

Thermische Solartechnik für Kälte, Wärme und Strom



Stadtwerke Crailsheim

Die thermische Nutzung der Solarenergie kann einen entscheidenden Beitrag zur Klima- und Ressourcenschonung leisten. Die Anwendungsmöglichkeiten reichen von der solaren Trinkwassererwärmung und Raumheizung über die Bereitstellung von solarer Wärme für industrielle Prozesse sowie die solarthermische Klimatisierung und Stromerzeugung bis hin zur thermo-chemischen Herstellung von Treibstoffen.

1. Einleitung

Im Rahmen der Nachfolgeregelung für die beiden aus Altersgründen ausscheidenden Institutsleiter wurde im April 2000 die Leitung des Instituts für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW) der Universität Stuttgart und des Instituts für Technische Thermodynamik (ITT) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Personalunion an Prof. Hans Müller-Steinhagen übertragen. Die beiden Institute haben heute zusammen 240 Mitarbeiter/innen (ITW = 40, ITT = 200), von denen ca. 160 in Stuttgart, 60 in Köln-Porz, 15 in Almería/Spainien und fünf in Hamburg stationiert sind. Die Struktur und Hauptarbeitsgebiete der beiden Institute können **(01)** entnommen werden.

Insgesamt beschäftigen sich über 100 Wissenschaftler/innen mit Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur thermischen Nutzung der Solarstrahlung im Temperaturbereich von 0 °C bis 1.500 °C. Damit ist der Verbund aus ITW und ITT die größte For-

scherguppe auf diesem Themengebiet in Europa und möglicherweise weltweit.

2. Bedeutung der Wärmebereitstellung

In Deutschland werden heute 50 Prozent des Endenergiebedarfs im Wärmemarkt umgesetzt, alleine 40 Prozent der energiebedingten CO₂-Emissionen entstehen bei der Wärmebereitstellung. Diese Zahlen unterstreichen die herausragende Bedeutung des Wärmemarktes für einen erfolgreichen Klimaschutz. Durch die vollständige energetische Sanierung des gesamten Gebäudebestandes kann der Endenergieeinsatz zur Wärmebereitstellung bis zum Jahr 2050 fast halbiert werden.

Um den Anteil Erneuerbarer Energien den Ausbauzielen der Bundesregierung entsprechend schnell ansteigen zu lassen, ist wegen der begrenzten Biomassepotenziale insbesondere ein schneller Ausbau der Solar- und Erdwärmenutzung erforderlich. Dem BMU „Leitszenario“ entspre-

chend kann bis zum Jahr 2050 knapp die Hälfte des dann noch verbleibenden Wärmebedarfs mit Erneuerbaren Energien gedeckt werden.

Die thermische Nutzung der Sonnenstrahlung ist jedoch nicht auf die Erwärmung von Wasser und die Beheizung von Gebäuden beschränkt. Der industrielle und gewerbliche Prozesswärmebedarf in Deutschland beträgt gegenwärtig etwa 1.800 PJ/a, davon rund 500 PJ/a unterhalb 200 °C. Dies entspricht etwa fünf Prozent des gesamten Endenergiebedarfs. Die solare Bereitstellung der Prozesswärme mit entsprechend geeigneten Kollektoren und Wärmespeichern könnte deshalb zusätzlich einen erheblichen Beitrag zur Minderung des Verbrauchs an fossilen Energieträgern und der damit verbundenen Emissionen beitragen.

Weitere Anwendungen von solar bereitgestellter Wärme sind

- die solare Klimatisierung und Kälteerzeugung,
- solarthermische Kraftwerke für die Stromerzeugung im MW bis GW Bereich,
- die Herstellung von solaren Brennstoffen wie zum Beispiel Synthesegase oder Wasserstoff.

Trotz der vielfältigen Anwendungen der Sonnenwärme wird ihre Bedeutung häufig im Vergleich zu anderen Technologien zur Nutzung der Erneuerbaren Energien stark unterschätzt. (02) zeigt jedoch einen Vergleich der im Jahr 2008 weltweit installierten Kapazitäten. Bei der gegenwärtigen Marktentwicklung kann davon ausgegangen werden, dass sich die führende Rolle der Solarthermie in den kommenden Jahrzehnten noch weiter verstärken wird.

3. Solaranlagen zur Trinkwassererwärmung und Raumheizung im Einfamilienhaus

Die Wärmeerzeugung mit Solarenergie hat bereits eine mehr als 30jährige Geschichte in Deutschland. Zum Ende des Jahres 2008 waren in Deutschland thermische Solaranlagen mit einer Wärmeleistung von insgesamt 7,9 GW_{th} bzw. einer Kollektorfläche von 11,3 Mio. m² installiert. Diese erzeugten im Jahr 2008 insgesamt 4520 GWh Solarwärme, wodurch mehr als 1,2 Mio. Tonnen CO₂-Emissionen vermieden wurden. Dennoch werden heute erst 0,3

SUMMARY

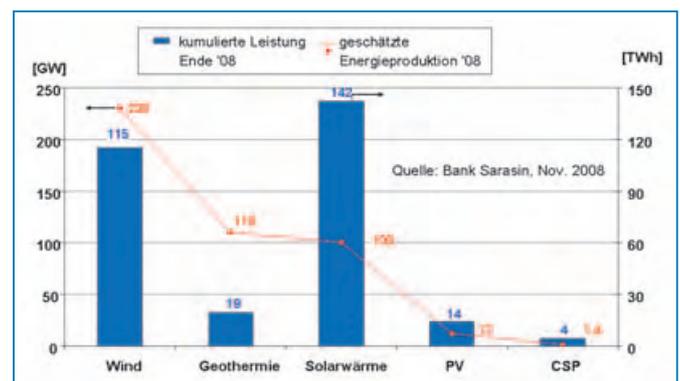
The thermal use of solar radiation can make an enormous contribution to the conservation of climate and natural resources. This ranges from the provision of heat for water, buildings and industrial processes to solar thermal air conditioning and power generation, and finally thermo-chemical production of fuels. Already today, more useful energy is provided by these technologies than by any other process using renewable energies, with the exception of the well-established hydropower. Together, the Institute for Thermodynamics and Thermal Engineering in the University of Stuttgart and the Institute of Technical Thermodynamics of the German Aerospace Centre (DLR) are amongst the leaders in the international research and development effort to exploit this almost unlimited source of energy.

Elliptischer Sonnensimulator für die Vermessung von Receiverrohren für Parabolrinnenkraftwerke



01

Im Jahr 2008 weltweit installierte Leistung und Energiebereitstellung

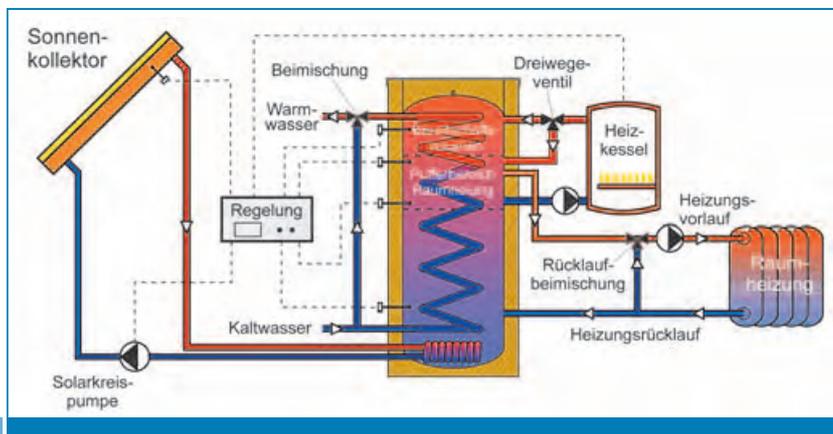


02

Prozent des deutschen Wärmebedarfs mit Solarwärme gedeckt. Es wird davon ausgegangen, dass bis 2020 europaweit im Durchschnitt 1 m² Kollektorfläche pro Einwohner installiert werden kann. Da Deutschland heute bereits den europäischen Durchschnitt übertrifft, könnten hier bis zum Jahr 2020 möglicherweise schon 2 m² Sonnenkollektorfläche installiert werden. Mit insgesamt 160 Mio. m² Kollektorfläche bzw. 112 GW_{th} installierter

thermischer Leistung würde dann über sechs Prozent des Wärmebedarfs gedeckt werden.

Solarwärme wird in Deutschland heute primär zur solaren Trinkwassererwärmung und Unterstützung der Raumheizung genutzt. Hierzu kommen in mehr als 98 Prozent aller Fälle Einzelanlagen für individuelle Gebäude zum Einsatz. Überwiegend handelt es sich hierbei um solare Kombianlagen, die sowohl zur Trinkwassererwärmung als auch zur Heizungsunterstützung dienen. Auf diese Anlagentechnologie entfällt der weitaus größte Teil der im Jahr 2008 neu installierten solarthermischen Leistung von 1,47 MW_{th} bzw. 2,1 Mio. m² Kollektorfläche.



Prinzipieller Aufbau einer solaren Kombianlage

Vereinzelte werden große solarthermische Anlagen zur solaren Wärmeversorgung von Mehrfamilienhäusern sowie Verbundsysteme, sogenannte solare Nahwärmesysteme zur Wärmeversorgung gesamter Siedlungsgebiete eingesetzt. Integraler Bestandteil von Solaranlagen sind Wärmespeicher, deren Speicherzeit meist im Bereich von wenigen Tagen liegt, jedoch auch mehrere Monate (saisonale Wärmespeicher) betragen kann. Im Hinblick auf den Nichtwohnungsbereich sind typische Einsatzgebiete von thermischen Solaranlagen die solare Kühlung und Prozesswärmeerzeugung für Industriebetriebe, Gewerbeimmobilien und öffentliche Einrichtungen wie z. B. Schwimmbäder.

Thermische Solaranlagen zur Erwärmung des Trinkwassers und für die Unterstützung der Raumheizung haben bereits einen hohen technischen Stand erreicht. Sie bestehen als zentrale Komponenten aus einem Sonnenkollektor, einem Wärmespeicher und einer Regelung (03). Der Kollektor absorbiert die von der

Sonne kommende Solarstrahlung und wandelt diese in Wärme um. Die erzeugte Wärme wird über ein in einem hydraulischen Kreislauf (Solarkreislauf) zirkulierendes Wärmeträgerfluid einem Warmwasserspeicher zugeführt. Zusätzlich wird dieser Speicher ggf. durch eine konventionelle Nachheizung (z. B. Öl- oder Gaskessel) beheizt. Vom Speicher ausgehend wird das Leitungsnetz für die Trinkwarmwasserversorgung sowie Raumheizung und ggf. weiterer Verbraucher wie z. B. ein Schwimmbad, mit Wärme versorgt. Der Betrieb der Anlage wird durch eine Regelung kontrolliert, die z. B. die Pumpe im Solarkreislauf ein- und ausschaltet sowie die Nachheizung aktiviert.

Etwa ein Drittel der heute in Ein- und Zweifamilienhäusern installierten Solaranlagen dient ausschließlich der Trinkwassererwärmung und etwa zwei Drittel aller Anlagen unterstützen zusätzlich die Raumheizung. Heute übliche solare Kombianlagen besitzen eine Kollektorfläche von etwa 10 bis 20 m² und Speichervolumina im Bereich von 0,7 bis 1,5 m³. Beim Einsatz in einem ‚üblichen‘ Einfamilienhaus kann mit diesen Anlagen eine Reduktion des Gesamtenergieverbrauchs für Heizung und Warmwasser von ca. 20 bis 30 Prozent erreicht werden. Soll ein deutlich größerer Anteil der benötigten Energie von der Sonne geliefert werden, so sind größere Kollektorflächen und/oder Speicherkapazitäten erforderlich.

Ein zukünftiges Ziel für den Gebäudebereich ist die Etablierung des sogenannten „100% SOLARAKTIVHAUSES“ als Baustandard. Beim „100% SOLARAKTIVHAUS“ wird der gesamte Wärme- und Kältebedarf zu 100 Prozent durch Solarwärme gedeckt. Entsprechend den Vorgaben der europäischen und deutschen Solarthermie-Technologieplattform (ESTTP, DSTTP) soll dieses Ziel bis spätestens 2030 erreicht sein. Zusätzlich zum Neubaubereich ist es das Ziel, im Gebäudebestand den Verbrauch fossiler Energieträger durch die sogenannte „solar aktive Sanierung“ deutlich zu reduzieren.

4. Solarunterstützte Nahwärme und Saisonale Wärmespeicherung

Für die Wärmeversorgung von größeren Wohnsiedlungen mit mindestens 100 Wohneinheiten wurden in den vergangenen Jahren Konzepte entwickelt, die bei

möglichst geringen Mehrkosten den fossilen Brennstoffbedarf zur Wärmeversorgung um bis zu 50 Prozent und mehr reduzieren. Ein wichtiger Baustein dieser Versorgungskonzepte ist die Nutzung von solarthermischer Energie in Nahwärmeversorgungssystemen mit saisonaler Wärmespeicherung. Seit 1993 wird durch die Energieforschungsprogramme Solarthermie-2000 und Solarthermie2000plus u. a. die Technik der Langzeit-Wärmespeicherung einschließlich des technischen Systems zur Nutzung der gespeicherten Wärme entwickelt und in Pilotanlagen verwirklicht. Elf Anlagen mit Langzeit-Wärmespeicher, die im Rahmen des Energieforschungsprogramms Solarthermie-2000plus von verschiedenen Instituten – so auch dem Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik – wissenschaftlich-technisch begleitet werden, sind in Betrieb. Große Solaranlagen mit bis zu 7000 m² Kollektorfläche sind heutzutage Stand der Technik. Die zeitliche Verschiebung zwischen Solarstrahlungsangebot im Sommer und maximalem Wärmebedarf im Winter wird über die saisonale Wärmespeicherung ausgeglichen, für die vier erprobte Techniken zur Verfügung stehen. Diese müssen jedoch weiterentwickelt werden, um die derzeit noch hohen Baukosten zu reduzieren.

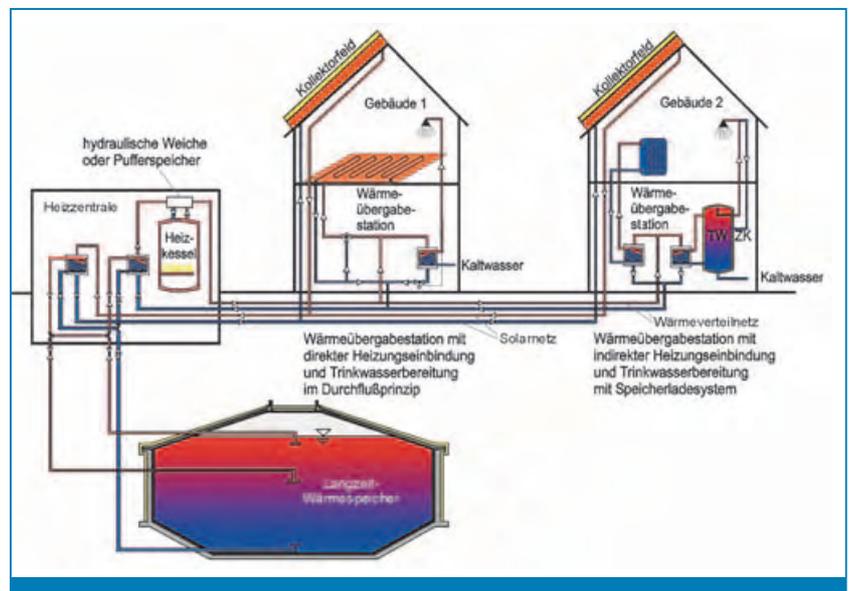
(04) zeigt das Schema einer solar unterstützten Nahwärmeversorgung mit Langzeit-Wärmespeicher. Die von den Sonnenkollektoren gewonnene Wärme wird über das Solarnetz zur Heizzentrale transportiert und bei Bedarf über ein Wärmeverteilnetz den Gebäuden zugeführt. Die Kollektoren sind auf den Dächern der 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 Siedlungsgeländes eingebaut ist. Das über das Wärmeverteilnetz gelieferte Heizwasser versorgt die Heizung und Trinkwassererwärmung der Gebäude. Die Heizwassererwärmung in der Heizzentrale verwendet die im Langzeit-Wärmespeicher gespeicherte Solarwärme und heizt bei Bedarf konventionell nach. Die Auslegungsrichtlinien dieser Anlagen lassen sich vereinfacht wie folgt zusammenfassen: Die Systemmindestgröße beträgt 100 Wohneinheiten mit je 70 m² Wohnfläche. Pro m² Wohnfläche sollte (0,14 – 0,21) m² Flach-

kollektor und je m² Flachkollektor (1,4 – 2,4) m³ Wasseräquivalent als Wärmespeicher vorgesehen werden. Eine so ausgelegte solarthermische Großanlage liefert pro Jahr circa 230 – 350 kWh pro m² Flachkollektor für einen solaren Deckungsanteil von 40 bis 60 Prozent am Gesamtwärmebedarf.

5. Solarthermische Kühlung

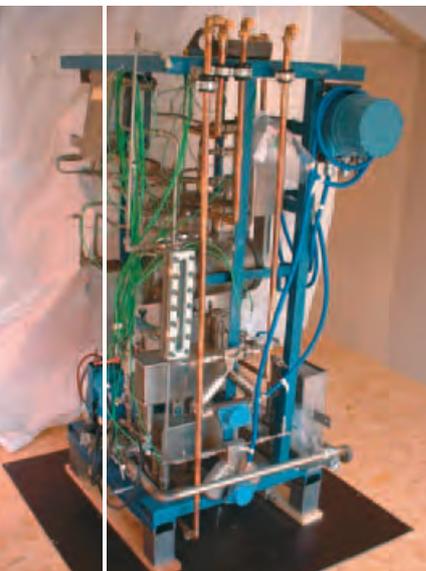
Auch in Deutschland entsteht durch moderne Bauformen und -materialien und durch den zunehmenden Einsatz elektrischer Geräte ein steigender Bedarf nach Raumklimatisierung. Zur Gebäudekühlung im kleinen Leistungsbereich (1 bis 10



Schema einer solar unterstützten Nahwärmeversorgung

kW Kälteleistung) werden heutzutage in der Regel Kompressionskältemaschinen eingesetzt. Diese Art der Kälteerzeugung benötigt als Antriebsenergie elektrischen Strom. Dadurch tritt gerade in Spitzenlastzeiten im Sommer eine erhebliche Belastung der Stromnetze auf, die bis zum Zusammenbruch führen kann. Weiterhin sind mit der Erzeugung von elektrischem Strom erhebliche CO₂-Emissionen verbunden.

Der Einsatz von Anlagen zur solaren Klimatisierung hat ein enormes Potenzial. Sie können Stromnetze im Sommer entlasten und Primärenergie einsparen. Die Nutzung Erneuerbarer Energien ist hier besonders attraktiv, weil im Gegensatz zur solaren Beheizung der zeitliche Verlauf von Nachfrage und Energieangebot weitgehend identisch sind. Noch sind viele An-



05a Absorptionskältemaschine



05b Solarkollektoren



05c Trockenkühler

Solare Kälteanlage des ITW

lagen in der Entwicklungs- bzw. Erprobungsphase. Damit diese Anlagen auf dem Markt konkurrenzfähig sind, müssen in erster Linie Optimierungen stattfinden. Am ITW wurde eine thermisch angetriebene Ammoniak/Wasser-Absorptionskältemaschine mit einer Kälteleistung von 10 kW entwickelt und in einem neuen Anlagenkonzept mit Eisspeicher umgesetzt, um eine maximale Verfügbarkeit an Kälteleistung zu sichern. Mit einer Prototyp-Anlage werden 115 m² Bürofläche des Institutsgebäudes mittels Kühldecken gekühlt. Ein weiterer Vorteil der Anlage des ITW ist, dass die installierte Solaranlage in den kühleren Monaten zusätzlich für die Gebäudeheizung verwendet wird, wobei die Absorptionskältemaschine als Wärmepumpe arbeitet. Somit ist es möglich, mit einer Anlage die komplette Versorgung von Gebäuden mit Wärme und Kälte zu übernehmen. Als Wärmequelle dienen thermische Solarkollektoren. Die Abwärme der Kältemaschine wird ausschließlich über einen Trockenkühler abgeführt. Die wesentlichen Komponenten dieser Anlage sind in (05) gezeigt.

6. Solarthermische Kraftwerke

Solarthermische Kraftwerke nutzen fokussierte Solarstrahlung, um damit Dampf oder Druckluft bei hohen Temperaturen zu erzeugen, die dann in konventionelle Dampf- oder Gasturbinenkreisläufe eingespeist werden. Bei Verwendung von effizienten Wärmespeichern können solche Großkraftwerke in den sonnenreichen Ländern planbaren und regelbaren Strom im MW- und GW-Bereich bereitstellen. Am 30. Oktober 2009 wurde von 12 großen Unternehmen die sogenannte DESERTEC Industrial Initiative (DII) gegründet, mit dem Ziel bis zum Jahr 2050 etwa 400 Mrd. Euro in solarthermische Kraftwerke in Nordafrika und in Hochspannungsgleichstrom-Leitungen (HGÜ) nach Europa zu investieren, um damit 15 Prozent des europäischen Strombedarfs zu decken. Das DESERTEC-Konzept basiert im Wesentlichen auf wissenschaftlichen Arbeiten des DLR Instituts für Technische Thermodynamik.

Zwei unterschiedliche Systeme zur großtechnischen solarthermischen Stromerzeugung in sonnenreichen Ländern sind heute verfügbar, siehe (06). Zum einen linienfokussierende Systeme, die die kon-

zentrierte Strahlung in ihrer Brennnlinie auf ein selektiv beschichtetes Absorberrohr richten und damit Temperaturen bis zu 400 °C im dort zirkulierenden Wärmeträger erzielen. Zum anderen punktfokussierende Systeme, bei denen dreidimensional gekrümmte der Sonne nach geführte Einzelspiegel (Heliostaten) die Solarstrahlung auf einen Wärmetauscher (Receiver) ausrichten, der sich auf der Spitze eines Turms befindet. Dabei können höhere Temperaturen als in den linienfokussierenden Systemen erzielt werden.

Solarthermische Kraftwerke mit Parabolrinnenkollektoren werden seit mehr als 20 Jahren in der kalifornischen Mojave Wüste betrieben. Lange fand ihre Erfolgsgeschichte keine Nachahmer. Inzwischen werden jedoch im gesamten Sonnengürtel der Welt neue Kraftwerke gebaut und betrieben. Allein in Spanien befinden sich zurzeit knapp 200 MW an Solarkraftwerken in Betrieb, mehr als 800 MW im Bau und mehrere GW in konkreter Planung. Auch in den USA und in einigen nordafrikanischen Staaten wird bereits gebaut und in zahlreichen weiteren Staaten laufen bereits konkrete Planungen. Bis zum Jahr 2020 werden weltweit 20 bis 40 GW an Solarkraftwerkskapazitäten erwartet. Dass es soweit gekommen ist, ist nicht zuletzt dem DLR zu verdanken, das diese Entwicklungen seit mehr als 30 Jahren kontinuierlich unterstützt hat. Zusammen mit seiner spanischen Schwesterorganisation CIEMAT und Industriepartnern wurde die Technik weiterentwickelt und im spanischen Testzentrum, der Plataforma Solar in Almeria, gemeinsam erprobt.

Kommerziell werden heutzutage überwiegend Parabolrinnenkollektoren eingesetzt, so zum Beispiel im Anfang 2009 eingeweihten Andasol 1 Kraftwerk in Andalusien, dem derzeit größten Solarkraftwerk der Welt. Auf einer Gesamtfläche von fast zwei Quadratkilometern stehen über 600 Parabolrinnen-Kollektoren, von denen jeder einzelne 150 Meter lang und 5,7 Meter breit ist. Insgesamt haben die Spiegel eine Fläche von über 500.000 Quadratmetern. In der Mitte dieses riesigen Solarfeldes befindet sich außerdem ein Wärmespeicher. Hier wird in zwei großen Tanks von 14 Metern Höhe und 36 Metern Durchmesser die überschüssige Energie während der Mittagsstunden in 26.000 Tonnen flüssigem Salz gespeichert. Das Salz wird durch Sonnenenergie auf bis zu

390 °C aufgeheizt. Mit der gespeicherten Wärme kann das Kraftwerk dann bis zu 7,5 Stunden nach Sonnenuntergang noch Strom mit voller Leistung (50 Megawatt) liefern. Neben diesem ersten kommerziell betriebenen Kraftwerk Andasol 1 sind bereits zwei weitere Solarkraftwerke am selben Ort im Bau: Andasol 2 befindet sich seit Mitte 2009 in der Erprobungsphase mit ebenfalls 50 Megawatt, Andasol 3 mit weiteren 50 Megawatt wird voraussichtlich Anfang 2011 folgen.

Heutzutage ist der Strom aus solarthermischen Kraftwerken noch deutlich teurer als konventionell erzeugte Elektrizität. So werden z. B. in Spanien bis zu 27 Cent/kWh vergütet. Durch die rasche Implementierung und die Vergrößerung der Anlagengrößen sind aber schon deutliche Kostensenkungen durch Skaleneffekte erkennbar. Dazu kommen technische Verbesserungen, die den Wirkungsgrad der Anlage erhöhen, so dass die gleiche Elektrizitätsmenge mit weniger Kollektoren erreicht werden kann. Auch die Verlängerung der Lebensdauer und die Reduzierung von Betriebs- und Wartungskosten tragen zur Kostensenkung bei. Auf all diesen Gebieten forscht das DLR häufig in Kooperation mit der Industrie. Höhere Effizienzen lassen sich z. B. durch höhere Temperaturen im Wärmeträgermedium erreichen, so dass die Wärmeenergie dann effizienter in mechanische Arbeit umgewandelt werden kann. Dem DLR ist es z. B. gelungen, in einem Turmkraftwerk Lufttemperaturen von über 1.000 °C zu erzeugen und in eine Gasturbine einzukoppeln. Damit lassen sich längerfristig bis zu 40 Prozent Spiegelfläche im Vergleich zu heutiger Kraftwerkstechnik einsparen. Auch kostengünstigere Speichermaterialien und innovative Kollektor- und Reflektorstrukturen werden entwickelt und erprobt. Insgesamt wird erwartet, dass sich durch die technische Weiterentwicklung mit solarthermischen Kraftwerken an guten Solarstandorten in den nächsten 15 Jahren wettbewerbsfähig CO₂-freier Strom nach Bedarf erzeugen lässt.

7. Solare Chemie

Die Nutzung von Solarenergie für chemische Prozesse eröffnet die Möglichkeit, sie in solaren Energieträgern wie Wasserstoff aber auch flüssigen solaren Kraftstoffen zu speichern. Aber auch durch die Vermeidung

von Energiewandlungsschritten – wie etwa Solarstrahlung in Wärme oder Wärme in Strom – können höhere Effizienzen bei ihrem direkten Einsatz als Energiequelle in chemischen Prozessen erzielt werden.

Im DLR Institut für Technische Thermodynamik wird seit 20 Jahren an der Entwicklung solarchemischer Prozesse gearbeitet. Der Fokus liegt dabei auf der Umsetzung von grundlegenden Forschungsergebnissen in praktische Anwendungen. Die bearbeiteten Themen reichen von der solar fotochemischen Reinigung von Wasser über die solare Synthese von Fein- und Massenchemikalien, das solarthermische Recycling von Rest- und Wertstoffen bis zum Schwerpunkt der Arbeiten, der Erzeugung von Energieträgern wie Wasserstoff, Synthesegas und daraus erzeugbaren flüssigen Energieträgern wie etwa Methanol. An zwei Beispielen sollen die Möglichkeiten der Solarchemie exemplarisch dargestellt werden.

Im Bereich der solaren Wasserreinigung hat das DLR in einer Reihe von nationalen und europäischen Projekten Katalysatoren, Verfahren und Anlagen entwickelt, mit dem Ziel die Nutzung von Solarstrahlung hier so effizient und wirtschaftlich attraktiv zu machen, dass ein Markteinstieg erfolgen kann. Diese Entwicklung ist inzwischen soweit, dass ein kommerzieller Solarreaktor von Industriepartnern vermarktet wird. Die Technologieentwicklung wurde unter anderem durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt in dem Projekt SOWARLA gefördert. Eine Demonstrationsanlage mit einer Solarreaktorfläche von 250 m² und einer jährlichen Reinigungsleistung von 18.000 m³



Bauformen von solarthermischen Kraftwerken (unten Andasol 1 Kraftwerk)



07

SOWARLA Demonstrationsanlage,
Lampoldshausen

Wasser wurde im Oktober 2009 in Lampoldshausen in Baden-Württemberg eingeweiht, siehe (07). Die SOWARLA Technik wurde 2008 mit dem Energy Globe Award – Germany ausgezeichnet.

Die solare Wasserstofferzeugung durch thermochemische Kreisprozesse zur Wasserspaltung wird seit annähernd zehn Jahren in überwiegend durch die Europäische Union geförderten Projekten entwickelt. Einer der bearbeiteten Prozesse ist der sogenannte zweistufige thermochemische Kreisprozess, bei dem spezielle Eisenoxide solar auf 800 °C aufgeheizt werden, um Wasserdampf Sauerstoff zu entziehen und so Wasserstoff zu erzeugen.

Bei der Aufheizung auf über 1.200 °C wird die Reaktion rückgängig gemacht und das Eisenoxid gibt den Sauerstoff wieder ab und kann erneut für die Wasserstofferzeugung eingesetzt werden. Im Projekt HYDROSOL hat das DLR Institut für Technische Thermodynamik diesen Prozess von Laborversuchen über Reaktoren, die im Sonnenofen des DLR betrieben werden und eine Leistungsaufnahme von < 10 kW haben, in einen kontinuierlichen Prozess weiterent-



08

HYDROSOL 2 Reaktor auf dem Solarturm der Plataforma
Solar de Almería, Spanien

wickelt. Im Projekt HYDROSOL 2 wurde dann eine vollständig automatisierte Anlage im Maßstab von 2 x 100 kW entwickelt, die derzeit erfolgreich auf einem Solarturm der Plataforma Solar de Almería in Spanien betrieben wird. HYDROSOL wurde unter anderem mit dem Descartes Research Prize 2006 der Europäischen Union ausgezeichnet.

8. Wärmespeicher im Temperaturbereich von 0 °C bis 800 °C

Effiziente Wärmespeicher sind eine wesentliche Voraussetzung für die weitreichende Nutzung der Solarthermie. Die bisher kommerziell eingesetzten Wärmespeicher verwenden Wasser als Speichermedium, das trotz seiner ansonsten ausgezeichneten Stoffwerte Nachteile im Hinblick auf Energiedichte und Einsatztemperatur aufweist. Charakteristische Merkmale thermischer Speicher sind die für die jeweiligen Anwendungen hochspezifischen Anforderungsprofile (hinsichtlich Temperatur, Wärmeträgermedien, Menge und Leistung der benötigten Energie). Dementsprechend befassen sich das ITW und das ITT in diesem Arbeitsgebiet mit einem breiten Spektrum an Speichertechnologien, Materialien und Methoden. Weiterhin werden Fragestellungen zur hocheffizienten Wärmeübertragung und Systemintegration gleichermaßen bearbeitet.

Gegenstand der Forschung ist die Entwicklung fortschrittlicher Speicherkonzepte wie Latentwärmespeicher, Sorptions- und thermochemische Speicher. Im Bereich der (etablierten) sensiblen Speicher liegt der Fokus auf Weiterentwicklungen im Hochtemperaturbereich. Dabei zielt das ITW darauf hin, die solaren Deckungsanteile von Solaranlagen zur Trinkwassererwärmung und Raumheizung durch effizientere Speicher zu erhöhen. Hierzu werden neue Speichertechnologien mit einer hohen Energiedichte erforscht und bereits etablierte Warmwasserspeicher z. B. in Hinblick auf eine Reduktion der Wärmeverluste und eine Verbesserung der thermischen Schichtung weiterentwickelt. Für die Leistungsprüfung von Warmwasserspeichern für Solaranlagen wurde am ITW ein Prüfverfahren entwickelt, das heute Bestandteil europäischer Normen ist. Die Arbeiten des ITT sind auf eine rationellere Energienutzung in Industrie und Kraft-

werkstechnik ausgerichtet. Hierbei ist die Speicherentwicklung für solarthermische Kraftwerke mit einbezogen.

Die Entwicklung von Speichertypen zur *saisonalen Wärmespeicherung* wird am ITW seit 1984 kontinuierlich fortgeführt; der erste deutsche Langzeitwärmespeicher wurde auf dem Gelände der Universität Stuttgart gebaut und betrieben. In verschiedenen Forschungsvorhaben wurden vier Leitkonzepte für die Wärmespeicherung im Untergrund konzipiert (Heißwasser-, Erdbecken-, Erdsonden- und Aquifer-Wärmespeicher) und in Größen zwischen 1.000 m³ und 60.000 m³ realisiert. Die Entscheidung für einen bestimmten Speichertyp hängt im Wesentlichen von den örtlichen Gegebenheiten, dem Volumen und insbesondere von den geologischen und hydrogeologischen Verhältnissen im Untergrund des jeweiligen Standortes ab.

Der *Heißwasser-Wärmespeicher* besteht aus einer wassergefüllten Tragkonstruktion z. B. Stahlbeton und ist teilweise im Erdreich eingebaut. Die Wärmedämmung wird heutzutage durch geeignete schüttfähige und druckfeste Materialien wie Schaumglasschotter und Blähglasgranulat am Boden, Deckel und den Seitenwänden vorgesehen. Als wasserdichte Auskleidung des Speichers dient z. B. Edelstahlblech. Die Speicher werden drucklos im Temperaturbereich von 30 bis 95 °C betrieben. Eine thermische Durchmischung des Speicherinhalts beim Be- und Entladen wird durch Ladewechseinrichtungen z. B. Prallteller in unterschiedlichen festen Positionen oder höhenvariablen ausgeführt.

Erdbecken-Wärmespeicher können beispielsweise als Kies/Wasser-Wärmespeicher ausgeführt werden. Dabei wird eine mit wasserdichter Kunststoffolie ausgekleidete Grube mit einem Kies/Wasser-Gemisch als Speichermedium gefüllt. Der Speicher ist seitlich, oben und unten mit schüttfähigen Materialien wärmedämmend. Die Ein- und Auspeicherung 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.

Beim *Erdsonden-Wärmespeicher* werden ca. 20 bis 100 Meter lange U-Rohre vertikal ins Erd-



Hochtemperaturbetonspeicher, noch ohne Wärmedämmung

reich verbracht. Dabei muss ein möglichst guter thermischer Kontakt zwischen U-Rohr und Erdreich erreicht werden. Beim Durchströmen der U-Rohre von heißem/kaltem Wärmeträgerfluid (z. B. Wasser) wird Wärme in den Untergrund ein- bzw. aus diesem ausgespeichert. Dieser Speichertyp kann nur zur Oberfläche hin wärmedämmend werden. Maximale Speichertemperaturen liegen bei etwa 80 °C, begrenzt durch die Lebensdauer des Erdwärmesonden-Materials.

Beim *Aquifer-Wärmespeicher* werden natürlich vorkommende, nach oben und unten abgeschlossene Grundwasserschichten zur Wärmespeicherung genutzt. Über zwei Brunnenbohrungen („kalte“ und „warme“ Bohrung) wird dem Speicher Grundwasser entnommen, dieses über einen Wärmeübertrager erwärmt und wieder in den Untergrund eingeleitet. Aquifer-Wärmespeicher stellen sehr hohe Anforderungen an die geologischen Verhältnisse (hydraulische Durchlässigkeit, Grundwasserfließgeschwindigkeit, biologische und chemische Zusammensetzung des Grundwassers) des jeweiligen Standortes. Die maximale Speichertemperatur ist auf 50 °C limitiert, um biologische und geochemische Veränderungen im Grundwasser zu vermeiden.

Als ein technisch und wirtschaftlich attraktives Konzept für Anwendungen bis 400 °C

9. Leistungsprüfung und Qualitätssicherung

Für die erfolgreiche Implementierung der Solarthermie als ein elementarer Baustein einer zukünftigen Energieversorgung ist es wichtig, dass die Leistungsfähigkeit von thermischen Solaranlagen bekannt und ihre Funktionsfähigkeit über einen Zeitraum von 20 bis 30 Jahren gewährleistet ist. Für die Prüfung von Sonnenkollektoren, Solaranlagen zur Trinkwassererwärmung und solaren Kombianlagen existieren heute bereits europäische Normen, die in den vergangenen zehn Jahren unter maßgeblicher Beteiligung des ITW entwickelt wurden. Produktprüfungen nach diesen Normen werden am „Forschungs- und Testzentrum für Solaranlagen (TZS)“ des Instituts für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW) durchgeführt – siehe (11).

Das TZS ist heute das größte Prüfzentrum für thermische Solartechnik in Europa. Im Jahr 2002 wurde das TZS durch den DAR (Deutscher Akkreditierungsrat) für die Durchführung von Prüfungen an thermischen Solaranlagen und ihren Komponenten wie z. B. Sonnenkollektoren und Wärmespeicher entsprechend den europäischen Normen EN 12975, EN 12976 und ENV 12977 akkreditiert. Das TZS darf damit auch Prüfungen gemäß den Regularien des europäischen Qualitätslabels „Solar Keymark“ durchführen. Ebenso erfolgen Prüfungen entsprechend den Vorgaben der US-Amerikanischen Zertifizierungsstelle SRCC (Solar Rating and Certification Cooperation).

Zusätzlich zur reinen Prüftätigkeit ist das TZS sehr stark im F&E-Bereich engagiert. Aktuelle Forschungsprojekte beschäftigen sich mit der Entwicklung von Prüfverfahren für solarthermische Kälteanlagen und für Kombinationen aus Wärmepumpen und Solaranlagen, sowie der Entwicklung beschleunigter Alterungstestverfahren für solarthermische Kollektoren und deren Komponenten.

Das ITT des DLR hat 2009 das weltweit erste Qualifizierungszentrum für Komponenten von solarthermischen Kraftwerken in Betrieb genommen, die hier unter kontrollierten Standardbedingungen vermessen werden können.

• T. Brendel, H. Driick,
W. Heidemann, H. Kerskes,
H. Müller-Steinhagen, R. Pitz-Paal,
C. Sattler, R. Tamme



Außenprüfstände des „Forschungs- und Testzentrums für Solaranlagen (TZS)“ des Instituts für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW)

DIE AUTOREN



1

1 PROF. DR. DR.-ING. HABIL HANS MÜLLER-STEINHAGEN

leitet seit 2000 in Personalunion das Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik der Universität Stuttgart (ITW) und das Institut für Technische Thermodynamik (ITT) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt. Er wurde in zahlreiche nationale und internationale Gremien berufen, darunter auch der Innovationsrat des Ministerpräsidenten und der Nachhaltigkeitsrats von Baden-Württemberg.



2

2 PROF. DR. ROBERT PITZ-PAAL

ist seit 1993 im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) e. V. in Köln tätig. Seit 2003 ist er Universitäts-Professor für Solartechnik an der RWTH Aachen und leitet die Abteilung Solarforschung im DLR Institut für Technische Thermodynamik.



3

3 DIPL.-ING. THOMAS BRENDEL

ist seit 1999 am Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik angestellt und dort für Verwaltung und Infrastruktur verantwortlich. Parallel dazu arbeitet er an einer Dissertation zum Thema thermosiphonische Flüssigkeitsförderung und leitet eine Arbeitsgruppe zur Weiterentwicklung von solar angetriebenen Absorptionskälteanlagen und Wärmepumpen.



4

4 DR.-ING. HARALD DRÜCK

ist der Leiter des „Forschungs- und Testzentrums für Solaranlagen (TZS)“ am ITW. Er ist u. a. Vorsitzender mehrerer deutscher und europäischer Normungsgremien sowie Mitglied der Steuerungsgruppe der deutschen und europäischen Solarthermie-Technologieplattformen (DSTTP, ESTTP).



5

5 DR.-ING. WOLFGANG HEIDEMANN

ist Leiter der Abteilung Rationelle Energienutzung am Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik der Universität Stuttgart. In dieses Arbeitsfeld fällt auch die solarunterstützte Nahwärmeversorgung mit saisonalen Wärmespeichern.



6

6 DR.-ING. HENNER KERSKES

hat an der Universität Stuttgart studiert und promoviert. Er ist als wissenschaftlicher Mitarbeiter am ITW angestellt und leitet dort die Arbeitsgruppe thermo-chemische Wärmespeicherung



7

7 DR. CHRISTIAN SATTLER

ist Diplom-Chemiker, seit 1997 im DLR und leitet das Fachgebiet Solare Stoffumwandlung in der Solarforschung des Instituts für Technische Thermodynamik. Er ist im Vorstand von N.ERGHY, der Gesellschaft der Forschungseinrichtungen in der europäischen Wasserstoff und Brennstoffzellen Joint Technology Initiative, für den Bereich Wasserstoffproduktion und -speicherung verantwortlich.



8

8 DR. RAINER TAMME

ist Diplom-Chemiker und hat auf dem Gebiet der Festkörper-Chemie promoviert. Er ist Leiter der Abteilung Thermische Prozesstechnik im Institut für Technische Thermodynamik des DLR. Schwerpunkt seiner wissenschaftlichen Tätigkeit sind Energiespeicherung, thermo-chemische Umwandlungen und Wasserstoffherzeugung. Gegenwärtig leitet er den Annex 19 „High Temperature Heat Storage“ im IEA Programm „Energy Conservation through Energy Storage“.

Kontakt

Universität Stuttgart, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik
Pfaffenwaldring 6, 70550 Stuttgart
Tel. 0711/685-63536, Fax 0711/685-63503
E-Mail: pm@itw.uni-stuttgart.de
Internet: <http://www.itw.uni-stuttgart.de>, Internet: <http://www.dlr.de/tt>