

Solare Kühlung

Peter Noeres
Fraunhofer UMSICHT
Osterfelder Straße 3, 46047 Oberhausen

Tel. +49 208 8598 1187, F. +49 208 8598 1423
E-mail. noe@umsicht.fhg.de

Inhalt:

1. Einleitung/Anlagenkonzepte/Umsetzung
2. Auslegung, technische Verfahren
3. Zwei Anlagenbeispiele, Betriebserfahrungen
4. Wirtschaftlichkeit, Zusammenfassung + Ausblick

I.1 Warum solare Kühlung ?

1. Kälte ohne zusätzlichen Energiebedarf aus regenerativen Quellen.
2. Kältebedarf und solares Energieangebot sind für die meisten Anwendungsfälle zeitgleich.
3. keine zusätzliche Belastung der vorhandenen elektrischen Infrastruktur.
4. Bedürfnis für Klimakälte steigt aus verschiedenen Gründen:
 - erhöhte Komfortansprüche,
 - Bauweise von Gebäuden, sommerlicher Wärmeschutz,
 - klimatische Änderungen mit extremen Klimabedingungen, insb. Anstieg der Luftfeuchte.

I.2 Bisherige Umsetzung in Europa

Zahlen zur
solarthermischen Kälteerzeugung:

Stand 2005: 70 Anlagen mit ca. 6,3 MW Kälteleistung
Kollektorfläche ca. 17500 m²

Verfahren:

ca. 60% der Leistung mit Absorbern,
ca. 25% mit Adsorptionskältemaschinen,
ca. 15% mit offenen Sorptionsprozessen.

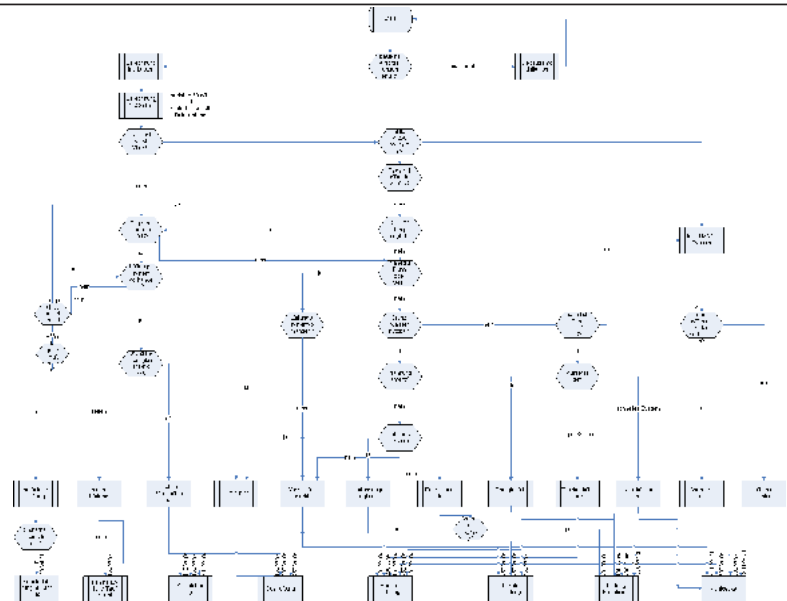
typische Kombinationen:

Wasser-LiBr-Absorber mit Vakuumröhre, mit
Flachkollektor, mit Parabolrinnenkollektor,
Adsorber mit Flachkollektoren,
Offene Sorptionsverfahren mit
Flachkollektoren/Luftkollektoren.

I.3 Entscheidungsbaum Klimatisierung

Gebäudegestaltung entsprechend
der täglichen Kühllast in Wh/m²/d

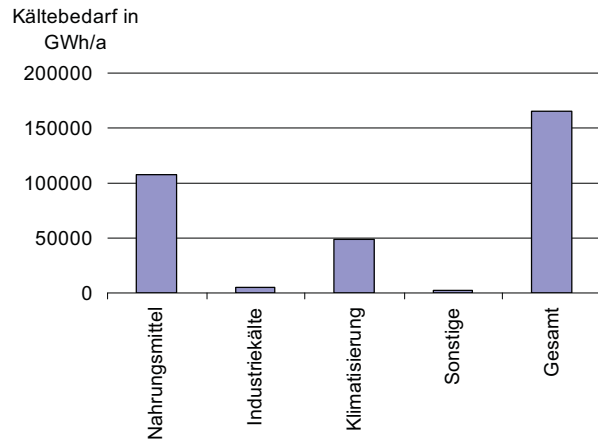
- lokale Kühlung,
- Kühldecken,
- Bauteilkühlung,
- Klimatisierung
- Fensterlüftung



Quelle: Zimmermann, Mark. Handbuch der passiven Kühlung

I.4 Kältebedarf in Deutschland

Energiebedarf für die Kälte:
14 % des Stromverbrauchs,
77.000 GWh_{el},
5,8 % de PE-Bedarfs in Deutschland



Quelle: DKV-Statusbericht Nr. 22, 2002

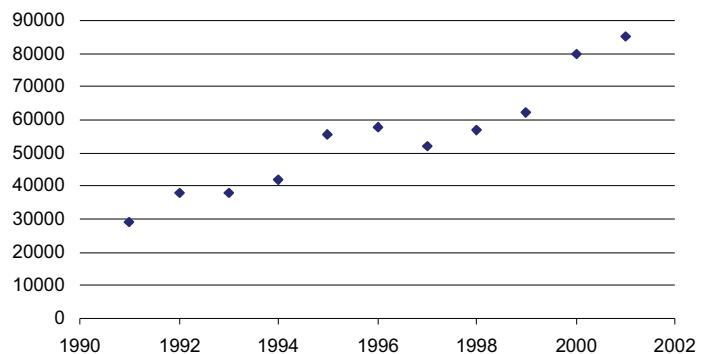
I.5 Markt der Raumklimageräte

Verkaufszahlen an
Raumklimageräten
in Deutschland

z. Vgl. Zahlen von 2002

Spanien u. Italien > 600.000 Stk
GB > 160.000 Stk
F > 220.000 Stk

95 % gehen in Deutschland in den
gewerblichen Sektor!



Quelle: CCI Promotor Verlag, 2003, Stiebel Eltron

I.6 Verfahren zur solaren Kälteerzeugung

Übersicht

Solare Kälteerzeugung:

1. Photovoltaik + elektrisch betriebene Kälteprozesse:
(Peltier-Elemente, Kompressionskälte)
2. Solarthermie + thermisch betriebene Kälteprozesse:

geschlossene Verfahren
-> Kaltwasser/Kaltsole

Sorptionsprozesse (Absorption, Adsorption)
Dampfstrahlkälteprozess Vuilleumier-Prozess,
Stirling-Stirling-Prozess

offene Verfahren
-> Kaltluft

DEC-Verfahren
L-DCS-Verfahren

II.1 Thermische Kälteprozesse

Leistungsdaten geschlossener Kälteverfahren

$$\eta_{\text{ges}} = \text{COP}(T_h, T_k, T_0) * \eta_{\text{koll}}(X)$$

$$X = (T_{k,m} - T_{\text{aussen}})/I$$

Solare Kühlung mit PV-Modulen
-> $\eta_{\text{ges}} = 0,08 * 4 = 0,32$

η_{ges} – Zahlenbeispiele für bekannte Anwendungen

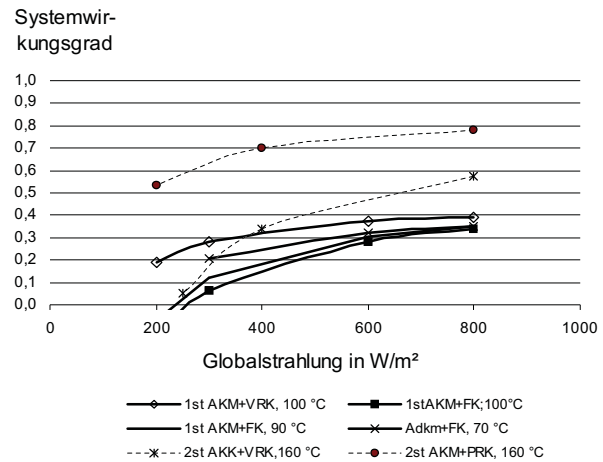
Verfahren	COP -	Leistungsbe- reich in kW	Heizmitteltemp eratur	allg. Leistungsverhalten	η_{ges}
Wasser- LiBr-AKM (SE)	0,55 – 0,75	(10) 30 – 5.000	70 – 130 °C	relativ träge, Gefahr der Kristallisation	$0,55 * 0,6 = 0,33$
Wasser- LiBr-AKM (DE)	1 – 1,35	200 – 5.000 (40.000)	135 – 180 °C	vgl. mit SE-Maschinen, relativ träge, Gefahr der Kristallisation	$0,5 * 1,2 = 0,6$
Wasser- NH ₃ -AKM (SE)	0,4 – 0,6	200 – 2000 kW	90 – 140 °C	insb. Anwendungen bei Verdampfertemperaturen unter 0 °C,	$0,5 * 0,6 = 0,3$
Wasser- Silicagel AdKM	0,4 – 0,65	70 – 350 kW	55 – 95 °C	quasikontinuierlicher Betrieb (Taktbetrieb), hohe Rückkühltemperatur möglich (auf Lasten des COP)	$0,5 * 0,55 = 0,275$
DSKM (KM Wasser)	0,3 - 1	1 – 15.000 kW	75 – 200 °C	gutes Teillastverhalten, schnelles Ansprechverhalten, einfache Prozeßgestaltung	$0,5 * 1 = 0,5$

II.4 Systemwirkungsgrade

Einfluß der Globalstrahlung

Betrachtete Systeme

- einstufiger Absorber & VRK,
- einstufiger Absorber & FK
- Adsorptionskälte & FK
- zweistufige AKM & PRK
- zweistufige AKM & VR



II.5 Überschlagsformeln

Abschätzung von Kollektorfläche Speichergröße

t_{vb} – Vollbenutzungsstunden in h/a

Q_0 – Nennkälteleistung in kW

f_{sd} – solarer Deckungsgrad

COP/COP_n – mittlere Leistungszahl Nenn-Leistungszahl

$\eta_{koll,m}$ – mittlerer Kollektorwirkungsgrad

W_{solar} – jährliche spez. Globalstrahlung, kWh/m²/a

SM – Solar Multiplier

$I_{solar,n}$ – Globalstrahlung in Nennlastfall, W/m

$$A_{koll} \sim (t_{vb} * Q_0 * f_{sd}) / (COP_m * \eta_{koll,m} * W_{solar,sp})$$

$$W_{sp} \sim 6h/d * I_{solar,n} * A_{koll} * \eta_{koll,n} * (1-1/SM)$$

$$SM \sim \eta_{koll,n} * A_{koll} * I_{solar,n} * COP_n / Q_0$$

$$A_{koll} \sim (250 * 58 * 0,8) / (0,58 * 0,3 * 980) = 136 \text{ m}^2$$

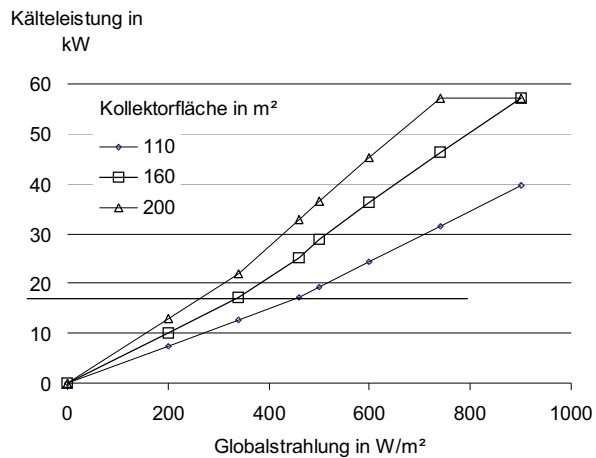
$$W_{sp} \sim 6 * 0,9 * 136 * 0,7 * (1-1/1,1) = 46 \text{ kWh}_{th}$$

$$SM \sim 0,70 * 136 * 0,900 * 0,75/58 = 1,1$$

II.6 Leistungsdiagramm

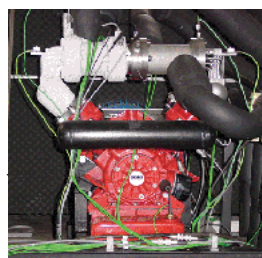
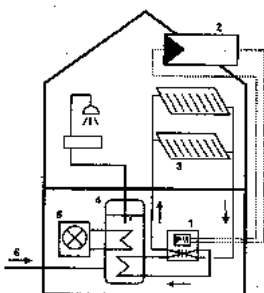
Einst. Wasser-LiBr-AKM + VRK
Kollektorbruttofläche als Parameter

Dimensionierung der Speicher,
(Kaltwasser, Heißwasserspeicher)
Dimensionierung des Kollektorfeldes,
Betriebskonzept,
Festlegung der Prozessparameter
(Nennbedingungen).



II.7 Elektrisch angetriebene Kältemaschinen

Stirlingkältemaschine:



- 1 Peltierkältemaschine (PKM)
- 2 PV-Generator
- 3 Kühlturm
- 4 Brauchwasserspeicher
- 5 Heizkessel
- 6 Trinkwasser

Peltierkälteanlagen:

- Kaskadenschaltung in Kombination mit Photovoltaik => Solare Klimatisierung, Uni-Siegen.
- Peltier-Module sind kleine thermoelektrische Einheiten auf Halbleiterbasis mit geringer Kälteleistung (≈ 100 W).
- Einsatz beim Temperieren von elektronischen Bauteilen.

Quelle: Prof. Dr. Krumm, W., Friesenwinkel, T.,: Photovoltaisch betriebene Peltierkältemaschine zur Gebäudekühlung: Konzeptpapier Universität Siegen, 2000

II.8 Kälteerzeugung mit PV-Modulen

Kompressions- kältemaschinen:

Weitere Anwendungen:

- solare Hauswasser/Trinkwasserkühlung
- Kühlcontainer für Arzneimittel
- photovoltaischer Eiserzeuger in Containerform
- Energieversorgung und Kühlung für eine Telekommunikationsanlage in Containerform

Quelle: ILK Dresden. Available Solar Cooling Applications

Solar Cooling Container¹⁾

Cooling system for cold storage of perishable goods and food stuffs

- basic unit: 20 ft container
- PV generator: 3.4 kWp
- cooling power: 5.1 kW (-5°C/45°C)
- cold storage room temperature: 0°C to 10°C (fan controlled)
- cold storage room capacity: 23 m³
- special features: cold storage for 3 days, redundant design of cooling system and energy supply



PV Milk Cooling Center¹⁾

System for cooling and cold storage of milk

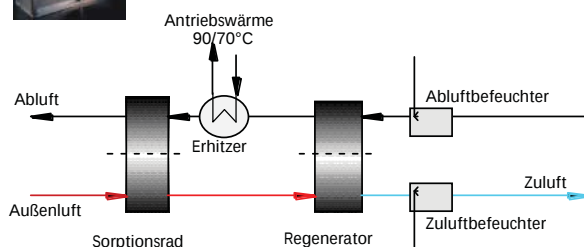
- basic unit: 20 ft container
- PV generator: 3.4 kWp
- cooling power: 11.3 kW (15°C / 50°C)
- milk storage and refrigeration capacity: 1000 l
- special features: ice storage with a capacity of 70 kWh, two-stage milk cooling, back-up generator



II.9 Adsorptionskälte

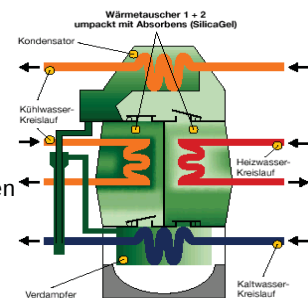
DEC-Verfahren, offene Sorptionsprozesse

Quelle: Klingenburg



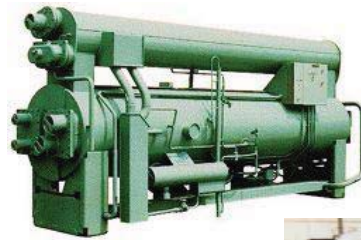
Wasser-Silicagel-
Adsorptionskältemaschinen

Quelle: Bine Profi-Info, 1998



II.10 Absorptionskältemaschinen

- Wasser-LiBr-Absorber (einstufig/zweistufig)
- Wasser-Ammoniak-Absorber (einst./zweistufig)
- spezielle Entwicklungen (SE/DL-Absorber, DL-Absorber)



Quelle: York Int.



Quelle: EES



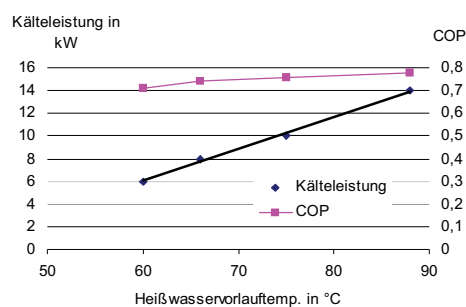
Quelle: Flughafen München

II.11 Absorptionskältemaschinen II

Einstufige Absorptionskältemaschine der
PHÖNIX SonnenWärme AG
Kälteleistung 6 - 16 kW
Markteinführung 2007



Quelle: www.sonnenwaermeag.de



EAW Energieanlagen Westenfelde
Wegracal SE15
Kälteleistung 15 kW bei 86 °C,
bisher 3 Anlagen realisiert.



Quelle: www.eaw-energieanlagenbau.de

II.12 Absorptionskältemaschine III, sonstige Verfahren

Heißwasser/Gasgefeuerte Absorber
(Heizkessel und Kältemaschine)

Quelle: www.broad.com Outdoor Units



Dampfstrahl-KM, mit PRK
Quelle: Fraunhofer UMSICHT



Quelle: Pink Chiller
(Wasser-NH₃)



Quelle: Climgazpro, France
(35 kW Wasser-LiBr)

III.I Beispielanlagen I

Pilotanlage Solitem GmbH,
Iberotel Sarigerme, Türkei

Dampfbefeuerte, zweistufige Wasser-LiBr-AKM

Kollektorfläche: 180 m²

Dampfparameter: 4 bar(ü), 143 °C



Quelle: Solitem GmbH Aachen.



Quelle: Solitem GmbH Aachen.

Kaltwassertemp.: 6/12 °C
Kühlwassertemp.: 27/35 °C
Dampfproduktion: 120 kg -> 70 kW_{th}
COP_n = 1,25
 $\eta_{koll} = 0,5$

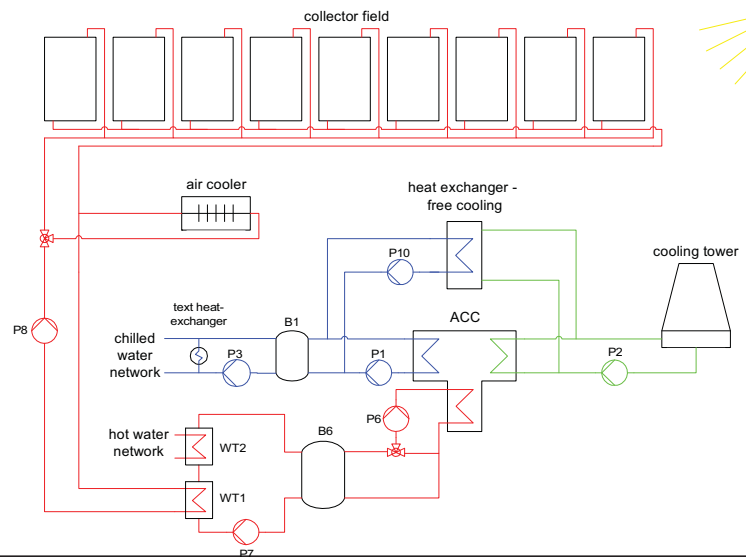
III.2 Beispielanlage II

Fraunhofer UMSICHT, Oberhausen

York Miniabsorber WFC 10
 58 kW Kälteleistung
 110 m² Kollektorfläche (Brutto)
 6,8 m³ Heißwasserspeicher
 1,5 m³ Kaltwasserspeicher

Freie Kühlung +
 Absorptionskälte

Quelle: Fraunhofer UMSICHT



III.3 Ansicht Gebäude C

Technisches Konzept:

- AKM mit Vakuumröhrenkollektoren.
- Ganzjährige Versorgung.
- Solare Kühlung, freie Kühlung, solare Wärme.



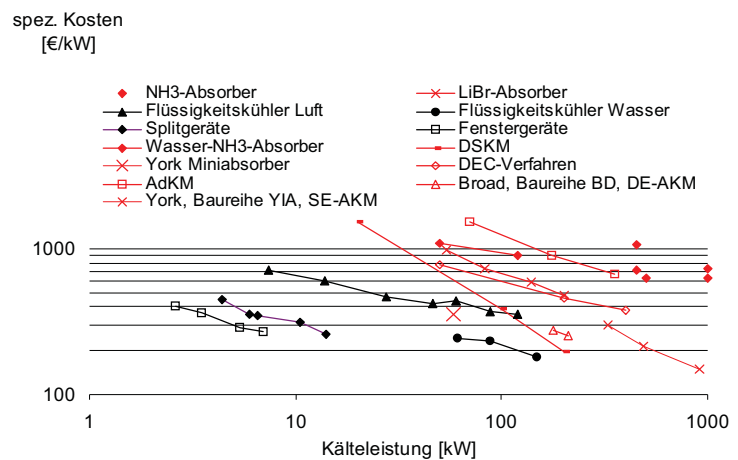
Quelle: Fraunhofer UMSICHT

III.4 Betriebsdaten 2005

Daten für 2005	Solare Einstrahlung (Globalstrahlung geneigt).	47,2 MWh _{th} ca. 655 kWh/m ² /a
tatsächliche Kältelieferung Netz: 15,3 MWh _{th}	Kollektornutzungsgrad	34 % ???
	mittlerer COP	0,58
	Kältelieferung AKM	12,6 MWh _{th}
(bisher 2006 14,9 MWh)	Kälteerzeugung über Freie Kühlung	2,7 MWh _{th}
	Strombedarf (inkl. Hilfssysteme und Kälteverteilung)	10,2 MWh _{th}
	Wasserverbrauch/Abwasser Verdunstungsmenge	100 m ³ , 49,6 m ³ 50,4 m ³

IV.1 Ökonomische Bewertung

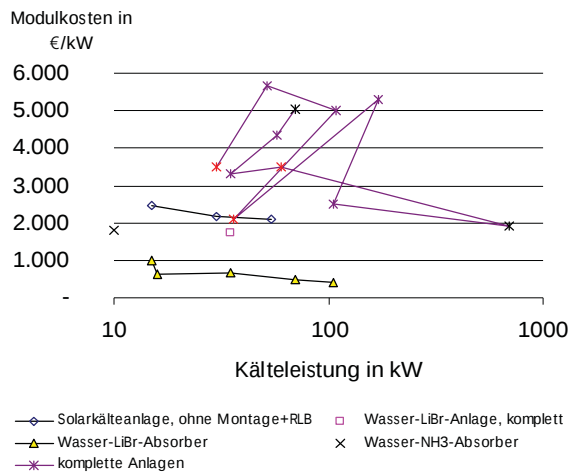
Spez. Investitionskosten, 2002
nur Kältemodule, ohne Hilfssysteme.



IV.2 Ökonomische Bewertung II

Spez. Investitionskosten, 2004, 2006

Entsprechend Angaben unterschiedlicher Hersteller/Errichter für unterschiedliche Systeme.



IV.1 Ökonomische Bewertung III

Fallbeispiel: Stromgrenzpreis für solarthermische Kälteerzeugung

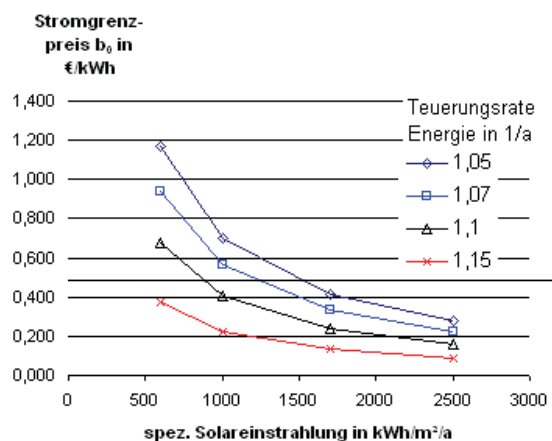
$$k_{el} = \frac{(k_{sp,koll} * (1+f) - k_{sp,0}) * 1/a_n * COP_{el}}{COP_{th} * \eta_{koll,m} * W_{solar}}$$

$$COP_{th} = 0,65, COP_{el} = 3,2$$

$$q_{kalk} = 1,05 (1/a), n = 20 a$$

$$k_{sp,koll} = 500 \text{ €/m}^2, k_{sp,0} = 113,7 \text{ €/m}^2$$

$$\eta_{koll,m} = 0,5, f=2$$



IV.3 Zusammenfassung

Trends/Erfahrungen:

- | | |
|---|--|
| - Eigene Anlage | - 2005 war im Anlagenbetrieb ein gutes Jahr
weitere Aktivitäten im Bereich der Betriebsoptimierung. |
| - Allg. Entwicklung | - Großes nationales u. internationales Interesse!!
Kältebedarf im privaten Sektor !!
- Wirtschaftlichkeit, Hilfsenergiebedarf -> Entwicklungs-
arbeiten sind erforderlich.
- Anzahl der Anbieter/Firmen steigt.
- Fördermöglichkeiten |
| - Zukünftige Vorhaben bei
Fraunhofer UMSICHT | - Entwicklungsarbeiten im Bereich der Ab- und Adsorptions-
kälteprozesse, auch im kleinen Leistungsbereich
- Entwicklungsprojekte zur Dampfstrahlkältetechnik |

VI.4 Literaturhinweise/Internetadressen

1. Entwicklungstendenzen und Wirtschaftlichkeitsolarthermischer Kühlung,
U. Eicker, HfT Stuttgart, Bd. 74 – Viertes Symposium „Solares Kühlen in der Praxis“.
2. Zimmermann, Mark. Handbuch der passiven Kühlung. Fraunhofer IRB-Verlag 2003.
3. Bine Informationsdienst Themeninfo I/04. Klimatisieren mit Sonne und Wärme. ISSN 1610-8302. Fachinformationszentrum
Karlsruhe, Mechenstr. 57, 53129 Bonn, internet: www.bine.info.
4. Berliner Energieagentur (Hrsg.) Solare Klimatisierung: Arbeitsplatzkomfort und Klimaschutz. 1. Aufl. Dezember 2004.
www.berliner-e-agentur.de.
5. Hans Martin Henning (ed.). Solar Assisted Air-Conditioning in Buildings: A Handbook for Planners. Springer Verlag 2004. XIV,
150 pages. 126 figures. ISBN 3-211-00647-8.
6. www.iea-shc-task25.org/english/index.html. Task 25: Solar-assisted air-conditioning of buildings.
7. www.ise.fhg.de/german/fields/field1/mb3/solar_cooling/index.html. www.solare-kaelte.de
8. <http://www.fv-sonnenenergie.de/Publikationen/index.php?id=5&list=180>.

- | | |
|---|---|
| 1. www.thermomax-group.com | Climasol (www.climgazpro.com) |
| 2. EAW Westenfelde (www.eaw-energieanlagenbau.de) | www.gasokol.at , www.pink.co.at |
| 3. Phönix Sonnenwärme AG (www.sonnenwaerme-ag.de) | www.sol-ution.com |
| 4. Solel (www.solel.com) | www.citrinsolar.de . |
| 5. ILK Dresden (www.ilkdresden.de) | www.conergy.de . |
| 6. Menerga (www.menerga.de) | www.solitem.de . www.broad.com |

IV.5 Ausblick

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

