

■ Wärme und Kälte aus der Sonne

- Solarkollektoren – Technologien und Systemtechnik
- Solare Nahwärme und saisonale Speicherung
- Solare Prozesswärme für Industrie, Meerwasserentsalzung und Solarchemie
- Solare Kühlung und Klimatisierung – Belüftung und Wärmerückgewinnung

Solarkollektoren – Technologien und Systemtechnik

Dr. Wolfgang Eisenmann
ISFH
w.eisenmann@isfh.de

Matthias Rommel
Fraunhofer ISE
matthias.rommel@ise.fraunhofer.de

Frank Späte
Solar-Institut Jülich -
Fachhochschule Aachen
spaete@sj.fh-aachen.de

Harald Drück
Universität Stuttgart;
Inst. für Thermodynamik
und Wärmetechnik
drueck@itw.uni-stuttgart.de

Einleitung

Die thermische Nutzung der Sonnenenergie ist in Deutschland seit rund 20 Jahren von einem starken Wachstum geprägt (Abb. 1). Die Branche hat sich und ihre Produkte in diesem Zeitraum deutlich professionalisiert.

Der Sonnenkollektor als Grundbaustein aller solarthermischen Systeme wandelt die auftreffende Solarstrahlung in Wärme um. Die wichtigsten Kollektorbauarten sind in Abb. 2 dargestellt.

Die verschiedenen Bauarten variieren deutlich in ihrer Leistungsfähigkeit und im Preis: Die unverglasten Kunststoffkollektoren werden zur Erwärmung von Freibädern im Temperaturbereich bis 30 °C eingesetzt, Flach- und Vakuumröhrenkollektoren zur Warmwasserbereitung und Gebäudeheizung sowie zur Klimatisierung im Temperaturbereich bis rund 80 °C, Parabolrinnen zur Bereitstellung industrieller Prozesswärme bis zu mehreren 100 Grad.

Damit stehen heute leistungsfähige und zuverlässige Kollektoren zur Verfügung, aber die Kosten müssen weiter gesenkt werden. Innovationen durch neue Materialien, Verfahren und Konzepte sind nach wie vor erforderlich.

Entwicklung der Kollektortechnik seit 1980

Besonders die Flachkollektoren sind in den letzten 25 Jahren weiter entwickelt worden. 1980 waren die verwendeten Absorberschichten für die Sonnenstrahlung meist nicht selektiv, und die transparente Abdeckung bestand häufig aus Kunststoffmaterialien. Die Einführung selektiver Absorberschichten wie z. B. Schwarzchrom ermöglichte einen entscheidenden Sprung in der Leistungsfähigkeit. Ab 1995 kamen die ersten in Vakuumverfahren hergestellten, hochselektiven Absorberschichten auf den Markt, die eine weitere Leistungssteigerung brachten.

Abbildung 1
Entwicklung des Kollektormarkts in Deutschland (Umrechnungsfaktor für alle Kollektorbauarten: $1 \text{ m}^2 \cong 700 \text{ W}_{th}$ vgl. [1])
Quelle: BSI

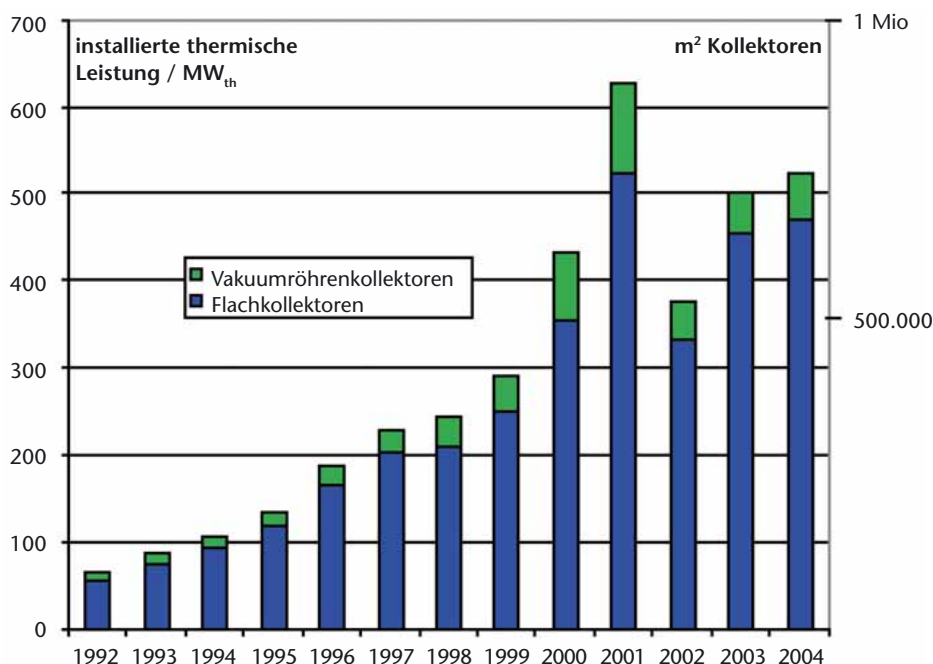


Abbildung 2
Bauarten von
Sonnenkollektoren



prismierten Gläser hat zu weiteren Ertragssteigerungen geführt. Seit etwa 2001 wird auch Antireflexglas für Solarkollektoren verwendet [1].

Neben Absorberblechen aus Kupfer sind in jüngster Zeit auch Aluminiumbleche auf dem Markt. Bei den Fügeverfahren zur Verbindung von Absorberblech und den Fluidkanälen dominieren heute die Ultraschall- und die neu hinzugekommene Laserschweißung. In den letzten Jahren hat auch die Automatisierung der Produktion erhebliche Fortschritte gemacht.

Hochwertige Vakuumröhrenkollektoren stehen schon seit längerer Zeit zur Verfügung. In ihnen ist der Zwischenraum zwischen Absorber und Verglasung evakuiert. Gegenwärtige Entwicklungen zielen vor allem auf Kostensenkungen, Verkürzung der Montagezeiten und Beherrschung des Stillstandsverhaltens.

Forschungsbedarf zur Stillstandsproblematik thermischer Solaranlagen

Die gestiegene Leistungsfähigkeit von Flachkollektoren drückt sich auch in einer Erhöhung der maximalen Stillstandstemperatur von etwa 140 °C (1980) bis teilweise über 230 °C (2005) aus. Viele Solaranlagen, insbesondere solche zur Heizungsunterstützung, sind für den Sommerbetrieb überdimensioniert. Bei vollständig beladenem Wärmespeicher schaltet die Solarpumpe ab. Das führt dazu, dass sich die sonnenbestrahlten Kollektoren immer weiter aufheizen. Bei fortdauernder Solarstrahlung verdampft die Wärmeträgerflüssigkeit. Abhängig von der hydraulischen Ausführung der Kollektoren und des Kollektorkreislaufs kann sich heißer Dampf über weite Strecken ausbreiten [2]. Dies kann zur vorzeitigen Alterung oder Beschädigung temperaturempfindlicher Komponenten (z. B. Membranausdehnungsgefäß oder Solarpumpe) führen und auch das Fluid selbst kann thermisch zu stark belastet werden.

Der Trend zu höher dimensionierten Solaranlagen und die gestiegene Leistungsfähigkeit der Kollektoren fördern das Auftreten von Anlagenstillstand mit der Verdampfung der Wärmeträgerflüssigkeit.

Diese „blauen Schichten“ haben inzwischen die Absorberschichten der ersten Generation weitgehend verdrängt.

Anfang der 90er Jahre hatte sich eisenarmes, hochtransparentes Sicherheitsglas als Material für die Kollektorabdeckung durchgesetzt. Die Verwendung von Klarglas oder schwachstrukturiertem Glas statt der vorher üblichen

*Abbildung 3
Metalldach-Sonnenkollektor nach dem Prinzip des Elastomer-Metall-Absorbers.
Oben: Formteile ohne und mit Elastomerschlauch, unten: Pilotanlage Freibad Nordstemmen*

Da aber hohe solare Deckungsanteile erforderlich sind, um fossile Brennstoffe möglichst weitgehend zu ersetzen und damit die Emission des klimaschädlichen Kohlendioxids zu reduzieren, müssen dringend Lösungen für die Stillstandsproblematik gefunden werden. Das Bundesumweltministerium fördert aus diesem Grund das Verbundprojekt „Systemuntersuchungen großer solar-thermischer Kombianlagen“, an dem die Firmen ZfS-Rationelle Energietechnik GmbH und Solar und Wärmetechnik Stuttgart (SWT) sowie die Forschungsinstitute Fraunhofer ISE und ISFH beteiligt sind (siehe auch [3]). Neben der Optimierung der Anlagentechnik für Großanlagen zur solaren Heizungsunterstützung ist es das Ziel, Ansätze zur Beherrschung des Stillstands Betriebs zu entwickeln. Hierzu ist vor allem das Verständnis der Vorgänge während der Stagnation durch Experimente an Einzelkollektoren, Test-Kollektorfeldern und realen Anlagen entscheidend verbessert worden.

Gebäudeintegration von Kollektoren

Wenn der Kollektor zusätzlich die Funktion der Gebäudehülle (Dach oder Fassade) übernimmt, ermöglicht diese Doppelnutzung wichtige Potenziale zur Kostensenkung. Des Weiteren bewirkt ein dach- oder fassadenintegrierter Kollektor – wenn er ohne thermische Trennung (Hinterlüftung) integriert ist – im Jahresmittel eine effektive Reduzierung der Wärmeverluste der Gebäudehülle, da sich der Absorber auch im Winter bei schwacher Solarstrahlung, die keinen Kollektorbetrieb ermöglicht, über Umgebungstemperatur erwärmt. Der Kollektor kann also insbesondere in der energetischen Sanierung des Gebäudebestandes und auch als Gestaltungselement eingesetzt werden.

Die Integration in die Fassade ist besonders interessant für Systeme mit hohen solaren Deckungsanteilen, weil der jahreszeitliche Verlauf der Einstrahlung auf die Kollektoren dem der Heizperiode besser angepasst ist und weil wesentlich seltener Stillstandsbetrieb entsteht als bei dachinstallierten Kollektoren.



Moderne Metalldächer sind architektonisch attraktiv und können so konstruiert werden, dass sie gleichzeitig als Sonnenkollektoren dienen. Die am ISFH entwickelten Konzepte für diese doppelte Nutzung von Dächern eröffnen neue Märkte für die Solarthermie, ermöglichen wichtige Kostensenkungen und sind architektonisch ansprechend. So ist es z. B. möglich, Zinkdächer als unverglaste Kollektoren auszuführen. Der Transport der Solarwärme erfolgt durch Kapillarrohrrmatten, die vom Wärmeträgermedium durchströmt werden und die auf die Rückseite des Zinkblechs aufgeklebt sind.

Dunkle Metalldächer aus Formteilen können mit Ω -förmigen Vertiefungen (sogenannten Sicken) ausgeführt werden, in die Schläuche aus Spezial-EPDM¹ eingelegt werden (s. Abb. 3, oben). Die absorbierte Sonnenenergie wird durch das in den Schläuchen zirkulierende Wasser aufgenommen und der Nutzung zugeführt. Die Konstruktion ist frostsicher, da der Schlauch die Volumenausdehnung beim Gefrieren problemlos aufnimmt. Dieses Prinzip des Elastomer-Metall-Absorbers (EMA) ermöglicht die Realisierung großflächiger, gebäudeintegrierter, kostengünstiger Sonnenkollektoren. Wenn höhere Wasser-

¹ EPDM: Ethylen-Propylen-Dien-Monomer Gummi

temperaturen gefordert sind, kann der Kollektor auch verglast ausgeführt werden. *Abb. 3* zeigt die erste Pilotanlage im Freibad Nordstemmen, die 2005 im Rahmen eines von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderten Projektes des ISFH realisiert wurde. Weitere mögliche Anwendungsbereiche sind industrielle Prozesswärme, Wasserentsalzung und Warmwasserbereitung.

Innovationen

Neue Materialien

Die Verwendung neuer Materialien für nahezu alle Komponenten des Kollektors eröffnet neue Chancen:

- Beim Absorbermaterial sind neben Kupfer und Aluminium auch Stahl oder Kunststoffe interessante Optionen.
- Farbige Absorberschichten (teilstelektive Lacke) sind Gegenstand intensiver Forschung [3] und werden sicher die Akzeptanz der Solartechnik bei Architekten verbessern und bieten erhebliche Kostensenkungspotenziale. Sie können in Zukunft auch auf unverglasteten Kollektoren im Dach oder in der Fassade angewendet werden.

Selbstreinigende Antireflexverglasungen könnten hohe Erträge ohne Alterungserscheinungen sicherstellen. Kollektorgehäuse aus Kunststoff sind bei hohen Stückzahlen kostengünstiger als die heute gängigen Aluminium-Rahmenkonstruktionen. Hochtemperaturbeständige Vakuumdämmungen ermöglichen sehr flache, leistungsstarke Kollektoren, die sich auch in Fensterkonstruktionen einbauen lassen [5]. Neue Kollektorfluide könnten mittelfristig die Stillstandsproblematik entschärfen [6].

Neue Verfahren

Ein Solarkollektor mit bionischen Strömungsstrukturen wird derzeit am Fraunhofer ISE entwickelt [6]. Natürliche Konstruktionen weisen im Gegensatz zu üblichen seriellen oder parallelen Kanalanordnungen in Solarabsorbern meist mehrfach verzweigte („fraktale“) Netzwerke auf. Im Rahmen eines von der DBU geförderten Projekts wird dieses biologische Prinzip auf



Abbildung 4
Absorber mit
bionischer
Strömungsstruktur

die Technik übertragen, um eine gleichmäßige Durchströmung bei geringem Druckverlust zu erreichen. Mit Hilfe eines mathematischen Algorithmus (FracTherm) ist es möglich, eine gegebene Fläche mit festgelegtem Ein- und Austrittspunkt mit einem fraktalen Hydrauliknetzwerk zu versehen. Der in *Abb. 4* gezeigte Absorber wurde mit Hilfe eines Verfahrens gefertigt, das den Vorteil bietet, auch sehr komplexe Geometrien herzustellen zu können. Die Absorber erreichen dadurch sehr hohe Kollektorwirkungsgradfaktoren, d. h. die Solarstrahlung wird sehr effektiv auf das Fluid übertragen. Bisherige Untersuchungen des FracTherm-Absorbers zeigten eine gleichmäßigere Durchströmung und bei hohen Massenströmen einen geringeren Druckverlust als bei vergleichbaren Absorbern mit paralleler Kanalanordnung (Harfenabsorber). Das ästhetische Aussehen könnte bei zukünftigen Entwicklungen vor allem auch für Solarfassaden interessant sein.

Konzepte für Prozesswärme

Die hohen Energiepreise erhöhen die Nachfrage nach solar erzeugter Wärme. Das gilt auch für Wärme mit höherem Temperaturniveau z. B. für industrielle Prozesse (100 – 300 °C) oder Klimatisierung (> 80 °C). Zur Zeit werden angepasste und neuartige Kollektorkonzepte dafür intensiv erforscht und für den Markt erschlossen (siehe zum Beispiel [7]).

Abbildung 5
Parabolrinnenkollektor
des SIJ (Prototyp)



Folgende Konzepte sind in der Entwicklung:

- Spezielle Flachkollektoren mit zweifacher, reflexionsarmer Verglasung und Argonfüllung im Scheibenzwischenraum.
- Konzentrierende Kollektoren, insbesondere Parabolrinnenkollektoren. An diesen Entwicklungen arbeiten z. B. die Firma Kopf gemeinsam mit der AEE in Österreich oder die Firma Solitem gemeinsam mit dem DLR in Köln und dem Solar-Institut Jülich (SIJ). Bei der SIJ-Entwicklung einer kleinen Parabolrinne ($2 \times 1 \text{ m}^2$) als Absorber wurde eine preiswerte, leistungsfähige Vakuumröhre chinesischer Bauart verwendet (Abb. 5)
- Ein Vakuumreceiver für große Rinnen wurde von der Firma Schott entwickelt und wird in der „Euro-Trough“-Rinne, einer europäischen Entwicklung unter Beteiligung des DLR, eingesetzt. Dies ist die derzeit leistungsfähigste Parabolrinne.

Weitere Konzepte

Solarkollektoren, die statt Flüssigkeiten Luft in den Fluidkanälen verwenden, werden als Luftkollektoren bezeichnet. Sie bieten sich vor allem dort an, wo auch das Wärmeversorgungssystem mit Luft betrieben wird, z. B. bei der Hallenheizung oder bei sorptionsgestützter Klimatisierung. Wesentliche Vorteile sind die inhärente Frostsicherheit und das unproblematische Stillstandsverhalten.

Photovoltaisch-thermische Hybridkollektoren (PVT) erzeugen aus dem Sonnenlicht gemeinsam thermische und elektrische Energie, indem die Abwärme der Solarzellen einer thermischen Nutzung zugeführt wird. Diese Systeme verfügen über eine hohe Gesamtausbeute. Sie weisen außerdem Potenziale für Kosteneinsparungen gegenüber getrennten Photovoltaik- und Kollektorsystemen auf, da nur ein Gehäuse und nur ein Montageschritt erforderlich sind. Zudem wird ein gemeinsamer Vertrieb von Solarstrom- und Solarwärmesystemen ermöglicht. Diese Vorteile können langfristig an Bedeutung gewinnen, wenn die Dachflächen knapper werden oder die Installationskosten gesenkt werden sollen. Nachteilig ist, dass die thermische Leistungsfähigkeit von PVT-Kollektoren beim gegenwärtigen Stand der Technik im Vergleich zu herkömmlichen Flachkollektoren deutlich reduziert ist. Außerdem weisen heute viele Komponenten (insbesondere das Laminat und Elektronikbauteile für den PV-Teil) eine zu geringe Temperaturbeständigkeit für den Einsatz in verglasten PVT-Kollektoren auf. Erhebliche Forschungsanstrengungen zur Verbesserung der Materialien und Wärmeübergänge sind erforderlich, um die hohen Potenziale realisieren zu können und um marktreife Produkte zu entwickeln. Im laufenden EU-Projekt „PV-Catapult“ ist unter Beteiligung des Fraunhofer ISE und des ISFH ein Entwicklungs- und Vermarktungsplan für PVT-Systeme erarbeitet worden [8].

Genormte Verfahren zur Prüfung der Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit sind gerade für die Entwicklung und Einführung innovativer Kollektoren besonders wichtig. Für die heute marktgängigen Bauarten findet EN 12975 Anwendung. Zusätzlich zu den genormten Verfahren ist es aber auch wichtig zu wissen, wie sich die Leistungsfähigkeit der Kollektoren im Lauf

der Zeit verändert. Ursächlich für eine eventuelle Abnahme der Kollektorleistung können z.B. Degradationserscheinungen der Absorberschicht oder eine Abnahme der Transmission der Glasscheibe sein. In dem am Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW) bearbeiteten Vorhaben „QanKoll“, gefördert durch das Förderprogramm Solarthermie 2000 plus des BMU wird zur Zeit das Alterungsverhalten der gegenwärtigen Generation von Sonnenkollektoren untersucht.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit heutiger Sonnenkollektoren hat einen hohen Stand erreicht. Dennoch müssen für eine verbesserte Wirtschaftlichkeit die Gesteuerungskosten der Solarwärme weiter deutlich gesenkt werden. Große Potenziale liegen für Warmwasser-Systeme weniger in einer weiteren Steigerung der Leistungsfähigkeit als vielmehr in einer Verbesserung des Preis/Leistungs-Verhältnisses. Weitere Verbesserungen der Zuverlässigkeit sind vor allem für eine sichere Beherrschung des Stillstandsbetriebs in Kollektor und Kollektorkreislauf erforderlich.

Zur Erreichung dieser Ziele und für neue Anwendungsbereiche ist die Entwicklung und Verwendung neuer Materialien für nahezu alle Komponenten des Kollektors erforderlich. Zur Erprobung dieser Materialien werden immer wieder Langzeit- und Alterungsuntersuchungen notwendig sein. Neue Kollektorkonzepte werden insbesondere zur Erschließung neuer Anwendungsbereiche für höhere Betriebstemperaturen benötigt: Prozesswärme, solare Kühlung, Meerwasserentsalzung etc.

Mit der Verbreiterung der Anwendungsgebiete der Solarwärme wird auch eine Diversifizierung der Kolleortypen unter Entwicklung anwendungsspezifisch optimierter Bauarten einhergehen. Luftkollektoren, konzentrierende Kollektoren und photovoltaisch-thermische Hybridkollektoren sind interessante Konzepte für die Zukunft, für die auch angepasste Prüfverfahren und -normen entwickelt werden müssen.

Der Trend zu größeren Kollektorflächen lässt sinkende anteilige Installationskosten erwarten. Gebäudeintegration und farbige Absorberschichten werden die Möglichkeiten zur architektonischen Gestaltung weiter verbessern. Die zunehmende Automatisierung der Produktion und die Verfeinerung der Qualitätssysteme der Hersteller werden die Konstanz der Fertigungsqualität noch erhöhen und die Kosten senken.

Literatur

- [1] Weitere Informationen zur neuen, auf die Leistung bezogenen Solarwärme-Statistik siehe http://www.iea-shc.org/welcome/Technical_note_solar_thermal_capacity.doc
- [2] Hausner H., Fink C.: Stagnation behaviour of solar thermal systems. Download unter http://www.iea-shc.org/outputs/task26/A_Hausner_Stagnation.pdf
- [3] <http://solarkombianlagen-xl.info>
- [4] Berner J.: Energiereiche Farben. Sonne, Wind und Wärme 09-2005, S. 38-40
- [5] Reim M. et al.: Silica aerogel granulate material for thermal insulation and daylighting. Solar Energy 79 (2005) 131-139.
- [6] Bösmann A.: Ionische Flüssigkeiten als neue Wärmeträgermedien. Tagungsband 13. Symposium Thermische Solarenergie OTTI, S. 174-178, 2003
- [7] Hermann M.: Entwicklung des FracTherm-Absorbers – Simulationen und Experimente. Tagungsband 15. Symposium Thermische Solarenergie OTTI, S. 94-99, 2005
- [8] Rommel M., Weiss W. (ed.): Medium Temperature Collectors. Download unter http://www.iea-shc.org/3_1.html (IEA SHC Task 33)
- [9] Download der Roadmap unter http://www.pvtforum.org/f_roadmap.html

Solare Nahwärme und saisonale Speicherung

Dr. Wolfgang
Heidemann

Universität Stuttgart
Institut für
Thermodynamik und
Wärmetechnik

heideman@
itw.uni-stuttgart.de

Christian Dötsch

Fraunhofer UMSICHT
(Institut für Umwelt-,
Energie-, und
Sicherheitstechnik)

christian.doetsch@
umsicht.fraunhofer.de

Prof. Dr. Hans
Müller-Steinhagen

DLR

hans.muellersteinhagen@
dlr.de

Einleitung

Die Nutzung thermischer Solarenergie (Solarthermie) erfreut sich zunehmender Beliebtheit. In den vergangenen Jahren stieg die jährlich installierte solarthermische Kollektorfläche in Deutschland um durchschnittlich ca. 20 % und beträgt derzeit ca. 900.000 m²/a. Diese Kollektorfläche dient entweder ausschließlich der Trinkwassererwärmung oder der kombinierten Trinkwassererwärmung und Heizungsunterstützung. Während bei der Wärmeerzeugung mit fossilen Brennstoffen unweigerlich Schadstoffe durch Verbrennen entstehen – vorrangig das für die globale Erwärmung verantwortliche Kohlendioxid (CO₂) – lassen sich diese Emissionen beim zusätzlichen Einsatz einer Solaranlage deutlich vermindern. Thermische Solaranlagen stellen daher einen wichtigen Baustein für eine umweltfreundliche und nachhaltige Energieversorgung dar.

Eine Übersicht der in Deutschland zur thermischen Solarenergienutzung eingesetzten Anlagentypen ist in *Abb. 1* gezeigt. Kleinanlagen mit typischerweise 1 bis 1,5 m² Kollektorfläche pro Person, wodurch sich Kollektorflächen pro Haus unter 10 m² bzw. 20 m² ergeben, kommen sehr häufig in Ein- oder Zweifamilienhäusern zum Einsatz. Der durch Solarenergie abdeckbare Anteil am Gesamtwärmebedarf beträgt bei Kleinanlagen 15 % für Trinkwassererwärmung und für die kombinierte Trinkwassererwärmung und Heizungsunterstützung 25 %.

Großanlagen mit mehr als hundert bis zu einigen tausend Quadratmetern Kollektorfläche sind relativ selten anzutreffen. Sie bieten jedoch die Möglichkeiten großer Preisreduktionen, da die spezifischen Anlagenkosten mit der Anlagengröße abnehmen. So betragen die Systemkosten für große Solaranlagen ca. 500 Euro pro Quadratmeter Kollektorfläche gegenüber ca. 1000 Euro pro Quadratmeter Kollektorfläche bei Kleinanlagen. Für die Wärmeversorgung von größeren Wohnsiedlungen mit mindestens 100 Wohn-

einheiten wurden in den vergangenen Jahren Anlagen entwickelt, die den fossilen Brennstoffbedarf zur Wärmeversorgung um bis zu 50 % und mehr reduzieren. Ein wichtiger Baustein dieser Versorgungskonzepte ist die Nutzung von solarthermischer Energie in Nahwärmeversorgungssystemen mit saisonaler Wärmespeicherung.

Innerhalb der Förderprogramme Solarthermie 2000 und Solarthermie 2000 plus wurden seit 1993 insgesamt neun Pilotanlagen mit Langzeit-Wärmespeicher in Deutschland in die Praxis umgesetzt, von denen sechs in *Abb. 2* gezeigt sind. Große Solaranlagen mit bis zu 3000 m² Kollektorfläche sind heutzutage Stand der Technik. Derzeit entsteht in Crailsheim eine Solarthermieanlage, die nach ihrer Fertigstellung mit 259 Wohneinheiten, 7325 m² Flachkollektoren und 40.500 m³ Erdsonden-Wärmespeicher zu den größten Deutschlands gehören wird. Im Rahmen der von der Bundesregierung initiierten Innovationsagenda wurde das Projekt Crailsheim im Dezember 2004 vom Impulskreis Energie als eines von vier innovativen „Leuchtturmprojekten“ und einziges auf dem Gebiet der erneuerbaren Energien ausgewählt. Die vom Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik wissenschaftlich-technisch betreuten Pilotanlagen im Rahmen von Solarthermie 2000 plus befinden sich in Friedrichshafen, Neckarsulm, Rostock und Crailsheim.

Kleinanlagen

<p>Trinkwassererwärmung</p> <p>Kollektorfläche < 10 m²</p> <p>Ein- und Zwei-Familienhäuser</p> <p>15% solarer Deckungsanteil am Gesamtwärmebedarf</p> <p>Einsatz im Alt- und Neubau</p>	<p>Trinkwassererwärmung und Heizungsunterstützung</p> <p>Kollektorfläche < 20 m²</p> <p>Ein- und Zwei-Familienhäuser</p> <p>25% solarer Deckungsanteil am Gesamtwärmebedarf</p> <p>Einsatz im Alt- und Neubau</p>
--	--

Großanlagen

<p>Trinkwassererwärmung</p> <p>Kollektorfläche > 100 m²</p> <p>Mehrfamilienhäuser, Krankenhäuser</p> <p>15 – 20% solarer Deckungsanteil am Gesamtwärmebedarf</p> <p>Einsatz im Alt- und Neubau</p>	<p>Nahwärme mit Kurzzeit-Wärmespeicher</p> <p>> 30 – 40 Wohneinheiten</p> <p>Mehrfamilienhäuser, Krankenhäuser</p> <p>15 – 20% solarer Deckungsanteil am Gesamtwärmebedarf</p> <p>Einsatz im Neubau</p>	<p>Nahwärme mit Langzeit-Wärmespeicher</p> <p>> 100 Wohneinheiten</p> <p>Ein- und Zwei-Familienhäuser</p> <p>50% solarer Deckungsanteil am Gesamtwärmebedarf</p> <p>Einsatz im Neubau</p>
---	---	---

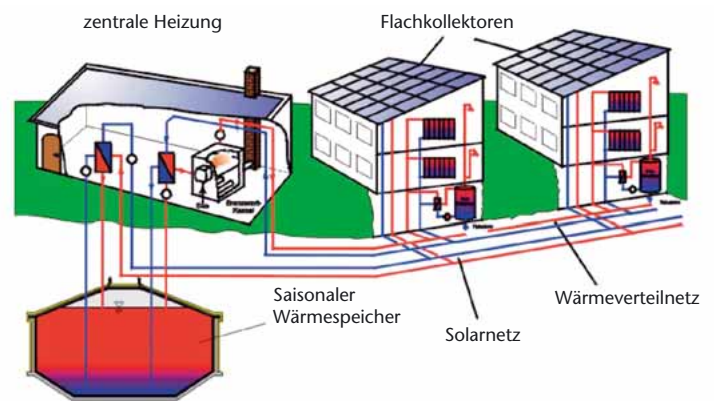
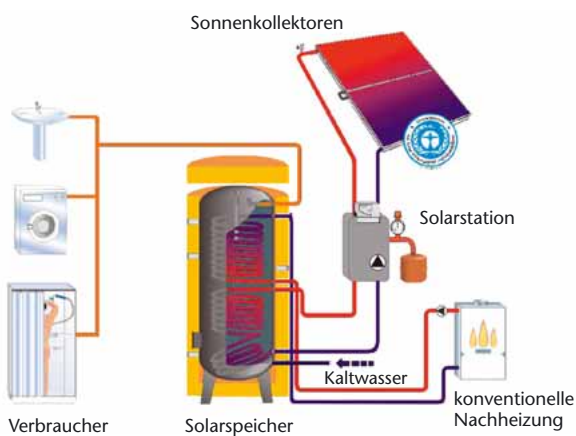


Abbildung 1 Anlagentypen in Deutschland



a Friedrichshafen-Wiggenhausen (1996)
380 Wohnungen, 4.050 m² Flachkollektor,
12.000 m³ Heißwasser-Wärmespeicher



b Steinfurt-Borghorst (1999)
23 Reihenhäuser, 510 m² Flachkollektor,
1.500 m³ Kies/Wasser-Wärmespeicher



c Hamburg-Bramfeld (1996)
124 Reihenhäuser, 3.000 m² Flachkollektor,
4.500 m³ Heißwasser-Wärmespeicher

Abbildung 2 Pilotanlagen zur solar unterstützten Nahwärmeversorgung

Bildquelle: a, b, d, e
Uni Stuttgart, ITW

Bildquelle: c, f
Prof. Em. Gockell, IGS,
Uni Braunschweig



d Rostock-Brinkmannshöhe (1996)
108 Wohnungen, 1.000 m² Flachkollektor,
20.000 m³ Aquifer-Wärmespeicher



e Neckarsulm-Amorbach (1998)
5.263 m² Flachkollektor,
63.360 m³ Erdsonden-Wärmespeicher



f Hannover-Kronsberg (2000)
106 Wohnungen, 1.350 m² Flachkollektor,
2.750 m³ Heißwasser-Wärmespeicher

Solarthermische Großanlagen zur solarunterstützten Nahwärmeversorgung

Abb. 3 zeigt das Schema einer Nahwärmeversorgung mit Langzeit-Wärmespeicher, in die solarthermische Kollektorfelder integriert sind. Die von den Sonnenkollektoren gewonnene Wärme wird über das Solarnetz in Form heißen Wassers zur Heizzentrale transportiert und bei Bedarf direkt an die Gebäude verteilt. Die Kollektoren sind auf den Dächern der Gebäude montiert, die möglichst nahe an der Heizzentrale liegen. Die im Sommer anfallende Überschusswärme wird in den saisonalen Wärmespeicher eingespeist, der in den Untergrund des Siedlungsgebietes eingebaut ist.

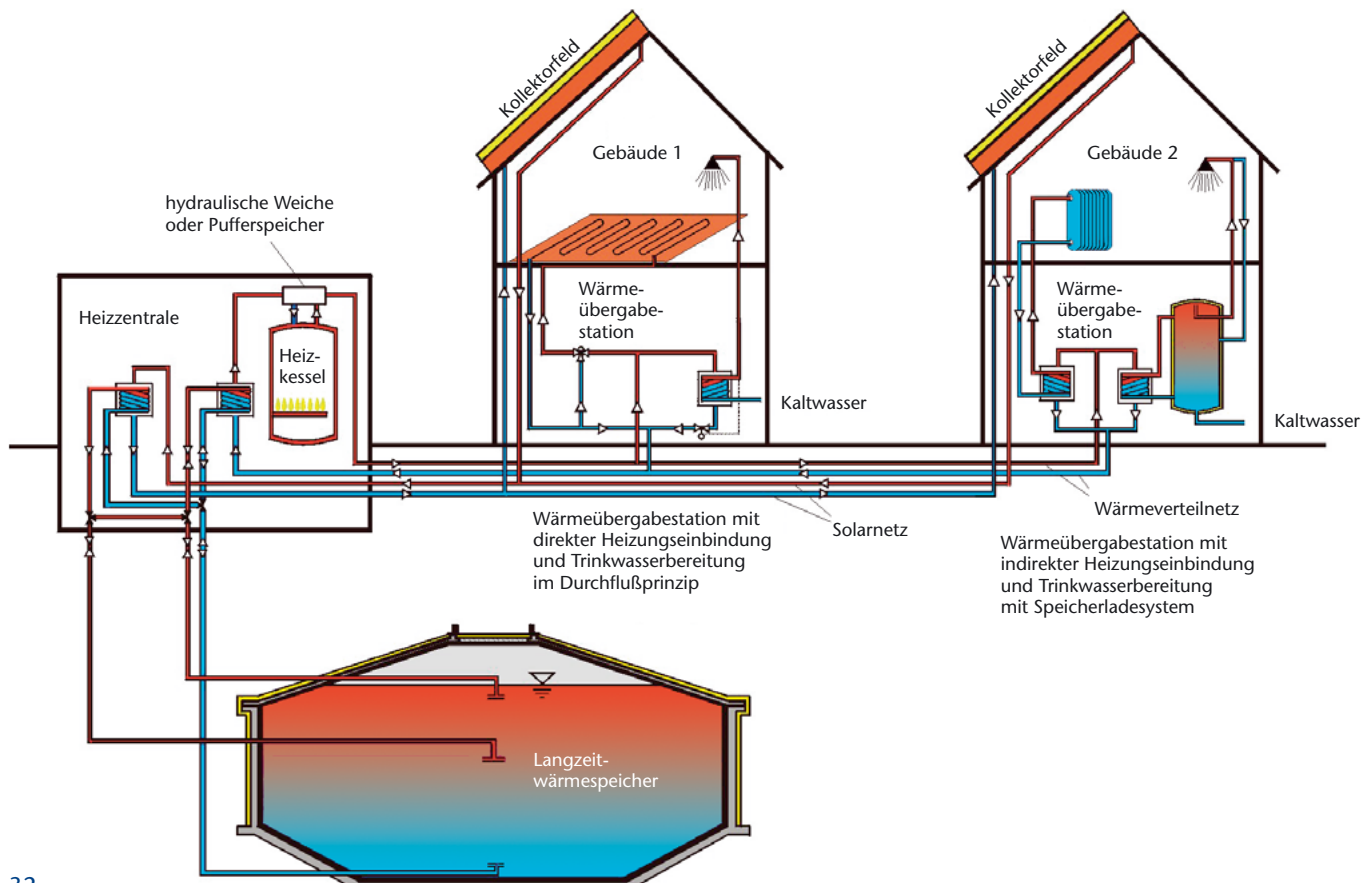
als Verbindung zwischen dem Wärmeverteilnetz und den hausinternen Installationen. Die Heizzentrale verwendet die im Langzeit-Wärmespeicher gespeicherte Solarwärme und heizt bei Bedarf konventionell nach, z. B. mit einem Gasbrennwertkessel. Ein Vorteil einer zentralen Wärmeversorgung ist, dass der zusätzliche Wärmeversorger schnell an neue technische Entwicklungen angepaßt werden kann.

Um die bei solarthermischen Großanlagen angestrebten hohen solaren Deckungsgraden von 40 - 50 % am Wärmebedarf von Haushalten zu erreichen, muss die solare Wärmestrahlung im Sommer über eine saisonale Wärmespeicherung im Winter zu Verfügung stehen. Derzeit stehen dafür vier erprobte Techniken zur Verfügung, die im Abb. 4 gezeigt sind.

Abbildung 3
Schema einer solarunterstützten Nahwärmeversorgungsanlage

Das über das Wärmeverteilnetz gelieferte Heizwasser versorgt die Heizung und Trinkwassererwärmung der Gebäude. Jedes Gebäude verfügt über eine eigene Wärmeübergabestation

Alle Langzeit-Wärmespeichertypen funktionieren zuverlässig, sie müssen jedoch noch weiterentwickelt werden, um die derzeit hohen Baukosten zu reduzieren. Die Entscheidung für einen



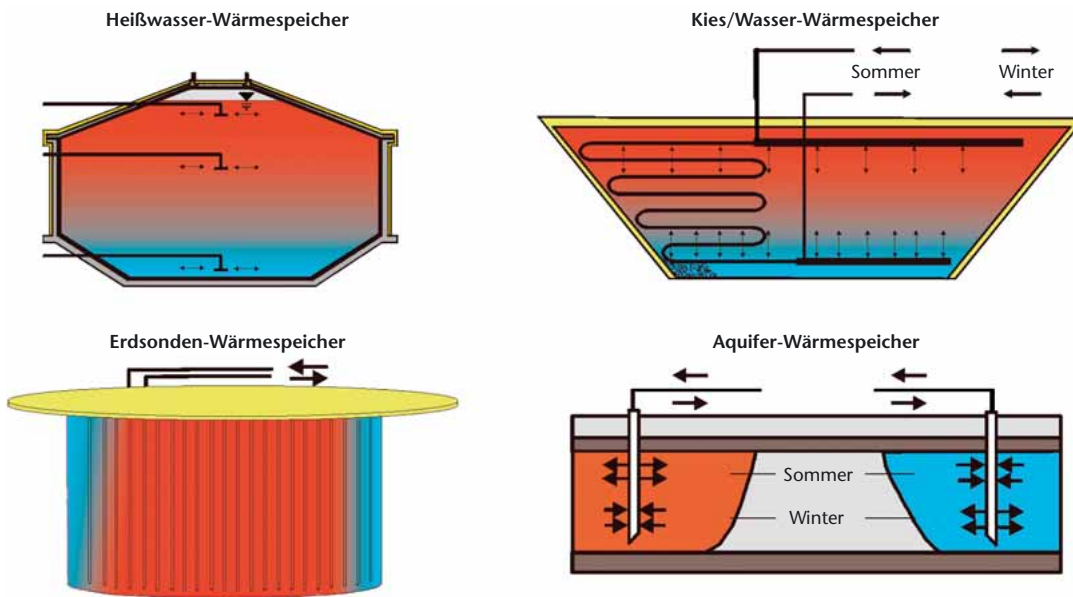


Abbildung 4
Langzeit-Wärmespeichertypen

bestimmten Speichertyp hängt im Wesentlichen von den örtlichen Gegebenheiten, dem notwendigen Speichervolumen und insbesondere von den geologischen und hydrogeologischen Verhältnissen im Untergrund des jeweiligen Standortes ab:

Heißwasser-Wärmespeicher

Heißwasser-Wärmespeicher können unabhängig von der Geologie und auch in kleiner Baugröße, z. B. als Wärmespeicher für einen Zeitraum von Tagen bzw. Wochen, eingesetzt werden.

Die wassergefüllte Tragkonstruktion aus Stahlbeton ist teilweise im Erdreich eingebaut. Eine Wärmedämmung ist besonders im Bereich des Deckels und der Seitenwände vorteilhaft beziehungsweise meist notwendig. Die wasserdichte Auskleidung des Speichers musste in früheren Projekten (Rottweil, Hamburg und Friedrichshafen vgl. *Abb. 2*) aus Edelstahlblech ausgeführt werden. In Hannover konnte im Jahr 2000 zum ersten Mal eine neuartige Betonmischung erfolgreich eingesetzt werden, deren Wasserdampfdurchlässigkeit so gering ist, dass auf eine zusätzliche Auskleidung verzichtet werden kann.



Abbildung 5
Heißwasser-Wärmespeicher (12000 m³) während der Bauphase (Friedrichshafen)

Quelle: Uni Stuttgart, ITW

Diese Vorgehensweise stellt heutzutage den Stand der Technik dar.

Eine Alternative zur beschriebenen Betonkonstruktion stellen Behälter aus glasfaserverstärkten Kunststoffen dar. Die Speicher werden drucklos im Temperaturbereich von 30 bis 95 °C betrieben. Um eine Durchmischung des Speicherinhaltes beim Be- und Entladen des Speichers zu verhindern, sind spezielle Vorrichtungen notwendig, die den Zu- und Ablauf wirbelfrei gewährleisten müssen. Derartige Ladewechseleinrichtungen werden zum Beispiel oft als Prallteller ausgeführt.

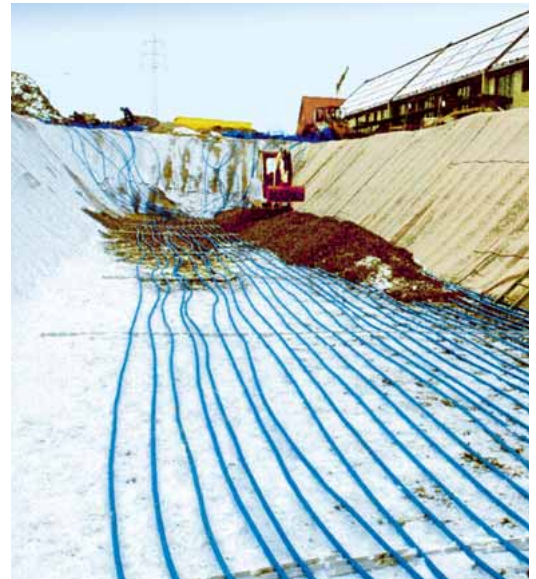
Abbildung 6
Aufbau des Kies/
Wasser-Wärme-
speichers (1500 m³)
in Steinfurt-Borghorst

Quelle: Uni Stuttgart, ITW

Kies/Wasser-Wärmespeicher

Kies/Wasser-Wärmespeicher haben eine mit wasserdichter Kunststoffolie ausgekleidete Grube, die mit einem Kies/Wasser-Gemisch als Speichermedium gefüllt ist (Abb. 6). Der Speicher ist seitlich und oben, bei geeigneter Druckfestigkeit des Dämmstoffes auch unten wärmedämmt. Die Ein- und Ausspeicherung der Wärme erfolgt über direkten Wasseraustausch oder indirekt über Rohrschlangen. Eine statische Tragkonstruktion ist nicht notwendig, da die auftretenden Lasten über den Kies an die Seitenwände und den Boden abgetragen werden.

Derzeitig eingesetzte Abdichtfolien begrenzen die Maximaltemperaturen auf ca. 90 °C. Bedingt durch die geringere Wärmekapazität des Kies/Wasser-Gemisches im Vergleich zu Wasser muss das Speichervolumen ca. 50 % größer gewählt werden, um die gleiche Wärmemenge wie in einem Heißwasser-Wärmespeicher speichern zu können. Speicher dieser Art sind am ITW der Universität Stuttgart seit 1985 sowie in Chemnitz, Augsburg und Steinfurt-Borghorst in Betrieb.



Erdsonden-Wärmespeicher

Erdsonden-Wärmespeicher speichern die Wärme in den Untergrund bzw. ziehen sie aus diesem wieder heraus. Abb. 7 zeigt verschiedene Typen von Erdwärmesonden sowie einen vertikalen Schnitt durch eine Erdwärmesonden-Bohrung. Geeignete Untergründe für Speicher dieser Art sind wassergesättigte Tone bzw. Tonsteine ohne oder mit nur geringer Grundwasserbewegung. Typische Werte für Bohrloch-Durchmesser liegen bei 100 - 200 mm, die Abstände zwischen zwei Bohrlöchern bei 1,5 - 3 m und die Bohrloch-tiefen bei 20 - 100 m. Eine Wärmedämmung kann nur zur Oberfläche hin erfolgen. Aufgrund der dadurch bedingten höheren Wärmeverluste zu den Seiten und nach unten hin sind nur große Speicher (> 50 000 m³) dieses Typs sinnvoll, bei denen kleine Oberflächen/Volumen-Verhältnisse erreicht werden können. Maximale Speichertemperaturen liegen bei ca. 80 °C, begrenzt durch die Lebensdauer des Erdwärmesonden-Materials. Durch die geringere Wärmekapazität des Speichermediums gegenüber Wasser und aufgrund einer geringeren Temperaturspreizung im Betrieb, müssen Wärmespeicher dieser Bauart im Vergleich zu Heißwasser-Wärmespeichern ein etwa 3 bis 5 mal größeres Volumen besitzen. Vorteilhaft ist bei diesem Speichertyp der im Vergleich zum Heißwasser-Wärmespeicher geringere Bauaufwand sowie ein möglicher modularer Aufbau bzw. eine sich dem Baufortschritt eines Wohngebietes anpassende Speichergröße.

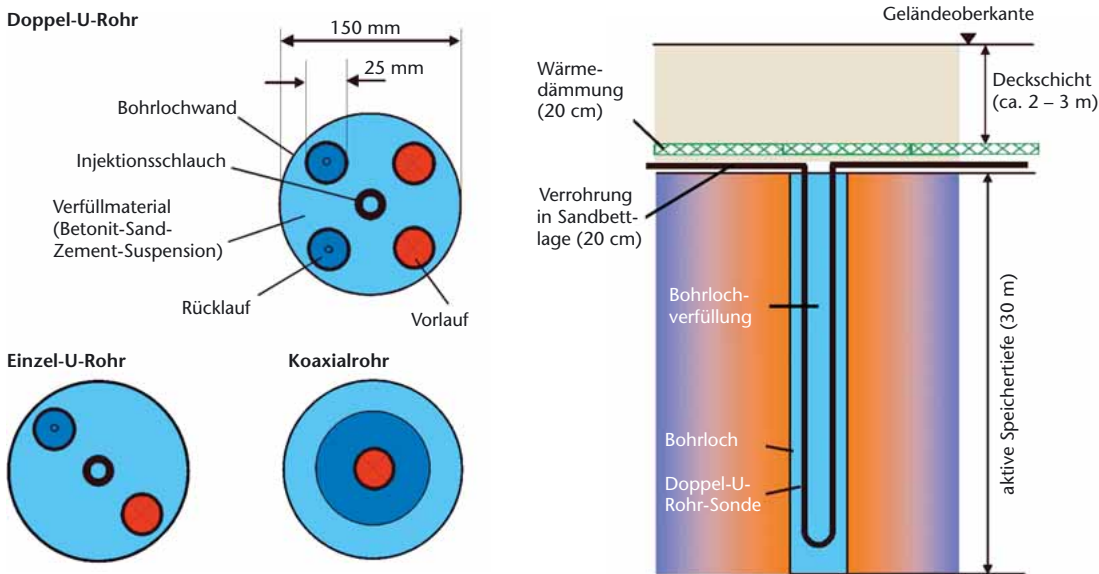


Abbildung 7
Aufbau von Erdwärmesonden

Aquifer-Wärmespeicher

Aquifer-Wärmespeicher nutzen natürlich vorkommende, nach oben und unten abgeschlossene Grundwasserschichten zur Wärmespeicherung. Über eine Brunnenbohrung (kalte Bohrung) wird dem Speicher Grundwasser entnommen, dieses über einen Wärmeübertrager erwärmt und über eine weitere Bohrung (warme Bohrung) wieder in den Untergrund eingeleitet (Abb. 8). Die Entnahme der Wärme erfolgt durch eine Umkehrung der Durchströmungsrichtung. Aquifer-Wärmespeicher stellen sehr hohe Anforderungen an die geologischen Verhältnisse des jeweiligen Standortes bezüglich hydraulischer Durchlässigkeit, Grundwasserfließgeschwindigkeit, biologischer und chemischer Zusammensetzung des Grundwassers.

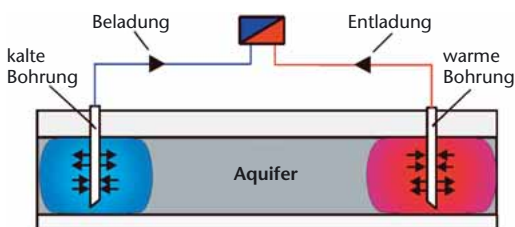
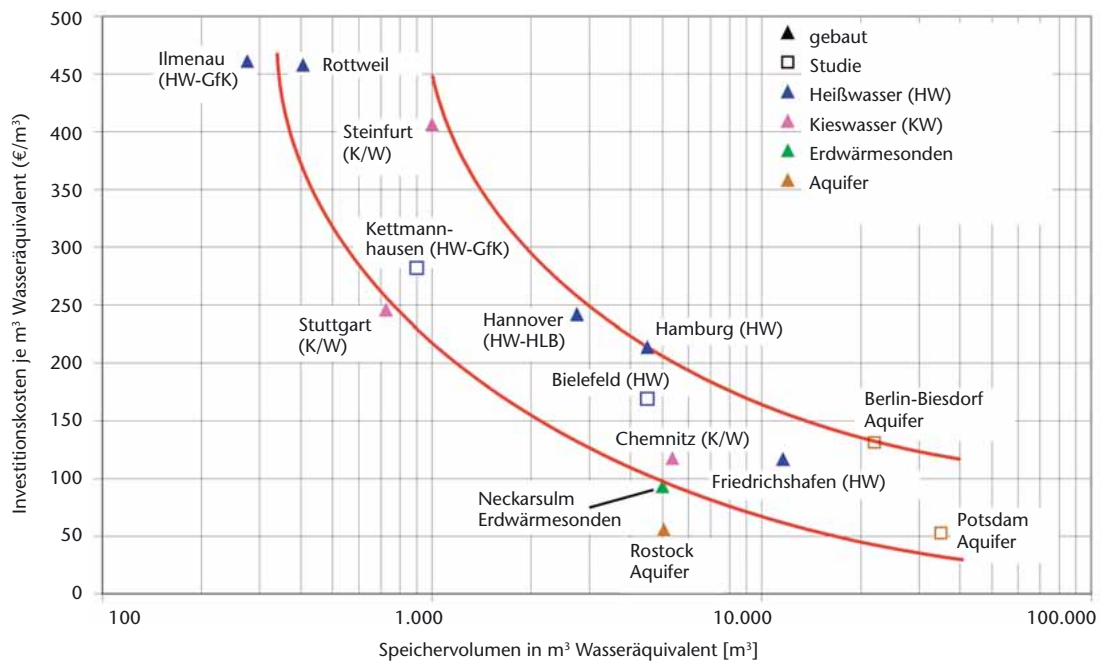


Abbildung 8
Aufbau eines Aquifer-Wärmespeichers

Sie können nicht zur Umgebung hin wärmege-dämmt werden. Bei Temperaturen oberhalb 50 °C kann es je nach örtlichen Gegebenheiten zu biologischen und geochemischen Veränderungen des Grundwassers kommen. Dies kann gegebenenfalls zu Ablagerungen an Wärmeüber-tragern und den Brunnenfiltern führen, wodurch es im Extremfall zu einem Erliegen der Förder-fähigkeit der Brunnen kommen kann. Um dies zu verhindern, muss in solchen Fällen eine geeignete Wasseraufbereitung während des Betriebs erfolgen.

In Abb. 9 sind die spezifischen Speicherkosten der verschiedenen Langzeitspeicher in Abhän-gigkeit vom Speichervolumen aufgetragen. Aufgeführt sind Kostenberechnungen, die durch Planungsstudien oder beim Bau erster Pilotan-lagen in Deutschland ermittelt wurden. Zum besseren Vergleich verschiedener Speicherkon-zepte ist das Speichervolumen auf Volumen-Wasseräquivalent umgerechnet. Die Investitionskosten liegen für Wärmespeicher größer als 10.000 m³ derzeit zwischen 70 und 120 Euro pro m³ Wasseräquivalent. Da alle gebauten Langzeitspeicher Pilotcharakter haben, sind deren Baukosten stark von den örtlichen Gegebenheiten abhängig. Insgesamt zeigt sich eine starke Kostenreduktion mit zunehmender Speichergöße.

Abbildung 9
Kosten verschiedener
Langzeit-Wärme-
speicher



Auslegungsrichtlinien, Erfahrungen und Empfehlungen

Betriebserfahrungen und Ergebnisse der wissenschaftlich/technischen Begleitforschung der Pilotanlagen zur solarunterstützten Nahwärmeversorgung können in den folgenden Auslegungsrichtlinien (deutsche Anlagen, solarer Deckungsanteil 40 - 50 %) zusammenfasst werden:

- Mindestgröße des Wohngebietes: 100 Wohneinheiten je 70 m²
- Kollektorfläche: 1,4 - 2,4 m² Flachkollektoren/ MWh jährlichem Wärmebedarf
- Speichervolumen: 1,4 - 2,1 m³ Wasser /m² Flachkollektoren.

Gut geplante und ausgeführte Anlagen weisen folgende Merkmale auf:

- Kompakte Bebauungsstruktur (gut: Reihen-/Mehrfamilienhäuser, schlecht: Einfamilienhäuser), wodurch sich geringe Rohrleitungslängen und damit geringe Wärmeverluste ergeben.
- Gebäude mit Sonnenkollektoren sollten nahe der Heizzentrale gelegen sein sowie mög-

lichst eine Ost/West-Dachfirstorientierung aufweisen. Dadurch ergibt sich eine optimale Südorientierung der Kollektorflächen. Abweichungen von bis zu 30 % von dieser optimalen Südausrichtung sind tolerierbar.

- Integrales Energiekonzept: Energieeffiziente Wärmeerzeugung und Verteilung mit Niedertemperaturheizsystemen (Vorlauf/Rücklauf: 60 °C/40 °C, 60 °C/30 °C, 40 °C/25 °C). Hoher Wärmedämmstandard (Niedrigenergiehaus, Passivhaus) der Gebäude.

Die Art der Trinkwassererwärmung sowie die Auslegung des Heizsystems bestimmen die Rücklauftemperatur des Nahwärmenetzes. Diese hat einen signifikanten Einfluss auf die Höhe des solaren Nutzwärmeertrags:

Wird die Wärme aus der Heizzentrale über ein Zwei-Leiter-Wärmeverteilnetz an die Verbraucher weitergegeben (vgl. Abb. 3), so kann dies mit direkter Heizungseinbindung und Trinkwasserbereitung im Durchflussprinzip erfolgen. Vorteilhaft ist dabei eine sehr gute Auskühlung des Vorlaufs sowie die Vermeidung von Legionellenbildung durch häufige Nutzung und einer Erwärmung auf 60 °C von Zeit zu Zeit. Pro Wohneinheit sind dabei Wärmeströme von 20 bis 30 kW zu übertragen.

Eine zweite Möglichkeit der Ankopplung der hausinternen Installationen an das Wärmeverteilnetz besteht in einer indirekten Heizungsanbindung und einer Trinkwasserbereitung mit Speicherladesystem. Dabei wird ebenfalls eine gute Auskühlung bei geringen zu übertragenden Wärmeströmen erreicht. Hier besteht die Gefahr der Legionellenbildung, die aber durch elektrisches Nacherhitzen vermieden werden kann – siehe oben. Durch den Einsatz von Niedertemperaturheizungen können im Vergleich zu konventionellen Heizsystemen niedrige Netzurücklauftemperaturen erreicht und der solare Deckungsanteil des Gesamtsystems deutlich gesteigert werden.

Weitere Möglichkeiten das Wärmeverteilnetz auszubilden sind Drei- und Vier-Leiternetze:

- Drei-Leiternetz: Dabei wird die Hausübergabestation durch eine Solarübergabestation, d. h. einem zusätzlichen Wärmeübertrager ergänzt: Der durch Raumheizung oder Trinkwassererwärmung abgekühlte Rücklauf wird mit dem Solarrücklauf verbunden und damit der Solaranlage zur Erwärmung direkt zur Verfügung gestellt.
- Bei einem Vier-Leiternetz als Wärmeverteilnetz werden je zwei Vor- und Rücklaufleitungen für Trinkwasser und Heizung verwendet. Die Aufteilung in Trinkwasser und Heizungsstrang erfolgt in der Heizzentrale.

Zusammenfassung

Die derzeit in Deutschland betriebenen neun Pilotanlagen zur solar unterstützten Nahwärmeversorgung mit Langzeitwärme-Speicher funktionieren ohne wesentliche Probleme. Die technische Machbarkeit und Effizienz der Systemtechnik konnte nachgewiesen werden. Alle vier Konzepte zur saisonalen Wärmespeicherung sind mindestens einmal umgesetzt. Diese Speicherkonzepte müssen nun weiterentwickelt werden, um die derzeit noch hohen Baukosten zu reduzieren. Dies erfolgt durch eine wissenschaftlich-technische Begleitforschung im Rahmen des Forschungskonzepts Solarthermie 2000 plus.

Literatur

- [1] Benner,M; Bodmann,M; Mangold,D; Nußbicker,J; Raab,S; Schmidt,Th; Seiwald,H; 2004: Solar unterstützte Nahwärmeversorgung mit und ohne Langzeit-Wärmespeicher (Nov. 98 bis Jan. 03). Forschungsbericht zum BMWi - Vorhaben 0329606 S.
- [2] Raab,S; Mangold,D; Nußbicker, Heidemann, W; Müller-Steinhagen,H; 2004: Solar assisted district heating system with seasonal hot water heat store in Friedrichshafen (Germany). 14. Internationales Sonnenforum, Freiburg, 20.-23.06.
- [3] Raab,S; Mangold,D; Heidemann, W; Müller-Steinhagen,H; 2005: Die solarunterstützte Nahwärmeversorgung in Crailsheim. 15. Symposium Thermische Solarenergie. Kloster Banz, 27.-29.04.

Solare Prozesswärme für Industrie, Meerwasserentsalzung und Solarchemie

Klaus Hennecke
DLR
Klaus.Hennecke@dlr.de

Dr. Ahmet Lokurlu
SOLITEM GmbH
a.lokurlu@solitem.de

Matthias Rommel
Fraunhofer ISE
matthias.rommel@ise.fraunhofer.de

Frank Späte
Solar-Institut Jülich -
Fachhochschule Aachen
spaete@sij.fh-aachen.de

Einführung

Der Prozesswärmebedarf für Industrie und Gewerbe macht einen erheblichen Anteil des Energieverbrauchs in Industrialisierten Länder aus. In Deutschland werden in diesem Bereich pro Jahr knapp 2000 PJ eingesetzt, das entspricht rund 20 % des gesamten Endenergiebedarfs. Rund 30 % dieses Bedarfs fällt im Temperaturbereich unterhalb 200 °C an, für den geeignete Solarkollektoren kurz- bis mittelfristig verfügbar sind.

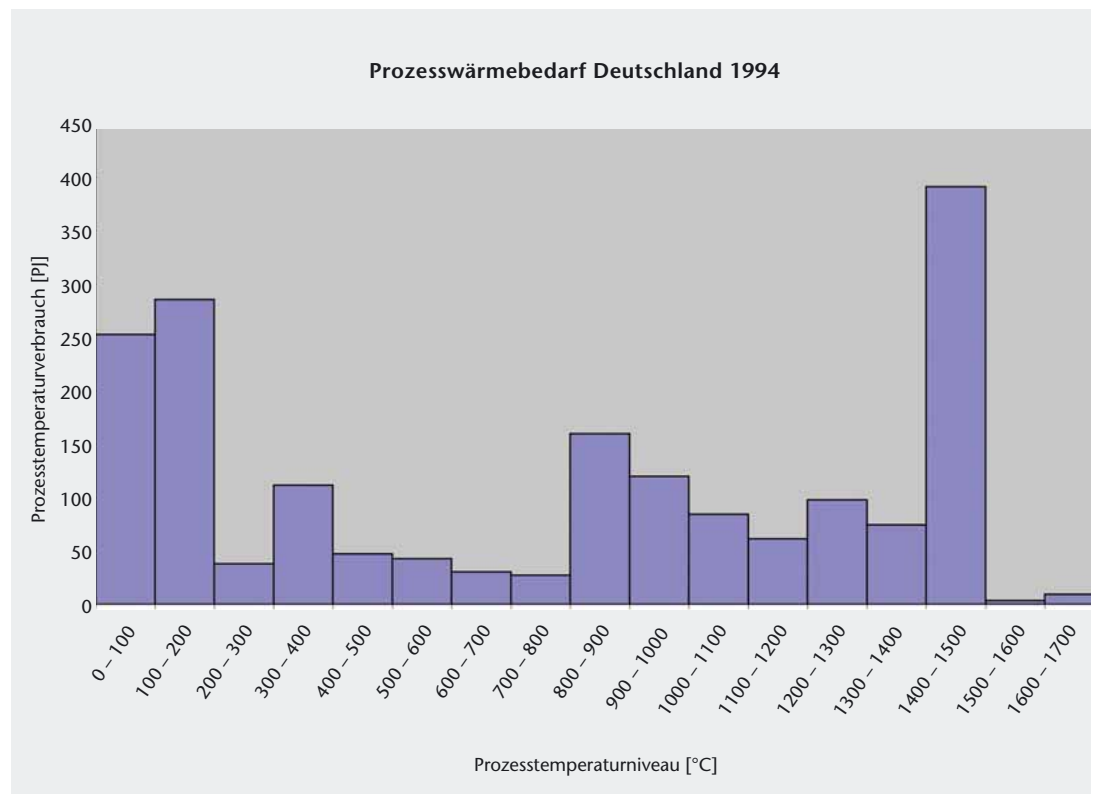
Verbrauchsschwerpunkte liegen in den folgenden Branchen und Prozessen:

- Nahrungs- und Genussmittelindustrie (z. B. Koch- und Eindampfprozesse)
- Chemische Industrie

- Zellstoff- und Papierindustrie (Kochen, Trocknen)
- Textilindustrie (Färben, Auswaschen, Trocknen)
- Investitionsgüterindustrie (z. B. Reinigungsbäder, Lackierkabinen, Lacktrockner)
- Dienstleistungen (z. B. Wäschereien)

Wollte man innerhalb der nächsten 20 Jahre nur 10 % dieses Bedarfs solar decken, müssten zu diesem Zweck jährlich rund 1,4 Mio m² Kollektorfläche installiert werden. Zum Vergleich: Im bisherigen Spitzenjahr 2001 wurden in Deutschland für Trinkwassererwärmung und Heizungsunterstützung 900.000 m² Kollektorfläche neu installiert. Offensichtlich besteht also ein großes Marktpotenzial, dennoch wurden bisher nur wenige Anwendungen realisiert.

Abbildung 1
Industrieller Prozesswärmebedarf in Deutschland (1994, eigene Darstellung nach [1])



Prozesswärme für die Industrie

Offenbar ist der Markt für solare Prozesswärme nicht einfach. Da Wärme nicht verlustarm über weite Strecken transportiert werden kann, sind nur solche Standorte geeignet, bei denen sowohl günstige Einstrahlungsbedingungen, als auch genügend Flächen zur Aufstellung der Kollektoren vorhanden sind. Bei der Auslegung und Systemintegration eines Kollektorfeldes als Wärmeerzeuger haben die geforderten Prozesstemperaturen wesentlich stärkeren Einfluss als in konventionellen Anlagen. Grundsätzlich kann die Solarwärme in das Wärmeversorgungssystem des Anwenders, oder direkt in den jeweiligen Prozess eingekoppelt werden. Da aber der Wirkungsgrad von Sonnenkollektoren mit steigender Temperatur abnimmt, ist bei der Integration solarer Prozesswärme ein möglichst niedriges Temperaturniveau vorteilhaft. Gerade dort kann jedoch häufig auch Abwärme aus anderen Prozessen oder Kraft-Wärme-Kopplung genutzt werden. Um das optimale Temperaturniveau für den Einsatz solarer Wärme zu finden, ist deshalb der Einsatz von Prozessintegrationsmethoden empfehlenswert.

Eine weitere Herausforderung stellt die tages- und jahreszeitlich sowie wetterabhängig wechselhafte Verfügbarkeit der solaren Strahlung dar. Um Produktionsmängel oder -ausfälle zu vermeiden müssen Strahlungsschwankungen durch entsprechende Speichersysteme abgepuffert werden. In der Regel muss zur Überbrückung längerer strahlungsarmer Zeiten eine hundertprozentige, konventionelle Reservekapazität vorgehalten werden. Deshalb bringt die Investition in die Solaranlage keine Reduktion des konventionellen Anlagenteils mit sich und die Anlage muss sich allein durch die erzielten Brennstoffeinsparungen amortisieren. Dies stellt bei heutigen Brennstoffpreisen eine Hürde für die Wirtschaftlichkeit solcher Investitionen dar. Um hohe Brennstoffeinsparungen erzielen zu können, sind hohe solare Deckungsgrade anzustreben. Vorzugsweise sollten Wärmebedarf und solares Angebot zeitlich korrelieren. Dies ist häufig bei Kühlung oder Klimatisierung der Fall, sowie bei Anwendern mit reinem Tagesbetrieb.

Schon diese kurzen Überlegungen verdeutlichen, dass es die "typische" Prozesswärmanwendung nicht gibt. Vielmehr sind individuelle Lösungen gefragt, die auf Anlagengröße, Bedarfsprofil, Wärmeträgermedium und Temperaturniveau der jeweiligen Prozesse abgestimmt sind. Der damit verbundene Beratungs- und Planungsaufwand bedeutet eine erhebliche Herausforderung für die Markterschließung. Um diese Herausforderung anzunehmen und zu meistern, wurde eine IEA Task (33/IV) gegründet. In dieser seit zwei Jahren laufenden Kooperation der internationalen Energieagentur (IEA) arbeiten Experten aus neun Ländern zusammen. Weitere Informationen finden sich unter <http://www.iea-ship.org>.

Eines der wenigen realisierten Beispiele einer solaren Prozesswärmeversorgung in Deutschland ist die 100 Quadratmeter große Vakuumröhren-Kollektoranlage der Schiffer GmbH & Co KG in Menden im Sauerland. Die mit den Mitteln aus dem REN-Programm des Landes Nordrhein-Westfalen geförderte Anlage wurde im Oktober 2003 in Betrieb genommen und dient zur Beheizung galvanischer Bäder (*Abb. 2*). Die Temperaturen dieser Bäder liegen zwischen 40 und 70 Grad Celsius. Geplant und errichtet wurde die Anlage von der Firma SOTEC solar aus Plettenberg.

Ein Beispiel für die solare Wärme-, Kälte- und Dampfversorgung ist die auf einem türkischen Hotel in Dalaman installierte Pilotanlage der Firma SOLITEM aus Aachen (*Abb. 3*). Das mehrfach preisgekrönte Anlagenkonzept (R.I.O. Innovationspreis, Energy Globe Award, Global 100 Eco-Tech Award und Solarpreis 2005 von EUROSOLAR) stellt mit 20 Parabolrinnenkollektoren thermische Leistungen bis zu 100 KW im reinen Dampfversorgungsbetrieb oder Kälteleistungen bis zu 130 KW zur Verfügung. Beide Versorgungsbereiche sind auch im Teillastbetrieb möglich. Durch den bivalenten Betrieb der Anlage werden im Sommer die Prozesswärmeverbraucher oder die den Kühlkreislauf speisende zweistufige Absorptionskältemaschine mit Dampf versorgt und im Winter beheizen die Kollektoren die Räume und unterstützen damit mit solarer Energie die fossile Dampferzeugung. [3]

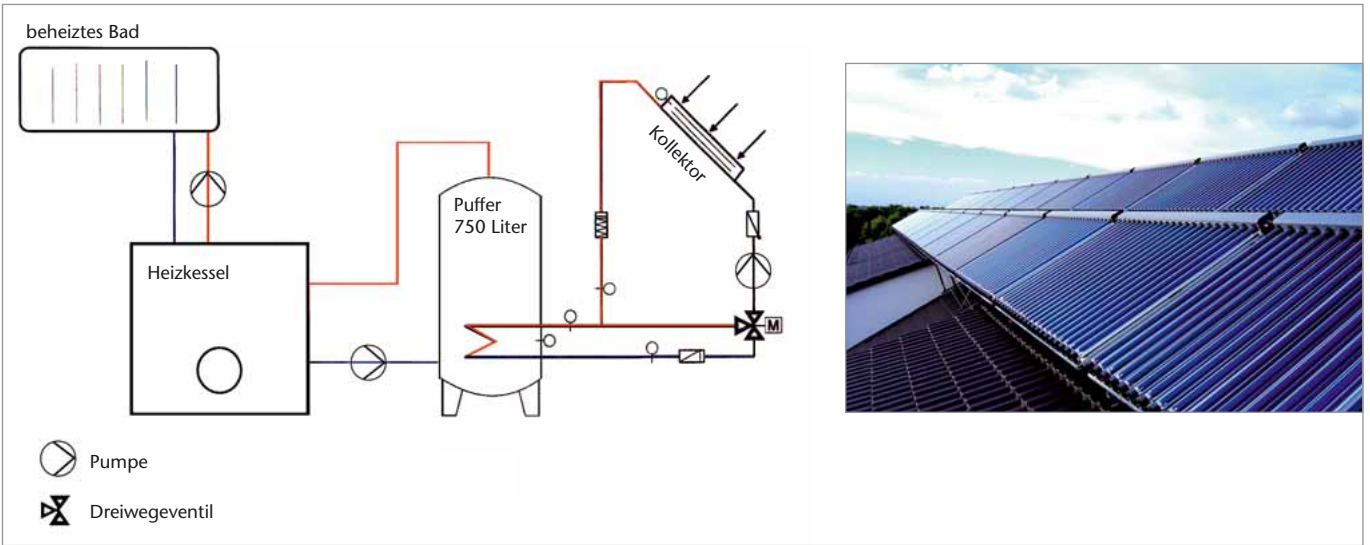
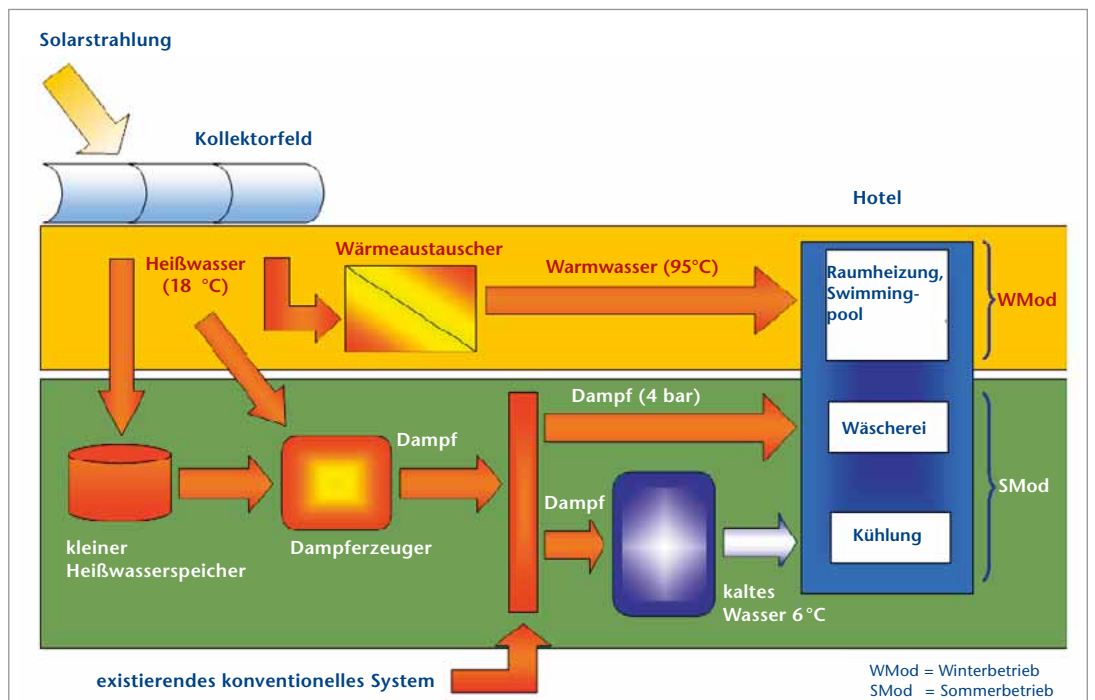


Abbildung 2 ↑
Anlagenschema
und Kollektorfeld
zur Beheizung
galvanischer Bäder
bei Fa. Schiffer
GmbH & Co KG

Quelle: EA-NRW

Abbildung 3 →
Schema und
Kollektorfeld zur
Wärme-, Dampf-
und Kälteversorgung
eines Hotels an der
türkischen Ägäisküste
in Dalaman

Quelle: SOLITEM GmbH





Ein weiteres vom Land NRW unterstütztes Projekt betrifft eine Großbäckerei in Burkina Faso. Dort wird zur Herstellung von rund 1000 Baguettes pro Tag heiße Luft bei über 250 °C mit einer Leistung von 20 bis 40 kW benötigt. Für diese beim Solar-Institut Jülich entwickelte Anlage (Abb. 4) wird Luft als Wärmeträger verwendet. Als Konzentratoren dienen 16 so genannte „Scheffler Spiegel“, die sich bereits in vielen Anwendungen in Entwicklungsländern bewährt haben. Jeder Spiegel bündelt das Sonnenlicht auf einen ortsfesten Brennfleck von rund 30 cm Durchmesser. Dort befindet sich ein eigens für diese Anwendung entwickelter Receiver, der die konzentrierte Strahlung absorbiert und die Wärme über eine große Oberfläche an die vorbeiströmende Luft abgibt. Die heiße Luft wird über einen Luft-Luft-Wärmetauscher im geschlossenen Kreislauf geführt, um die hohe Rücklauftemperatur des Backofens nutzen zu können.

Ein häufig verwendeter Wärmeträger in industriellen Prozessen ist Dampf. Im Rahmen einer von der AG Solar NRW geförderten Studie untersuchten DLR und YTONG AG am Beispiel der Porenbetonherstellung, ob die für solarthermische Kraftwerke entwickelte Technologie der direkten Dampferzeugung in Parabolrinnen auf industrielle Anwendungen übertragen werden kann (Abb. 5).

Der wesentliche Dampf verbrauchende Prozessschritt ist die Härtung des Materials im Autoklaven. Üblicherweise werden mehrere Autoklaven zeitlich versetzt betrieben, und Dampfspeicher zur teilweisen Wärmerückgewinnung und zum Lastmanagement eingesetzt. Diese Speicher bieten eine gute Möglichkeit zur Einkopplung solar erzeugten Dampfes, ohne den Fertigungsprozess durch schwankende Solarstrahlung zu gefährden. Das Dach einer typischen Fertigungshalle könnte Platz für ein Kollektorfeld mit etwa 5 % der Nennleistung der installierten konventionellen Kessel bieten. An günstigen Standorten im Mittelmeerraum könnten etwa 10 % des jährlichen Dampfbedarfs solar gedeckt werden bei Kosten, die im Bereich der konventionellen Erzeugungskosten liegen.

Aufgrund dieses ermutigenden Ergebnisses wurde die Versuchsanlage am DLR-Standort Köln-Porz mit rund 80 kW Leistung für die direkte Dampferzeugung umgerüstet, um die theoretisch erarbeiteten Verfahrensgrundlagen auch in dem für Prozessdampferzeugung relevanten Druck- und Temperaturbereich experimentell abzusichern. Nach Abschluss und Auswertung der noch laufenden Versuchskampagne werden Anwender zur Realisierung einer ersten Pilotanlage gesucht.

Prozesswärme für Meerwasserentsalzung

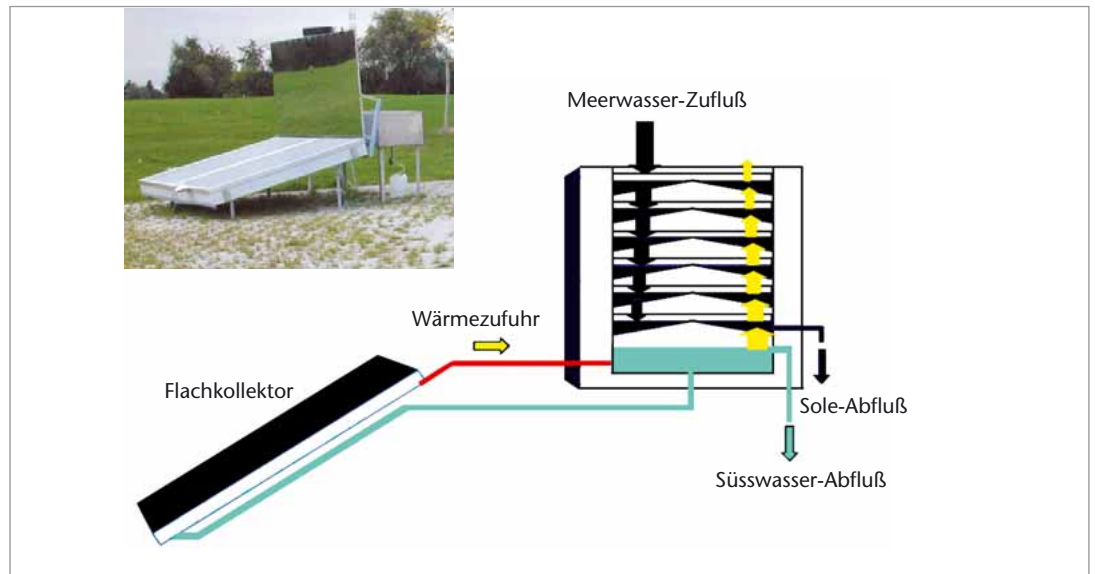
Ein Sonderfall der Prozesswärmenutzung ist die Meerwasserentsalzung. Der weltweit steigende Wasserbedarf lässt hier einen enorm wachsenden Markt vermuten. Ein Grundproblem der thermischen Meerwasserentsalzung besteht darin, dass die bei der Destillation erforderliche Verdampfung von Wasser sehr energieaufwändig ist.

Abbildung 4
Solar unterstützte
Großbäckerei in
Burkina Faso



Abbildung 5
Parabolrinnenanlage
des DLR zur direkten
Prozessdampf-
erzeugung

Abbildung 6
Wasserentsalzung durch Mehrstufenverdampfung, Schema und Testanlage des Solarinstitut Jülich



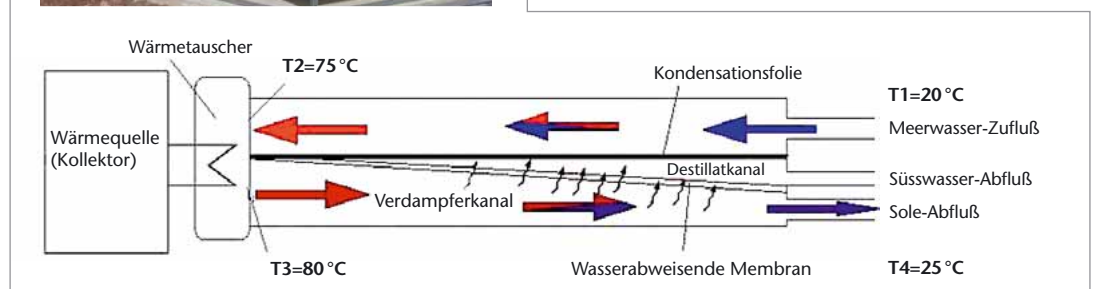
Deshalb werden mehrstufige Verfahren angewendet, bei denen ein großer Anteil der Verdampfungswärme in der jeweils nachfolgenden Stufe zurück gewonnen wird.

Bei dem am Solar-Institut Jülich entwickelten System für kleine Tagesleistungen sind mehrere Verdampfungswannen übereinander angeordnet (Abb. 6). Die unterste Stufe der Entsalzungsanlage dient gleichzeitig als erste Stufe der Verdampferkolonne und als Auffangbecken für das Destillat. Die Solarwärme wird dieser untersten Stufe zugeführt. Der aufsteigende Dampf kondensiert an der Unterseite der

darüber liegenden Wanne. Dort entsteht aufgrund der Kondensationswärme erneut Dampf, der wiederum an der nächsthöheren Stufe kondensiert, usw. Dieses Anlagenkonzept wird zur Zeit mit verschiedenen Kollektortypen getestet.

Auch bei dem am Fraunhofer ISE entwickelten Konzept der Membrandestillation wird der spezifische Energiebedarf durch interne Wärmerückgewinnung gesenkt. Bei diesem Verfahren wird die erwärmte Sole entlang einer Wasser abweisenden, porösen Polymermembran geführt. Wassermoleküle in Form von Dampf durchdringen diese Membran und werden auf der anderen Seite kondensiert. Die Kondensationswärme dient wiederum zur Vorwärmung der zugeführten Sole. Im Rahmen eines von der EU geförderten Projektes werden zur Zeit Kompaktsysteme in Ägypten, Jordanien und Marokko mit einer Entsalzungsleistung von ca. 100 Litern pro Tag getestet. Die Abb. 6 zeigt eine Anlage in Gran Canaria. Die Hauptkomponenten dieser Anlagen sind das Membrandestillationsmodul,

Abbildung 7
Wasserentsalzung durch Membrandestillation, Funktionsprinzip und Kompaktsystem des Fraunhofer ISE



ein 6 m² Solarkollektor, eine salzwasserbeständige Pumpe und ein Photovoltaikmodul, das einen autarken Betrieb der Anlage ermöglicht. Zwei größere Anlagen mit Kollektorflächen von 80 m² werden bis März 2006 in Jordanien und Gran Canaria in Betrieb genommen werden.

Prozesswärme für die Solarchemie

Die solare Bereitstellung von Hochtemperaturwärme für thermische und chemische Prozesse ist das Ziel längerfristig angelegter Forschungs- und Entwicklungsarbeiten. Ein mit Unterstützung der AG Solar NRW untersuchtes Beispiel für eine mögliche zukünftige Anwendung ist das solare Recycling von Aluminium. Der konventionelle Prozess in gasbefeuerten Drehrohröfen erfordert neben dem erheblichen Einsatz fossiler Energie auch eine aufwändige Abgasnachbehandlung zur Beseitigung der beim Aufschmelzen des verunreinigten Schrottes entstehenden Schadstoffe. Bei direkter Beheizung des Schmelzofens mit konzentrierter Solarstrahlung werden weder Brennstoff noch Verbrennungsluft benötigt. Dies reduziert den Abgasvolumenstrom und damit die Kosten der Nachbehandlungsanlage erheblich. Neben der Betriebskostensenkung durch Brennstoffeinsparung besteht hier also das Potenzial, auch Investitionskosten zu reduzieren und damit die Aussichten auf Wirtschaftlichkeit der solaren Variante zu erhöhen.

Dieses Verfahren wurde am DLR Sonnenofen in Köln Porz im Technikumsmaßstab erfolgreich demonstriert. In dieser Versuchsanlage reflektiert ein 57 m² großer Heliostat das direkte Sonnenlicht auf einen feststehenden Konzentrator, in dessen Fokalbereich von etwa 13 cm Durchmesser eine Konzentration von bis zu 5000 Sonnen und eine Gesamtstrahlungsleistung von über 20 kW erreicht werden kann. Mit dem im Fokus positionierten Drehtrommelofen wurden täglich mehrere Chargen von je ca. 1 kg Aluminium aufgeschmolzen.

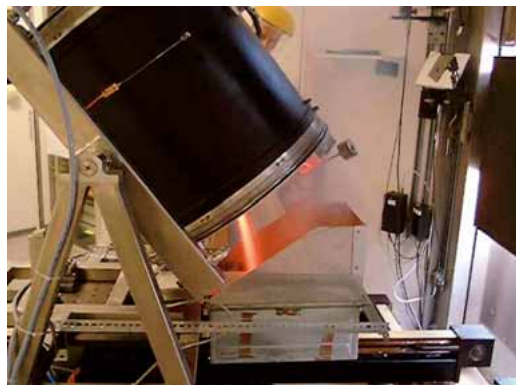


Abbildung 8
Solares Aluminiumrecycling:
Oben: Sonnenofen mit Heliostat und Konzentrator.
Mitte: Drehrohrföfen.
Unten: Abgießen der Schmelze

Quelle: DLR

Zusammenfassung

Die Beispiele zeigen, dass solare Prozesswärmeerzeugung wichtige Beiträge zu Klimaschutz und Ressourcenschonung liefern kann. Im Temperaturbereich bis etwa 200°C sind marktnahe Technologien kurz- bis mittelfristig verfügbar. Einer weiten Verbreitung stehen immer noch niedrige fossile Brennstoffkosten sowie ein hoher Beratungs- und Planungsaufwand entgegen. Hier ist an die Politik zu appellieren, durch angepasste Förderprogramme die Markterschließung zu erleichtern. Langfristig besteht weiterhin Forschungsbedarf insbesondere im Bereich Hochtemperaturanwendungen und Solarchemie.

Literatur

- [1] Mauch, W.; Schaefer, H: Strukturen des Wärmebedarfs in Industrie und Gewerbe, VDI Tagungsband „Wirtschaftliche Wärmenutzung in Industrie und Gewerbe“, Braunschweig 1997
- [2] Schweiger, H.; Farinha Mendes, J.; Benz, N.; Hennecke, K.; Prieto, G.; Cusi, M.; Goncalves, H.: The Potential of Solar Heat for Industrial Processes, Proc. EuroSun 2000, Kopenhagen
- [3] Lokurlu, A. , Richarts, F., Krüger, D.: Highly efficient Utilisation of Solar Energy with newly developed Parabolic Trough Collectors (SOLITEM PTC) for Chilling and Steam Production in a Hotel at the Mediterranean Coast of Turkey. International Journal of Energy Technology and Policy (IJETP), Volume 3, Issue 1/2. Inderscience, 2005.
- [4] Kötter, J.; Müller, C.; Schwarzer, K.: Solare Großbäckerei in Burkina Faso, Erneuerbare Energien Ausgabe 11/04 S.54-55 , Hannover 2004
- [5] Hennecke, K.; Kötter, J.; Michel, o.; Peric, D.: Solar Process Steam Generation for the Production of Porous Concrete, Proc. 11th Int. Symposium on Solar Power and Chemical Energy Systems, Zürich 2002
- [6] Müller, C.; Schwarzer, K.: Solar Thermal Desalination Systems with Multi-Stage Heat Recovery, Proc. Eurosun 2004, Freiburg
- [7] Rommel, M.; Koschikowski, J.; Wieghaus, M.: Thermally driven Desalination Plants based on Membrane Distillation, Proc. Int. Conference 'RES for Island – Tourism & Water', Kreta 2003
- [8] Glasmacher-Remberg, C.; Roeb, M.; Dersch, J.; Schäfer, R.; Funken, K.-H.: Solar Thermal Recycling of Aluminium, Proc. 6th Int. Secondary Aluminium Congress, Cannes 2001.

Solare Kühlung und Klimatisierung – Belüftung und Wärmerückgewinnung

Einführung

Der Markt für Klimatechniken wächst. Dies liegt an wachsenden Komfortansprüchen, Zunahme von Wärmequellen innerhalb von Gebäuden (elektrische Geräte, Computer), architektonischen Trends und nicht zuletzt an der Zunahme der Außentemperaturen im Sommer. Die sommerliche Klimatisierung von Gebäuden erzeugt einen steigenden Energiebedarf, der heute fast ausschließlich durch Strom gedeckt wird. Die Nutzung von solarthermisch angetriebenen Klimatisierungsverfahren ist eine viel versprechende Möglichkeit, um den Strombedarf für die Klimatisierung zu reduzieren.

Solare Kühlungs- und Klimatisierungstechniken

Heute stehen unterschiedliche Verfahren zur Verfügung, um Solarwärme zur Gebäudeklimatisierung zu nutzen. Bislang sind allerdings nur zentrale solarthermisch angetriebene Anlagen für Gebäude oder Gebäudebereiche technisch möglich, nicht dagegen Anlagen für den dezentralen Einsatz in einzelnen Räumen. Generell sind Klimatechniken hinsichtlich des thermodynamischen Verfahrens und hinsicht-

lich des „Kälteträgers“ zu unterscheiden (siehe *Abb. 1*). Die verwendeten Anlagen stellen entweder Kaltwasser bereit (geschlossene Kältemaschinen) oder sie entziehen der Frischluft Feuchtigkeit und senken die Raumtemperatur (offene Sorptionsverfahren).

Unter Sorption versteht man die reversible Anlagerung eines Kältemittels, wie z. B. Wasser in einem zweiten Stoff. Im Falle der Feststoffsorption (Adsorption) handelt es sich hierbei um ein hochporöses Material wie z. B. Zeolith oder Silikagel. Bei der Flüssigsorption wird dagegen ein Lösungsmittel mit hoher Affinität zur Aufnahme des Arbeitsstoffs verwendet. Die Sorption an festen wie auch an flüssigen Sorptionsmitteln kann sowohl in geschlossenen Maschinen als auch in offenen Verfahren Verwendung finden.

Geschlossene Kältemaschinen

Bei der Verwendung von geschlossenen Kältemaschinen wird Kaltwasser aus thermischer Energie bereitgestellt, das für die Raumklimatisierung eingesetzt werden kann. Die drei wichtigsten Techniken sind:

- Absorptionskältemaschinen,
- Adsorptionskältemaschinen und
- Dampfstrahlkältemaschinen.

Dr. Hans-Martin Henning
Fraunhofer ISE
hans-martin.henning@ise.fraunhofer.de

Prof. Dr. Rainer Braun
Fachhochschule Gelsenkirchen - Energie-Institut
rainer.braun@fh-gelsenkirchen.de

Dr. Ahmet Lokurlu
SOLITEM GmbH
a.lokurlu@solitem.de

Dr. Peter Noeres
Fraunhofer UMSICHT (Institut für Umwelt-, Energie-, und Sicherheitstechnik)
peter.noeres@umsicht.fraunhofer.de

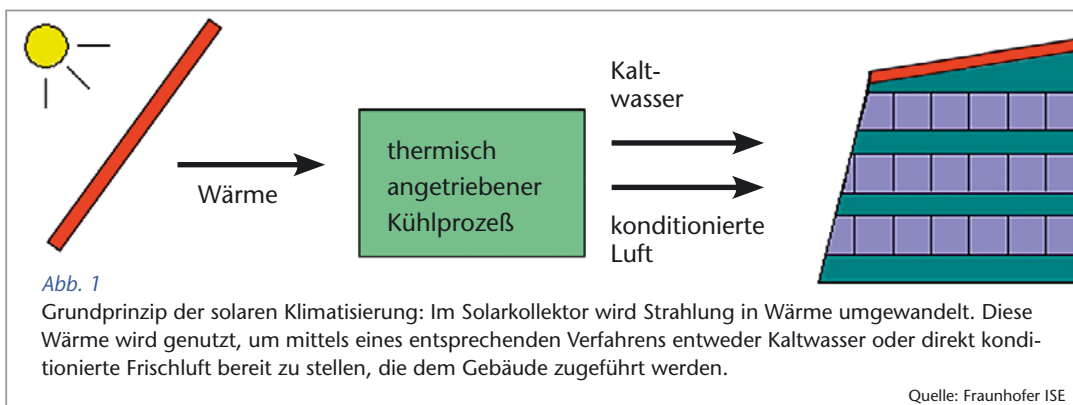


Abbildung 1

Abb. 1
Grundprinzip der solaren Klimatisierung: Im Solarkollektor wird Strahlung in Wärme umgewandelt. Diese Wärme wird genutzt, um mittels eines entsprechenden Verfahrens entweder Kaltwasser oder direkt konditionierte Frischluft bereit zu stellen, die dem Gebäude zugeführt werden.

Quelle: Fraunhofer ISE

Bei Absorption und Adsorption handelt es sich um thermochemische Verfahren, bei denen ein Zweistoffgemisch aus Kältemittel und Sorptionsmittel genutzt wird, um eine thermische Verdichtung des Kältemittels zu erreichen. Die Dampfstrahlkältetechnik ist ein thermo-mechanisches Verfahren mit nur einem Stoff. Der wesentliche Bestandteil der Dampfstrahlkältemaschine ist der Strahlverdichter. Bei diesem wird mit Hilfe eines Treibmediums Kältemittel-dampf vom Verdampferdruckniveau auf das Kondensatordruckniveau gefördert. Details zu den Verfahren sind beispielsweise in dem BINE- Informationsblatt „Klimatisieren mit Sonne und Wärme“ beschrieben [1].

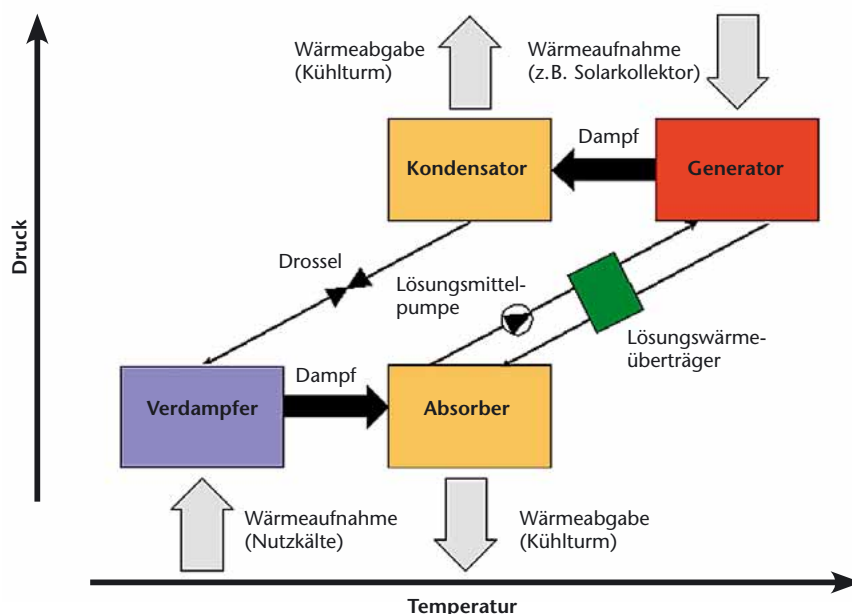
Die benötigte Kaltwassertemperatur für die Raumklimatisierung hängt entscheidend davon ab, ob Geräte versorgt werden, die auch für die Luftentfeuchtung (latente Lasten) benutzt werden, oder ob die angeschlossenen Räume nur zur Kontrolle der Temperatur (sensibler Lasten) dienen. In zentralen Lüftungsgeräten oder dezentralen Umluftgeräten, die sowohl zur Kontrolle der Temperatur als auch der Feuchte der Raumluft verwendet werden und die in südlichen Ländern sehr verbreitet sind, wird die Luft unter den Taupunkt abgekühlt. Dadurch kondensiert ein Teil des Wasserdampfes der Luft und die absolute Feuchte im Raum sinkt. Um eine solche Luftentfeuchtung zu ermögli-

chen, sind Kaltwassertemperaturen im Bereich 6 - 9 °C erforderlich. Soll die Kältemaschine jedoch lediglich für die Abfuhr sensibler Lasten eingesetzt werden, so reichen deutlich höhere Kaltwassertemperaturen im Bereich 15 - 20 °C aus. Beispiele für entsprechende Techniken sind Flächenkühlsysteme also Kühldecken, Fußbodenkühlung, Wandflächen mit integrierten Kapillarrohrmatten oder Bauteilkühlung bzw. Betonkernkühlung. In Frage kommen auch andere Systeme der stillen Kühlung wie Umluftkühler, die mit natürlicher Luft-Zirkulation arbeiten. In *Abb. 2* ist das Schema einer Absorptionskältemaschine als der heute wichtigsten der genannten Techniken dargestellt.

In *Abb. 2* befindet sich der Verdampfer auf niedrigem Druckniveau bei ca. 10 mbar. Das Kältemittel Wasser verdampft daher bereits bei 4 - 7 °C. Die Verdampfungswärme wird von einem äußeren Kältekreis aufgebracht und erzeugt so die nutzbare Kälteleistung. Der entstandene Kältemitteldampf wird im Absorber durch konzentrierte LiBr-Lösung absorbiert und kann – da er sich jetzt im flüssigen Zustand befindet – durch geringen Energieaufwand mit einer Lösungsmittelpumpe (auf das höhere Druckniveau gefördert werden. Durch die Zufuhr von solar erzeugter Antriebswärme mit einer Temperatur von ca. 70 ° - 95 °C wird der Kältemitteldampf im Generator wieder aus der

Abbildung 2
Schema einer einstufigen Lithiumbromid (LiBr)-Wasser-Absorptionskältemaschine.

Quelle: Fraunhofer ISE



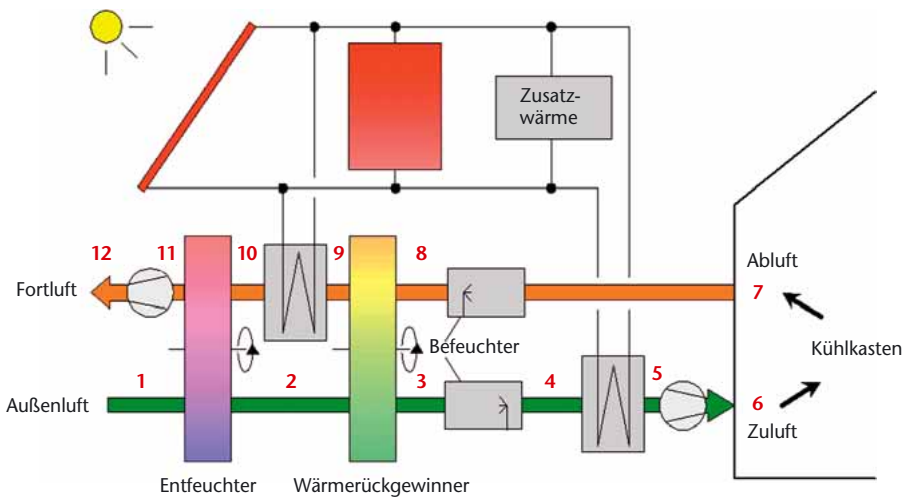


Abbildung 3
Standardverfahren
der sorptionsgestütz-
ten Klimatisierung
mit Sorptionsrotor
(Entfeuchter).

Quelle: Fraunhofer ISE

Wasser-LiBr-Lösung angetrieben und im Kondensator durch zugeführtes Kühlwasser bei rund 30 °C verflüssigt. Das Kältemittel kann nun – nach Drosselung auf das niedrige Druckniveau – im Verdampfer erneut verdampft werden. Die im Generator gewonnene konzentrierte Lösung wird über einen Lösungswärmeübertrager in den Absorber zurückgeführt.

Offene Verfahren

Offene Verfahren basieren generell auf einer Kombination der sorptiven Luftentfeuchtung mit der Verdunstungskühlung. Sie werden im deutschsprachigen Raum als sorptionsgestützte Klimatisierung (SGK) und im Englischen als „Desiccant and Evaporative Cooling (DEC)“ bezeichnet. Das Kältemittel Wasser ist dabei in direktem Kontakt mit der Atmosphäre – deshalb die Bezeichnung als „offenes Verfahren“. Solche Lüftungsanlagen haben primär die Aufgabe, einen Raum mit gefilterter Frischluft zu versorgen. Die Sorptionstechnik ermöglicht es mit Hilfe von thermischer Antriebsenergie, diese Frischluft zu konditionieren, also ihre Temperatur und Feuchte zu kontrollieren. Somit geht die Funktion über die Kältebereitstellung hinaus, was einen direkten Vergleich mit Kaltwassererzeugern schwierig macht.

Die heute wichtigste Bauausführung von offenen Sorptionsanlagen nutzt Sorptionsrotoren als zentrale Komponente zur Luftentfeuchtung. Es sind unterschiedliche Ausführungen für unterschiedliche Klimabedingungen möglich

(feucht-heiss, trocken-heiss, moderat usw.). Der in moderaten Klimazonen anwendbare Standardzyklus mit Verdunstungskühlung sowohl in der Zuluft als auch der Abluft ist in [Abb. 3](#) dargestellt. Die gleichen Anlagen können auch im Winter genutzt werden. Hier kann die Möglichkeit der Wärmerückgewinnung und bei Bedarf auch der Feuchtrückgewinnung ebenfalls zur Energieeinsparung unter Verwendung der gleichen Systemkomponenten angewendet werden. Neuere Verfahren arbeiten mit flüssigen Sorptionsmitteln oder neuen Komponenten der Feststoffsorption.

Weitere Details zu den Verfahren sowie eine Übersicht zur Thematik insgesamt gibt beispielsweise ein Themen-Info des BINE Informationsdiensts [1].

Beschreibung des in [Abb. 3](#) dargestellten Standardverfahrens:

- 1 → 2 die Außenluft wird zunächst entfeuchtet, dabei aber durch die freiwerdende Sorptionswärme und Wärmeübertragung von der Abluftseite erwärmt;
- 2 → 3 die Luft wird im Gegenstrom zur Abluft im Wärmerückgewinner (WRG) vorgekühlt;
- 3 → 4 mittels direkter Verdunstungskühlung wird die Luft durch Einsprühen von Wasser bei Zunahme der Feuchte abgekühlt;
- 4 → 5 der Wärmeübertrager ist nur im Winter zur Lufterwärmung erforderlich;

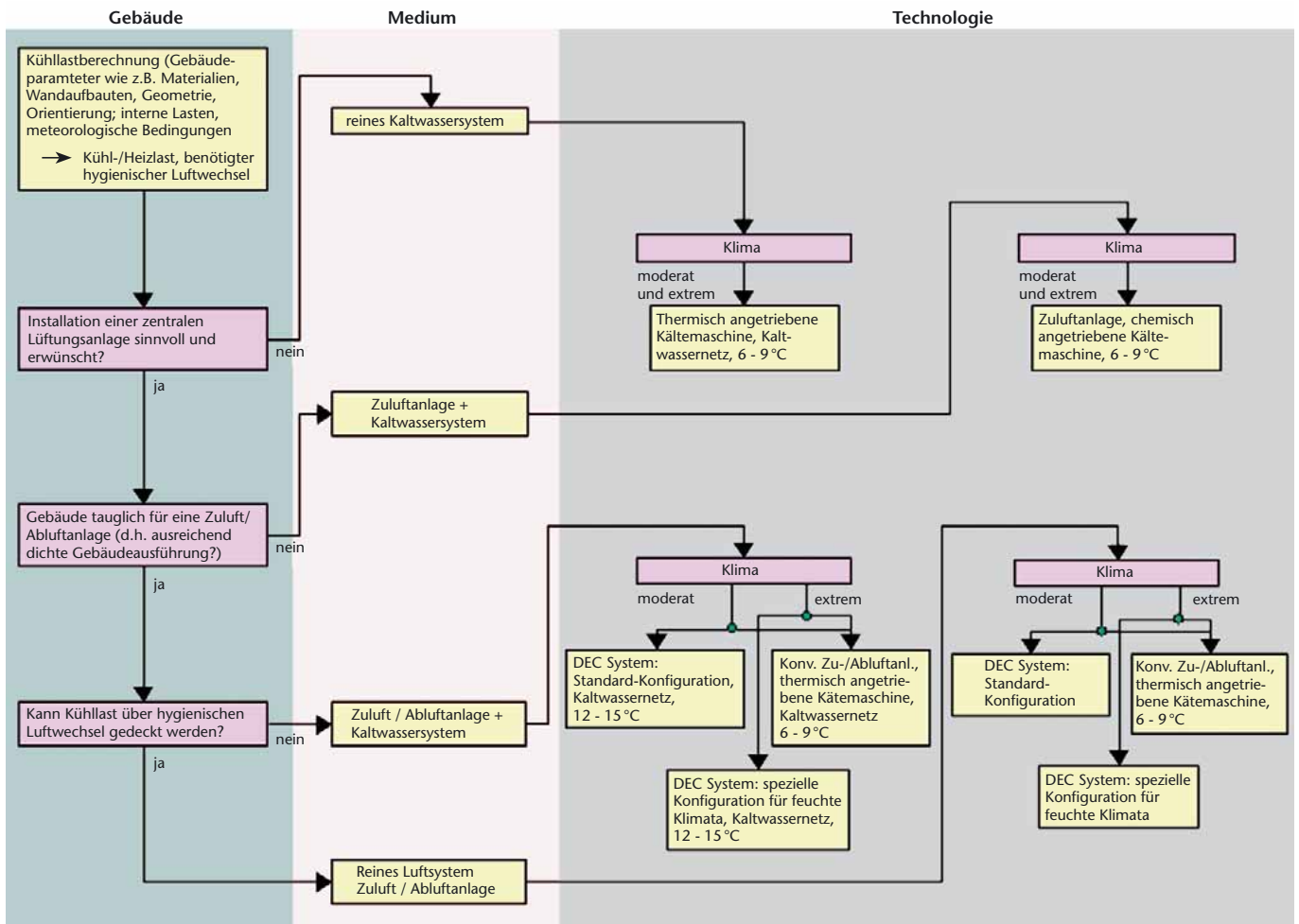


Abbildung 4 Entscheidungsschema zur Systemauswahl

Quelle: Fraunhofer ISE

6 mittels Ventilator in den Raum geförderte Zuluft wird durch interne Lasten (sensibel, latent) erwärmt und die Feuchte nimmt zu; 7 → 8 die Abluft wird befeuchtet und dadurch abgekühlt; 8 → 9 die Luft erwärmt sich im Gegenstrom zur Zuluft im Wärmerückgewinner; 9 → 10 die bereits vorgewärmte Luft wird mittels extern zugeführter Wärme auf Regenerationstemperatur (ca. 60 - 80 °C) erwärmt; 10 → 11 die Regenerationsluft entzieht dem Sorptionsmaterial im Rotor die auf der Zuluftseite zugeführte Feuchte. Der Sorptionsrotor rotiert langsam mit rund 8 bis 12 Umdrehungen pro Stunde.

Systemauswahl

Welche Anlagentechnik vorteilhaft eingesetzt werden kann, um Solarwärme für die Raumklimatisierung zu nutzen, hängt von vielen Randbedingungen ab. Entscheidende Kriterien sind neben den klimatischen Bedingungen die Menge und Zusammensetzung der Kühllasten, die Erfordernisse des Bauherren oder Nutzers nach einer zentralen, mechanischen Lüftungstechnik sowie die Gebäudedichtheit, die darüber entscheidet, ob es sinnvoll ist, eine Zu-/Abluft-Anlage zu installieren. Im Rahmen eines unter dem Dach der Internationalen Energie-Agentur (IEA) durchgeführten, internationalen Projektes zur solaren Klimatisierung wurde ein Entscheidungsbaum entwickelt, der die Auswahl geeigneter Anlagen erleichtert. Das Entscheidungsschema ist in Abb. 4 dargestellt. Das gesamte Dokument mit Anwendungsbeispielen kann von der Internetseite des IEA-Projektes geladen werden [2].

Beispiele für Anlagen mit solarthermischen Kollektoren

Heute sind in Europa rund 70 Anlagen installiert, die solarthermische Kollektoren für die solare Gebäudeklimatisierung verwenden. Die meisten der Anlagen wurden in Deutschland und Spanien realisiert. Die insgesamt installierte Kälteleistung beträgt rund 6,3 MW und die hierfür installierte Kollektorfläche knapp 17.500 m². Rund 60% der Anlagen verwenden Absorptionskältemaschinen, etwa 12% Adsorptionskältemaschinen und rund 27% offene Kühlverfahren.

Der Mittelwert der spezifischen Kollektorfläche aller Anlagen beträgt rund 2,9 m²/kW. Ein Wert von 3 - 3,5 m²/kW kann als 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 m² pro 1000 m³/h installierter Luftleistung als sinnvolle Größenordnung herausgestellt. Diese Werte sind aber nur grobe Anhaltspunkte und ersetzen keinesfalls eine detaillierte und angepasste Anlagenauslegung. So hängt die Auslegung beispielsweise entscheidend von der anteiligen Verteilung der Kühllasten (innere Lasten, äußere Lasten) ab und im Einzelfall kann eine um einen Faktor 2 größere Kollektorfläche sinnvoll sein. Im Folgenden sollen zwei beispielhafte Anlagen näher beschrieben werden: eine Anlage mit einstufiger Absorptionskältemaschine, die am Fraunhofer Umsicht in Oberhausen installiert wurde, und eine Anlage mit zweistufiger Absorptionskältemaschine und Parabolrinnenkollektoren zur Klimatisierung eines Hotels in der Türkei.

Solarthermische Kühlung beim Fraunhofer UMSICHT, Oberhausen

Die solarthermische Kühlung beim Fraunhofer UMSICHT wird seit August 2002 betrieben und speist das Kaltwasser in ein institutsinternes Kaltwassernetz ein. Die Kälte wird zur Zeit vornehmlich zur Kühlung von Labor- und Installationsräumen (EDV/Schaltanlagen) benötigt. Seit Anbindung des Labors Anfang 2005 an das Kaltwassernetz konnte eine deutliche Zunahme des Kältebedarfes festgestellt werden, der die verfügbare Wärmeleistung der Solarkollektoren

im Tagesmittel und an warmen Sommertagen teilweise übersteigt. Deshalb wurde in diesem Jahr erstmals auch mit der hauseigenen Mikrogasturbine (Turbec-Turbine) unterstützend gearbeitet.

Die erzielbare Kälteleistung des einstufigen Absorbers beträgt nach Herstellerangaben maximal 58 kW_{th}. Zum solarthermischen Betrieb stehen 110 m² Vakuumröhrenkollektorfläche zur Verfügung, die unter Nennbedingungen Heizwasser auf einem Temperaturniveau von 97/105 °C (Rücklauf Kältemaschine / Vorlauf KM) zur Verfügung stellen. Eine Besonderheit der Anlage ist die Möglichkeit, auch ohne Absorptionskältemaschine durch freie Kühlung in Nachtzeiten oder in der Übergangszeit Wärme an die Umgebung abzuführen. Hiermit können ca. 20% des jährlichen Kältebedarfs gedeckt werden. Die Solarwärme wird bei fehlendem Kältebedarf auch zur Heizungsunterstützung in das gebäudeeigene Heiznetz eingespeist. Ein vereinfachtes Verfahrensschema zeigt *Abb. 5*.

Solarthermische Klimatisierung im türkischen Hotel „Sarigerme Park“

Im April 2004 wurde in dem Ferienhotel „Iberotel Sarigerme Park“ an der türkischen Ägäisküste ein System zur Solaren Klimatisierung und Prozessdampferzeugung installiert und in Betrieb genommen. Die Anlage verfügt über ein 180 m² großes Parabolrinnenkollektorfeld (*Abb. 6*), welches das Wärmeträgermedium Wasser auf 180 °C erhitzt und einem Dampferzeuger zur Verfügung stellt, der Satttdampf von 4 bis 5 bar erzeugt. Das Wasser fließt mit einer Rücklauf-temperatur von 155 °C zum Kollektorfeld zurück und schließt den Heißwasserkreislauf.

Der erzeugte Dampf wird zum einen direkt als Prozessdampf in der Wäscherei des Hotels für die Trocknung verwendet, zum anderen einer zweistufigen Absorptionskältemaschine (AKM) zur Verfügung gestellt. Die AKM, die mit einem sehr hohen COP (Coefficient Of Performance) von 1,3 bis 1,5 (in Teillast) arbeitet, treibt einen Kaltwasserkreislauf an. Das austretende Kaltwasser verlässt die AKM mit 6 °C und nimmt die Wärme aus den Hotelzimmern auf. Auf einem Temperaturniveau von 12 °C fließt das Wasser zur AKM zurück. In einem zweiten

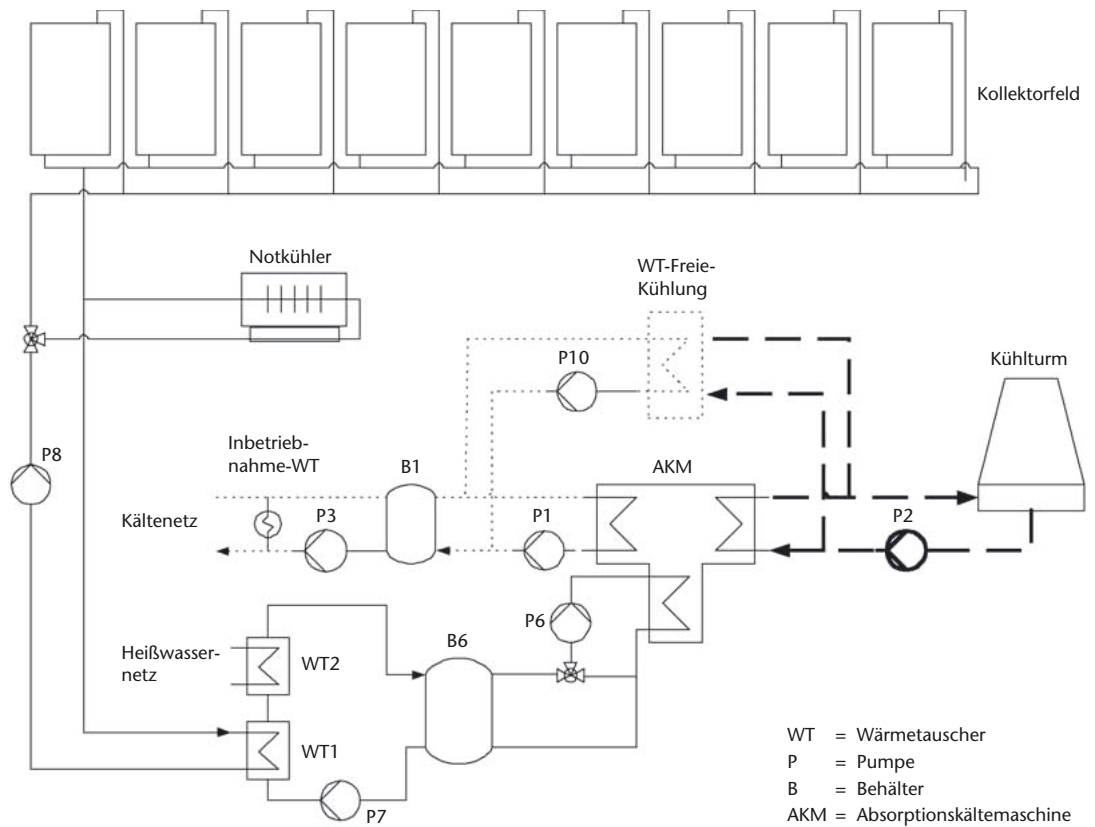


Abbildung 5
Vereinfachtes Schema
der solaren Kälteerzeugung
im Fraunhofer
UMSICHT



Abbildung 6
Blick auf das Parabol-
rinnen-Kollektorfeld
einer türkischen
Hotelanlage
Quelle: SOLITEM GmbH

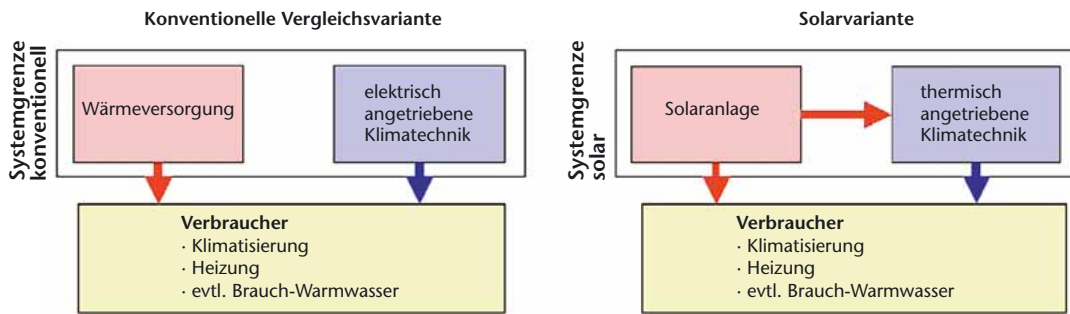


Abbildung 7 Systemgrenze solare Klimatisierung und konventionelles Vergleichssystem
Quelle: Fraunhofer ISE

Kaltwasserkreislauf wird der Absorptionskältemaschine die aufgenommene Wärme auf höherem Temperaturniveau wieder entzogen. Das Wasser verlässt die AKM mit 35 °C, durchläuft einen Kühlturm und fließt mit 27 °C zurück. Um die Gesamteffizienz übers Jahr zu steigern, wird das System bivalent betrieben. Im Sommer wird gekühlt und Dampf bereitgestellt, während im Winter – wo Klimatisierung nicht immer notwendig ist – die Anlage auch zu Beheizungszwecken und zum Heizen des Swimmingpools verwendet werden kann. Zusätzlich wird der Betrieb nach Tarifzeiten für Strompreise optimiert. In den Niedertarifzeiten, in denen Strom günstig ist, wird weniger Kälte erzeugt zugunsten von erhöhter Prozessdampfbereitstellung. In den Hochtarifzeiträumen, in denen Strom teuer ist, wird vor allem Kälte bereitgestellt, um möglichst viel Strom zu sparen. Durch diese intelligente Kombination wird das System insgesamt erheblich wirtschaftlicher.

Wirtschaftlichkeit

Um Anlagen der solaren Klimatisierung wirtschaftlich bewerten zu können, muss ein Vergleich mit einem definierten konventionellen System sowohl hinsichtlich der Energieeinsparung als auch hinsichtlich der Kosten durchgeführt werden.

Für einen derartigen Vergleich muss deshalb die Systemgrenze erweitert werden. Die solar betriebene Variante, die das Solarsystem (einschließlich Speicher und Backup-System) sowie die thermisch angetriebene Klimatechnik umfasst, muss mit der konventionellen Variante, bestehend aus dem fossil befeuerten Heizkessel

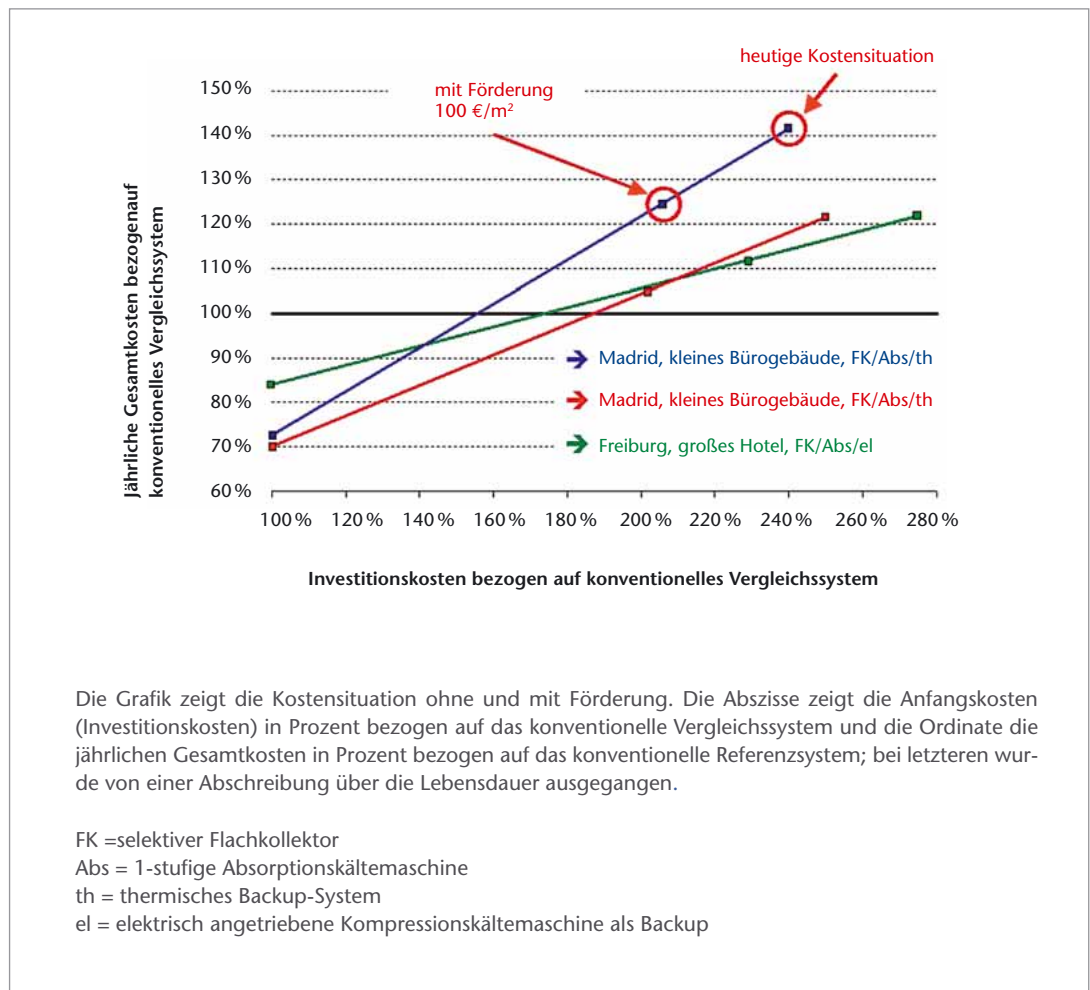
der elektrisch angetriebenen Klimatechnik, verglichen werden. Demnach ist bei beiden Varianten nicht nur der thermische Antrieb, sondern auch die Kältetechnik bzw. Klimatechnik mit in Betracht zu ziehen. Die Komplexität dieser Aufgabe ist in Abb. 7 dargestellt.

Im Rahmen mehrerer Studien wurden systematische Untersuchungen zur Kostensituation durchgeführt. Dabei gehen eine Vielzahl von Parametern wie die Kosten konventioneller Energieträger, die Investitionskosten aller Komponenten, die Auslegung der solaren Variante und viele weitere ein. Eine ausführlichere Darstellung der Vergleichsergebnisse findet sich im Tagungsband des 3. Symposiums Solares Kühlen in der Praxis [3]. Abb. 8 zeigt beispielhaft Ergebnisse für die Klimatisierung eines „kleinen“ Bürogebäudes (ca. 1000 m² klimatisierte Nutzfläche) und eines „großen“ Bürogebäudes (ca. 10.000 m²) in Madrid sowie die Klimatisierung eines Hotels in Freiburg (ca. 6.500 m² klimatisierte Nutzfläche). Alle Ergebnisse wurden mittels Simulationsrechnungen erzielt. Dafür wurden unterschiedliche Auslegungen (Kollektortypen, Kollektorflächen, Größe eines Wärmespeichers, Backup-Systeme zu Wärme- und Kälteerzeugung mit konventioneller Energie) untersucht und diejenige mit den niedrigsten Kosten pro eingesparter Einheit Primärenergie selektiert. Die Kostensituation für diese Auslegung ist jeweils in Abb. 8 dargestellt.

Es zeigt sich, dass die Anfangskosten (Investitionskosten inklusive Planungskosten) um einen Faktor 2 bis 2,5 höher liegen als für konventionelle Verfahren. Die Energieeinsparung bei Verwendung der solaren Klimatisierung führt zu einer Reduktion in den Verbrauchskosten.

Abbildung 8
Kostensituation für
solare Klimatisierung
für Beispielsysteme in
Madrid und Freiburg

Quelle: Fraunhofer ISE



Eine Gesamtkostenrechnung unter der Annahme einer Abschreibung über die Lebenszeit führt somit zu Mehrkosten von 20 bis 40 % (ohne Förderung) bzw. 5 bis 20 % (mit angenommener Förderung in Höhe von 100 Euro pro m² Kollektorfläche). Diese Ergebnisse können als typisch für die heutige Situation (deutsche Energiepreise aus 2004) gelten.

Forschungstrends und -bedarf

Kostensenkungen

Forschungsarbeiten zielen insgesamt auf eine Verbesserung der Kostensituation für solare Klimatisierung. Dabei sind zwei Haupttrends zu beobachten:

- Weiterentwicklung der kälte- oder klimatischen Verfahren, um die Effizienz zu verbessern, sodass höhere Gesamtwirkungsgrade erreicht werden oder aber die gleichen Wirkungsgrade mit niedrigeren Antriebstemperaturen und somit mit einfacheren Kollektortechniken erreicht werden können.
- Lösungen, bei denen deutlich höhere Temperaturen zum Antrieb verwendet werden, als mit den heute verbreiteten Verfahren. Dadurch können entweder zwei-stufige Kälteverfahren mit einer nennenswert höheren Effizienz eingesetzt werden oder es können tiefere Temperaturen auf der Kälteseite bei zugleich hohen Rückkühltemperaturen erzielt werden. Ein Beispiel hierfür ist der Einsatz von einstufigen Ammoniak-Wasser-Kältemaschinen mit trockener Rückkühlung in heißen Klimazonen, die einen Eisspeicher laden. In all diesen Fällen ist eine

sehr effiziente Kolleorteknik erforderlich, um die notwendigen Antriebstemperaturen im Bereich 140-180°C zu erzielen. Hierfür kommen praktisch nur einachsige nachgeführte, konzentrierende Kollektoren in Frage.

Kältemaschinen im Bereich kleiner Leistungen

Ein weiterer Trend, der in den vergangenen fünf Jahren sowohl in Deutschland als auch in weiteren europäischen Ländern zu beobachten war, betrifft die Entwicklung von Kältemaschinen im Bereich kleiner Leistungen (2 bis 30 kW Kälteleistung). Eine derartige Entwicklung soll im Folgenden kurz beispielhaft dargestellt werden:

Bei der Entwicklung handelt es sich um eine neuartige einstufige Ammoniak-Wasser Absorptionskältemaschine, die auf der Basis einer seit Jahren installierten Demonstrationsanlage ausgelegt worden ist. Die Anlage hat eine Leistung von 25 kW und kann Kälte bei Temperaturen im Bereich -2°C bis 3°C bereit stellen; damit ist sie auch zur Eiszerzeugung einsetzbar. Die Heißwassertemperatur für den thermischen Antrieb liegt im Bereich 85 - 95 °C und der Nenn-COP¹ bei 0,5. Ziel der Anlage ist es, eine autarke Solarversorgung für ein Kühlager im kleinen Leistungsbereich zu ermöglichen. Ein Schema des konzipierten Gesamtsystems sowie eine Kostenkalkulation findet sich in *Abb 9*. Weitere Details sind in [4] beschrieben. Eine Übersicht über sonstige Entwicklungsprojekte kann in [5] nachgelesen werden.

Systemtechnik

Neben der Weiterentwicklung im Bereich der Komponenten betrifft der zukünftige Forschungsbedarf vor allem die Systemtechnik. Ob die möglichen Einsparungen bei Einsatz solare Klimatisierung in der Praxis realisierbar sind, hängt von dem planmäßigen Funktionieren der Anlagen ab. Erfahrungen mit Anlagen, die im Rahmen von Pilot- und Demonstrationsprojekten realisiert wurden, zeigen, dass durch Mängel in der hydraulischen Verschaltung und der Regelungstechnik dieses Potenzial zunächst vielfach nicht realisiert wird. Nur ein intensives, begleitendes Monitoring mit kontinuierlicher

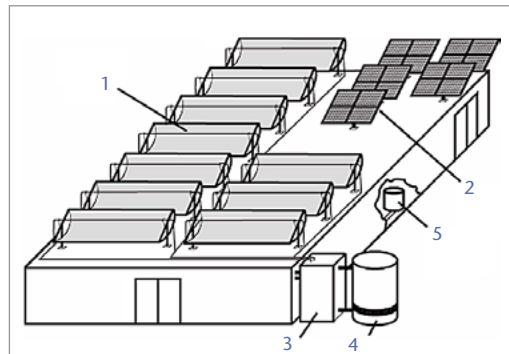


Abbildung 9
Schema des 300 m² Kühlager-Depots:

- (1) Parabol-Rinnen-Kollektor
- (2) PV-Anlage
- (3) Neuartige Absorptionskältemaschine, COP = 0.70
- (4) Nasskühlturm
- (5) Innen liegender Eisspeicher

NH₃/H₂O-Absorptionskühlung, Energieversorgung durch Parabolrinnenkollektor für ein 300 m² Kälteenergiespeicher

Komponente	Investition
1) Parabolrinnenkollektor, 10 Kollektormodule, 90 m ² , 43 kW	50.000,- €
2) PV-Anlage für Notstromversorgung, 26 m ² , 3,3 kW _p	22.500,- €
3) NH ₃ /H ₂ O-Absorptionskühler, Verdampfungstemperatur -4 °C, 30 kW	43.500,- €
4) Nasskühlturm 36 °C/30 °C, 74 kW	4.500,- €
5) Eisspeicher, 1000 kg, 90 kWh	6.500,- €
Gesamt	127.000,- €
jährliche Abzahlungen	11.900,- €
spezifische Kühlkosten	0,18 €/kWh

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. Hier stellt das Programm „Solarthermie 2000 plus“ des Bundesumweltministeriums eine wertvolle Förderung dar, um neue, optimierte Anlagen zu erstellen und Planungs- und Betriebspraxis zu optimieren, dokumentieren und zu verbreiten.

¹ Eine Schlüsselgröße zur Beschreibung der Effizienz von thermisch angetriebenen Kältemaschinen ist das Wärmeverhältnis (engl. Coefficient Of Performance, COP). Der COP ist definiert als das Verhältnis aus Kälteleistung und hierfür benötigter Antriebswärmeleistung.

Zusammenfassung

Unterschiedliche technische Lösungen zur Nutzung thermischer Solarenergie für die sommerliche Gebäudeklimatisierung sind marktverfügbar. Die Anwendung dieser Techniken kann zu nennenswerten Reduktionen im Primärenergieverbrauch führen, sofern die Systeme entsprechend ausgelegt sind. Voraussetzung hierfür ist eine ausreichende Dimensionierung des Solarkollektorfeldes und – je nach Randbedingungen – die Integration von Speichern in das Gesamtsystem.

Die Anzahl der heute installierten Anlagen ist allerdings noch sehr gering. Erfahrungen mit installierten Anlagen und deren Betrieb belegen die Notwendigkeit weiterer messtechnisch begleiteter Demonstrationsanlagen. Dadurch sind auch weitere Kostenreduktionen zu erwarten, sodass mittelfristig eine Amortisation der Anlagen innerhalb der Lebensdauer – zumindest mit einer Förderung im Bereich 100 Euro/m² – machbar erscheint.

Eine neue Anwendungsmöglichkeit in den nächsten Jahren ergibt sich aus der zunehmenden Verfügbarkeit kleiner thermisch angetriebener Kältemaschinen. Dadurch sind auch Anwendungen im kleinen Leistungsbereich (< 30 kW) erschließbar. Eine interessante Kombination stellt z. B. die Erweiterung von solarthermischen Anlagen zur Brauchwassererwärmung und Heizungsunterstützung (Kombianlagen) um eine kleine Kältemaschine dar. Damit kann eine sinnvolle Nutzung der bislang nicht nutzbaren Überschüsse der Solaranlage im Sommer erreicht werden.

Literatur

- [1] Henning, H-M. (Autor); Meyer, F. (Redaktion): Klimatisieren mit Sonne und Wärme. BINE Informationsdienst; themen-info I/04.
- [2] Decision Scheme for the Selection of the Appropriate Technology Using Solar Thermal Air-Conditioning - Guideline Document. IEA Solar Heating and Cooling Programme, Task 25: Solar-assisted air-conditioning of buildings. www.iea-shc-task25.org
- [3] Henning, H-M.: Wirtschaftlichkeitsanalyse solarthermische Kühlung. Tagungsband 3. Symposium Solares Kühlen in der Praxis, Fachhochschule Stuttgart, 26-27.4.2004, Stuttgart
- [4] Wolfgang Stürzebecher, Rainer Braun, Eric Garbett, Malcolm Denman: Solar Driven Sorption Refrigeration Systems for Cold Storage Depots. Proc. HPC 2004 – 3rd International Conference on Heat Powered Cycles, Cyprus, October 2004
- [5] Henning, H-M.: Solare Klimatisierung – Stand der Entwicklung. erneuerbare energie (Österreich), Heft 2-05