | Pompeu i Fabra Library, Mataró | Bibliothek | | | 55 | | | | | | 105 |
| | Portugal | INETI, Lisbon | Büroräume | | | 42 | | | | | 40 |
| Atecnic, Sintra | | Büroräume | | | 57.6 | | | | | 66 | |
| Verkehrszentrale | | Büroräume, Leitzentrale | 70 | | | | | | | 663 | |
| Italien | Baxter, Trento | Büroräume, Ausstellungsfläche | 108 | | | | | 108 | | | |
| Österreich | Ökopark, Hartberg | Büroräume, Seminarraum | | | 30 | | | | 20 | | |
| | Weinbaubetrieb Peitler, Steiermark | Weinlager | 10 | | | | | 100 | | | |
| Frankreich | CSTB-Gebäude, Sophia Antipolis | Laborräume | 35 | | | | | | 63 | | |
| | DIREN-Gebäude, Guadeloupe | Büroräume | 35 | | | | | | 61 | | |
| | Weinkeller, Banuyls | Weinlager | 52 | | | | | | 130 | | |
| Holland | Verhuelst, Waalwijk | Büroräume | | | 19.5 | | | 33 | | | |
| | Energieversorger, Heemstede | Büroräume | | | 46.2 | | | 77 | | | |
| Israel | Technion, Haifa | Büroräume | | | | 8.64 | | | | 20 | |

Tab. 1 – Übersicht über realisierte Anlagen der solar unterstützten Klimatisierung in Europa (ohne Anspruch auf Vollständigkeit)

Der Mittelwert der spezifischen Kollektorfläche aller Anlagen beträgt $2.84 \text{ m}^2/\text{kW}$. In Abb. 3 ist die Verteilung der Größe der spezifischen Kollektorfläche je nach verwendeter Kälte-technik dargestellt. So kann ein Wert von $3\text{-}3.5 \text{ m}^2/\text{kW}$ als ein Anhaltspunkt für thermisch angetriebene Kältemaschinen gelten. Bei den offenen Verfahren ist eine Angabe bezogen auf die Luftmenge üblicher; hier hat sich ein Wert zwischen 8 und 10 m^2 pro $1000 \text{ m}^3/\text{h}$ installierter Luftleistung als in den meisten Fällen sinnvolle Größenordnung herausgestellt. Diese Werte sind aber nur als allererste Anhaltspunkte zu sehen und ersetzen keinesfalls eine detaillierte Anlagenauslegung.

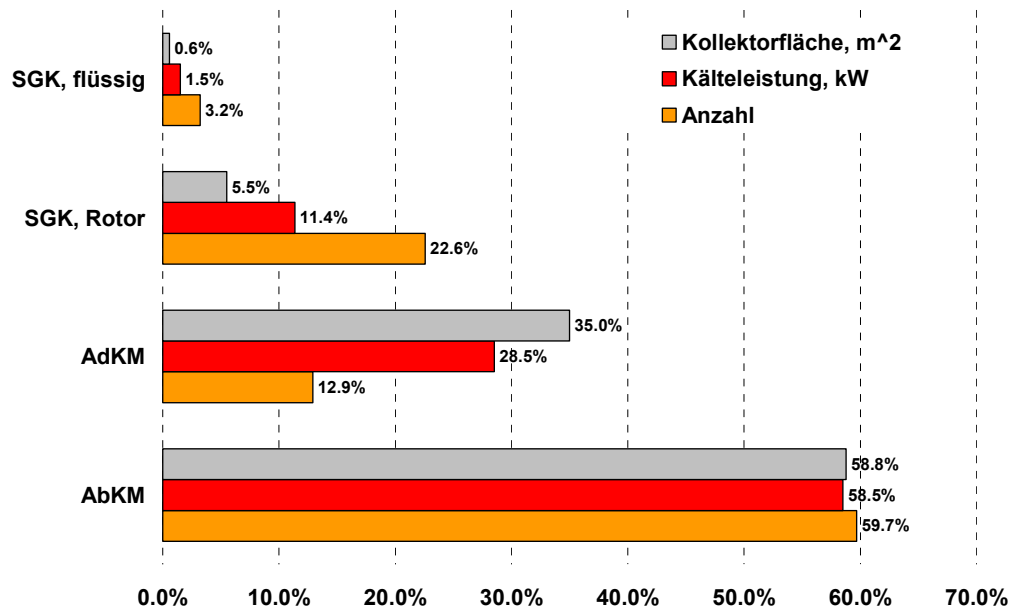


Abb. 1 – Verteilung der realisierten Anlagen hinsichtlich Anzahl, Kälteleistung und Kollektorfläche auf die unterschiedlichen Kühltechniken

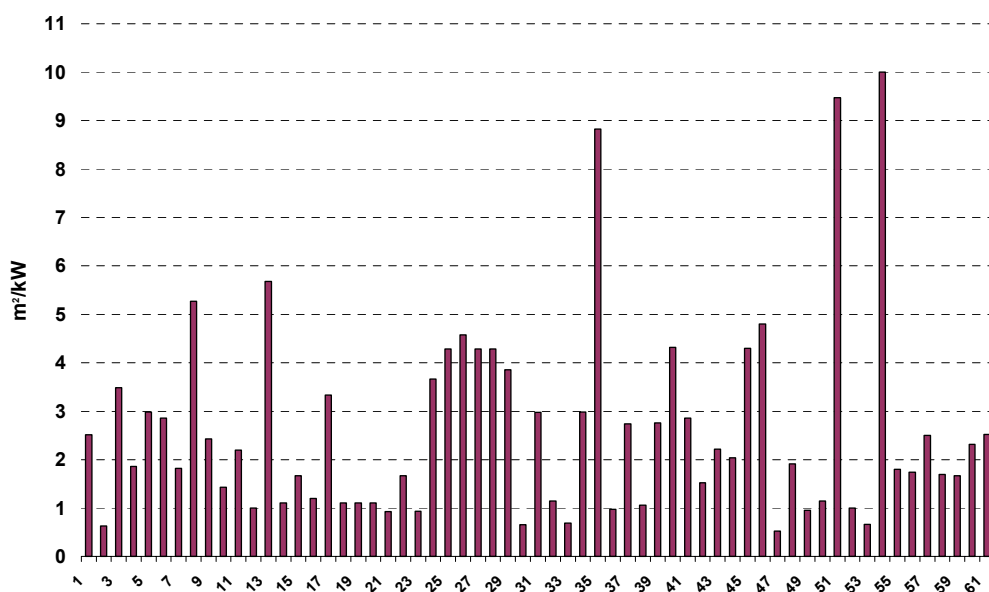


Abb. 2 – Spezifische Kollektorfläche (bezogen auf die installierte Kälteleistung)

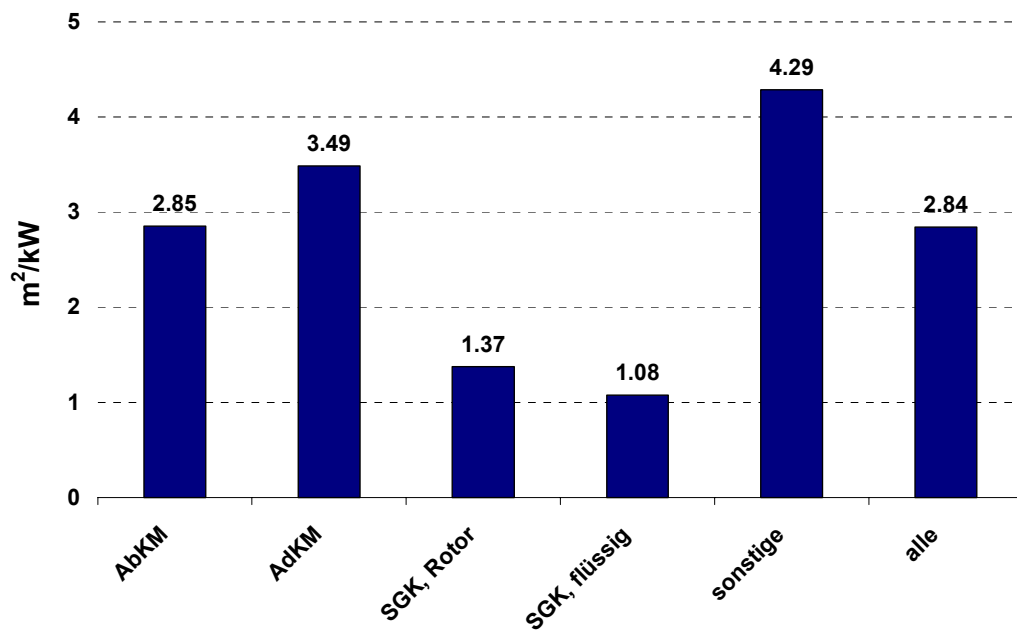


Abb. 3 – Mittlere spezifische Kollektorfläche für die unterschiedlichen Techniken

In Task 25 „Solar Assisted Air Conditioning of Buildings“, einem Projekt das derzeit unter Beteiligung von 11 Ländern im Rahmen des Solar Heating & Cooling Programme der Internationalen Energie-Agentur (IEA) durchgeführt wird, werden 11 Anlagen in 6 Ländern durch ein begleitendes Meßprogramm vermessen und die Ergebnisse dokumentiert. Das Meßprogramm endet im November 2004 und anschließend werden die Ergebnisse in Form eines technischen Berichts zusammengefaßt werden. Einige wichtige Hinweise, die sich bereits jetzt aus der begleitenden Vermessung ableiten lassen sind:

- ♦ Bei vielen Anlagen gibt es Mängel insbesondere im hydraulischen Design und in der Anlagenregelung. Die Auslegung des Kollektorfeldes muss eine gleichmäßige Durchströmung sicherstellen und zugleich stagnationssicher sein. Dies ist vielfach schwieriger als bei Brauchwasseranlagen wegen der höheren Betriebstemperaturen, die sich aus der Anforderung der Kältemaschinen ergeben. Eine Last-abhängige Regelung der Antriebstemperatur (Vorlauftemperatur) der Kältemaschine kann die Gesamteffizienz erhöhen, erfordert jedoch eine ausgeklügelte Regelung, die zugleich fehleranfälliger ist. Ein hydraulisches Design, das eine Umfahrung des Wärmespeichers ermöglicht, ist ebenfalls u.U. energetisch sinnvoll, macht jedoch die Regelung wiederum komplexer. Hier gilt es, den richtigen Kompromiss zwischen Komplexität und Effizienz zu finden. Im Zweifelsfall ist es sinnvoller, ein robustes, zuverlässiges, regelungstechnisch handhabbares Konzept zu wählen.
- ♦ In vielen Fällen wurden die erwarteten Energieeinsparungen nicht in vollem Umfang erreicht. Grund ist vielfach ein unerwartet hoher Energieverbrauch für Hilfskomponenten wie den Kühlturm oder die Ventilatoren in Lüftungsanlagen. Dies sind vielfach allerdings Probleme, die sich auf die klassischen Komponenten beziehen und auch in üblichen Anlagen bestehen. Hier wurden sie jedoch durch die intensive meßtechnische Begleitung offensichtlich.
- ♦ Generell muß eine höherer Planungsaufwand einkalkuliert werden, da die Systeme notwendigerweise komplexer als konventionelle Anlagen sind.
- ♦ Eine umfangreiche Inbetriebnahme-Phase ist unabdingbar, um die Einregelung der Komponenten sicherzustellen und alle möglichen Betriebszustände zu testen. Nur

dann können Probleme, wie z.B. die Ladung des Wärmespeichers durch die konventionelle Backup-Wärmequelle oder ein fortwährender Betrieb des Kühlturmventilators – auch dann, wenn gar keine Rückkühlung benötigt wird – rechtzeitig erkannt werden.

- ◆ Letztlich empfiehlt sich auch für Anlagen, die nicht im Rahmen eines wissenschaftlichen Begleitprogramms beobachtet werden, eine z.B. web-basierte, kontinuierliche Anlagenüberwachung. Dies ist heute bei großen haustechnischen Anlagen ohnehin üblich und ist für die solare Klimatisierung wegen der höheren Komplexität besonders sinnvoll.

3 Technisch-wirtschaftliches Potential

Um die Situation solar unterstützter Klimatisierung hinsichtlich der aktuellen Kosten zu analysieren, wurde im Rahmen des von der EU unterstützten Projekts SACE Solar Air Conditioning in Europe /Wiemken 2003/ ein Simulationsprogramm entwickelt, mit dem mit wenig Aufwand eine Vielzahl unterschiedlicher Systemvarianten und –auslegungen untersucht und verglichen werden kann. Details über das Programm und die der Analyse zu Grunde liegenden Annahmen können /Henning, 2004-II/ entnommen werden.

3.1 Vorgehen

Um die Wirtschaftlichkeit solar unterstützter Klimatisierungssysteme zu untersuchen, muß eine Jahresenergiebilanz für die solar unterstützte Variante sowie für eine konventionelle Vergleichsvariante erstellt werden. Dabei sind alle Energieströme einschließlich der Hilfsenergien für Pumpen, Ventilatoren, Kühlturm usw. zu berücksichtigen. Die Jahresenergiebilanz stellt die Grundlage zur Ermittlung der Betriebskosten der untersuchten Anlagen dar. Dabei sind die entsprechenden, gültigen Energiekosten zu Grunde zu legen. In Verbindung mit einer Ermittlung der Investitionskosten und sonstiger Kosten wie derjenigen für Planung und Wartung läßt sich letztlich eine Gesamtkostenrechnung durchführen, auf deren Basis eine Ermittlung der Wirtschaftlichkeit erfolgt.

3.2 Verfahrensbeschreibung

Die Methode, die angewendet wurde, um die Jahres-Energiebilanz eines gegebenen Solarsystems bei gegebener Anlagentechnik und Last zu ermitteln, basiert auf zwei Jahres-Zeitreihen.

Die erste Zeitreihe enthält stündliche Werte der solaren Einstrahlung auf den Solar Kollektor sowie der Außenlufttemperatur; damit können für eine bestimmte Solarkollektoranlage für einen gegebenen Standort und die aktuelle Betriebstemperatur des Solar Kollektors stündliche Werte der Solargewinne ermittelt werden. Die stündlichen Solargewinne werden dabei auf der Basis der üblichen Wirkungsgrad-Gleichung von Solar Kollektoren errechnet:

$$\eta = k(\Theta) \cdot c_0 - c_1 \cdot x - c_2 \cdot x^2 \cdot G \quad (1)$$

mit

$$x = \frac{(T_{op} - T_{umg})}{G} \quad (2)$$

Dabei bezeichnet T_{op} die Betriebstemperatur des Solarkollektors, T_{umg} die Umgebungstemperatur und G die Einstrahlung auf den Kollektor. $k(\Theta)$ ist der sogenannte Einstrahl-

Winkel-Korrekturfaktor, der die Strahlungsreduktion bei nicht senkrechtem Einfall berücksichtigt. Die Kollektorparameter c_0 , c_1 und c_2 können aus Testberichten für Solarkollektoren und entsprechenden Datenbanken gewonnen werden (z.B. /SPF 2002/).

Die zweite Zeitreihe enthält stündliche Werte der Kühl- bzw. Heizlasten des gegebenen Gebäudes für den gleichen Standort und die gleichen Klimadaten. Für die Erstellung der zweiten Zeitreihe wird ein Gebäudesimulationsverfahren benötigt, um für jede Stunde die aktuelle Heiz- bzw. Kühllast zu ermitteln. Im Rahmen der hier durchgeführten Studie wurde hierfür TRNSYS verwendet /TRNSYS, 2003/.

Basierend auf den stündlichen Werten der verfügbaren Solarwärme einerseits und der Heiz-/Kühllast andererseits, wird in dem Verfahren eine einfache Energiebilanz für ein Gesamtsystem durchgeführt. Für die Rechnungen wurden unterschiedliche Systemvarianten untersucht, die in Abb. 4 dargestellt sind. Abbildung 4a zeigt eine Anlage zur Raumklimatisierung mit einer thermischen Kältemaschine zur Bereitstellung von Kälte. Die Solarwärme wird zur Beladung eines Pufferspeichers verwendet, der zusätzlich über eine zweite Wärmequelle beladen wird, wenn seine Temperatur unter die Betriebstemperatur der Kälteanlage (Kühlperiode) bzw. des Heizungssystems fällt (Heizperiode). Abbildung 4b zeigt ein ähnliches System, bei dem jedoch in der Kühlperiode bei nicht ausreichender Solarstrahlung nicht die thermisch angetriebene Kälteanlage sondern eine zweite Kompressionskältemaschine betrieben wird. Abbildung 4c zeigt eine Anlage der sorptionsgestützten Klimatisierung (SGK) zur direkten Luftkonditionierung (Kühlung, Entfeuchtung in der Kühlperiode bzw. Heizung, Befeuchtung in der Heizperiode). Abbildung 4d zeigt ein konventionelles Referenzsystem, das als Vergleichssystem für das SGK-System in Abbildung 4c dient und Abbildung 4e ein konventionelles Referenzsystem zum Vergleich mit den Kaltwassersystemen in Abbildung 4a und Abbildung 4b.

Für die Umwandlung von Wärme in Kälte (bzw. von Primärenergie in Heizwärme) wurden konstante Werte angenommen, die von der jeweils ausgewählten Kältetechnik abhängen. Eine Zusammenfassung der verwendeten Parameter für die technischen Komponenten enthalten Tab. 2 und Tab. 3; Tab. 2 stellt die Kennwerte der verwendeten Solarkollektoren dar und Tab. 2 diejenigen der verwendeten Kühltechniken.

In der Modellierung wurde ein Wärmespeicher mit homogener Temperatur angenommen. In diesen kann die überschüssige Solarwärme eingespeichert werden, die somit zu einem späteren Zeitpunkt mit nicht ausreichender Solarwärme zur Lastdeckung zur Verfügung steht. Die Speicherbeladung ist durch eine Maximaltemperatur begrenzt (in den Rechnungen 95°C).

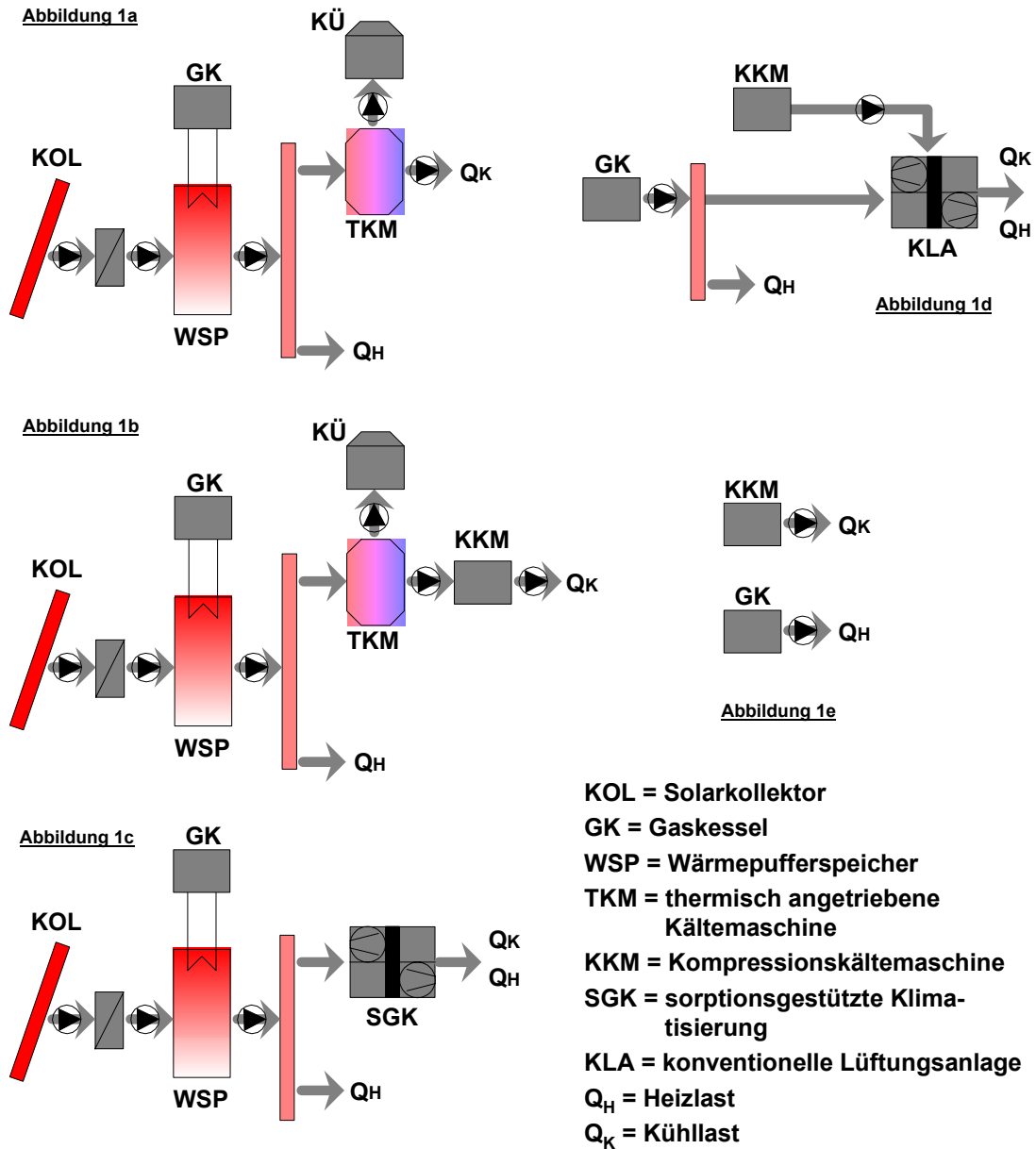


Abb. 4 – Schemata der untersuchten Systeme

| Parameter | Einheit | Flachkollektor | Vakuum-Röhren-Kollektor |
|--|------------|----------------|-------------------------|
| optischer Wirkungsgrad c_0 | - | 0.789 | 0.94 |
| linearer Anteil Wärmeverlustkoeffizient c_1 | W/m^2K | 2.88 | 2.2 |
| quadratischer Anteil Wärmeverlustkoeffizient c_2 | W/m^2K^2 | 0.018 | 0.033 |

Tab. 2 – In den Simulationsrechnungen verwendete Kollektorparameter

| Parameter | Einheit | AbKM | AdKM | SGK-Anlage | KKM | Heizungs-system |
|---------------------------------------|---------|------|------|------------|-----|-----------------|
| COP, □ | - | 0.68 | 0.6 | 0.75 | 3 | 0.9 |
| Antriebstemperatur, Vorlauftemperatur | °C | 85 | 70 | 75 | - | 45 |

Tab. 3 – Parameter der unterschiedlichen Kälteverfahren (AbKM = 1-stufige Absorptionskältemaschine, AdKM = Adsorptionskältemaschine, SGK-Anlage = Sorptionsgestützte Klimatisierung, KKM = Kompressionskältemaschine und des Heizungssystems

Aufbauend auf der dargestellten Methode wurde ein Computer-Programm entwickelt. Mit einer Vielzahl von Simulationen wurden unterschiedliche Systemkonfigurationen, Solar Kollektoren, Klimabedingungen usw. untersucht. Dabei wurden sämtliche Energieflüsse berücksichtigt, also auch der Stromverbrauch aller Pumpen, der Ventilatoren (im Kühlturm bei Kaltwassersystemen bzw. in der Lüftungsanlage bei offenen Verfahren) sowie der Wasserverbrauch für den Kühlturm bzw. für die Befeuchter. Wegen der hohen Rechengeschwindigkeit, kann in kurzer Zeit eine Vielzahl unterschiedlicher Systemvarianten simuliert und analysiert werden. Weitere Informationen sind z.B. im Handbuch „Solar Assisted Air-Conditioning in Buildings – A Handbook for Planners“ /Henning, 2004-III/ enthalten.

Obwohl das Verfahren auf Grund der Vernachlässigung des Teillastverhaltens der Kälte- bzw. klimatechnischen Komponenten sowie der Verwendung stationärer Modelle bis auf den Wärmespeicher erhebliche Vereinfachungen beinhaltet, behandelt es doch zentrale Fragestellungen der solaren Klimatisierung in einer adäquaten Weise. So wird die Schlüsselfrage der zeitlichen Übereinstimmung von Kühllast (bzw. Heizlast) und solarer Wärme auf Grund der Verwendung von Jahreszeitreihen korrekt wiedergegeben. Auch die Verwendung eines 1-Knoten-Speicher-Modells ist nicht kritisch, da die meisten thermisch angetriebenen Kühltechniken ohnehin nur eine relativ geringe Temperatur-Spreizung des Wärmeträgers erlauben. Das Verfahren gibt demnach einen recht zuverlässigen Anhaltspunkt über mögliche Energieeinsparungen durch die Verwendung der solaren Klimatisierung; für eine detaillierte Anlagenauslegung zur Untersuchung unterschiedlicher hydraulischer Konzepte oder Regelungsstrategien ist es dagegen ungeeignet.

Im Rahmen von Task 25 ‘Solar Assisted Air Conditioning of Buildings’ des Solar Heating and Cooling Programme der Internationalen Energie Agentur (IEA) wurden drei Referenzgebäude – ein Bürogebäude mit einer Nutzfläche von 930 m², ein Hotel (643 m²) und ein Seminarraum (216 m²) und sieben Referenzklimata für die Untersuchung von Systemen der solar unterstützten Gebäudeklimatisierung definiert /Henning, 2004-III/. Details über die verwendeten Gebäudedaten (Geometrie, Wandaufbauten, Fenster, interne Lasten usw.) können ebenfalls dem Handbuch (s.o. /Henning, 2004-III/) entnommen werden.

3.3 Ergebnisse einer Parameterstudie

In den folgenden Untersuchungen wurde für jedes untersuchte System am jeweiligen Standort jeweils diejenige Anlagenauslegung (Kollektorfläche, Speichergröße) für die weitere Betrachtung ausgewählt, die zum niedrigsten Wert der Kosten der eingesparten Primärenergie führt. Die Kosten der eingesparten Primärenergie sind eine kombinierte Kosten-Performance-Größe, die angibt, welcher monetäre Aufwand entsteht, um eine kWh Primärenergie einzusparen. Das Minimum dieser Größe kann z.B. als Entscheidungskriterium für eine Anlagenauslegung (Kollektorgröße, Kollektortyp, Speichergröße)

dienen. Für die Gebäude Büro und Hotel wurde von einem Kaltwassersystem ausgegangen und es wurde eine Kombination unterschiedlicher Systeme hinsichtlich der angewandten Kältetechnik (Absorption, Adsorption), hinsichtlich der eingesetzten Kolleortechnik und hinsichtlich des verwendeten Backup-Systems untersucht. Für den Seminarraum, der sich wegen der höheren Personenbelegung durch einen deutlich höheren nominellen Luftwechsel auszeichnet, wurde ein SGK-System angenommen, das mit einer konventionellen Lüftungsanlage (siehe Abb. 4) verglichen wurde.

| Last | Kollektor | Kältetechnik | Backup | A_{opt} | V_{opt} | P_{AKM} | P_{KKM} | PE-Einsparung | $Cost_{PE,spar}$ |
|-------------------|-----------|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------|------------------|
| - | - | - | - | m^2 | m^3 | kW | kW | % | €/kWh |
| Büro, 930 m^2 | FPC | AbKM | thermisch | 180 | 16.2 | 46.9 | - | 49.8% | 0.139 |
| | FPC | AbKM | KKM | 110 | 6.6 | 25 | 40.5 | 38.2% | 0.182 |
| | FPC | AdKM | thermisch | 190 | 17.1 | 46.9 | - | 56.8% | 0.196 |
| | FPC | AdKM | KKM | 120 | 7.2 | 25 | 38.4 | 40.7% | 0.250 |
| | ETC | AbKM | thermisch | 100 | 10.5 | 46.9 | - | 47.3% | 0.167 |
| | ETC | AbKM | KKM | 60 | 5.4 | 25 | 40.1 | 36.9% | 0.208 |
| | ETC | AdKM | thermisch | 90 | 9.5 | 46.9 | - | 63.5% | 0.127 |
| | ETC | AdKM | KKM | 80 | 7.2 | 25 | 38.4 | 43.0% | 0.280 |
| Hotel, 643 m^2 | FPC | AbKM | thermisch | 240 | 25.2 | 26.1 | - | 47.1% | 0.141 |
| | FPC | AbKM | KKM | 80 | 3.2 | 21.5 | 26.1 | 28.4% | 0.126 |
| | FPC | AdKM | thermisch | 220 | 22 | 26.1 | - | 52.5% | 0.147 |
| | FPC | AdKM | KKM | 140 | 8.4 | 25 | 25.2 | 45.6% | 0.155 |
| | ETC | AbKM | thermisch | 140 | 15.4 | 26.1 | - | 46.9% | 0.158 |
| | ETC | AbKM | KKM | 60 | 4.5 | 23.5 | 26.1 | 34.6% | 0.139 |
| | ETC | AdKM | thermisch | 140 | 11.2 | 26.1 | - | 53.3% | 0.167 |
| | ETC | AdKM | KKM | 90 | 8.1 | 25 | 25.2 | 46.9% | 0.177 |
| Büro, 9300 m^2 | FPC | AbKM | thermisch | 1100 | 82.5 | 468.8 | - | 39.3% | 0.061 |
| | FPC | AbKM | KKM | 500 | 30 | 250 | 405 | 30.5% | 0.070 |
| Hotel, 6430 m^2 | FPC | AbKM | thermisch | 1600 | 144 | 260.9 | - | 41.8% | 0.090 |
| | FPC | AbKM | KKM | 400 | 16 | 180 | 260.9 | 23.0% | 0.044 |
| Seminarraum | FPC | SGK | thermisch | 110 | 9.9 | - | - | 43.8% | 0.173 |

Tab. 4 – Ergebnisse der Parameterstudie (Standort Madrid); FPC bezeichnet einen Flachkollektor und ETC einen Vakuum-Röhren-Kollektor; AbKM bedeutet Absorptionskältemaschine, AdKM Adsorptionskältemaschine und KKM Kompressionskältemaschine; A_{opt} und V_{opt} bezeichnen die Kollektorgröße und das Speichervolumen der Variante mit dem niedrigsten Wert der Kosten der eingesparten Primärenergie, $Cost_{PE,spar}$; P_{AKM} und P_{KKM} sind die Nenn-Leistungen der Kältemaschinen

Eine Übersicht über die dargestellten Systemvarianten und -anwendungen geben Tab. 4 (Madrid) und Tab. 5 (Freiburg). Darin sind des Weiteren die Kollektorfläche und das Speichervolumen der ausgewählten Auslegung angegeben sowie die Leistungen der thermischen Kältetechnik und – bei Varianten mit elektrischer Kältemaschine als Backup – die Kälte-Leistung der Kompressions-Kältemaschine. Darüberhinaus sind die prozentuale Primärenergieeinsparung sowie die Kosten der eingesparten Primärenergie aufgeführt.

Neben den Untersuchungen für die oben genannten Gebäude wurde eine weitere Untersuchung für deutlich größere Lasten vorgenommen. Dafür wurden sämtliche Lasten (Heizen, Kühlen, Befeuchten, Entfeuchten) der entsprechenden Gebäude um einen Faktor 10 erhöht. Auf Grund der Degression der spezifischen Kosten der wichtigsten Systemkomponenten (Solarkollektor-Anlage, thermisch angetriebene Kältemaschine) mit der Größe ergibt sich hier ein insgesamt günstigeres Bild für die Solarvarianten.

| Last | Kollektor | Kälte-technik | Backup | A _{opt} | V _{opt} | P _{AKM} | P _{KKM} | PE-Einsparung | Cost _{PEspar} |
|----------------------------|-----------|---------------|-----------|------------------|------------------|------------------|------------------|---------------|------------------------|
| - | - | - | - | m ² | m ³ | kW | kW | % | €/kWh |
| Büro, 930 m ² | FPC | AbKM | thermisch | 240 | 25.2 | 26.9 | - | 31.2% | 0.385 |
| | FPC | AbKM | KKM | 160 | 12 | 25 | 26.3 | 28.5% | 0.392 |
| | ETC | AbKM | thermisch | 120 | 12.6 | 26.9 | - | 32.4% | 0.352 |
| | ETC | AbKM | KKM | 70 | 6.3 | 25 | 26.9 | 26.9% | 0.388 |
| Hotel, 643 m ² | FPC | AbKM | thermisch | 320 | 28.8 | 26.3 | - | 27.1% | 0.286 |
| | FPC | AbKM | KKM | 60 | 3 | 18.4 | 26.3 | 14.9% | 0.187 |
| | ETC | AbKM | thermisch | 200 | 20 | 26.3 | - | 37.2% | 0.241 |
| | ETC | AbKM | KKM | 50 | 2.3 | 18.4 | 26.3 | 18.8% | 0.194 |
| Büro, 9300 m ² | FPC | AbKM | thermisch | 1600 | 120 | 269.1 | - | 29.0% | 0.206 |
| | FPC | AbKM | KKM | 700 | 31.5 | 247.4 | 269.1 | 22.5% | 0.172 |
| Hotel, 6430 m ² | FPC | AbKM | thermisch | 1900 | 171 | 262.7 | - | 21.7% | 0.191 |
| | FPC | AbKM | KKM | 700 | 31.5 | 197.9 | 262.7 | 20.2% | 0.075 |
| Seminarraum | FPC | SGK | thermisch | 94 | 5.6 | - | - | 29.5% | 0.348 |

Tab. 5 – Ergebnisse der Parameterstudie (Standort Freiburg);
zur Erklärung siehe Tab. 4

Es wird deutlich, daß für keines der untersuchten Systeme heute eine Primärenergieersparnis mit einer Kostenersparnis einhergeht. Dies hieße, dass die Kosten der eingesparten Primärenergie zu einem negativen Wert führen. Im weiteren wurde deshalb untersucht, welche Reduktion in den Investitionskosten erforderlich wäre, um zu einem Break-Even in den Jahreskosten und damit zu einem Durchbruch in der Wirtschaftlichkeit der Solarvarianten zu gelangen. Die Ergebnisse für die betrachteten Systeme zeigen die Abbildungen Abb. 5 bis Abb. 10.

In jeder der Abbildungen sind die Gesamtjahreskosten als Funktion der Investitionskosten dargestellt. Der Punkt jeweils rechts oben beschreibt den heutigen Zustand. Der Punkt links unten ist ein theoretischer Wert und zeigt, welche Einsparung in den Jahreskosten erreicht würde, wenn die Solarvariante zu den gleichen Investitionskosten wie die konventionelle Vergleichsvariante errichtet werden könnte. Der gefüllte Punkt auf der jeweiligen Geraden stellt die Situation für eine Förderung der Kosten der Solaranlage in Höhe von 100 €/m² dar. Die Abbildungen Abb. 5 bis Abb. 10 gelten für:

- ◆ Bürogebäude (930 m²) in Madrid (Abb. 5)
- ◆ Hotel (643 m²) in Madrid (Abb. 6)
- ◆ Bürogebäude (9300 m²) und Hotel (6430 m²) in Madrid (Abb. 7)
- ◆ Bürogebäude (930 m²) und Hotel (643 m²) in Freiburg (Abb. 8)
- ◆ Bürogebäude (9300 m²) und Hotel (6430 m²) in Freiburg (Abb. 9)
- ◆ Seminarraum (216 m²) in Madrid und Freiburg (Abb. 10)

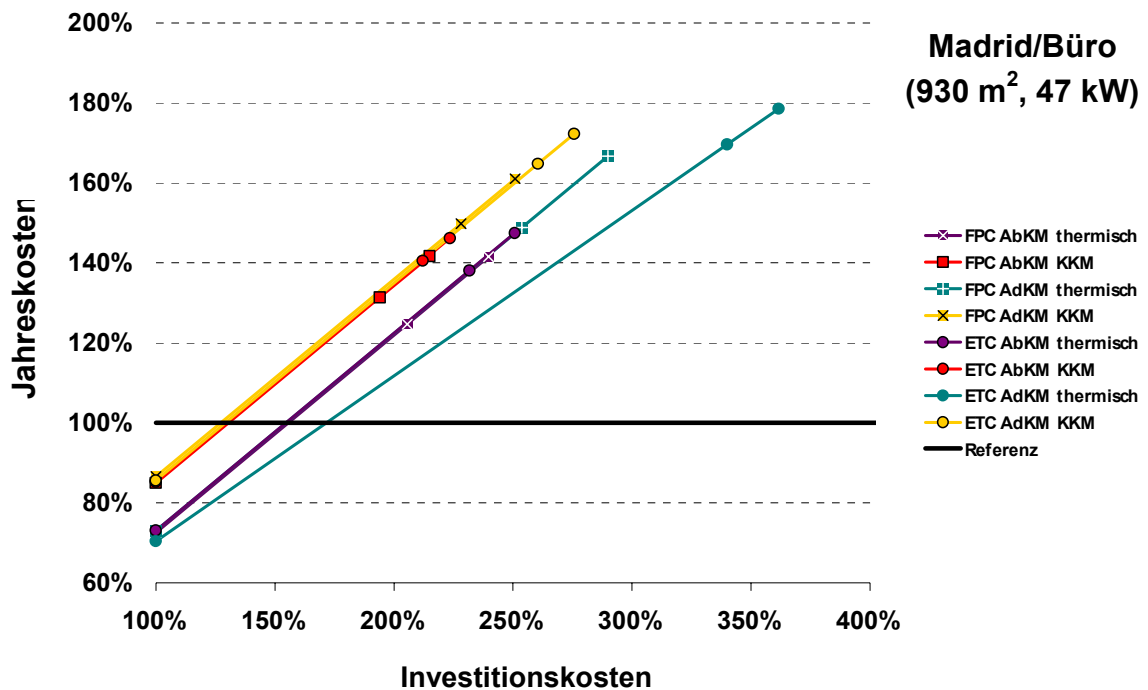


Abb. 5 – Gesamt-Jahreskosten als Funktion der Investitionskosten, jeweils in % bezogen auf das konventionelle Vergleichssystem: Madrid, Bürgebäude (930 m²). Der Endpunkt rechts oben beschreibt die aktuelle Kostensituation. Der jeweilige Punkt auf der entsprechenden Geraden gilt für eine Förderung der Kosten der Solaranlage in Höhe von 100 €/m².

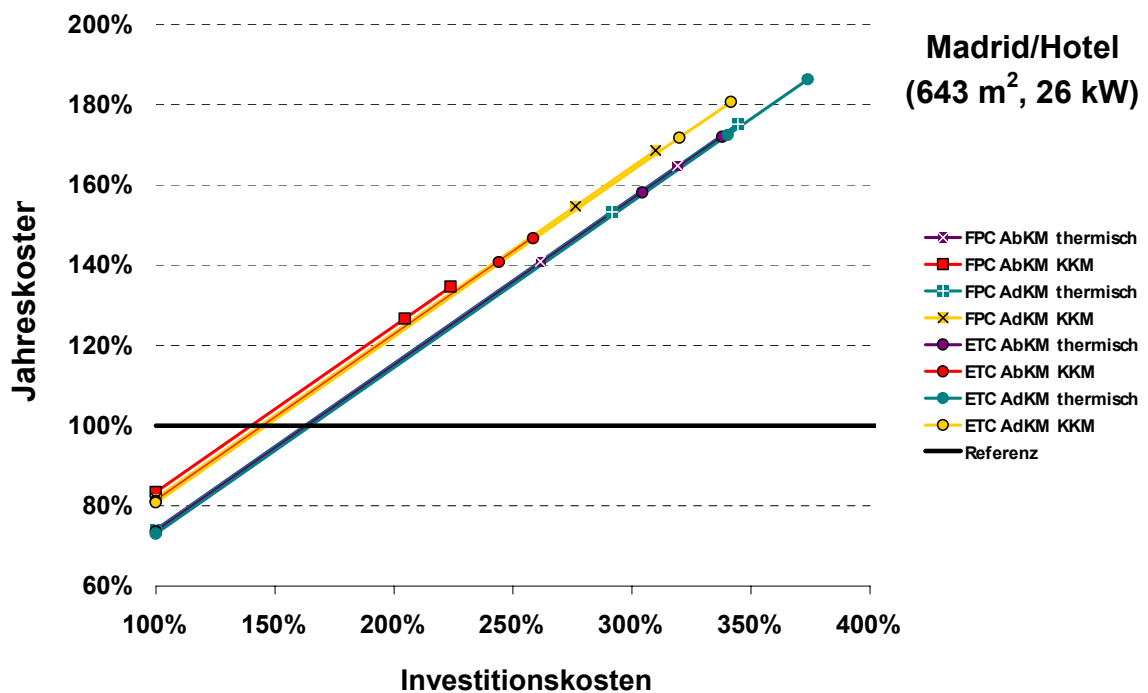


Abb. 6 – Gesamt-Jahreskosten als Funktion der Investitionskosten: Madrid, Hotel (643 m²).

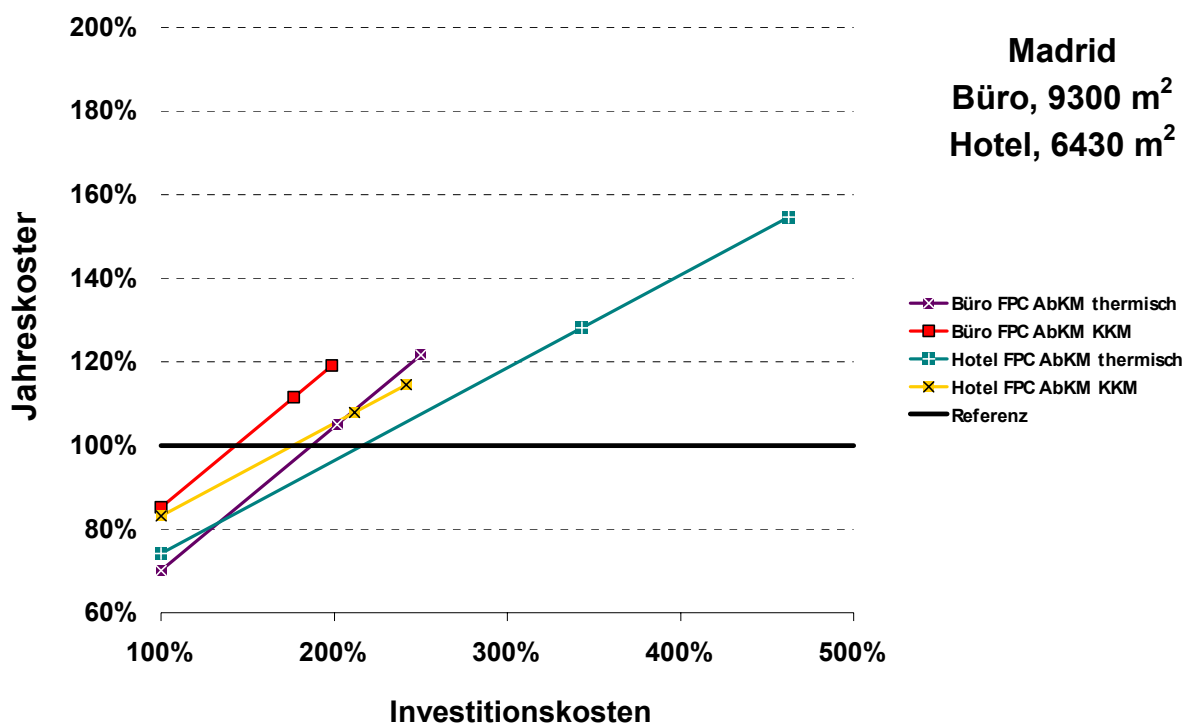


Abb. 7 – Gesamt-Jahreskosten als Funktion der Investitionskosten: Madrid, Bürogebäude (9300 m²) und Hotel (6430 m²).

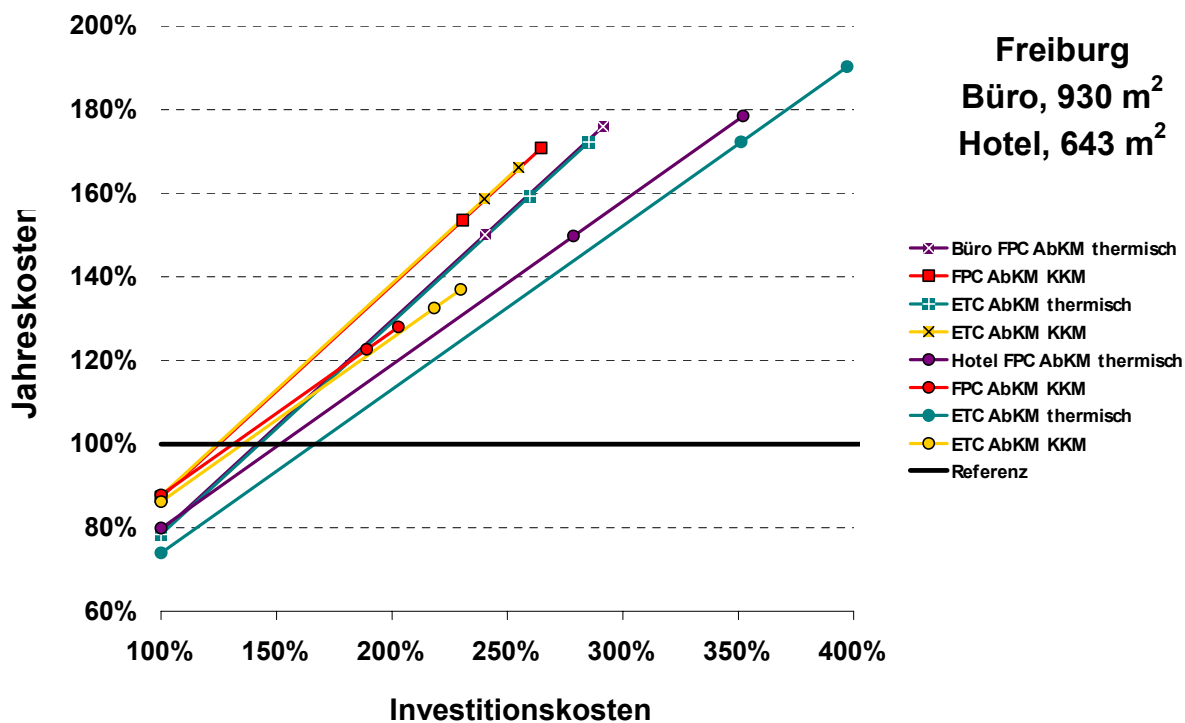


Abb. 8 – Gesamt-Jahreskosten als Funktion der Investitionskosten: Freiburg, Bürogebäude (930 m²) und Hotel (643 m²).

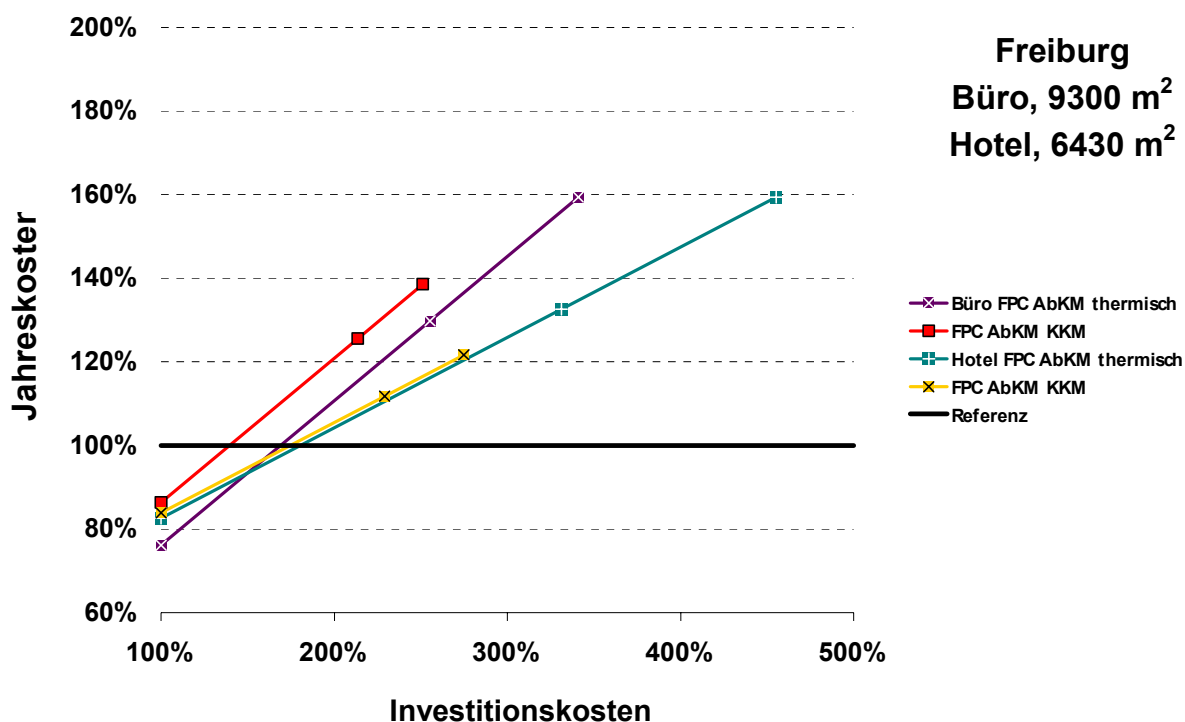


Abb. 9 – Gesamt-Jahreskosten als Funktion der Investitionskosten: Freiburg, Bürogebäude (9300 m²) und Hotel (6430 m²).

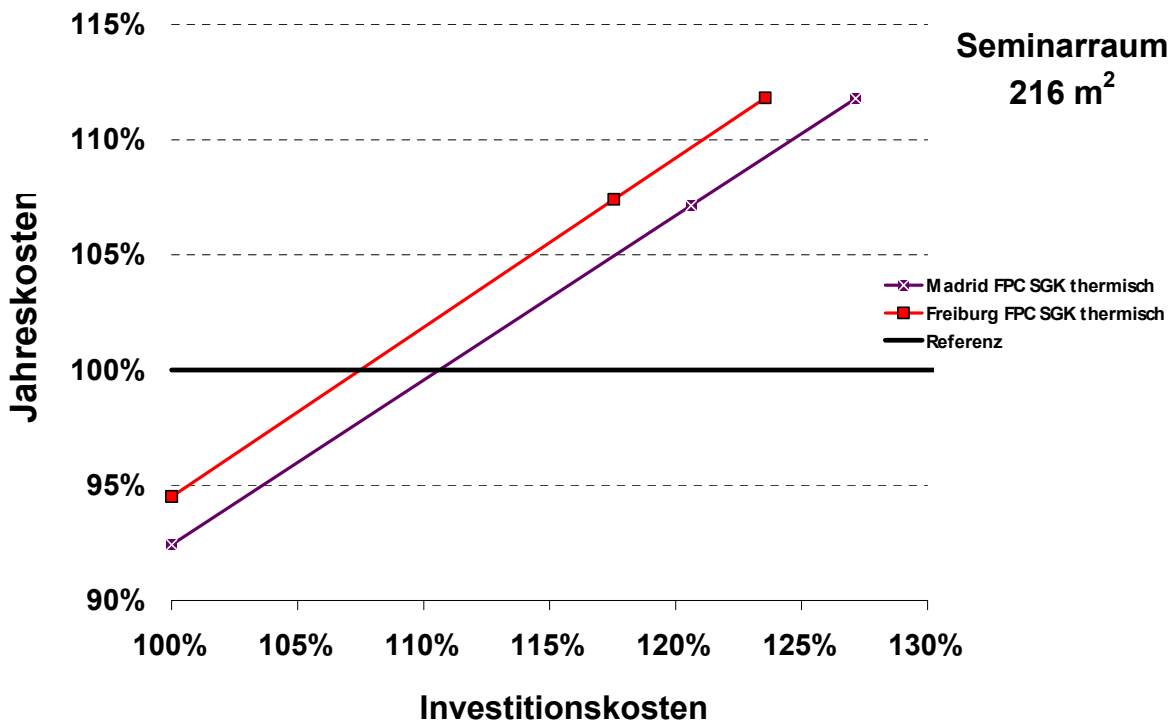


Abb. 10 – Gesamt-Jahreskosten als Funktion der Investitionskosten: Madrid und Freiburg, Seminarraum (216 m²)

Die folgenden Ergebnisse lassen sich aus der Parameteruntersuchung ableiten:

- ◆ Während in Madrid generell Varianten mit Flachkollektoren zu kostengünstigeren Lösungen führen, sind in Freiburg die Gesamtjahreskosten bei Verwendung von Vakuum-Röhren-Kollektoren nur unwesentlich höher oder – je nach Systemvariante – sogar niedriger als bei Verwendung von Flachkollektoren. Welcher Kollektor zu den besten Ergebnissen führt, hängt demnach mit vom Standort ab.
- ◆ Generell führen Adsorptionskältemaschinen zu höheren Kosten als Absorptionskältemaschinen. Dies ist in erster Linie durch die höheren Anschaffungskosten bedingt.
- ◆ Auf Grund der niedrigeren spezifischen Komponentenkosten führen größere Anlagen zu vorteilhafteren Ergebnissen. Damit sind bei entsprechender Systemauswahl Mehrkosten (Jahres-Gesamtkosten) von weniger als 20 % bezogen auf die Jahres-Gesamtkosten der konventionellen Systeme möglich. Bei einigen Systemen wird hier mit einer Kollektorförderung in Höhe von 100 €/m² nahezu der Break-Even zur konventionellen Vergleichsvariante erreicht.
- ◆ Bei den SGK-Anlagen liegen bereits heute die Investitionskosten wesentlich näher an denjenigen der konventionellen Vergleichssysteme als bei den Kaltwassersystemen. Mit entsprechender Förderung liegen die Jahres-Gesamtkosten an beiden untersuchten Standorten nur noch um rund 7-8 % über denjenigen der Referenzanlagen.
- ◆ Die Kosten eingesparter Primärenergie liegen in Madrid im günstigsten Fall bei rund 4.4 €-Cent pro kWh und in Freiburg bei rund 7.5 €-Cent pro kWh. Dieser Wert wird bei der solar unterstützten Klimatisierung eines großen Hotels mit Absorptionskältemaschine und Flachkollektoranlage und bei Verwendung einer Kompressionskältemaschine als Backup-System erreicht. Dieser Wert kann z.B. mit einem entsprechenden Wert für Strom aus photovoltaischen Anlagen verglichen werden. Aus der in Höhe von rund 57 €-Cent pro kWh elektrischer Energie gewährten, kostendeckenden Einspeisevergütung ergibt sich ungefähr ein Zuschuß in Höhe von 47 €-Cent/kWh (angenommener Preis für elektrische Energie aus dem Netz 10 €-Cent/kWh). Setzt man den oben verwendeten primärenergetischen Umwandlungsfaktor für die Stromerzeugung von 0.36 (siehe Tabelle 4) an, so entspricht dies Kosten pro kWh eingesparter Primärenergie in Höhe von knapp 17 €-Cent.

4 Zusammenfassung

Bislang gibt es nur vergleichsweise wenig Anlagen der solar unterstützten Klimatisierung. Erfahrungen mit Anlagen, die im Rahmen von Pilot- und Demonstrationsprojekten realisiert wurden, zeigen, dass durch Mängel in der hydraulischen Verschaltung und der Regelungstechnik das rechnerische Potential der möglichen Energieeinsparung vielfach nicht realisiert wird. Nur ein intensives, begleitendes Monitoring mit kontinuierlicher Fehleranalyse und Optimierung der Regelungstechnik führt letztlich zu einer Funktion der Anlage entsprechend der Planung. Insofern ist eine Weiterführung der Förderung von Demonstrationsanlagen mit begleitendem Monitoring und Betriebsanalyse unabdingbar, um bewährte, standardisierte Anlagenkonzepte und regelungstechnische Verfahren zu entwickeln. Dabei sollten bereits im Planungsprozess die Erkenntnisse aus vorangegangenen Projekten einfließen.

Anlagen der solar unterstützten Klimatisierung sind unter aktuellen Randbedingungen (Investitionskosten, Energiepreise) in der Regel nicht wirtschaftlich. Um einen größtmöglichen Nutzen von Mehrkosten im Sinne einer Maximierung der Energieeinsparung erfassbar zu machen, wurde die Größe 'Kosten eingesparter Primärenergie' definiert. Damit können unterschiedliche Konfigurationen des Solarsystems verglichen und bewertet werden und es ist eine Optimierung im Sinne der niedrigsten Kosten für eine realisierte Primärenergieeinsparung im Vergleich zu einem konventionellen Vergleichssystem möglich. Am Beispiel von Referenzgebäuden wurden unterschiedliche Systemkonfigurationen und Standorte unter Verwendung dieser Methode verglichen. Allerdings wird bei Einbeziehung einer üblichen Förderung der Break-Even im Vergleich zu konventionellen Anlagen bei günstigen Bedingungen nahezu erreicht.

Um die Wirtschaftlichkeit von Systemen der solar unterstützten Klimatisierung in der Zukunft weiter zu verbessern, ist ein Bündel von Maßnahmen notwendig. Einerseits können technische Verbesserungen an den Komponenten, wie z.B. eine höhere Effizienz der thermisch angetriebenen Kältemaschinen bzw. Klimatisierungsverfahren, zu Kostenreduktionen führen. Parallel ist eine weitere Senkung der Kosten der Solaranlage, insbesondere bei Grossanlagen, wie sie in der Regel für die solar unterstützte Klimatisierung eingesetzt werden, wünschenswert. Letztlich wird eine erfolgreiche Markteinführung nicht ohne entsprechende Unterstützung von förderpolitischer Seite, beispielsweise im Rahmen eines Markteinführungsprogrammes, gelingen.

Literatur

CLIMASOL (2004), Eine aktuelle Übersicht über Anlagen zur solaren Klimatisierung wird aktuell im Projekt CLIMASOL (4.1030/Z/02-121/2002) erstellt, das mit Mitteln der Europäischen Union im Rahmen des ALTENER-Programms unterstützt wird.

Henning, H-M., (2004-I), Solare Klimatisierung – Stand der Entwicklung, Tagungsband der Tagung „Solares Kühlen“, 7. Mai 2004, Wirtschaftskammer Österreich, Wiedner Hauptstraße 63, 1040 Wien

Wiemken, E., Henning, H-M. (2003), Economic study results report (Deliverable no.4, Work Package 3), SACE – Solar Air Conditioning in Europe (EU project Accompanying measures NNE5/2001/00025), (downloadable from web page: <http://www.ocp.tudelft.nl/ev/res/sace.htm>)

Henning, H-M. (2004-II), Wirtschaftlichkeitsanalyse solarthermischer Kühlung, 3. Symposium Solares Kühlen in der Praxis, 26. - 27. April 2004, Stuttgart (Hochschule für Technik)

SPF Rapperswil (2002), Collector Catalog 2002, Institut für Solar-technik SPF, BFE Bundesamt für Energiewirtschaft Bern, (Version 1.6.). web page: www.solarenergy.ch

TRNSYS (2003), TRNSYS – A Transient System Simulation Program – a program developed at the Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, USA. web page: <http://sel.me.wisc.edu/trnsys>

Henning, H-M. (Hrsg.) (2004-III), Solar Assisted Air Conditioning in Buildings – Handbook for Planners. Springer-Verlag, Wien, New York