

Solare Kühlung und Klimatisierung – Stand der Techniken und Perspektiven

Thermische Solarenergie zur Klimatisierung von Gebäuden
Hannover, 27. Januar 2009



Edo Wiemken

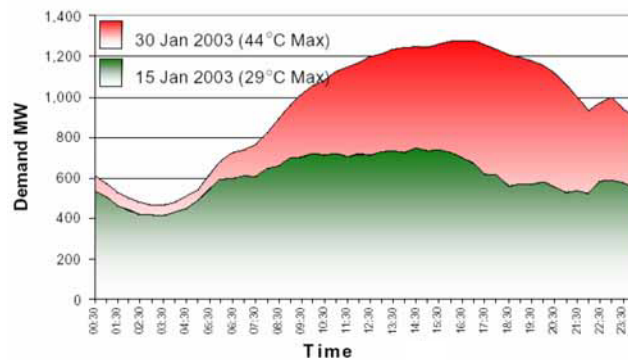
Fraunhofer-Institut
für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg
Thermisch aktive Materialien und solare Kühlung

- Vorbemerkungen
- Thermisch angetriebene Kaltwassererzeugung
- Sorptionsgestützte Klimatisierung
- Antriebswärme (Solarkollektoren)
- Stand / Kosten der solaren Kühlung
- Zusammenfassung

Warum solare Kühlung?

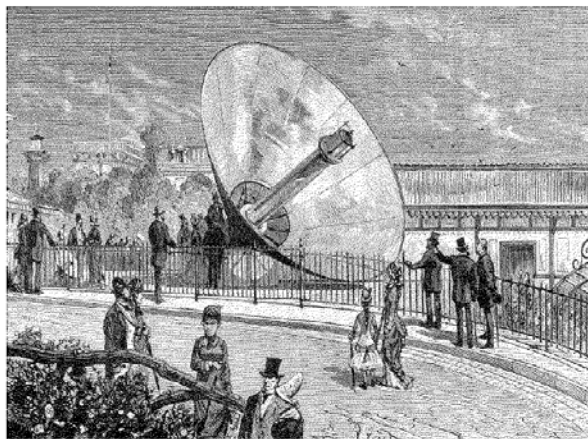
- Spitzenlast im Stromnetz wird in manchen Regionen bereits durch Klimatisierungsaufwand geprägt
- Gleichzeitig hohe solare Erträge verwertbar
- Ganzjährige Ausnutzung solarthermischer Systeme durch Heizen, Kühlen, Brauchwassererwärmung
- Arbeitsstoffe ohne Treibhauspotenzial

Sydney West Bulk Supply Point Load Profile



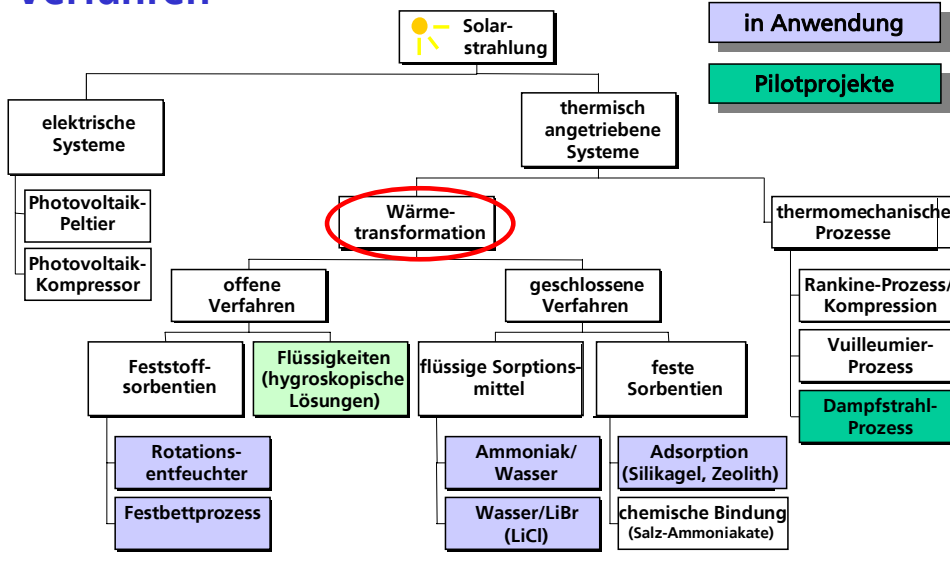
Erste Erfahrungen Weltausstellung 1878 in Paris:

Erzeugung eines Eisblocks
am 29. September durch
Augustin Mouchot mit
periodisch arbeitender
Absorptionskältemaschine
(nach dem Prinzip von
Edmund Carré)

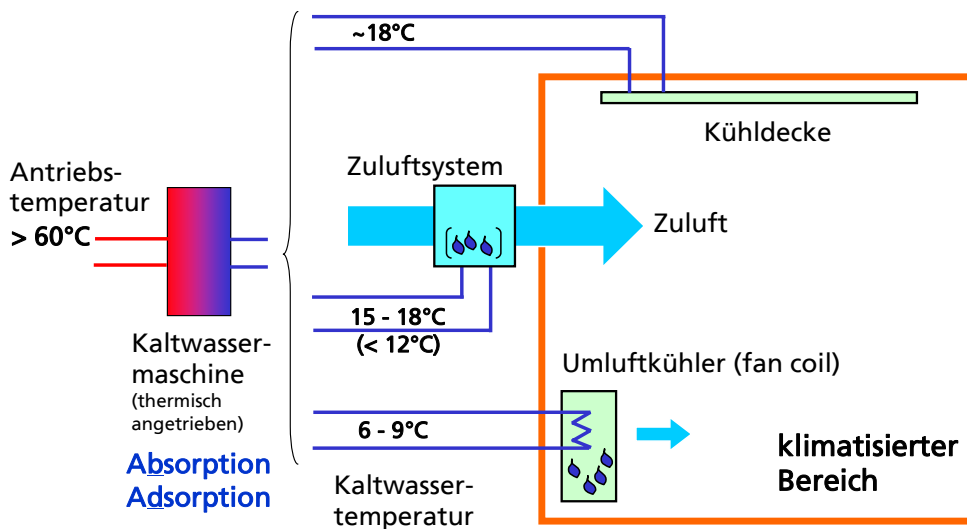


Mouchot, Augustin:
La chaleur Solaire et ses Applications
Industrielles
(deutsche Ausgabe, Olynthus Verlag,
1987)

Verfahren

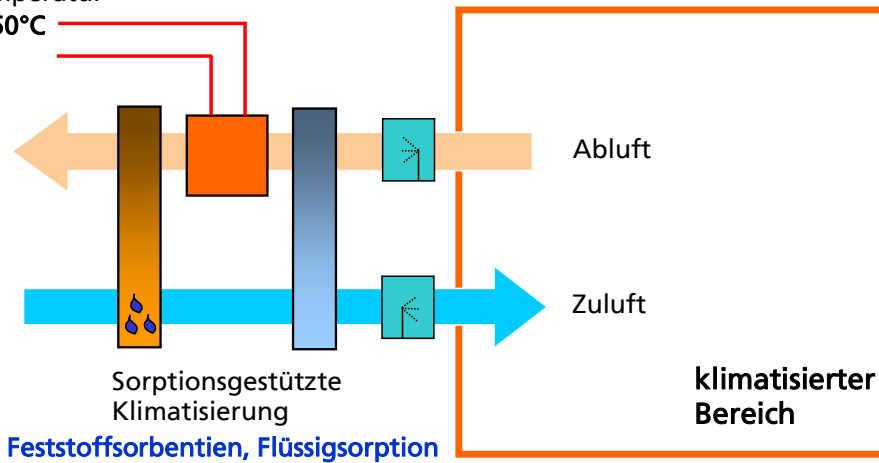


Geschlossene Verfahren Verteil-Medium Kaltwasser



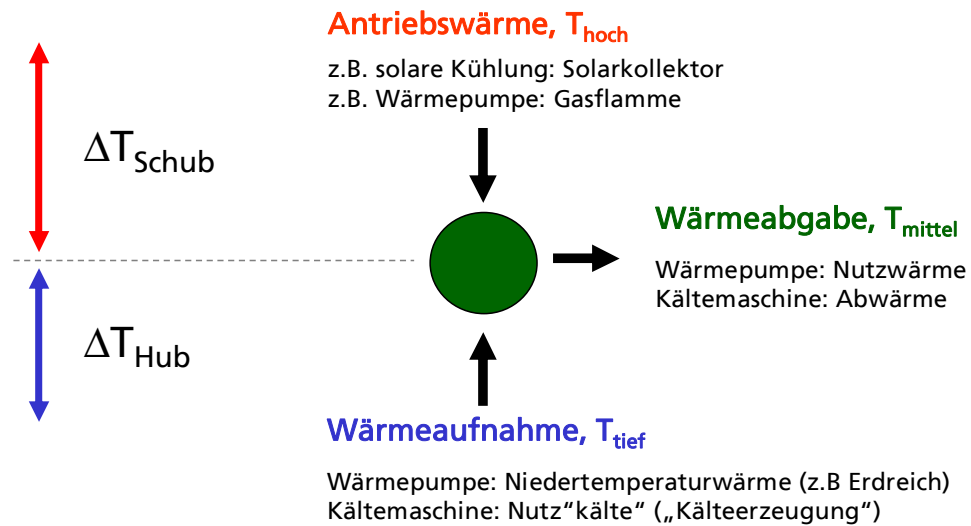
Offene Verfahren Verteil-Medium konditionierte Luft

Antriebs-
temperatur
> 50°C



- Vorbemerkungen
- Thermisch angetriebene Kaltwassererzeugung
- Sorptionsgestützte Klimatisierung
- Antriebswärme (Solarkollektoren)
- Stand / Kosten der solaren Kühlung
- Zusammenfassung

Thermisch angetriebene Wärmetransformation



Thermisch angetriebene Wärmetransformation

Coefficient of Performance
(Wärmeverhältnis ζ)

$$\text{COP} = \frac{\text{Nutzkälte}}{\text{Antriebswärme}}$$

Thermodynamische Grenze
(Carnot'scher Vergleichsprozess)

$$\text{COP}_{\text{Grenz}} = \frac{\text{Nutzkälte}}{\text{Antriebswärme}} = \frac{1 - \frac{T_{\text{mittel}}}{T_{\text{hoch}}}}{\frac{T_{\text{mittel}}}{T_{\text{tief}}} - 1}$$

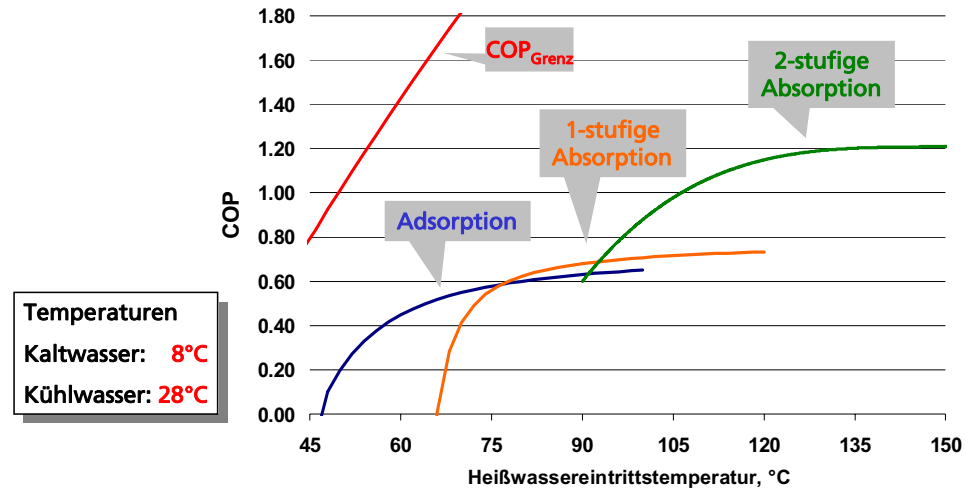
Prozessgüte

$$\xi_{\text{PQ}} = \frac{\text{COP}_{\text{real}}}{\text{COP}_{\text{Grenz}}}$$

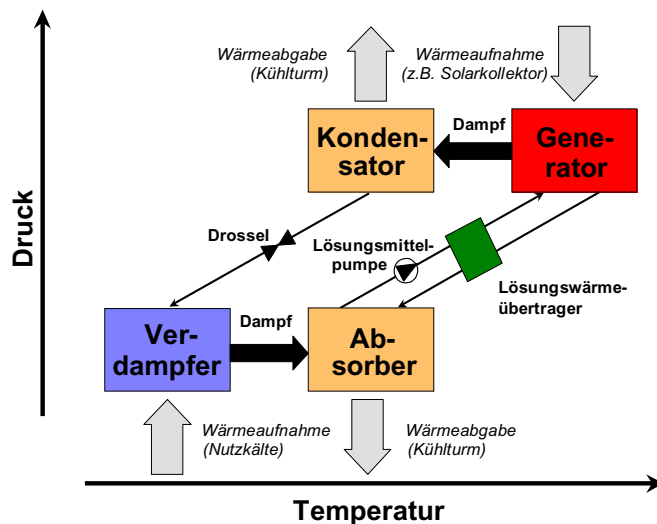
typische Werte

$$0.3 \leq \xi_{\text{PQ}} \leq 0.4$$

COP von Kaltwassererzeugern: Stand der Technik



Absorption mit flüssigem Sorptionsstoff- Grundschem



Absorptionskältemaschinen - Stand der Technik

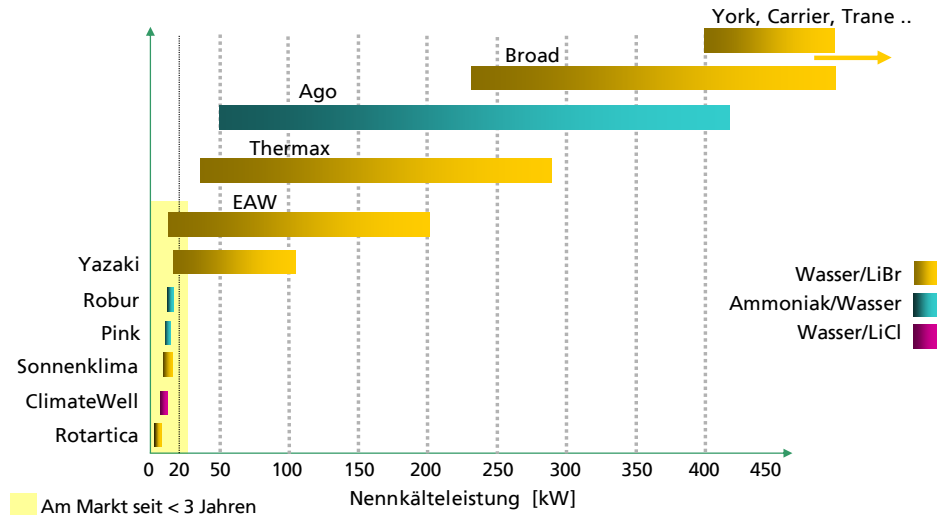
- einstufige Absorptionskältemaschinen; Antrieb: Heißwasser
 - ♦ traditionelle Anbieter aus der Kältetechnik (meistens auch Anbieter von el. Kompressionskältemaschinen) im Leistungsbereich > 200 kW
 - ♦ für Klimatisierung überwiegend Systeme mit Wasser/LiBr; für Tieftemperaturkälte Ammoniak/Wasser
 - ♦ Bis vor einigen Jahren meist genutzte Maschine in Verbindung mit solarer Klimatisierung: Yazaki WFC 10 (35 kW)
 - ♦ Seit kurzem: mehrere Geräte im kleinen Leistungsbereich < 15 kW Nennkälteleistung

Absorptionskältemaschinen < 20 kW Nennkälteleistung (Beispiele)



Absorptionskältemaschinen – Anbieter

(Antrieb: Heißwasser; kein Anspruch auf Vollständigkeit)



Absorptionskältemaschinen - Stand der Technik

■ zweistufige Absorptionskältemaschinen

- ◆ Einige Hersteller von 2-stufigen Maschinen; oft direkt befeuert
- ◆ Interessant für solarthermische Anwendungen:
Antrieb mit Heißwasser / Heißdampf
- Fa. Broad; 170 kW $P_{\text{Nennkälte}}$
ca. 180°C Antriebstemperatur,
max. COP: 1.4
- ◆ einige Realisierungen mit solarthermischem Antrieb (konzentrierende Systeme)

2-stufige Absorptions-KM; 170 kW Nennkälteleistung
Bildquelle: AICIA Sevilla



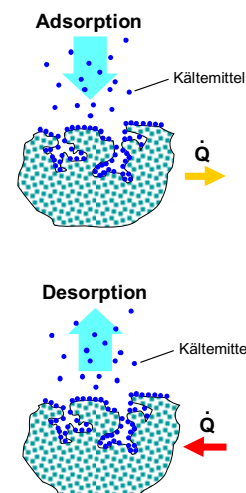
Absorptionskältemaschinen - Stand der Technik

Nutzung der Absorptionstechnik in Deutschland

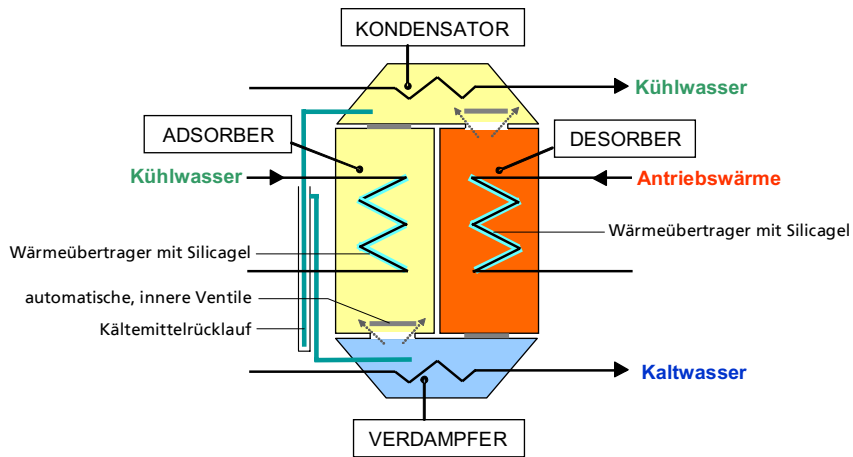
- Industrielle Anwendung, Nutzung von Abwärme
- zentrale Kälteversorgung in großen Einheiten (z.B. in Kältenetzen; Antrieb mit BHKW-Abwärme, Fernwärme)
- Bisher geringer Anteil an Gesamtkälteerzeugung (Statusbericht DKV Nr. 22, 2002: < 2%), aber durch neueren Aufbau in Kältenetzen vermutlich wachsend

Adsorption - grundlegender Prozess

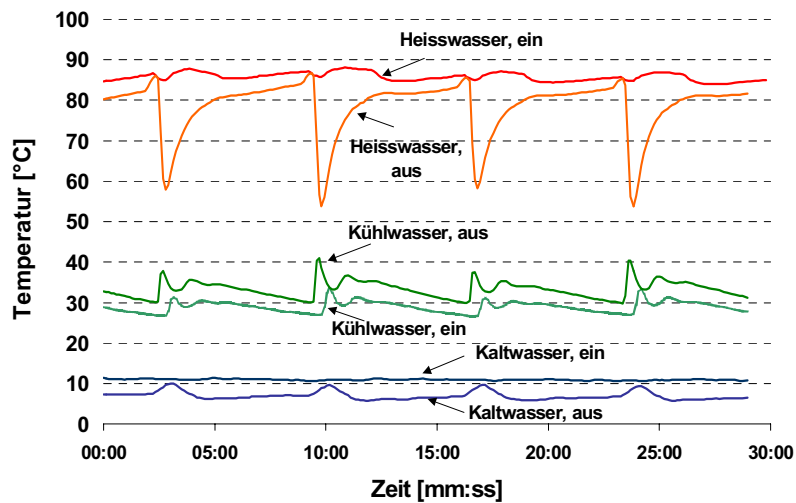
- Anlagerung von Gasmolekülen auf der inneren Oberfläche von hochporösen Feststoffen
- Typische Porengröße: 0.5 – 2 nm
- „innere Oberfläche“: 300-1200 m² pro Gramm
- Typische Materialien: Silikagel, Zeolith, Aktivkohle, aktiviertes Aluminium
- Reversible Bindung, d.h. der Arbeitsstoff (Kältemittel) kann periodisch adsorbiert und desorbiert werden
- Dieser Effekt kann benutzt werden, um einen geschlossenen Kreisprozess durch aufeinander folgende Phasen der Adsorption und Desorption zu realisieren



Schema einer Adsorptionskältemaschine



Maschinenzyklus



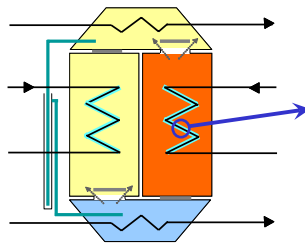
Adsorptionskältemaschinen - Stand der Technik

- Etabliert am Markt
 - Nishiyodo (Japan): 70 – 350 kW
 - Mayekawa (Japan), in Europa Mycom: 50-350 kW
- Beginn der Markteinführung
 - Sortech (Halle): 7.5 kW; 15 kW (WP-Funktion möglich)
 - Invensor (Berlin): 5-15 kW
- F&E
 - ECN (NL): 2 kW mit Wasser-Silicagel (Entwicklung)
 - Universität Warwick (GB): 2 kW Ammoniak-Aktivkohle (Entwicklung)
 - Shanghai Jiao Tong University (China): 10 kW Wasser-Silikagel (Test)
 - Sortech: direkte Aufkristallisation von Zeolith auf Wärmeübertrager
- F&E Sorptionsmaterialien: höhere Leistungsdichte durch optimierte Sorptionsmaterialien und Wärmeübertragerstrukturen

Adsorber-Aufbau: Stand der Technik

- Granuläres Sorptionsmaterial in metallischen Lamellen (teilweise verklebt)
- Rohre zur Wärmezu- bzw. -abfuhr

Quelle: Sortech





Mayekawa / Mycom ADR
350 kW Nennkälteleistung
Installation: FESTO AG & Co, KG

Nishiyodo NAK
70 kW Nennkälteleistung
Installation: Universitäts-Klinikum Freiburg



Sortech ACS 08
7.5 kW Nennkälteleistung

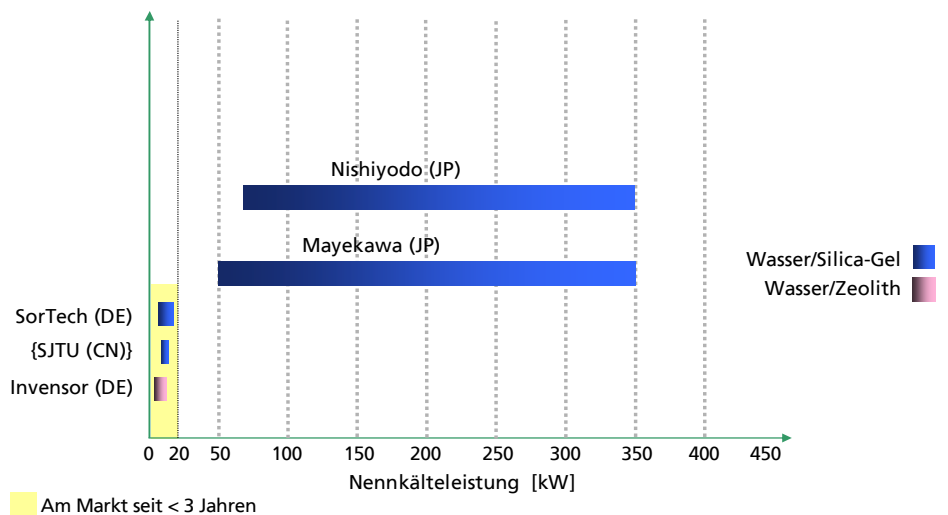
Sortech ACS 15
15 kW Nennkälteleistung



Quelle: Sortech



Adsorptionskältemaschinen - Anbieter



Adsorptionskältemaschine - Stand der Technik

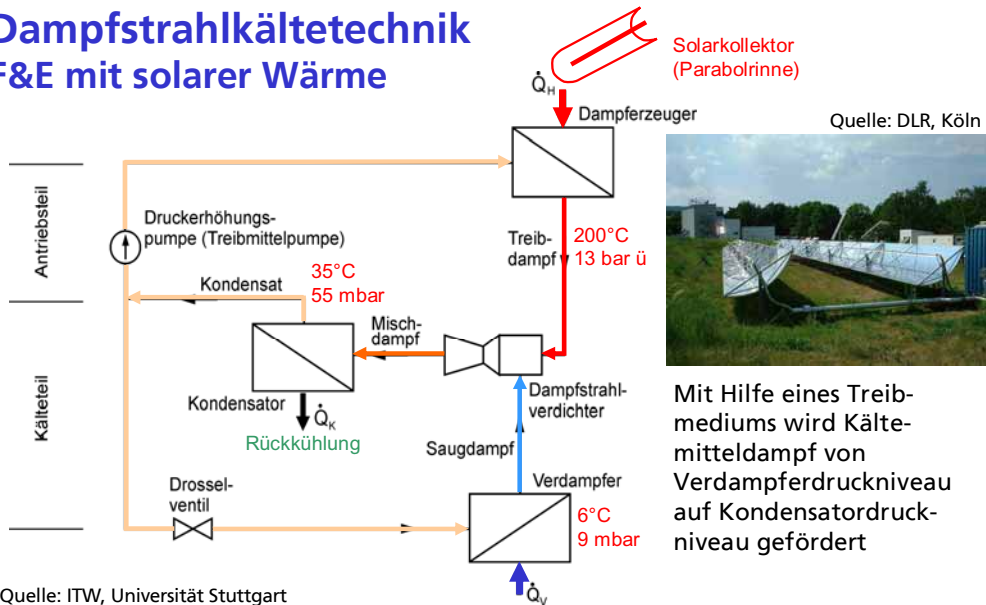
■ Vorteile

- Umweltfreundliche Stoffpaare
- Keine Lösungsmittelpumpe, wenig bewegte Teile
- Keine Kristallisationsgefahr
- Niedrige Antriebstemperaturen > 60°C
- Sehr geräuscharm
- Hohes Kostenreduktionspotential (grundsätzlich einfacher Aufbau)

■ Nachteile

- Hohe Anforderungen an Vakuumdichtigkeit
- Vermeidung von Bildung nicht-kondensierbarer Gase
- Derzeit noch niedrigerer COP als bei Absorptionskältemaschinen
- Zyklische Temperaturschwankungen in den hydraulischen Kreisen

Dampfstrahlkältetechnik F&E mit solarer Wärme



Dampfstrahlkältetechnik

■ Vorteile

- Nur Wasser als Trieb- und Kältemittel
- vom Verdichtungsverhältnis abhängiger COP (> 1 möglich)
- schnelle Ansprechgeschwindigkeit, robuste Technik

■ Nachteile

- Antriebstemperaturen von typischerweise $> 150^{\circ}\text{C}$
- Einsatz von konzentrierenden Solarsystemen mit Nachführung wie z.B. Parabolrinnenkollektoren als Antriebsquelle
- bislang gibt es keine standardisierten, marktverfügbaren Serienmodelle

➔ aussichtsreich für sonniges Klima, Prozesskälteanwendungen

Dampfstrahlkältetechnik

- Kommerzielle Anwendungen im großen Leistungsbeich ($> \text{einige } 100 \text{ kW}$) ohne solare Wärmenutzung
- F&E-Aktivitäten zur Nutzung solarer Wärme
- Prototyp-Entwicklung einer 5 kW DSKM (Fraunhofer UMSICHT, DLR, AEE INTEC)



- Vorbemerkungen
- Thermisch angetriebene Kaltwassererzeugung
- Sorptionsgestützte Klimatisierung
- Antriebswärme (Solarkollektoren)
- Stand / Kosten der solaren Kühlung
- Zusammenfassung

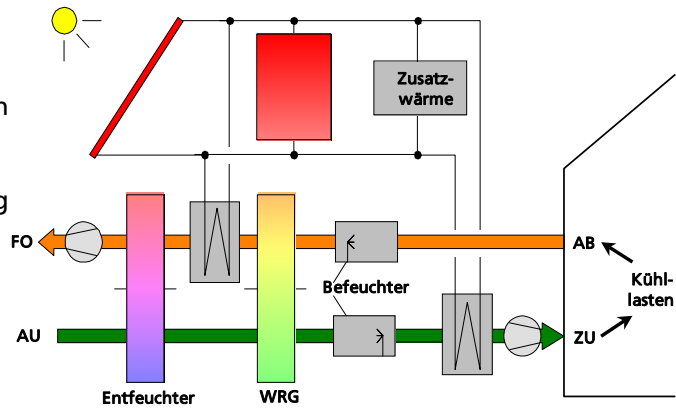
Offene Verfahren

- Offene Systeme werden für die direkte Luftkonditionierung hinsichtlich Temperatur und Feuchte verwendet. Es wird kein Kaltwasser produziert
- Sie bestehen generell aus einer Kombination von sorptiver Luftentfeuchtung und Verdunstungskühlung
- Typische Antriebstemperaturen: 55°C bis 90°C
- Kühlung ohne Kälteanlage
- Bezeichnungen:
 - ◆ Sorptionsgestützte Klimatisierung (SGK) oder
 - ◆ Desiccative and evaporative cooling (DEC)
- als alleinige Systeme besonders geeignet für Klimatisierungslösungen, in denen größere Außenluftvolumenströme gefragt sind

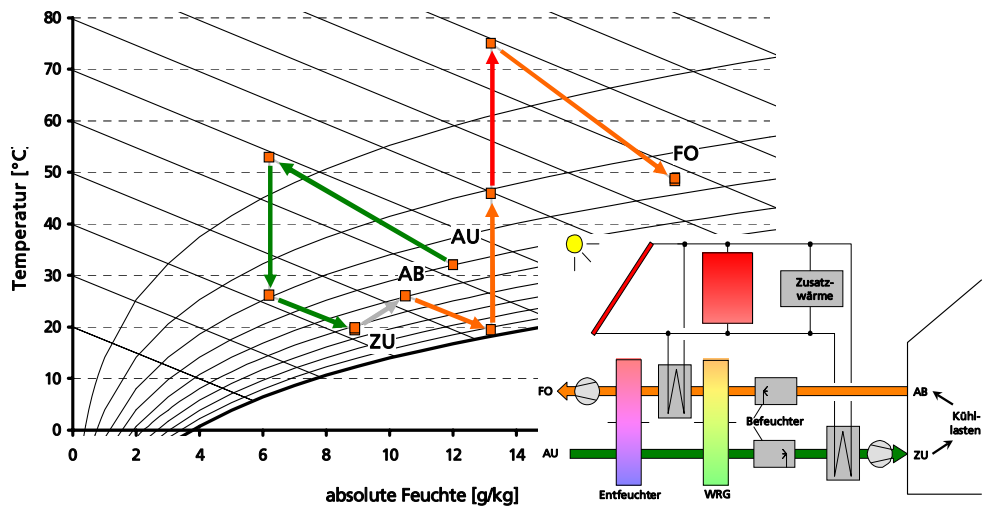
Standardprozess für moderates Klima (Mitteleuropa)

Standard-SGK-Verfahren

Entfeuchter zusätzlich zum System mit kombinierter Verdunstungskühlung



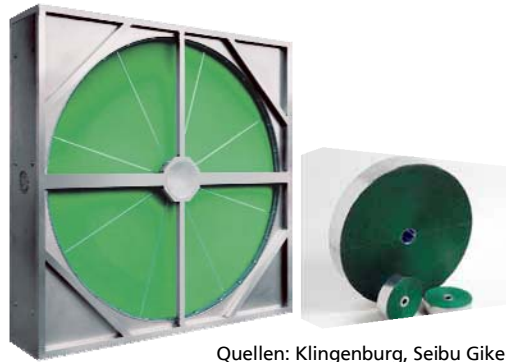
Standardprozess für moderates Klima (Mitteleuropa)



Sorptionsgestützte Klimatisierung

Anlagen mit Sorptionsrotor

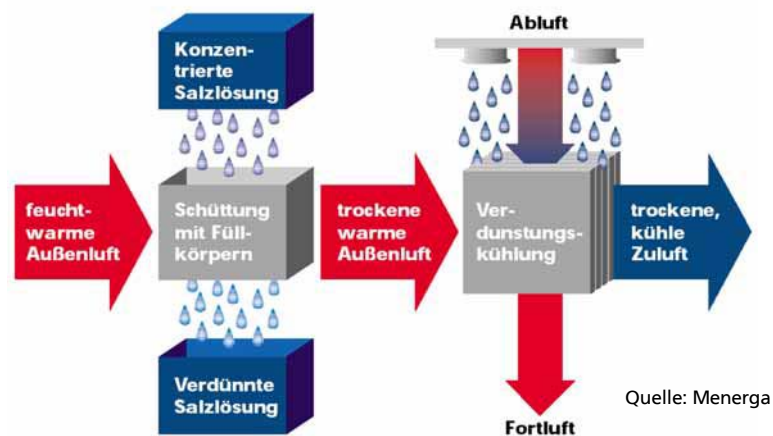
- Marktverfügbare Komponenten, große Leistungsbandbreite
- Verschiedene Hersteller
- Sorptionsmaterialien: Silikagel, LiCl
- Erforderlich: Sorgfältige Auslegung und Regelung, sorgfältige Inbetriebnahme und Überwachung des Anlagenbetriebs
- Unterschiedliche Verschaltungen für gemäßigte und feucht-heiße Klimata



Quellen: Klingenburg, Seibu Giken

Offene Systeme mit Flüssigsorption

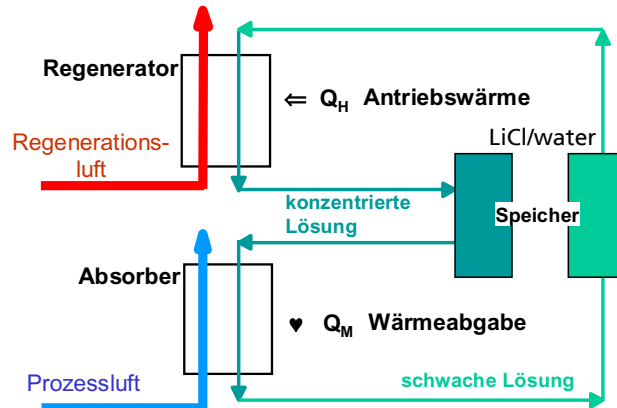
- Offene Absorption



Quelle: Menerga

Offene Systeme mit Flüssigsorption

- Offene Absorption
- Möglichkeit der verlustlosen Energiespeicherung in Salzlösung (LiCl); zeitlich versetzte Regeneration
- International: F&E
- In Deutschland: Menerga, L-DCS Technology
- Einige Pilotanlagen mit solarer Wärmenutzung

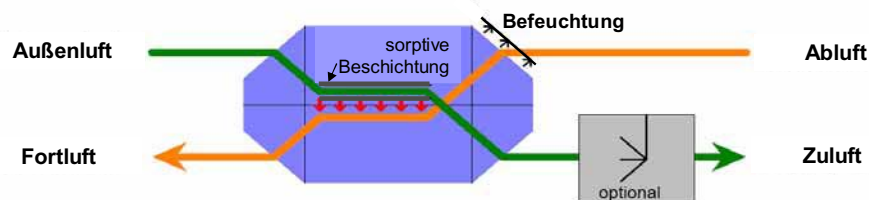


F&E: Sorptiver Gegenstrom-Luftentfeuchter



Task 38
Solar Air-Conditioning
and Refrigeration

- Prototyp Entwicklung am ISE; Partner: POLIMI, Firmen
- ECOS – indirect Evaporative Cooling heat exchanger with Sorption
- Luft-Luft – Wärmeübertrager mit sorptiver Beschichtung auf der Zuluftseite
- Entfeuchtung und Kühlung auf der Zuluftseite durch
 - sorptive Beschichtung auf der Zuluftseite
 - Aufnahme der Sorptionswärme im Abluftkanal (indirekte Verdunstungskühlung)



- Vorbemerkungen
- Thermisch angetriebene Kaltwassererzeugung
- Sorptionsgestützte Klimatisierung
- Antriebswärme (Solarkollektoren)
- Stand / Kosten der solaren Kühlung
- Zusammenfassung

Antriebswärmequellen

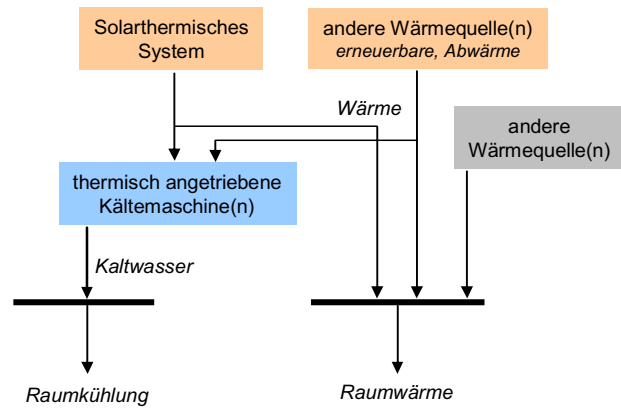
- Kollektoren als Hauptwärmequelle für den Antrieb der Ab-/Adsorptionskältemaschinen bzw. zur Regeneration im SGK-System
- Solare Wärme im Winter immer zur Heizungsunterstützung nutzen
- Primärenergieeinsparung im Vergleich zu konventioneller Anlagentechnik (mit elektrisch betriebener Kompressionskältetechnik) muss gewährleistet sein

Antriebswärmequellen

Falls solare Wärme nicht ausreichend ist (keine solar autonome sommerliche Klimatisierung einsetzbar):

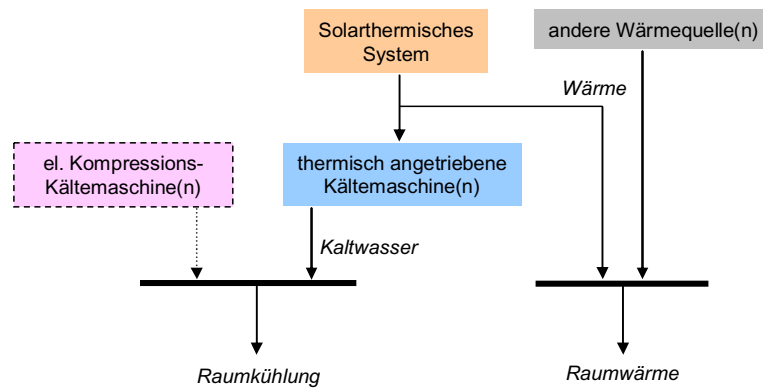
- Vermeidung von Zusatzwärmequellen mit Einsatz fossiler Brennstoffe

(bei einstufiger Kälte-technik: schon bei geringen Anteilen fossiler Zusatzwärme primärenergetisch ungünstig)

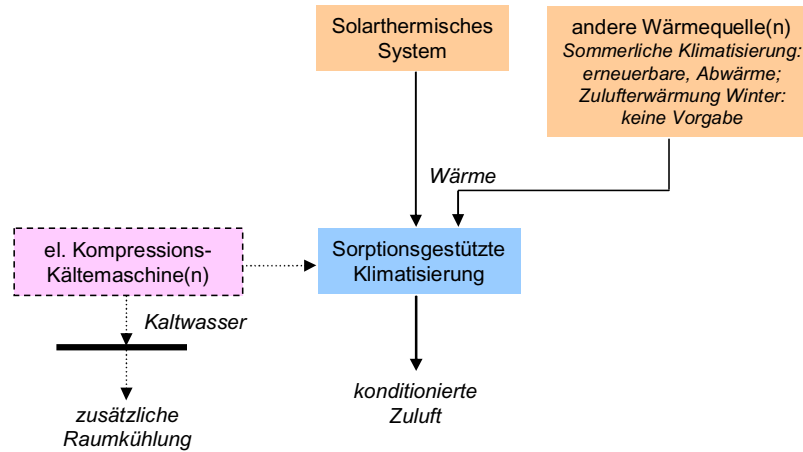


Antriebswärmequellen

- Alternativ: konventionelle, elektrisch betriebene Kältetechnik als Back-up



Antriebswärmequellen für SGK



Solarluftkollektor

direkte Luft-erwärmung

Flachkollektor

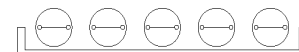
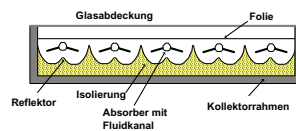
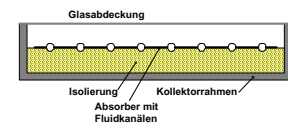
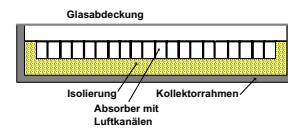
Erwärmung einer Flüssigkeit (Wasser-Glycol); mit/ohne selektive Beschichtung

schwach konzentrierend (z.B. stationärer CPC)

Erwärmung einer Flüssigkeit (Wasser-Glycol) Strahlungskonz. ohne Nachführung

Vakuum-Röhrenkollektor

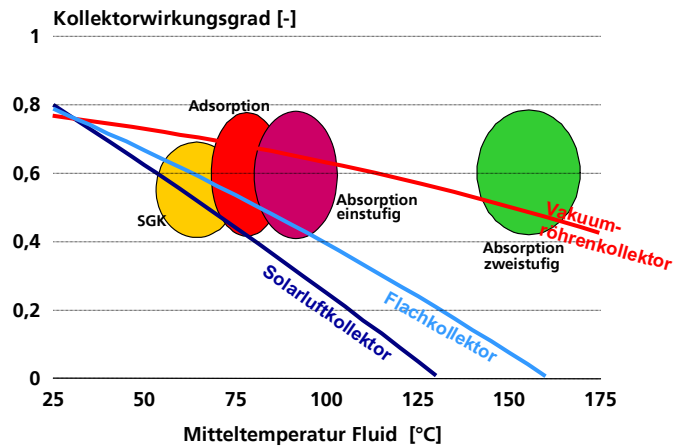
evakuierte Glasröhre; direkt durchströmt oder Heat-pipe; evtl. Konzentrator



Solarkollektoren und thermisch angetriebene Kühlverfahren

$T_{\text{Umgebung}} = 25^{\circ}\text{C}$
Einstrahlung = 800 W/m^2

Auswahl Kollektor-
wirkungsgrade



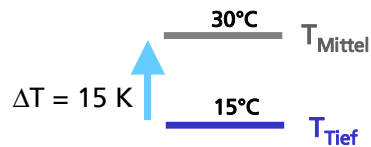
Solarkollektoren und thermisch angetriebene Kühlverfahren

Nachgeführte Kollektoren:

- Standorte mit hohem Direktstrahlungsanteil
- Anlagen mit hohen Antriebstemperaturen (ab ca. 120°C), z.B. zweistufige Absorptionskältechnik
- Anlagen mit hohem Temperaturhub zwischen Kaltwassertemperatur und Kühlwassertemperatur, z.B. Ammoniak/Wasser Kältetechnik in Verbindung mit trockener Rückkühlung

Kollektorauswahl: Einfluss durch Temperaturhub

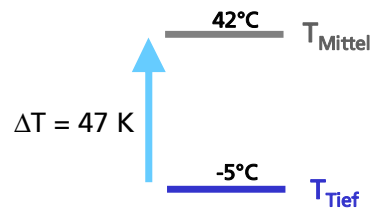
Temperaturhub ΔT : klein



Kühldecken,
nasse Rückkühlung

Kollektoren:
stationär (FK, VRK)

Temperaturhub ΔT : groß

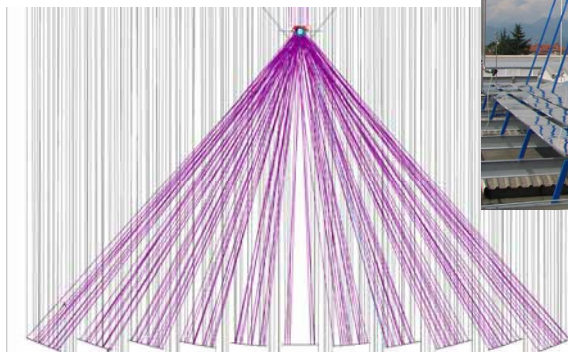


Prozesskälte,
trockene Rückkühlung

Kollektoren:
konzentrierend, nachgeführt

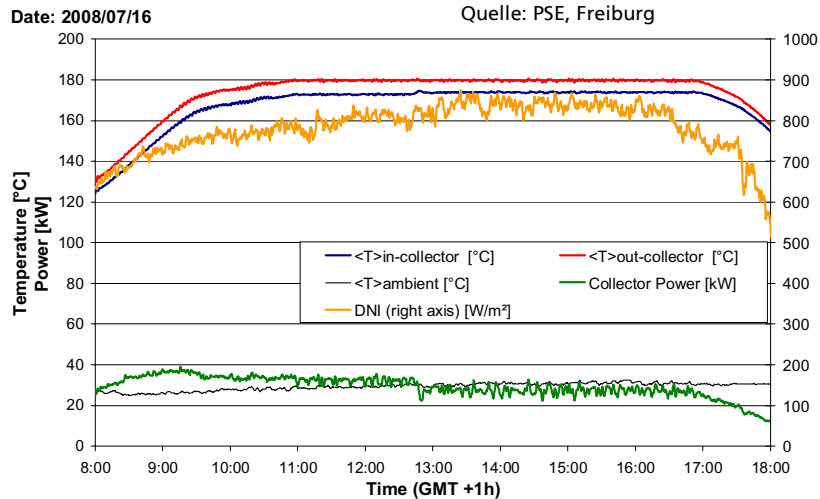
Beispiel: Fresnel-Kollektor für Mitteltemperaturbereich 100°C – 200°C

- Spiegelemente:
Glas, Rückseitenverspiegelung
- Hohe Windstabilität
- Einfache Reinigung
- Hersteller: PSE, Freiburg



Quelle: PSE, Freiburg

Beispiel: Fresnel-Kollektor für Mitteltemperaturbereich 100°C – 200°C



- Vorbemerkungen
- Thermisch angetriebene Kaltwassererzeugung
- Sorptionsgestützte Klimatisierung
- Antriebswärme (Solarkollektoren)
- Stand / Kosten der solaren Kühlung
- Zusammenfassung

Stand der solaren Kühlung und Klimatisierung

- Hohe Aufmerksamkeit gegenüber solarer Kühlung, aber noch keine Marktdurchdringung
- Weltweit ca. 200 – 300 Anlagen
- Zuwachs insbesondere im Nennkälte-Leistungsbereich < 15 kW; hohe Zuwachsraten in Spanien
- Internationale Aktivitäten zur Marktunterstützung
z.B.: Task 38 'Solar Air-Conditioning and Refrigeration'
im Solar Heating & Cooling Programme der IEA
(Schwerpunkte: Paket-Systemlösungen, Standardisierung, Monitoring, ..)
- Marktunterstützung in nationalen und in EU-Projekten



Stand der solaren Kühlung und Klimatisierung

- Überwiegend Kaltwassersysteme, größtenteils Absorption
- Mehrere Entwicklungen im Bereich kleiner Kaltwassererzeuger (Absorption, Adsorption) im Nennkältebereich < 15 kW...
- ... leider auch Produktionszurückstellungen (Rotartica, Spanien)
- Erste Systemanbieter
(z.B., S.O.L.I.D. in Österreich; SolarNext, Schüco in Deutschland)
erste kommerzielle Anbieter für Flüssigsorption (z.B. Menerga)
- F&E zur Minimierung des Energieaufwandes für die Rückkühlung (z.B. Einsatz von Latentwärmespeichern)
- F&E im Bereich Sorptionstechnik (verbesserte Sorptionsmaterialien, Wärmeübertragerstrukturen,..)

Hemmnisse in der Marktentwicklung

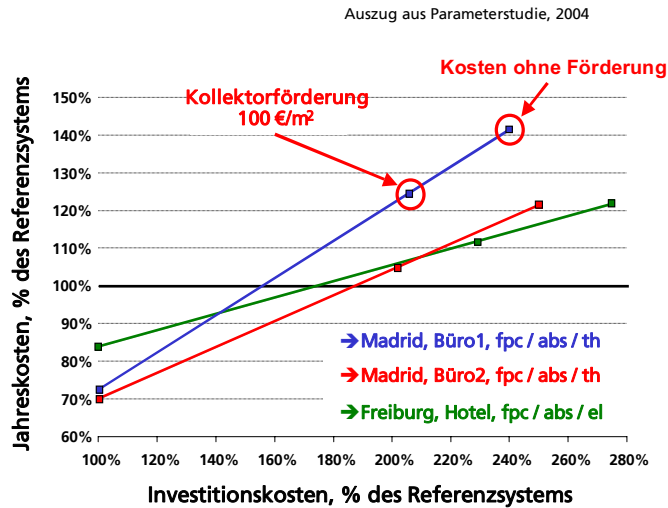
Beispiele zu Kostenabschätzungen (aus Parameterstudie):

Investitionskosten um den Faktor 2 bis 3 höher

Jahreskosten* um den Faktor 1.2 bis 1.5 höher (ohne Förderung)

*Jahreskosten enthalten: Kapitalkosten (annuisiert), Betrieb und Wartung

fpc: flat-plate collector
abs: absorption chiller
th: thermal back-up
el: el. compression chiller back-up



Zusammenfassung

- Solare Kühlung ist vielseitig einsetzbar (zentrale Kälteverteilung)
- Entwicklung von Systemtechnik für höhere Antriebstemperaturen im Zusammenhang mit 2-stufiger Absorptionstechnik oder mit trockener Rückkühlung
→ Pilotprojekte an sonnenreichen Standorten
- Erforderlich: mehr Standardisierung und Planungshilfen, insbesondere im Bereich kleiner Leistung
→ IEA Task 38: Solar Air-Conditioning and Refrigeration
→ EU Projekte (SOLAIR, SolarCombi+, High-Combi, ...)
- Mit zunehmender Marktentwicklung: deutliche Senkung der Komponentenkosten

Zusammenfassung

- Mittelfristig: ‚Paketlösungen‘ für Anlagen im kleinen Leistungsbereich 5 - 20 kW Nennkälteleistung; Nutzung solarer Wärme für Heizungsunterstützung und Kältebereitstellung
- Mittelfristig: mehr Planungsunterstützung (Auslegungs- und Modellierungswerkzeuge, Richtlinien für Planung, Inbetriebnahme und Anlagenüberwachung)
- Mittel- bis längerfristig: mehr Standardisierung für Anlagen im mittleren und größeren Leistungsbereich für unterschiedliche Klimaregionen und Anwendungsbereiche

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit