

**SONDERHEFT SOLARFORSCHUNG**

Solarenergie – Spitzenforschung aus Deutschland

von Jürgen Trittin

Independent Power Projects –
Industriepartnerschaften des DLR in der Solarforschung

Zehn Jahre Sonnenofen –
Rückblick, Highlights, Perspektiven

Impressum

DLR-Nachrichten – Das Magazin des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt

Herausgeber:
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Redaktion:
Bernhard Fuhrmann (ViSdP),
Sabine Hoffmann (Redaktionsleitung),
Gerd Dibowski (Projektleitung),
Marlies Stüttgen (alle DLR)

Presse- und Öffentlichkeitsarbeit des DLR
Tel.: 02203 601-2286
Fax: 02203 601-3249
E-Mail: pressestelle@dlr.de
www.dlr.de/dlr-nachrichten

Hausanschrift:
Porz-Wahnheide, Linder Höhe
51147 Köln

Druck:
Druckerei Thierbach
45478 Mülheim an der Ruhr

Gestaltung:
Andreas Ziller, MACH 8,
45134 Essen

ISSN 0937-0420
Nachdruck nur mit Zustimmung des Herausgebers und Quellenangabe.
Hinweis gemäß § 33 Bundesdatenschutzgesetz: Die Anschriften der Postbezieher der DLR-Nachrichten sind in einer Adressdatei gespeichert, die mit Hilfe der automatischen Datenverarbeitung geführt wird.

Gedruckt auf umweltfreundlichem, chlorfrei gebleichtem Papier.

Bildnachweis:
Alle Bilder DLR, soweit nicht anders angegeben. Seite 35 bis 37, Fragsol; Seite 84 bis 86, EADS; Seite 88, ESA.

SOLARFORSCHUNG

Die Bedeutung der Sonnenenergie für Europa 2



Solarenergie – Spitzenforschung aus Deutschland 6

Solarforschung im DLR – Strategien und Perspektiven 12

Independent Power Projects – Industriepartnerschaften des DLR in der Solarforschung 18

Plataforma Solar de Almería – Eine deutsch-spanische Zusammenarbeit 22

SOLAR THERMISCHE STROMERZEUGUNG

Solkraftwerke – Potenziale und Märkte 28

Die Strahlung der Sonne einfangen – Der Parabolrinnenkollektor SKAL-ET150 34

Schlüsseltechnologie für die solare Kraftwerkstechnik – Die Entwicklung des Parabolrinnen-Receiver 38

Die Zukunft der Stromerzeugung – Luftrezeivertechnologie bei Kraftanlagen München 42

Sonnenstrom aus Gasturbinen 48



Die Sonne macht Dampf 52

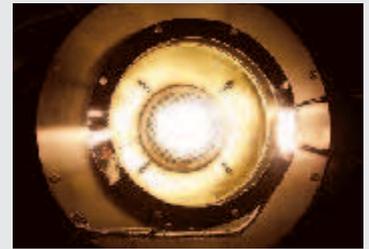
Dish/Stirling-Systeme 56

SOLARE BRENNSTOFFERZEUGUNG

Thermische Speicherung für solare Kraftwerke 60

Energieträger der Zukunft – Wasserstoff versus fossile Brennstoffe 64

Solare Erdgasreformierung 68



Solarer Wasserstoff – Thermochemische Spaltung von Wasser 72

SONNENOFEN



Zehn Jahre Sonnenofen – Rückblick, Highlights, Perspektiven 76

Materialforschung im Sonnenofen – Werkstoffprüfung unter extremen Bedingungen 80

Venus Express – Belastungstests im Sonnenofen des DLR 84

Reise ins Innere Sonnensystem – Thermische Tests für BepiColombo 88

Solare Prozesstechnik – Solar beheizte Drehrohrreaktoren 92

REZENSIONEN

Was ist Licht, was ist Energie und, ... was ist eine Zahl 96

Die Sonne liefert uns täglich ein nahezu unbegrenztes Energiepotenzial, das alleine in Deutschland den Primärenergieverbrauch um das Achtzigfache übersteigt. Sie ist als Energiequelle praktisch unerschöpflich und steht uns auch in den nächsten Jahrillionen zur Verfügung. Fossile Brennstoffe wie Kohle, Erdgas oder Erdöl sind dagegen nur begrenzt vorhanden. Die nächsten Generationen werden nicht mehr uneingeschränkt auf sie zurückgreifen können. Dennoch steigt die weltweite Nachfrage nach Kraftwerksleistung. In Deutschland kommt hinzu, dass in der Energiewirtschaft in den nächsten zwei Jahrzehnten ein erheblicher Bedarf an

Liebe Leserin,
lieber Leser,



Ersatz für ältere fossile Kraftwerke prognostiziert wird. Langfristiges Ziel muss es deshalb sein, in großtechnischem Maßstab die erneuerbaren Energiequellen zur Stromerzeugung vor allem in hierzu besonders geeigneten Regionen zu erschließen.

Das besondere Augenmerk der DLR-Solarforschung liegt auf der Entwicklung umweltfreundlicher und klimaverträglicher Energiesysteme, die die terrestrische Sonnenstrahlung in Nutzenergie umwandeln. Wichtige Schwerpunkte sind dabei die Kostensenkung und die Weiterentwicklung der Komponenten und Systeme sowie die

Erschließung neuer Anwendungsfelder solarthermischer Technologien. Eine besondere Rolle spielen die Arbeiten an Komponenten für Parabolrinnen- und Turmkraftwerke. Die dringendste zu lösende Frage der Zukunft, auf die wir eine Antwort suchen, ist die nach der chemischen Speicherung von Solarenergie, damit in Zukunft nicht nur Elektrizität sondern auch Kraftstoffe nachhaltig bereitgestellt werden können.

Das Sonderheft Solarforschung der DLR-Nachrichten soll Ihnen einen Einblick in die zukunftsweisenden Arbeiten des DLR verschaffen. Ich freue mich, dass der Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Jürgen Trittin, die Bedeutung der Solarforschung für Deutschland mit seinem Artikel unterstützt. Dafür möchte ich mich herzlich bedanken, ebenso wie für den Beitrag von Pablo Fernandez Ruiz, Direktor Energie in der Generaldirektion Forschung der Europäischen Kommission. Ich wünsche Ihnen nun „sonnige Stunden“ bei der Lektüre dieser „Solarausgabe“ der DLR-Nachrichten.

Sigmar Wittig

Prof. Dr. Sigmar Wittig
Vorsitzender des Vorstands



Von Pablo Fernandez Ruiz

Die Bedeutung der Sonnenenergie für Europa

Schon 1994 hat die Europäische Union erkannt, dass konzentrierende solarthermische Technologien ein Baustein sein könnten, um die ehrgeizige Zielsetzung 22 Prozent der Elektrizitätserzeugung bis zum Jahr 2010 durch erneuerbare Energien bereitzustellen.



Nachdem jedoch die Technologielieferanten der ersten kommerziellen Kraftwerke Anfang der neunziger Jahre in den Vereinigten Staaten in die Insolvenz gegangen waren, musste zunächst die Europäische industrielle Kompetenz gestärkt werden, um einen nachhaltigeren Erfolg dieser Technologieoption in Europa zu ermöglichen.

Um die hohen Kosten für die Entwicklung und Demonstration einer neuen Generation von Solarkraftwerken schultern zu können, war ein europäischer Ansatz notwendig.

Das Forschungsrahmenprogramm der Europäischen Union förderte daher seit 1994 19 Projekte mit einem Gesamtumfang von 27 Millionen Euro, wesentliche zusätzliche Mittel wurden außerdem zur Unterstützung von Pilotanlagen zur Verfügung gestellt.

Mit der Unterstützung durch nationale Programme und insbesondere durch die Verabschiedung einer ausreichend rentablen Stromeinspeisevergütung in Spanien sind in diesem Jahr endlich die ersten kommerziellen Erfolge dieser Anstrengungen zu bewundern: der Bau des ersten kommerziellen Solarkraftwerks in Spanien hat begonnen.

Zahlreiche weitere Projekte stehen offensichtlich kurz vor dem Abschluss. Bis zum Jahr 2010 werden mehr als 600 Megawatt an elektrischer Leistung in Europa am Netz erwartet.

Zu diesem Erfolg haben die auf diesem Gebiet führenden Europäischen Forschungseinrichtungen, das Deutsche Zentrum für Luft und Raumfahrt e.V. (DLR) und die spanische CIEMAT, beigetragen. Wesentliche Projekte, die zu Technologieentwicklungen geführt haben, die heute in Spanien zum kommerziellen Einsatz kommen, sind mit ihrer Unterstützung entwickelt und gemeinsam auf der Plataforma Solar in Almería getestet worden.

Das 6. F&E Rahmenprogramm der Europäischen Union mit einer Laufzeit von 2002 bis 2006 öffnet Europäischen Forschungseinrichtungen und Institutionen weitere Perspektiven zur Vertiefung der internationalen Zusammenarbeit und zur Stärkung der europäischen Forschungskompetenz.

So sind die Gründung einer gemeinsamen Forschungsallianz SOLLAB zusammen mit Forschungspartnern aus Spanien, Frankreich und der Schweiz, sowie die Erarbeitung einer europäischen Forschungsroadmap zu den solarthermischen Kraftwerkstechnologien die richtigen Schritte, um den europäischen Forschungsraum in diesem Umfeld zu stärken und die führende Europäische Marktposition auszubauen. Darüber hinaus widmet sich das DLR langfristigeren Themen, wie die Erzeugung von solarem Wasserstoff über thermochemische Verfahren.

Pilot und Demonstrationsprojekte müssen die neu entwickelten Technologieoptionen weiter qualifizieren. Aber auch weitere Forschung und Entwicklung zur Senkung der Stromgestehungskosten auf 0,05 Cent pro Kilowattstunde ist notwendig, um mittelfristig mit Strom aus fossilen oder nuklearen Quellen konkurrieren zu können. Neben Strom müssen langfristig auch Brennstoffe zu günstigen Preisen aus erneuerbaren Energien herstellbar sein.

Alle diese Entwicklungen können nur gemeinsam im Europäischen Verbund gelingen. Ich wünsche daher dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt sowie den beteiligten Partnern aus Forschung und Industrie weiterhin anhaltenden Erfolg auf diesem Weg und hoffe, dass es auch zukünftig solche bemerkenswerten Ergebnisse geben wird, wie sie hier in dieser Veröffentlichung präsentiert werden.

Pablo Fernandez Ruiz, Direktor Energie in der Generaldirektion Forschung der Europäischen Kommission. ◀

Abb. vorhergehende Seite: Kostengünstige Stromversorgung für Europa durch solarthermische Kraftwerke (am Beispiel von Parabolrinnenfeldern).

Abb.: Lokale Stromversorgung als Ersatz für z.B. Dieselgeneratoren durch Dish-Sterling-Systeme (hier DISTAL II in Almería).









Von Jürgen Trittin

SOLARENERGIE

Spitzenforschung aus Deutschland

Die Begrenzung des Klimawandels ist eine der größten Herausforderungen unserer Zeit. Klimaschutz und eine nachhaltige Energiepolitik sind die wesentlichen Schritte auf diesem Weg. Ein zentraler Ansatzpunkt der Bundesregierung ist hierbei der Ausbau der erneuerbaren Energien.

So ist Deutschland nicht nur in der Produktion von Strom aus Wind und Sonne führend, sondern nimmt auch in der Forschung eine internationale Spitzenstellung ein. Die Bundesregierung hat durch kontinuierliche Forschungsförderung dazu beigetragen, Deutschlands Technologieführerschaft insbesondere auch in den Bereichen Photovoltaik und solarthermische Stromerzeugung zu sichern und auszubauen.

Um den Ausbau der erneuerbaren Energien zu forcieren und die Vorreiterschaft in einem der globalen Zukunftsmärkte zu sichern, wird der Markteinführung sowie Forschung und Entwicklung im Bereich der erneuerbaren Energien auch zukünftig ein hoher Stellenwert eingeräumt.

Abb. links: EUROTROUGH-Parabolrinnenkollektor – Ausgereifte Technik mit sehr hohem Wirkungsgrad.





Der Klimawandel gehört zu den größten Herausforderungen des 21. Jahrhunderts. In den vergangenen 100 Jahren haben vor allem die aus fossilen Brennstoffen stammenden CO₂-Emissionen zu einer nachweisbaren Erwärmung der Erdatmosphäre geführt. Bereits heute bedroht der Klimawandel die Lebensgrundlagen von Millionen Menschen.

Rund 80 Prozent der weltweiten Energienutzung beruhen auf fossilen Energieträgern. Klimaschutz und Energiewende gehören daher eng zusammen. Nur durch eine nachhaltige Energiepolitik können wir den Klimawandel bremsen. Zentrale Ansatzpunkte sind zum einen Energieeinsparung und Energieeffizienz und zum anderen der Ausbau der erneuerbaren Energien.

Die Bundesregierung hat sich vor diesem Hintergrund zum Ziel gesetzt, den Anteil erneuerbarer Energien am Stromverbrauch von gut sechs Prozent im Jahr 2000 auf 12,5 Prozent bis 2010 und 20 Prozent bis 2020 zu erhöhen. Wir sind auf gutem Wege, diese Ziele auch zu erreichen. Dank des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) erreichte der Anteil der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien im ersten Halbjahr 2004 erstmals zehn Prozent. Und dieser Anteil wird weiter steigen. Die Novelle des EEG schafft hierfür ausgezeichnete Rahmenbedingungen.

Um das derzeitige hohe Ausbautempo mittel- bis langfristig halten zu können, müssen wir vor allem die Kosten der er-

neuerbaren Energien weiter senken. Dazu trägt zum einen der Ausbau selbst bei, da größere Stückzahlen eine kostengünstigere Produktion der Anlagen ermöglichen. Zum anderen kommt es für Kostensenkungen entscheidend auf erfolgreiche Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten an. Die Bundesregierung hat daher im Haushaltsentwurf für 2005 trotz der angespannten Haushaltslage die verfügbaren Mittel für die Forschung im Bereich erneuerbare Energien deutlich erhöht. Dies unterstreicht den hohen Stellenwert, der dem Ausbau der erneuerbaren Energien in der Klimaschutz- und Energiepolitik zukommt.

Das Forschungsprogramm des Bundesumweltministeriums umfasst grundlagen- und anwendungsorientierte Forschung in den Bereichen Photovoltaik, Windkraft, solarthermische Kraftwerke, Niedertemperatur-Solarthermie und Geothermie. Es verfolgt klare Ziele:

- Im Vordergrund steht die Senkung der Kosten für erneuerbare Energien.
- Darüber hinaus gilt es, den Ausbau der erneuerbaren Energien möglichst umwelt- und naturverträglich zu gestalten.
- Und schließlich wollen wir Deutschlands Technologieführerschaft in vielen Bereichen der erneuerbaren Energien sichern und ausbauen.

Denn Deutschland ist nicht nur in der Produktion von Strom aus Wind und Sonne führend, sondern hat auch in der Forschungslandschaft eine internationale Spitzenstellung. Dies gilt gerade auch in den Bereichen Photovoltaik und solarthermische Kraftwerke. Die Bundesregierung hat durch kontinuierliche Forschungsförderung zu dieser Spitzenstellung beigetragen und wird dies auch künftig tun.

Abb. links: Parabolrinnenkraftwerk (SEGS) bei Cramer Junction, Mojave Wüste, USA. In Betrieb seit 1980 mit einer elektrischen Auslegungsleistung von 354 Megawatt.





Die direkte Unterstützung der Markteinführung erneuerbarer Energien (z.B. durch das EEG) und ein hohes Niveau von Forschung und Entwicklung wirken gegenseitig befruchtend. Fortschritte in der Forschung führen zu einer verbesserten Wettbewerbsfähigkeit der erneuerbaren Energien. Umgekehrt weckt ein stetig steigender Marktanteil das Interesse der Wissenschaft. Mit anderen Worten: Je mehr die erneuerbaren Energien die Märkte erobern, desto attraktiver wird es für Unternehmen und Wissenschaftler - und insbesondere den wissenschaftlichen Nachwuchs - sich in diesem Bereich zu engagieren. Die Markterfolge von heute sind deshalb die Basis für die Spitzenforschung von morgen und umgekehrt.

Diesen Zusammenhang gilt es auch zu nutzen, um solarthermische Kraftwerke weiter nach vorne zu bringen. Diese können in sonnenreichen Regionen, wie z.B. Spanien und Nordafrika, Strom vergleichsweise kostengünstig produzieren und einen erheblichen Beitrag zur dortigen Stromversorgung leisten. Sogar Exporte nach Mitteleuropa sind denkbar und könnten dort die CO₂-Emissionen weiter absenken. Für einen global erfolgreichen Klimaschutz sind solarthermische Kraftwerke daher unverzichtbar.

Wegen der großen Bedeutung solarthermischer Kraftwerke hat das Bundesumweltministerium vor drei Jahren einen eigenen Forschungsschwerpunkt im Rahmen des Zukunftsinvestitionsprogramms

Abb. links: Heliostaten befinden sich „im Track“ das heißt sie werden der Sonnenbahn so nachgeführt, dass der Brennpunkt immer ortsstabil auf einen Bereich (hier im SOLGATE-Experiment auf dem Versuchsturm CESA1) fällt.

der Bundesregierung eingerichtet. Die darin erzielten Erfolge sind nicht zuletzt dem Know-how und dem hohen Engagement der Solarforscher im Deutschen Zentrum für Luft und Raumfahrt zu verdanken.

Mit der internationalen Technologieführerschaft in der Parabolrinnentechnologie hat Deutschland eine hervorragende Ausgangsposition für den künftigen Ausbau der solarthermischen Stromerzeugung. Jetzt müssen wir diesen Ausbau in Gang setzen. Deutschland unterstützt daher die „Global Market Initiative“ (GMI) zur Markteinführung solarthermischer Kraftwerke. Auf der internationalen Konferenz für Erneuerbare Energien im Juni 2004 in Bonn haben sich mehrere Staaten des Mittelmeerraums dieser Initiative angeschlossen. Dazu gehören neben Spanien, Italien, Israel und Jordanien auch Algerien, Marokko und Ägypten. Weitere Staaten sollen folgen. Die Zeit für konkrete Projekte ist gekommen, damit sich eine Eigendynamik im Markt entwickeln kann. Die in Spanien geplanten Anlagen können hierfür eine Lokomotivfunktion erfüllen.

Die Bundesregierung wird ihre Politik des Ausbaus der erneuerbaren Energien entschlossen fortsetzen. Markteinführungsinstrumente und Forschungsförderung werden sich auch künftig gegenseitig ergänzen. Sie werden gemeinsam dazu beitragen, dass wir unserer Verantwortung für das Klima gerecht werden und zugleich unsere Technologieführerschaft in einem der globalen Zukunftsmärkte sichern.

Jürgen Trittin ist Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). ◀





Von Joachim Szodruch

SOLAR- FORSCHUNG IM DLR

STRATEGIEN UND PERSPEKTIVEN

Bundesumweltminister Jürgen Trittin hat im Juni bei der internationalen Konferenz für erneuerbare Energien „renewables 2004“ in Bonn gesagt: „Solarthermische Anlagen werden für die Energieversorgung der Zukunft eine wichtige Rolle spielen“, und diese Überzeugung wird vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) ohne Einschränkung geteilt.



Abb. vorhergehende Seite: Solarer Parabolrinnenreaktor zur Photosynthese.

Abb. links: Heliostate.

Abb. unten: Testeinrichtung CESA1 für solarthermische Hochtemperaturanwendungen, Plataforma Solar de Almería (PSA), Spanien.

Schon seit Ende der 70er Jahre engagiert sich das DLR für diese Technologie. Der Einstieg eines Luft- und Raumfahrt orientierten Forschungsunternehmens in dieses Thema begann als Projektkoordinator für das erste Versuchskraftwerk, das unter der Schirmherrschaft der Internationalen Energieagentur unter Beteiligung von neun Staaten im spanischen Almería errichtet und betrieben wurde. Das DLR qualifizierte damals vor allem die Managementkompetenz für Großprojekte. Heute, mehr als 20 Jahre später, forscht und entwickelt ein Team von mehr als 50 Mitarbeitern an den DLR Standorten Köln, Stuttgart und im spanischen Almería, auch auf dem inzwischen zur wichtigen Testplattform umgebauten ersten Versuchskraftwerk. Diese strategische Weitsicht und der kontinuierliche Fortschritt haben wesentlich dazu beigetragen, dass Industrie und Politik inzwischen vom Erfolg dieser Technik überzeugt sind.

Solarthermische Stromerzeugung ist neben der Photovoltaik eine Möglichkeit, die terrestrische Sonneneinstrahlung zu nutzen. Hierbei werden die Sonnenstrahlen mit Hilfe von Spiegeln konzentriert und ein Trägermedium im Fokus der Spiegel erhitzt. Die Wärme wird in Dampfturbinen eingekoppelt, die wiederum Generatoren zur Stromerzeugung antreiben.

Solarthermische Anlagen unterscheiden sich von konventionellen Kraftwerken also lediglich dadurch, dass zur Wärmeerzeugung solare Energie statt fossiler Brennstoffe verwendet wird.

Je höher die Konzentration der Strahlung ist, umso höhere Temperaturen lassen sich erzeugen. Dieses wiederum ist eine wesentliche Voraussetzung, um die eingesammelte solare Wärme effizient in Strom umzuwandeln. Die Effizienz der solarthermischen Kraftwerke steigt also mit zunehmender Temperatur an, das heißt weniger Spiegelfläche ist theoretisch nötig, um die gleiche Menge an Elektrizität zu erzeugen. Da sich nur das direkte Sonnenlicht konzentrieren lässt, ist eine effektive Anwendung der Technik vor allem in sonnenreichen Gebieten der Erde sinnvoll. Rein rechnerisch gäbe es allein auf etwa ein Prozent der Fläche der Sahara das Potenzial, den Stromverbrauch der Welt durch den Betrieb solarthermischer Kraftwerke decken zu können. Durch die Möglichkeit Wärme preiswerter als mechanische oder elektrische Energie speichern zu können, sind solarthermische Kraftwerke, anders als etwa die Photovoltaik oder die Windenergie, in der Lage, Strom auch nach Sonnenuntergang bzw. an windstillen Tagen kostengünstig bereitzustellen zu können. An vergleichbaren Standorten liegen die Kosten bei noch

recht hohem Optimierungspotenzial zur Stromerzeugung heutzutage bei etwa der Hälfte der Kosten von Photovoltaiksystemen.

Die drei wesentlichen Bauarten für solarthermische Kraftwerke unterscheiden sich in der geometrischen Form der konzentrierenden Spiegel. Rinnenkollektoren konzentrieren die direkte Solarstrahlung in parabelförmigen verspiegelten Rinnen um das 100-fache auf ein in der Brennlinie verlaufendes Rohr. In Turmkraftwerken fokussieren große Planspiegel (40 bis 200 Quadratmeter) das Sonnenlicht auf die Spitze eines zentralen Turmes. Je nach optischer Genauigkeit wird die Strahlung um das 500 bis 1.000-fache verstärkt.

Während Turm- und Rinnenkollektoren für die Einkopplung der Wärme in Großkraftwerke der 100 Megawatt Leistungsklasse geeignet sind, ist die dritte Alternative besonders für den dezentralen Bereich einiger zehn Kilowatt geeignet. Der Konzentrator besteht hier aus einer parabelförmigen verspiegelten Schüssel, die die Strahlung in einem Punkt bündelt. Dort wird ein Trägermedium erhitzt und die Wärme direkt in einer kleinen Wärmekraftmaschine, z.B. einem Stirling Motor in Strom umgewandelt.

Seit Mitte der 80er Jahre werden in Kalifornien Rinnenkollektoren zur kommerziellen Stromerzeugung in Gebieten mit hoher Direkteinstrahlung eingesetzt. Die weitere Verbreitung stoppte Anfang der 90er Jahre, da die Stromerzeugungskosten zu hoch waren, um bei sinkenden Brennstoffpreisen und reduzierten Subventionen am Strommarkt konkurrieren zu können. Obwohl diese Technologie schon vor 15 Jahren Stromerzeugungskosten ermöglichte, die bis heute unter denen der Photovoltaik liegen, hat sie weitgehend ihre öffentliche – und bis zum Juni dieses Jahres ebenso ihre politische – Aufmerksamkeit verloren.

Im Juni dieses Jahres hat Bundesumweltminister Jürgen Trittin und Repräsentanten mehrerer Länder die so genannte





Abb. links: DLR-"Fix-Fokus-Rinne" – Facettierte Parabolreflektoren im Test.
Abb. unten: Parabolrinnenanordnung zur kostengünstigen solarthermischen Stromerzeugung.

„Global Market Initiative“ zur Markteinführung solarthermischer Kraftwerke im Sonnengürtel der Erde vereinbart. Ziel ist es, innerhalb von zehn Jahren die Technologie für solarthermische Anlagen zur Marktreife führen, um Solarstrom voll konkurrenzfähig mit fossil erzeugtem Strom aus konventionellen Kraftwerken zu machen. Bis zum Jahr 2015 sollen Kraftwerke mit einer Kapazität von 5.000 Megawatt errichtet werden. Vereinbart wurde, durch geeignete Gesetzgebung und Anreizprogramme zur Förderung der Einspeisung von Strom aus erneuerbaren Energien, durch transnationalen Stromtausch mit verbesserten Vergütungen für erneuerbaren Strom sowie durch CO₂-Zertifikate und multilaterale Finanzprogramme der Initiative zum Erfolg zu verhelfen. In Europa spielt Spanien hier zurzeit eine Vorreiterrolle. Dort wird seit März 2004 eine Vergütung von etwa 21 cents/Kilowattstunde für Strom aus solarthermischen Kraftwerken für eine Laufzeit von 25 Jahren gezahlt. Dies hat regelrecht einen „run“ auf die besten Standorte ausgelöst. Für ein erstes Kraftwerk wurde bereits mit dem Bau begonnen. Bis zu zehn weitere Projekte sind zurzeit in der Entwicklung mit einem Investitionsvolumen von mehr als einer Milliarde Euro.

Das politische Klima für konzentrierende Solarstromsysteme ist somit sehr günstig.

Neben dem hohen Klimaschutzpotenzial ist das besondere Exportpotenzial dieser Technologie für die Politik, deutsche Firmen und das DLR der Grund sich in der Weiterentwicklung von solarthermischen Anlagen zu engagieren. Eine mittelfristige Akzeptanz dieser Stromerzeugungsform ist jedoch einzig durch einen konkurrenzfähigen Preis zu erzielen, so dass weitere Forschung und Entwicklung notwendig ist, um die Kosten weiter zu senken. Hier verfolgt das DLR in Abstimmung mit der Industrie und eingebettet in das Energieprogramm der Helmholtz Gemeinschaft eine klare Strategie, die darauf abzielt die deutsche Industrie bei der Markteinführung der Technik optimal zu unterstützen und gleichzeitig die technischen Optionen zur Kostensenkung vorzubereiten. Dabei sind zwei Schwerpunkte zu nennen: erstens, die Erhöhung der Betriebstemperaturen um eine bessere Energieeffizienz zu erreichen und zweitens die Entwicklung von thermischen Energiespeichern, die helfen Wolkendurchgänge auszugleichen, den Strom nach Bedarf zu liefern und die Nutzungszeiten des Kraftwerks zu verlängern. Langfristig bereitet man außerdem die Speicherung der Solarenergie in chemischer Form (z.B. Wasserstoff) vor, um die Flexibilität (Einsatz im Verkehr) zu erhöhen.

Auf diesem Weg gibt es schon einige Erfolge vorzuweisen. So wurde z.B. in einem

europäischen Verbundprojekt eine Möglichkeit entwickelt, das bislang in Parabolrinnenkollektoren verwendete Wärmeträgermedium Thermoöl, das seine Einsatzgrenze bei maximal 400 Grad Celsius hat, zu ersetzen und direkt Wasser im Kollektor zu verdampfen. Damit lassen sich nicht nur Kosten einsparen, sondern auch höhere Temperaturen erzeugen. Ein zweites Beispiel ist die Einkopplung von Solarwärme von über 1.000 Grad Celsius in eine kleine Gasturbine. Ein solches Konzept würde hochskaliert auf größere Leistungen in der Kombination mit einer Dampfturbine einen Sprung im Wirkungsgrad im Vergleich zu heutigen solaren Dampfkraftwerken erlauben. Um solche Experimente praxisnah umsetzen zu können, ist der Zugang zum spanischen Testzentrum Plataforma Solar in Almeria (PSA) von entscheidender Bedeutung. Daraus ergibt sich die enge Kooperation mit dem spanischen Forschungspartner CIEMAT, der die PSA federführend betreibt.

Das DLR hat mit seinen Aktivitäten zu konzentrierenden Solarsystemen ein Alleinstellungsmerkmal in Deutschland und richtet seine Kooperation daher international aus. Innerhalb profitieren die Arbeiten von Synergien mit den anderen Energieforschungsthemen des DLR, nämlich der Kraftwerkstechnik, wo insbesondere das Thema Gasturbine im Vordergrund steht und die Arbeiten zu solaren Gasturbine beflügelt, sowie das Thema Brennstoffzellen, bei der die Wechselwirkung über das Thema Erzeugung bzw. Verwendung von Wasserstoff besteht. Synergien existieren auch im Bereich der Fernerkundung, z.B. um Einstrahlungsdaten aus Satellitendaten zu ermitteln.

Damit ist das DLR exzellent aufgestellt, um die Entwicklung dieser Technologie vom Labor bis in die industrielle Anwendung zu begleiten.

Prof. Dr. Joachim Szodroch ist Mitglied des DLR-Vorstands, Fachbereich Luftfahrt und Energie ◀



Von Robert Pitz-Paal, Hans Müller-Steinhagen
und Bernhard Milow

Independent Power Projects

Industriepartnerschaften des DLR in der Solarforschung

Im Umfeld des heutigen weltweit liberalisierten Energiemarktes werden Kraftwerke in den meisten Fällen als so genannte „Independent Power Projects“ entwickelt. Das bedeutet, dass Energiedienstleistungen gegen langfristige Energieabnahmeverträge angeboten werden. Daher muss nicht nur die Energieanlage selbst, sondern auch ihre Finanzierung sowie ihr langfristiger Betrieb von der Industrie angeboten und garantiert werden. Dies stellt insbesondere für die noch nicht am Markt etablierten „solarthermischen Kraftwerke“ eine erhebliche unternehmerische Herausforderung dar.

Mit geschätzten Kosten von mehr als 200 Millionen Euro für ein erstes 50 Megawatt Solarkraftwerk ist die Hemmschwelle zurzeit noch hoch. Das gilt insbesondere in weniger entwickelten Ländern. Ende der neunziger Jahre führte ein verstärktes Engagement für den Klimaschutz wie auch die Volatilität der Brennstoffpreise in verschiedenen Ländern zu neuen Anreizprogrammen für Solarkraftwerke. Konkrete Projekte sind nun in Spanien, Italien, USA, Algerien, Ägypten, Indien, Marokko und Mexiko in der Planung. Teilweise wurde bereits mit dem Bau erster Anlagen begonnen.

Der Markteinstieg wird im Moment im Wesentlichen durch kleinere Projektentwicklungsgesellschaften vorangetrieben.

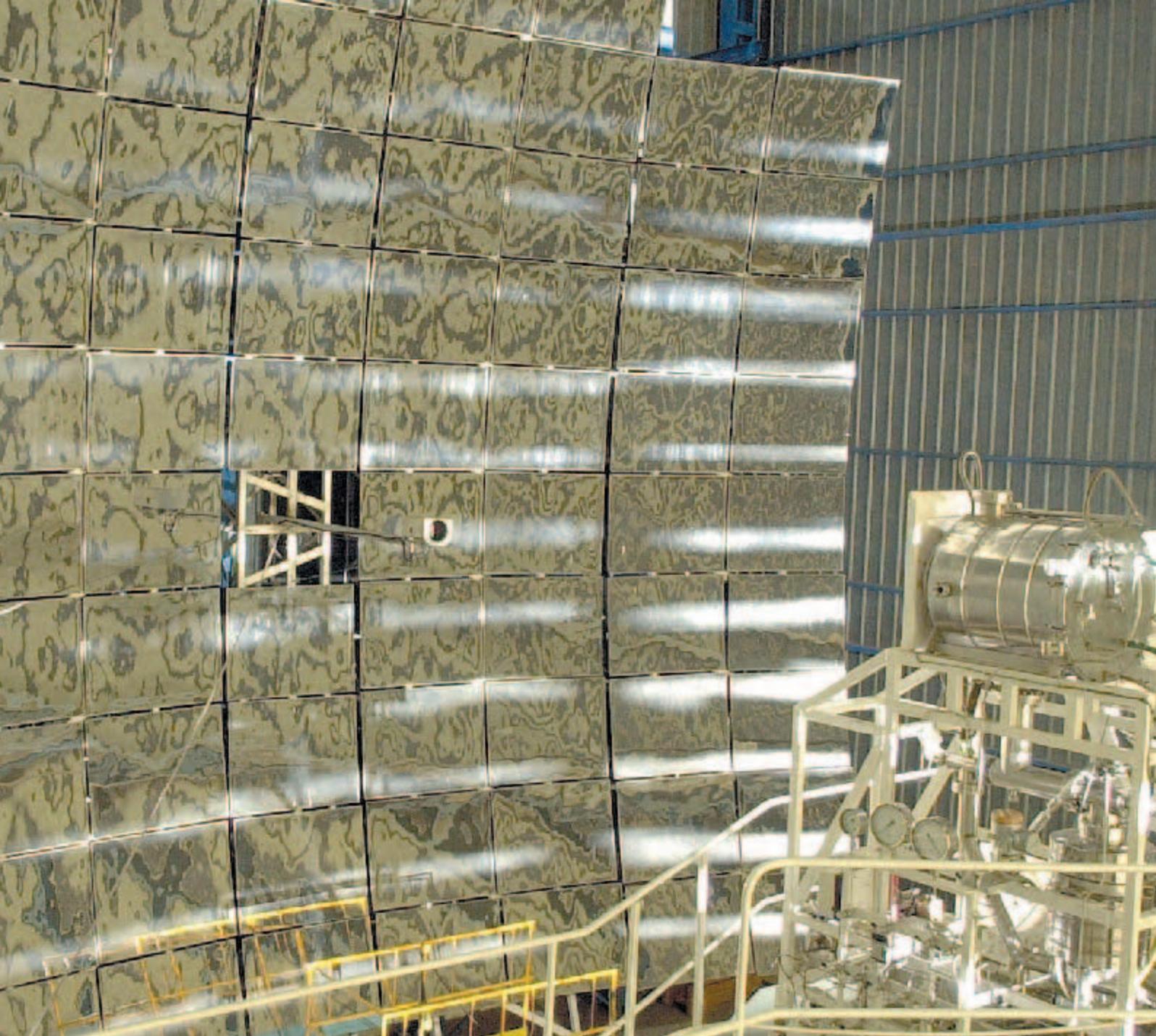
Sie müssen für die ersten kommerziellen Projekte, quasi in Pionierarbeit, Standorte identifizieren, die benötigte Landfläche sichern, das konzeptionelle Engineering übernehmen, Genehmigungsfragen (meist erstmalig) regeln, einen Generalunternehmer und Investoren identifizieren und überzeugen, Zulieferer von Schlüsselkomponenten identifizieren und qualifizieren, sowie die Kreditfinanzierung vorbereiten. Die deutsche Solar Millennium AG ist ein Beispiel einer solchen erfolgreichen Projektentwicklungsgesellschaft, die mit der Entwicklung von zwei Kraftwerksprojekten in Südspanien schon so weit fortgeschritten ist, dass mit dem Bau der ersten Anlage voraussichtlich Anfang 2005 begonnen werden kann. Kommt es zum Bau der Kraftwerke, dann gibt es neben der Lieferung des klassischen

Kraftwerksblocks (der meist am Weltmarkt gekauft wird) einen hohen Lieferanteil für die solarspezifischen Systeme (Kollektor, Speicher etc.), der heutzutage noch etwa 60 bis 70 Prozent der Investitionen des Kraftwerks ausmacht. Hierbei finden neben Engineering-Dienstleistungen vor allem die Herstellung von Schlüsselkomponenten in Deutschland statt.

Die DLR-Solarforschung ist in ihrem breiten Kompetenzspektrum, das von der Grundlagenforschung und Theoriebildung über experimentelle und numerische Methoden bis zu Demonstrationsanlagen unter realen Betriebsbedingungen reicht, ein gefragter Forschungspartner, um die Industrie bei den verschiedenen sich daraus ergebenden Herausforderungen



Abb: Konzentratorspiegel des Sonnenofens auf der Plataforma Solar de Almería (PSA), Spanien.



gen zu unterstützen. Darüber hinaus stehen Großversuchsanlagen wie der Sonnenofen auf dem Gelände in Köln-Porz und eine permanente Delegation auf Plataforma Solar in Almería (PSA) in Südspanien als Testinfrastruktur zur Verfügung.

So wurde z.B. die Solar Millennium AG von der DLR-Solarforschung durch ihre Präsenz in Südspanien bei der Auswahl von geeigneten Standorten in Spanien unterstützt. Mit Hilfe von Satellitendaten wurde die solare Einstrahlungsverteilung großer Flächenareale mit hoher Ortsauflösung und über viele Jahre gemittelt bestimmt. Dies ist eine wichtige Grundlage für die Bestimmung der Wirtschaftlichkeit dieser Kraftwerke.

Der Schwerpunkt bei der Zusammenarbeit mit der Industrie liegt jedoch auf dem Gebiet der Komponentenentwicklung und Komponentenqualifikation.

Ein sehr erfolgreiches Beispiel ist die Zusammenarbeit mit dem so genannten EuroTrough Konsortium (bestehend aus den Firmen FlagSol (D), SBP(D), Fichtner (D), Inabensa (E), Iberdrola (E)) zur Entwicklung eines neuartigen Parabolrinnenkollektors (namens Eurotrough), mit verbessertem Wirkungsgrad und geringeren Kosten. DLR und der spanische Forschungspartner und Betreiber der PSA, CIEMAT, haben den 75 Meter langen Prototypen dieses Kollektors mitentwickelt und auf der Plataforma Solar aufgebaut und getestet. Die deutschen Industriepartner

haben auf dieser Basis eine gesamte Kollektorschleife (800 Meter) in einem der Solarkraftwerke in Kalifornien errichtet und betrieben. Dabei hat das DLR die Industrie mit modernster optischer Messtechnik unterstützt, so dass die hohen Genauigkeitsanforderungen an die Konzentratorkontur bei der Montage eingehalten werden konnten. Die Ergebnisse waren so überzeugend, dass 550.000 Quadratmeter dieses Kollektortyps in dem von der Solar Millennium AG entwickelten Kraftwerksprojekt zum Einsatz kommen werden. Auch hier unterstützt das DLR mit der Entwicklung von Qualitätssicherungsmaßnahmen Aufbau.

Als weiteres Beispiel ist die Zusammenarbeit mit der Firma Schott Rohrglas zu nennen. Schott war bei der Errichtung



Abb: Kollektor zur Direktverdampfung im EU-Projekt INDITEP auf der PSA, Spanien.

Abb: DISS-Parabolrinne auf der PSA, Spanien.



der Solarkraftwerke in Kalifornien in den 80er Jahren Zulieferer für die Glashüllrohre (insgesamt 90 Kilometer Länge), die von einem israelischen Hersteller verwendet wurden, um die Vakuumisolierung der metallischen Absorberrohre herzustellen. Diese Rohre sind in der Brennlinie des Kollektors montiert und werden von einem Wärmeträgerfluid durchströmt, das die eingestrahelte Energie aufnimmt. Eine erhebliche Steigerung in der Wertschöpfung versprach man sich bei Schott durch die Entwicklung eines eigenen Produkts. Auch hier konnte das DLR helfen, die Anforderungen zu spezifizieren, Lösungen mit zu entwickeln, zu berechnen und zu bewerten sowie Prototypen sowohl im Labor als auch eingebaut im Kollektor zu vermessen. Dabei ist nach heutigem Kenntnisstand ein der Konkurrenz

überlegenes Produkt entstanden. Erste Bestellungen sind bereits bei Schott Rohrglas eingetroffen.

Beide Beispiele sind ausführlicher in Beiträgen in diesem Heft erläutert und werden durch weitere ergänzt. Während in diesen Fällen die Industrie klar die Führungsrolle übernommen hat, gibt es andere Beispiele, in denen eine industrielle Umsetzung noch weiter entfernt ist. Das DLR hat in diesen Fällen die Federführung bei der Entwicklung, wobei die beteiligten Firmen durchaus ihre eigenen Kompetenzen einbringen, allerdings auch selbst lernen und ergünden möchten, ob sich ein zukünftiges Geschäftsfeld ergeben könnte. Beiträge hierzu finden sich in diesem Heft z.B. unter der Rubrik „Solare Brennstoffe“.

Darüber hinaus nutzt die DLR-Solarforschung ihre Kompetenz und Infrastruktur dazu, um der Industrie Dienstleistungen in anderen Bereichen als der Solarenergie anzubieten. Ein typisches Beispiel ist die Nutzung des Sonnenofens in Köln-Porz. Hier wird von Hochbelastungstests für Compoundmaterialien für Gasturbinschaufeln bis zu thermischen Belastungstests unter Weltraumbedingungen für Raumfahrtmissionen zu Merkur oder Venus durch konzentrierte Strahlung durchgeführt.

Schließlich sind aus der Forschung zu solaren Komponenten und Systemen Spin-offs entstanden, die häufig noch näher an der wirtschaftlichen Anwendung lie-



gen, als der eigentliche Schwerpunkt Solarenergie. Ein Beispiel hierfür sind poröse Strukturen aus Keramik oder Metall, die einem Schwamm ähneln. Sie werden in der Solartechnik verwendet, um Luft mit konzentrierter Strahlung, die durch eine solche poröse bestrahlte Struktur gesaugt wird, auf Temperaturen von mehr als 1.000 Grad Celsius zu erhitzen. Hier zeigt sich, dass das vorhandene Know-How auf diesem Gebiet auch eingesetzt werden kann, um Komponenten für die Kühlung von Gasturbinenbrennkammern zu optimieren oder als Dieselfilter verwenden zu können. Über diese Ansätze wird mit Partnern aus dem Automobil- (z.B. Deutz AG) oder Kraftwerksbereich (Siemens) zusammengearbeitet.

Die Entwicklung von technologischen Ansätzen zur Strom- und Wärmeerzeugung sowie zur chemischen Verfahrenstechnik mittels konzentrierender Solarsysteme wurde in der Vergangenheit häufig vom DLR in seiner Rolle als Forschungseinrichtung angestoßen. Potenzielle Industriepartner werden dabei frühzeitig identifiziert und eingebunden. Durch seine Größe und die vielfältigen Arbeitsgebiete im DLR können Synergien in interdisziplinären Projekten optimal genutzt werden. Die Verwertungsstrategie ist auf den Transfer der Ergebnisse in die kooperierende europäische Industrie gerichtet, um ihr einen wesentlichen Anteil an künftigen Solarkraft-Projekten zu sichern. Die enge Kopplung an die Industrie und die internationale Vernetzung im Rahmen

einer Kooperationsvereinbarung der International Energy Agency (IEA) führt dazu, dass das DLR auch als Berater bei der Erstellung und Evaluation von kommerziellen Pilotprojekten gefragt ist. Durch diesen direkten Zugriff ist gewährleistet, dass zukünftiger Forschungs- und Entwicklungsbedarf schnell erkannt und umgesetzt werden kann.

Prof. Dr. Robert Pitz-Paal ist Leiter der Solarforschung im DLR-Institut für Technische Thermodynamik an den Standorten Köln, Stuttgart und Almería. Prof. Dr. Dr. Hans Müller-Steinhagen ist Leiter des DLR-Instituts für Technische Thermodynamik. Bernhard Milow ist DLR-Programmbeauftragter Energie. ◀

Von Christoph Richter und Diego Martinez

Plataforma Solar

Eine deutsch-spanische

In der südostspanischen Provinz Almería, nahe der Wüste von Tabernas, liegt die Plataforma Solar de Almería (PSA). Auf diesem über 100 Hektar großen Gelände wird seit 1980 die geballte Kraft der andalusischen Sonne genutzt, um verschiedene Hochtemperatur-Solartechnologien unter praxisnahen Bedingungen zu testen und zu optimieren. Über 20.000 Quadratmeter unterschiedlich geformter Spiegel in verschiedenen Testeinrichtungen konzentrieren die direkte Solarstrahlung zur Erzeugung hoher und höchster Temperaturen. Diese in der kargen Landschaft teilweise futuristisch anmutenden Anlagen bilden



de Almería

Zusammenarbeit

das größte europäische und in seiner Vielfalt auch weltweit führende Testzentrum für konzentrierende Hochtemperatur-Solartechnik und faszinieren jedes Jahr nicht nur die solarbegeisterten unter den zahlreichen wissenschaftlichen und privaten Besuchern. Das DLR war an Planung und Aufbau maßgeblich mitbeteiligt und nutzt es seit Beginn mit vor Ort stationiertem wissenschaftlichem Personal für die eigenen solartechnischen Test- und Entwicklungsarbeiten, in enger Zusammenarbeit mit der spanischen Partnerorganisation CIEMAT, die heute Besitzer und Betreiber der Anlage ist.



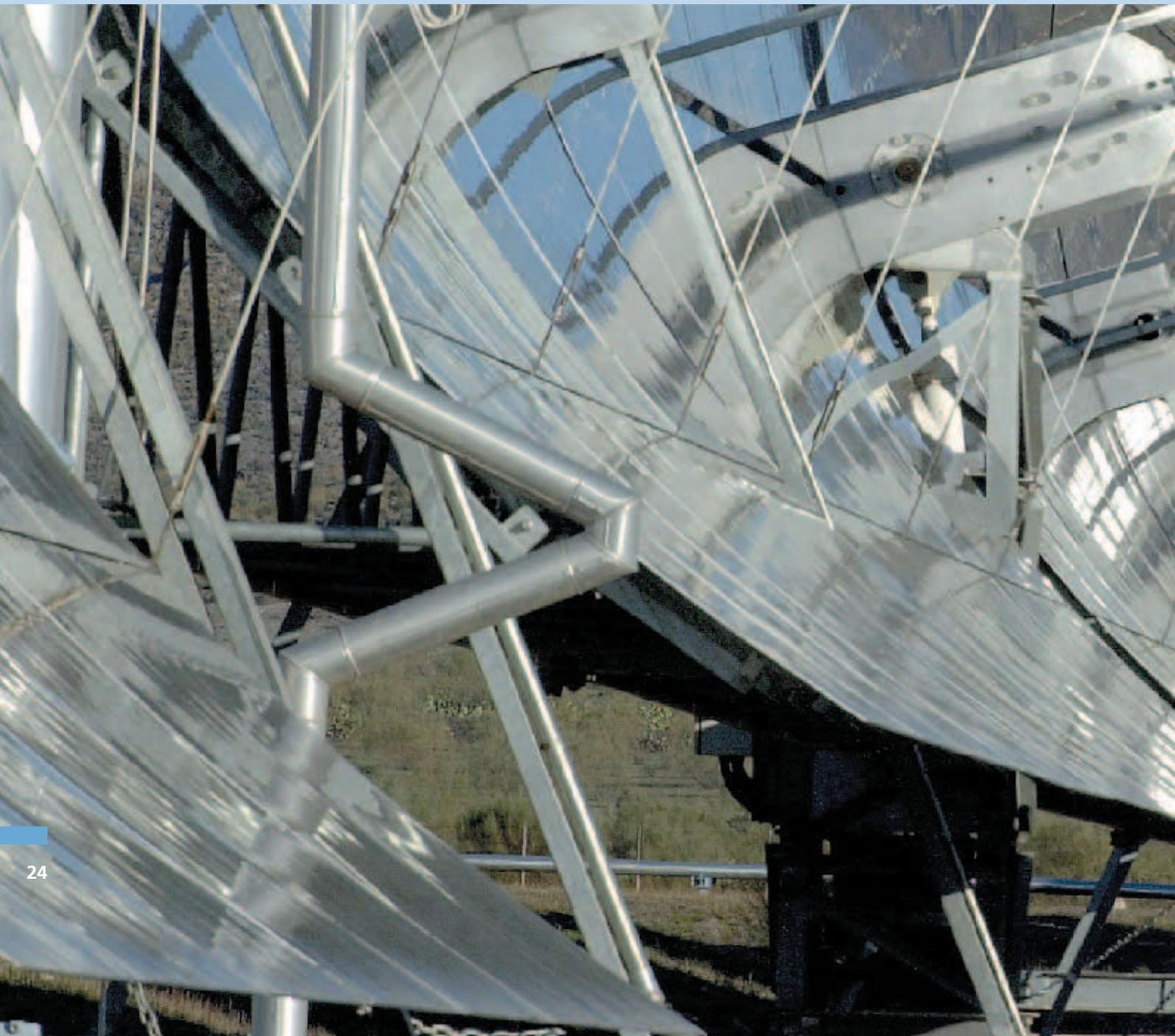
Die Gründung der PSA geht zurück auf die internationalen Bemühungen, nach dem ersten Ölpreisschock 1973 alternative Energiequellen nutzbar zu machen. Um das Potenzial solarthermischer Kraftwerke auszuloten und auszubauen, initiierte die Internationale Energieagentur (IEA) in der zweiten Hälfte der 70er Jahre ein internationales Projekt zum Bau einer Solarturm- und einer Parabolrinnenanlage, ausgelegt auf jeweils 500 Kilowatt elektrische Leistung, an dem sich damals neun Länder beteiligten (Belgien, Deutschland, Griechenland, Italien, Österreich, Schweiz, Schweden, Spanien und USA). Für dieses vom DLR koordinierte Small Solar Power System (SSPS) genannte Projekt stellte die spanische Regierung das Testgelände in der Wüste von Tabernas zur Verfügung, das neben seinen hervorragenden Einstrahlungsbedingungen

(über 3.000 Sonnenstunden und über 1.900 Kilowattstunden pro Quadratmeter direkter Solarstrahlung pro Jahr) auch neue Arbeitsplätze in einer Region versprach, deren Nutzung als beeindruckende landschaftliche Kulisse für viele Western- und Abenteuerfilmproduktionen in der zweiten Hälfte der 70er Jahre deutlich nachließ.

Der Testbetrieb der SSPS-Anlage wurde 1980 aufgenommen. 1982 wurde zusätzlich auf Initiative der spanischen Regierung als rein spanisches Projekt die Solarturmanlage CESA I (Central Electrosolar de Almería) in Betrieb genommen, die auf ein Megawatt elektrische Leistung ausgelegt war. Von 1985 bis 1987 diente die CESA I Anlage zum Test des ersten deutsch-spanischen Großprojekts GAST (Gas Cooled

Solar Tower). Im selben Zeitraum wurde die SSPS-Anlage von der IEA an Spanien übertragen und damit die organisatorische Vereinigung beider Anlagen zur heutigen PSA vollzogen. Ein parallel zwischen Deutschland und Spanien ausgehandeltes bilaterales Abkommen regelte die gemeinsame wissenschaftliche Nutzung der PSA für Entwicklung, Test und Demonstration konzentrierender Hochtemperatur-Solartechnologie. Im Rahmen dieses 1987 in Kraft getretenen CHA (Convenio Hispano-Aleman) agierten als gleichberechtigte geschäftsführende Institutionen CIEMAT von spanischer und DLR von deutscher Seite.

Der CHA war auf der Basis einer gemeinsamen spanisch-deutschen Geschäftsführung der PSA bis Ende 1998 in Kraft. In dieser Zeit wurde die Testkapazität der PSA durch



den Bau eines Solarofens, mehrerer Dish-Stirling Anlagen und der DISS-Anlage zur direkten Dampferzeugung stark erweitert und damit die internationale Spitzenstellung insbesondere in Bezug auf technologische Vielfalt erheblich ausgebaut. Dies wurde in zunehmendem Maße auch durch die finanzielle Beteiligung der EU etwa ab Ende der 80er Jahre ermöglicht, die über verschiedene Projekte in vielen Jahren etwa ein Drittel eines jährlichen Gesamtbudgets von circa drei bis vier Millionen Euro beisteuerte. Neben zahlreichen solaren Projekten rückte die PSA hierbei auch mit einem für die European Space Agency durchgeführten Testprogramm zum Temperaturschock beim Atmosphäreneintritt auf den keramischen Schutzschilden des Raumgleiters Hermes als europäische Großfor-

schungsanlage in den Blickpunkt der Öffentlichkeit. Die spezifischen Möglichkeiten zu weltraumbezogenen Forschungsarbeiten wurde übrigens auch ab Ende der 90er Jahre von Wissenschaftlern des Max-Planck Instituts zur Untersuchung der Tschernenkow-Strahlung mit Hilfe des großen Heliostatenspiegelfeldes des CESA I Turms intensiv genutzt.

Ab 1999 ging die Geschäftsführung der PSA in die alleinige Verantwortung von CIEMAT über, da die damalige deutsche Bundesregierung bereits 1997 die Beendigung des CHA in seiner bisherigen Form beschlossen hatte. Der Wunsch beider PSA-Partner (DLR und CIEMAT) nach einer Fortführung der erfolgreichen Kooperation wurde in gemeinsamer Übereinkunft durch stärker projektbezogene Kooperationsver-

einbarungen mit jeweils dreijähriger Laufzeit realisiert. Hierbei leistet das DLR einen deutlich reduzierten finanziellen Beitrag zu den Betriebskosten der PSA und hat damit auch einen formal deutlich reduzierten Einfluß auf die Nutzung der verschiedenen Testanlagen. Trotz dieses erheblichen Einschnitts auf der deutschen Seite konnte in der Praxis durch sehr erfolgreiche Projektakquisition Qualität und Quantität der auf der PSA geleisteten wissenschaftlichen Arbeiten von beiden Partnern bis heute mindestens gehalten oder gesteigert werden. Dies ist nicht zuletzt auf die in langen Jahren gewachsene vertrauensvolle Zusammenarbeit der vor Ort tätigen deutschen und spanischen Mitarbeiter zurückzuführen. In diesen Zeitraum fallen z.B. wichtige neue Meilensteine in der Weiterentwicklung der



Abb. vorhergehende Seite: Sicht über die Plataforma Solar (PSA) bei Almería, Spanien

Abb: Testen und Entwickeln in Andalusien, eine der trockensten und sonnenreichsten Regionen Europas (durchschnittlich sechs Regentage pro Jahr).

Hochtemperatur-Solartechnologie wie die Demonstration der direkten Dampferzeugung, Einkopplung von Solarenergie in Gasturbinen bei Temperaturen bis 1.000 Grad Celsius sowie im Rahmen der auf weltweite Markteinführung zielenden Produktentwicklung Design, Aufbau und Test des europäischen Parabolrinnenkollektors Eurotrough und des Dish/Stirling-Systems EuroDish.

Testeinrichtungen

Der weithin sichtbare 83 Meter hohe Solarturm der CESA I Anlage ist schon fast ein Wahrzeichen der PSA. Hier konzentrieren insgesamt 300 Heliostaten á 40 Quadratmeter die Solarstrahlung und stellen circa sieben Megawatt thermischer Energie für Tests auf insgesamt vier verfügbaren Teste-

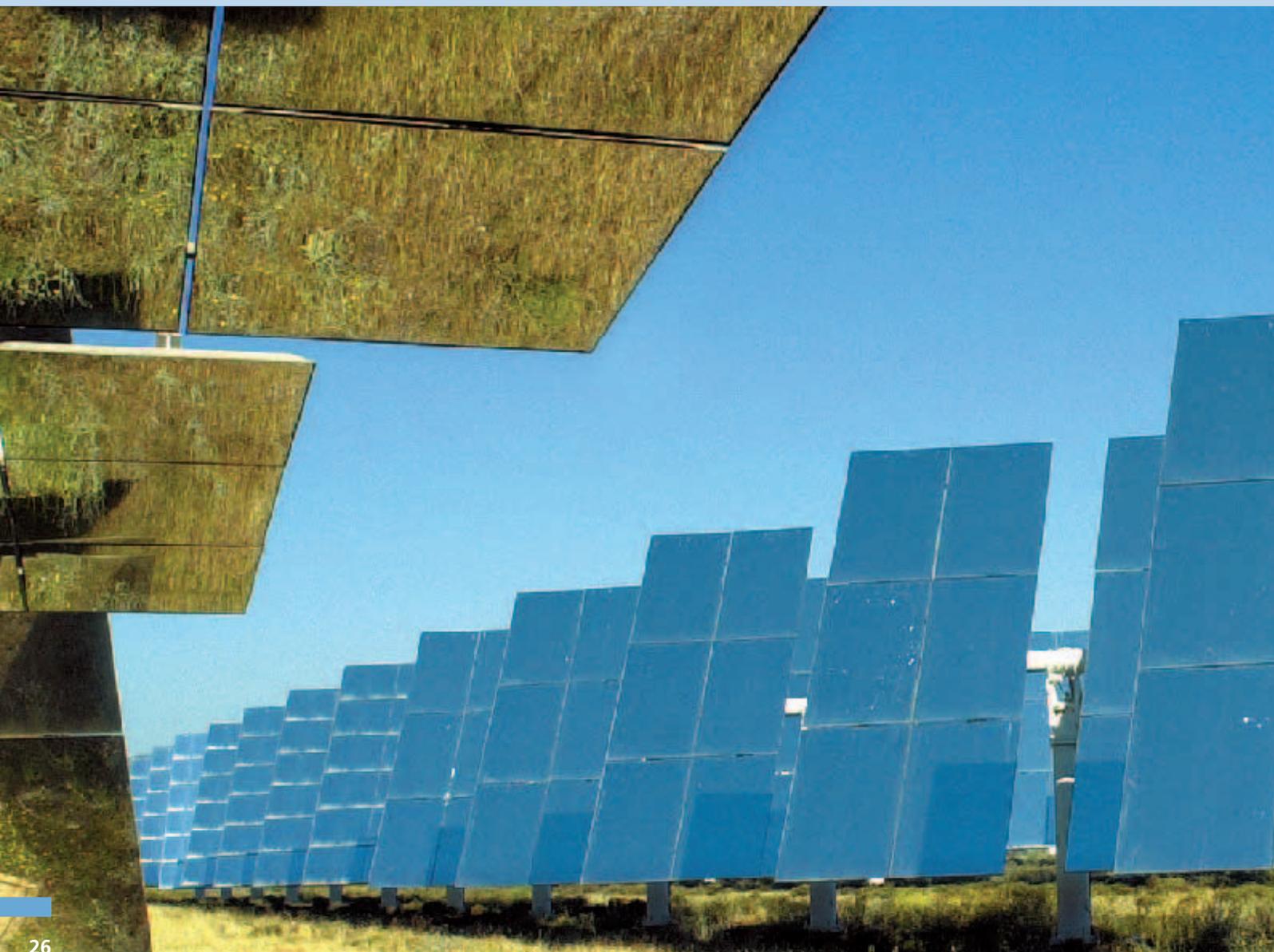
benen am Turm bereit, die bereits für zahlreiche solare Großversuche genutzt wurden. Die noch aus dem SSPS-Projekt stammende etwas kleinere CRS Solarturmanlage bietet mit neunzig Heliostaten gleicher Größe und zwei Testebenen gute Voraussetzungen für kleinere Projekte und Testobjekte.

Die emblematischste Anlage im Parabolrinnenbereich ist zweifellos der inzwischen auf ca. 700 Meter Gesamtlänge ausgebaute DISS-Strang, dessen etwa drei Megawatt thermischer Leistung für die direkte Erzeugung von Dampf bis 100 bar und über 400 Grad Celsius genutzt werden. Der 75 Meter lange Eurotrough-Kollektor sowie der 50 Meter lange LS3-Kollektor bilden eine wichtige Testeinrichtungen für Untersuchungen an Hochleistungs-Absorberrohren, Entwicklung von photogrammetri-

schen Messmethoden und Tests an einem kürzlich in Betrieb genommenen Hochtemperatur-Feststoffspeichersystem.

Im Dish-Stirling Bereich werden derzeit zwei EuroDish-Anlagen mit Spiegeldurchmessern von achteinhalb Meter für kontinuierlichen Betrieb und Test neuer Komponenten betrieben, weitere vier Anlagen älterer Bauart sind für spezifischen Testbedarf ausrüstbar.

Dies ist nur ein knapper Überblick über die für die Forschung zur solarthermischen Stromerzeugung wesentlichsten Anlagen, weitere Einrichtungen wie ein Solarofen sowie solarchemische Testanlagen für Wasserreinigung runden das Angebot der PSA ab. Für den professionellen Betrieb dieser Anlagen sind derzeit etwa 20 Wissenschaftler und Ingenieure von CIEMAT



und zwölf vom DLR vor Ort, etwa 40 weitere spanische Kollegen sind für die unterstützenden Arbeiten in Betrieb, Instandhaltung und Verwaltung beschäftigt. Aus verschiedenen nationalen und europäischen Programmen werden Gastaufenthalte zahlreicher Studenten und insbesondere in den Sommermonaten Wissenschaftlern aus anderen europäischen Forschungseinrichtungen gefördert, so dass die gesamte aktive „Belegschaft“ der PSA häufig über einhundert Personen umfassen kann.

Ausblick

Das Ende März 2004 in Kraft getretene spanische Einspeisegesetz hat attraktive Rahmenbedingungen für den Bau solarthermischer Kraftwerke geschaffen und

das Interesse von Projektentwicklern, Technologieanbietern und EVU's deutscher, spanischer und internationaler Herkunft an den Möglichkeiten und Marktchancen dieser Technologie nicht nur in Spanien deutlich gesteigert. Auch weltweit hat vor dem Hintergrund steigender Bemühungen um den Klimaschutz und aktuell wieder sehr hoher Ölpreise die Entwicklung zum Bau neuer solarthermischer Kraftwerke deutlich an Schub gewonnen, wie insbesondere die auf der Renewables2004-Konferenz in Bonn von zahlreichen Staaten unterschriebene Globale Marktinitiative (GMI) zum Bau von 5.000 Megawatt in den nächsten zehn Jahren zeigt. Diese Dynamik zeigt sich auch auf der PSA in einer steigenden Zahl von Anfragen von verschiedener Seite nach technischer Beratung, Projektzusammenarbeit und Berichterstattung in den Medien.

Vor diesem Hintergrund wird von DLR und CIEMAT eine erneute Intensivierung der Zusammenarbeit und ein Ausbau der Testmöglichkeiten auf der PSA angestrebt, um dem wachsenden Bedarf nach Forschung und Entwicklung in diesem Bereich optimal Rechnung zu tragen. Die Aussichten für eine wirklich sonnige Zukunft in der deutsch-spanischen Zusammenarbeit waren hier wohl selten so gut wie heute!

Dr. Christoph Richter ist Leiter der DLR-Gruppe auf der Plataforma Solar de Almería (PSA), Spanien und Diego Martinez ist Direktor der PSA. ◀



Abb.: Heliostate reflektieren und konzentrieren das Sonnenlicht auf hohe Energiedichten.

SOLARTHERMISCHE STROMERZEUGUNG

*Von Franz Trieb, Carsten Hoyer, Stefan Kronshage,
Richard Meyer, Marion Schroedter-Homscheidt*

Solar-

Potenziale und Märkte

kraft-

Die solare Einstrahlung ist der „Brennstoff“ der Solarenergie. Dessen Verfügbarkeit bestimmt entscheidend die Wirtschaftlichkeit eines Kraftwerkprojektes. Wann scheint wo, wie viel Sonne? Über diese Frage stolpert zwangsläufig jeder, der aus der Nutzung von solarer Einstrahlung Profit schlagen möchte.

werke

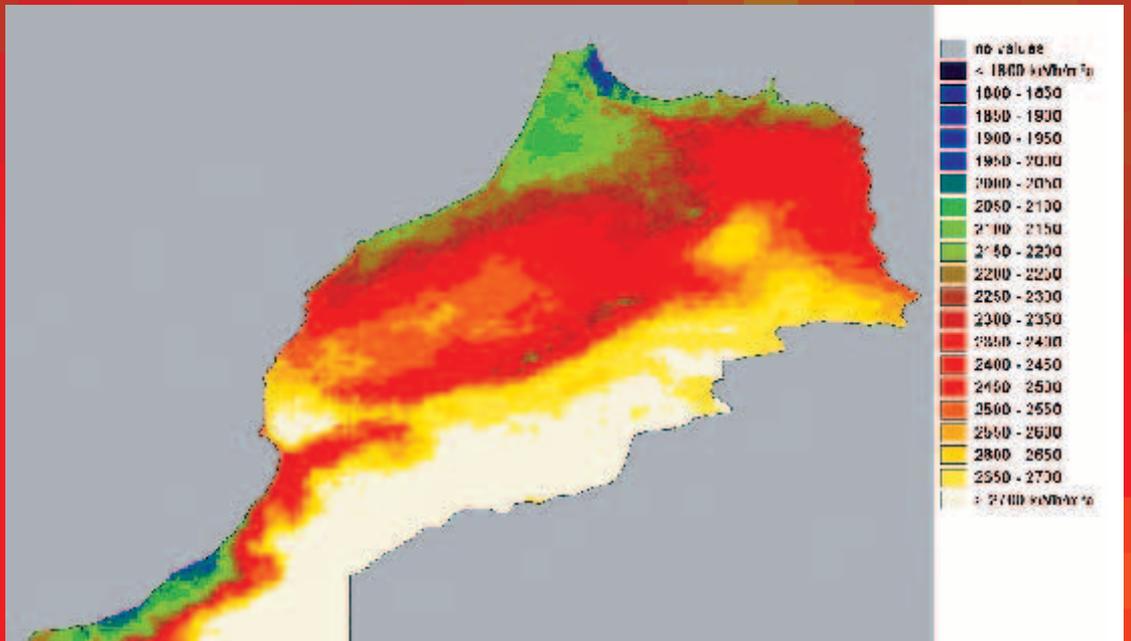
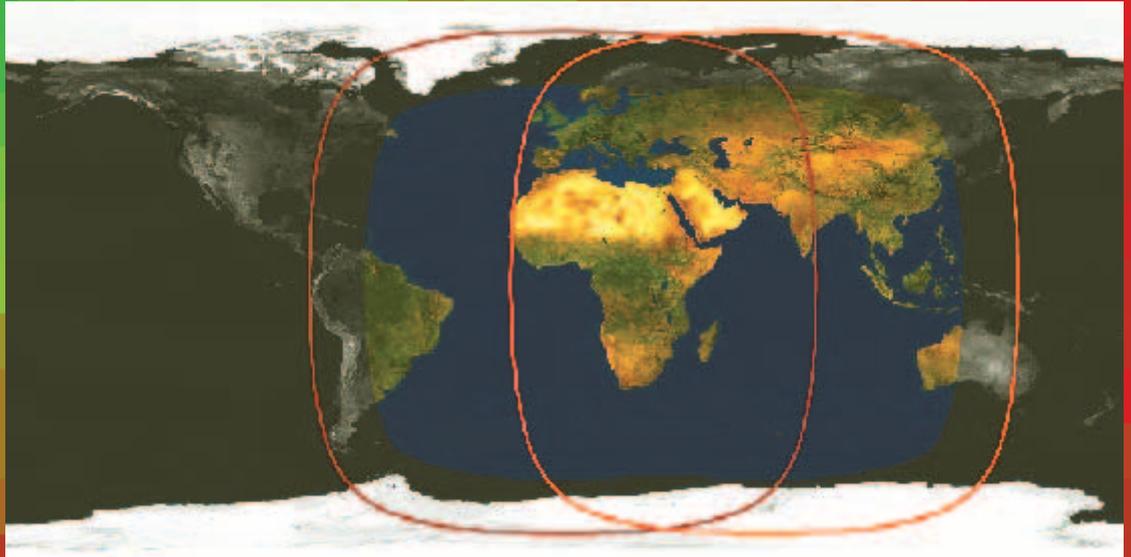


Abb. oben: Sichtbereiche von Meteosat Prime (rot, links) und Meteosat east (orange, rechts). Die farbige Fläche kann in hoher Qualität ausgewertet werden. Für Meteosat Prime werden Daten von 1983 bis 2005 und Meteosat East von 1998 bis 2008 bereit stehen.

Abb. unten: Die Karte zeigt die mittlere Jahressumme der Direktnormalstrahlung der Jahre 2000 bis 2002 für Marokko.

In der Phase der Projektplanung brauchen die Planer präzise Informationen darüber, wo wieviel Sonneneinstrahlung zu erwarten ist, um einen guten Standort zu finden, die Komponenten der Anlage optimal aufeinander abzustimmen und die wirtschaftlichen Erträge zu prognostizieren.

Im Betrieb werden aktuelle Solarstrahlungsinformationen benötigt, um den Betrieb der Anlage zu überwachen. Da die Einstrahlung nicht konstant ist, schwankt dementsprechend auch die produzierte Strom- oder Wärmemenge. Um hier Soll- und Isterträge abzugleichen, braucht der Betreiber aktuelle Informationen über seine Energiequelle.

Abhilfe durch Satellitendaten

Satellitenfernerkundung kann hier sehr gute Dienste leisten. Die wesentlichen atmosphärischen Komponenten, die die Sonneneinstrahlung auf der Erde beeinflussen, sind Wolken, Aerosole und Wasserdampf. Alle diese Komponenten können mit meteorologischen Satelliten gemessen werden.

Die Wissenschaftler des DLR-Instituts für Physik der Atmosphäre und vom Institut für technische Thermodynamik haben ein Verfahren entwickelt, um aus Satellitendaten die solare Einstrahlung am Erdboden zu bestimmen. Die Wolken haben dabei den stärksten Einfluss. Diese werden aus den halbstündlichen Bildern des europäischen Wettersatelliten Meteosat, der etwa 36.000 Kilometer über dem Schnittpunkt des Äquators und des Nullmeridians im Golf von Guinea steht, bestimmt. Das Verfahren nutzt sowohl den sichtbaren als auch den infraroten Kanal von Meteosat. Der Infrarotkanal ermöglicht eine bessere Bestimmung der Bewölkung bei Sonnenauf- und -untergang und kann auch hohe Eiswolken erkennen. Staub und andere Aerosolpartikel reduzieren zudem die Einstrahlung durch Streuung und Absorption. In die Berechnung des Strahlungstransfers fließen deshalb auch Messungen und Modellwerte von Spurengasen (v.a. Wasserdampf) und Partikeln in der Atmosphäre ein.

Präzise Langzeitmessungen

Ein besonderer Vorteil der Satelliten ist, dass sie diese Komponenten flächendeckend in gleicher Qualität messen und

die Daten in Archiven gespeichert werden können. So können ganze Regionen auch retrospektiv ausgewertet werden. Es sind keine Reisen in die Zielregionen notwendig und lange Zeiträume können analysiert werden, ohne dass erst lange und kostspielig vor Ort gemessen werden muss.

Strahlungsdaten, die auf Satellitendaten beruhen, haben eine bessere Aussagekraft als Bodenmessungen. Da die Einstrahlung von Jahr zu Jahr stark schwanken kann, sind lange Zeiträume notwendig, um die Auslegung und die Wirtschaftlichkeitsrechnungen auf eine solide Basis zu stellen. Bodenmessungen über mehrere Jahre stehen fast nie in der Nähe eines gewünschten Standortes zur Verfügung. Die flächendeckende Bestimmung der solaren Strahlungsressource ermöglicht die Suche eines optimalen Standortes und ist daher mit entscheidend für die Markteinführung solarer Energietechnologien. Denn Kraftwerke können so an Standorten mit möglichst niedrigen Energiegestehungskosten realisiert werden.

Service für Endverbraucher

Am DLR wurden zur Zeit zwei Services aufgebaut: SOLEMI („Solar Energy Mining“) und ENVISOLAR („Environmental Information Services for Solar Energy Industries“). Der Schwerpunkt von SOLEMI ist die Bereitstellung von historischen Langzeitdaten (Meteosat Prime mehr als 20 Jahre, Meteosat East zehn Jahre) mit großer räumlicher Ausdehnung. ENVISOLAR wird diese Archive in die Zukunft fortführen und zeitnahe Daten bereitstellen.

Das Endprodukt ist ein leistungsfähiger Datensatz zur Analyse solarer Ressourcen, den das DLR künftig Projektplanern und der Industrie als Service zur Verfügung stellen wird. Produkte sind z.B. Karten mit Jahressummen oder stündliche Zeitreihen der Direktnormalstrahlung in Kilowattstunden pro Quadratmeter. Investoren solarthermischer Kraftwerke haben damit schon lange vor Baubeginn ein Hilfsmittel zur Hand, das ihnen aufzeigt, wie viel Strom am gewünschten Ort gewonnen werden kann.

ENVISOLAR nutzt den neuen Wettersatelliten Meteosat 8 (MSG), der seit dem 29. Januar 2004 im Einsatz ist und erweiterte Möglichkeiten bietet. Alle 15 Minuten liefert MSG im optischen und im Infrarotbereich eine neue Aufnahme mit einer räumlichen Auflösung von drei Kilometern.

Zudem verfügt er über einen zusätzlichen breitbandigen Kanal im sichtbaren Spektralbereich mit einer Kilometer Auflösung. Insgesamt misst MSG in zwölf Spektralkanälen. Zum Vergleich: Sein Vorgänger beobachtete die Erde nur in drei Kanälen mit zweieinhalb bzw. fünf Kilometer Auflösung. Unter anderem erlaubt die zweite Meteosat-Generation eine noch genauere Beschreibung von Wolken und Wasserdampf in der Atmosphäre. Dies bietet neue Möglichkeiten zur verbesserten Strahlungsbestimmung, die derzeit im EU-Projekt HELIOSAT-3 entwickelt werden.

ENVISOLAR wird derzeit im Auftrag der ESA parallel zu SOLEMI im DLR unter Führung des DFD und bei seinen Partnern Ecole des Mines (F) und Universität Oldenburg (D) aufgebaut. ENVISOLAR Services werden, ebenso wie SOLEMI, Betreibern von solarthermischen- und Photovoltaikanlagen in Zukunft wertvolle Dienste erweisen. Der Schwerpunkt liegt hier neben der Erweiterung der SOLEMI-Zeitreihen um die Meteosat-8 (MSG) basierten Informationen insbesondere auf zeitnahen Diensten, wie die bereits erwähnte Überwachung des Betriebs von Solaranlagen. Dank der aktuell empfangenen Satellitendaten kann mit hoher Genauigkeit errechnet werden, wie viel Energie die jeweilige Anlage aus dem einfallenden Sonnenlicht gewinnen müsste. Weicht der tatsächlich erreichte Wert von den erfassten ENVISOLAR-Daten ab, ist das für den Betreiber ein verlässliches Indiz, dass mit seiner Solaranlage etwas nicht in Ordnung ist. Ein weiterer Schwerpunkt des ENVISOLAR-Projekts sind zudem Strahlungsvorhersagen bis zu 48 Stunden im Voraus zur Anlagensteuerung konventioneller und solarer Kraftwerke.

Senkung der Investitionskosten

In der Planung von Solarenergienutzung ist die verfügbare Einstrahlung nicht das einzige entscheidende Kriterium, denn die Stromgestehungskosten hängen für Solarkraftwerke auch von den notwendigen Investitionskosten ab. Der zweite Schritt ist daher die Ermittlung potenzieller Standorte und der Investitionskosten an diesen Standorten. Für diesen Zweck sind geographische Informationssysteme (GIS) geeignet, die weltweit zunehmend im Bereich der infrastrukturellen Planung und Projektentwicklung eingesetzt und mit einer ständig aktualisierten Datenbasis ausgestattet werden. Zunächst wer-

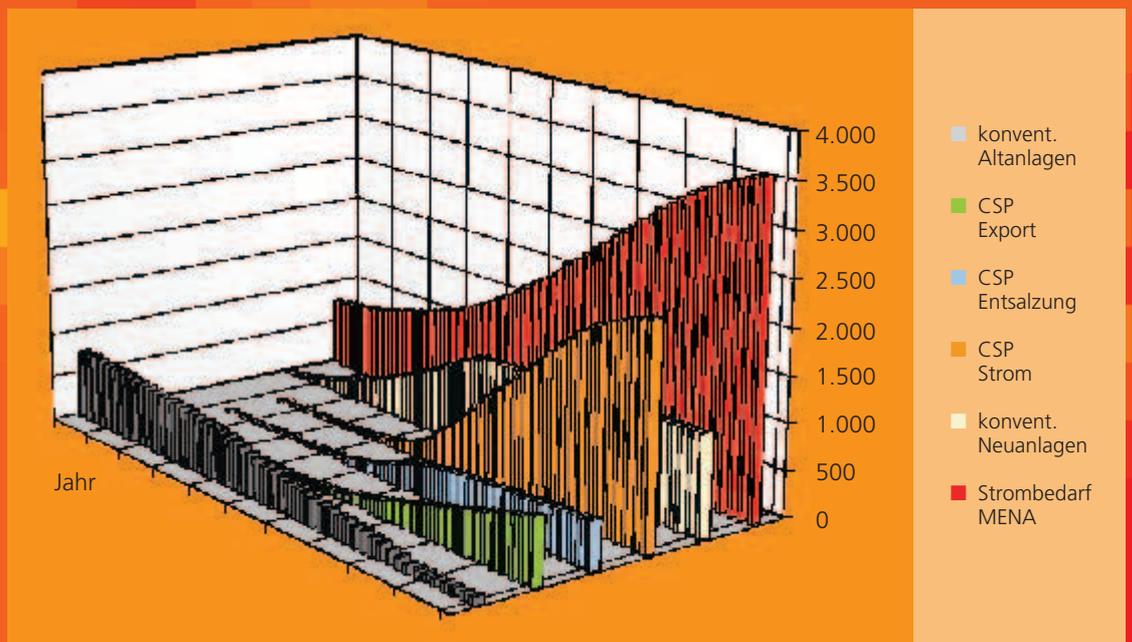
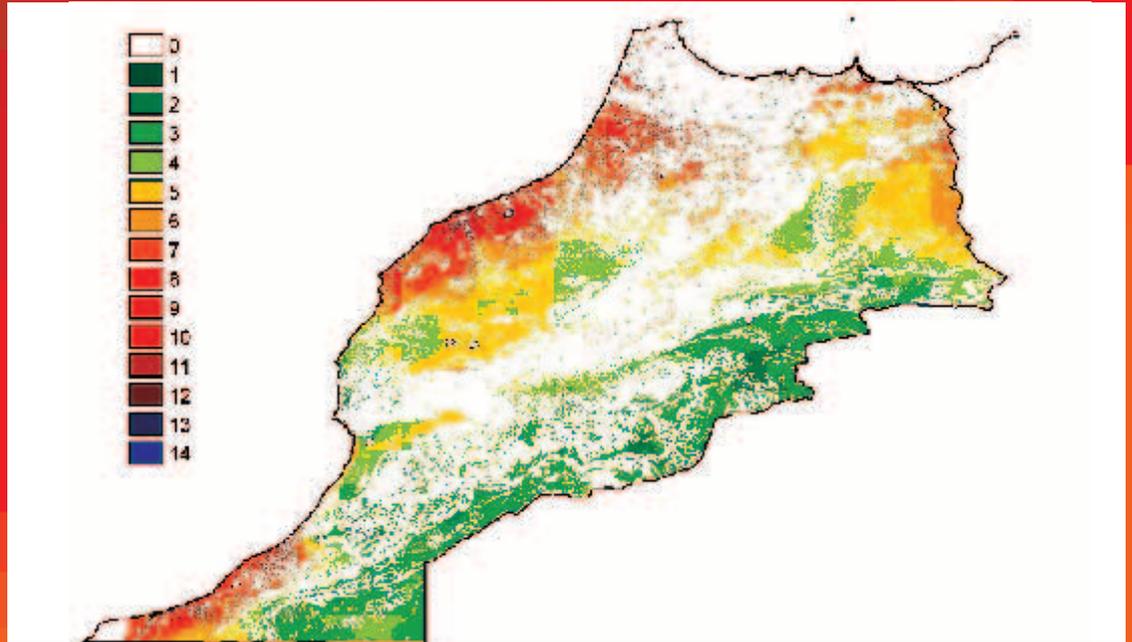


Abb. oben: Ökonomische Standortrangfolge für Solarkraftwerke mit 200 Megawatt Leistung für Marokko (0: Kein Standort, 1: Beste Standortklasse).

Abb. unten: Ausbaupotenziale für solarthermische Kraftwerke (CSP) zur Stromerzeugung, Meerwasserentsalzung und für den Solarstromexport im Mittleren Osten und Nordafrika (MENA) für ein Referenz-

szenario mit mittleren Wachstumsraten der Bevölkerung und des Pro-Kopf-Inlandekonoms. Weiter sind alte und neue konventionelle Kraftwerkskapazitäten und der Gesamtstrombedarf in MENA dargestellt. Etwa 15 Prozent der erzeugten solarthermischen Energie wird in 2050 zur Entsalzung von Meerwasser verwendet, etwa 20 Prozent werden exportiert. (Quelle: MED-CSP Studie, 2004)

Zeitraum	Phase	Installierte Leistung für Strom und Wasser	Kum. Investition MUS\$	Voraussetzungen	Kostenniveau für Strom und Wasser *
2004-2006	Einstieg mit Pilotanlagen und Technologietransfer	5 MW, 1.7 Mm ³ /a, 25% solar	20	Public Private Partnership, politische Unterstützung, Zuschüsse, Soft Loans, ggf. Einspeisegesetz, langfristige Strom- und Wasserabnahmeverträge, Garantien	5.1-7.8 ct/kWh 75-90 ct/m ³
2006-2010	Technologie-transfer	355 MW, 118 Mm ³ /a	1.300	wie oben	3.8-6.8 ct/kWh 75-90 ct/m ³
2010-2015	Technologie-einführung	2.100 MW, 700 Mm ³ /a, 50% solar	7.400	wie oben	3-6 ct/kWh 60-90 ct/m ³
2015-2020	Markter-schließung	6.600 MW, 2.200 Mm ³ /a, 75% solar	21.900	Public Private Partnership, langfristige Strom- und Wasser-abnahmeverträge, Garantien	3-5.2 ct/kWh 29-90 ct/m ³
2020-2025	Markt-expansion	21 GW, 7 Mrd. Mm ³ /a, >75% solar	80.000	Public Private Partnership, langfristige Strom- und Wasser-abnahmeverträge	3-5 ct/kWh 15-75 ct/m ³
2025-2050	Kommerzielle Phase	offen	offen	keine	3-5 ct/kWh 5-65 ct/m ³

Die Tabelle zeigt die einzelnen Phasen der Markteinführung solarthermischer Kraftwerke, den Kapazitätsausbau und die damit verbundenen Investitionen sowie das erreichbare Kostenniveau für Strom und gegebenenfalls entsalztes Wasser aus solchen Anlagen. Spätestens 2015 wird ein Kostenniveau erreicht, das konventionellen Anlagen entspricht. Danach werden solarthermische Kraftwerke zunehmend den internationalen Kraftwerkmarkt beherrschen, da sie eine der wirtschaftlichsten und ergebnisreichsten Optionen darstellen werden.

* Hybridbetrieb mit 8.000 Vollaststunden pro Jahr. Bandbreite zwischen einem Szenario mit weitgehend privater Finanzierung (neun Prozent Zins, 20 Jahre Kapitaldienst) und einem Szenario mit Anteilen öffentlicher Finanzierung im Rahmen einer Private Public Partnership (vier Prozent, 40 Jahre Kapitaldienst).

den dabei ungeeignete Standorte ausgeschlossen, wenn z.B. die Geländesteigung größer als 2,1 Prozent ist oder die Flächen bereits anderweitig genutzt werden: Wälder, Landwirtschaft, Siedlungsflächen, Schutzgebiete usw. Auf den geeigneten Flächen wird anschließend zusammen mit den Einstrahlungsdaten der Ertrag eines Kraftwerkes simuliert. Zusammen mit den Projektkosten (Kraftwerksbau, Anbindung an die Infrastruktur, Versicherungskosten, Kapitalkosten) können so Stromgestehungskosten an jedem potenziellen Standort abgeschätzt werden. Aus dieser Abschätzung kann dann entweder eine Rangliste potenzieller Standorte erzeugt werden, die den Planern hilft, die besten Standorte zu finden, oder es kann z.B. das wirtschaftliche Potenzial der solarthermischen Stromerzeugung in einer Region abgeschätzt werden.

Aus den Potenzialabschätzungen können in einem dritten Schritt Strategien für die Markteinführung entwickelt werden. So werden im Rahmen des vom Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit geförderten Projekts

„Concentrating Solar Power for the Mediterranean Region“ (MED-CSP) die Ressourcen- und die Bedarfspotenziale solarthermischer Kraftwerke auf der Basis von Wachstumsmodellen für die Mittelmeerländer in verschiedenen Szenarien bis 2050 ermittelt. Dabei wird der Strom-, Wasser- und der Industriesektor im Mittleren Osten und Nordafrika (MENA) und der Export von Solarstrom nach Europa untersucht. Die Studie erstellt eine Datenbasis für die Entwicklung von Markteinführungsstrategien im Rahmen der „Global Market Initiative for Concentrating Solar Power“ (GMI-CSP) und der „Trans-Mediterranean Renewable Energy Cooperation“ (TREC) und gibt Anhaltspunkte für deren Umsetzungspotenziale.

Blick in die Zukunft

Der Ausbau solarthermischer Kraftwerke ist bis 2025 durch die Herstellungskapazitäten der solarthermischen Kraftwerkskomponenten begrenzt, so dass der schnell wachsende Energiebedarf in MENA bis dahin noch weitgehend konventionell gedeckt werden muss. Nach 2025 werden ausreichende Produktionskapazitäten erreicht und mehr und mehr

der Bedarf zum begrenzenden Faktor. Solarthermische Kraftwerke übernehmen dann große Anteile der Versorgung. Die verfügbaren solaren Energieressourcen schränken das Potenzial im betrachteten Zeitraum nicht ein. Ein klimaverträglicher und nachhaltiger Ausbau der Energie- und Wasserversorgung im Mittelmeerraum und im Mittleren Osten stellt wegen des schnell wachsenden Bedarfs – bei moderatem Wachstum erreichen die MENA-Länder bis 2050 in etwa den heutigen Strombedarf Europas – eine große Herausforderung dar, bei der solarthermische Kraftwerke eine Schlüsselfunktion erfüllen werden.

Franz Trieb, Carsten Hoyer und Stefan Kronshage sind wissenschaftlicher Mitarbeiter am DLR-Institut für Technische Thermodynamik, Stuttgart. Richard Meyer ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am DLR-Institut für Physik der Atmosphäre, Oberpfaffenhofen. Marion Schroedter-Homscheidt ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am Deutschen Fernerkundungsdatenzentrum (DFD), Oberpfaffenhofen. ◀

Von Ulf Herrmann und Paul Nava

Die Strahlung der Sonne einfangen

Die Entwicklung des Parabolrinnen-Kollektors SKAL-ET150

Die FLAGSOL GmbH ist eine Ingenieurgesellschaft für Entwicklung, Planung und Bau von solarthermischen Kraftwerken. Die elektrische Leistung dieser Kraftwerke (z.B. 80 Megawatt) ist mit konventionellen, fossil gefeuerten Anlagen vergleichbar. Das Kernstück eines Parabolrinnen-Kraftwerks ist der Kollektor, der die Sonnenstrahlung einfängt und dadurch nutzbar macht. Der Kollektor konzentriert die Solarstrahlung im Fokus des parabolförmig gekrümmten Spiegels. In der Brennlinie der Spiegel befindet sich ein von Thermoöl durchströmtes Absorberrohr, das die Solarwärme einsammelt. Von dort wird sie dann in den Kraftwerksblock transportiert und durch eine konventionelle Dampfturbine in Strom umgesetzt.





Abb.: SKAL-ET Demonstrationsanlage in Kalifornien.

Die FLAGSOL betreibt die Weiterentwicklung der Technologie der Parabolrinnen-Kraftwerke, um dieser zu einer breiten Markteinführung zu verhelfen. Gemeinsam mit dem DLR und anderen Partnern aus Industrie und Forschung wird seit mehreren Jahren gemeinsam daran gearbeitet, diese Technologie effizienter zu machen und die Kosten weiter zu senken.

Ein herausragendes Beispiel dafür ist die Entwicklung einer neuen Generation von Parabolrinnen-Kollektoren, dem SKAL-ET150. Der SKAL-ET150-Kollektor basiert auf dem EuroTrough Kollektorkonzept, das in einem europäischen Konsortium unter Beteiligung von FLAGSOL und DLR entwickelt wurde.

Nach dem erfolgreichen Prototyp-Test mit einem halben EuroTrough-Kollektor auf der Plataforma Solar de Almería (Spanien), hat nun in einem vom BMU geförderten Projekt die FLAGSOL gemeinsam mit ihren Partnern, der Solar Millennium AG und sbp GmbH, die dritte Generation des EuroTrough, den SKAL-ET150 entwickelt und eine Demonstrationsanlage bestehend aus sieben Kollektoren mit einer Gesamtfläche von 4.360 Quadratmeter zur Qualifizierung dieses Kollektors errichtet. Die Kollektoren wurden an ein bestehendes Solarkraftwerk in der kalifornischen Mojave-Wüste angeschlossen und ersetzen dort Kollektoren älterer Bauart.

Die Anlage ist seit April 2003 in Betrieb. Sie wird seitdem routinemäßig gemeinsam mit dem Kraftwerk betrieben und trägt mit ca. 0,7 Megawatt zur Stromproduktion bei.

Das DLR hat das Projektteam wesentlich durch optische und geometrische Vermessung der Kollektorstruktur unterstützt, wodurch weitere Verbesse-

rungen der optischen Qualität möglich wurden. Mit dem Verfahren der Photogrammetrie wurden zum Beispiel die Formabweichungen des Konzentrators von seiner idealen Form vermessen. Demnach beträgt die Abweichung des parabolförmigen Konzentrators von seiner Idealform trotz der gewaltigen Abmessungen von 12 mal 5,7 Meter nur wenige Millimeter. Die Standardabweichung ist sogar geringer als ein Millimeter.

Dieser hohen Präzision ist zu verdanken, dass der neue SKAL-ET-Kollektor ca. zehn Prozent mehr Leistung aufweist als Kollektoren älterer Bauart und vergleichbarer Größe. Dieses wurde durch vergleichende Messungen an der Kraftwerksanlage in Kalifornien nachgewiesen. Bei den Vergleichsmessungen waren beide Kollektorentypen mit Spiegeln der Firma FLABEG GmbH, einem Anteilseigner der FLAGSOL, sowie mit Absorberrohren gleicher Baureihe bestückt. Die unterschiedliche Leistung ist demnach im Wesentlichen auf die neue SKAL-ET-Struktur sowie auf die in diesem Projekt neu entwickelte Nachführregelung des Kollektors zurückzuführen.

Der SKAL-ET-Kollektor soll nun im ersten kommerziellen Solarkraftwerk Europas, das zurzeit in Spanien geplant wird, eingesetzt werden. Der Baubeginn ist für Anfang 2005 vorgesehen. Die FLAGSOL wird in diesem Projekt für die gesamte Planung des Solarteils des Kraftwerks verantwortlich sein. Das DLR soll auch hier wiederum mit seiner speziellen Expertise im Bereich der Messtechnik und Qualifizierung von Solarsystemen unterstützend tätig sein.

Paul Nava ist Geschäftsführer und Ulf Herrmann Leiter des Bereichs Engineering der FLAGSOL GmbH, Köln. ◀



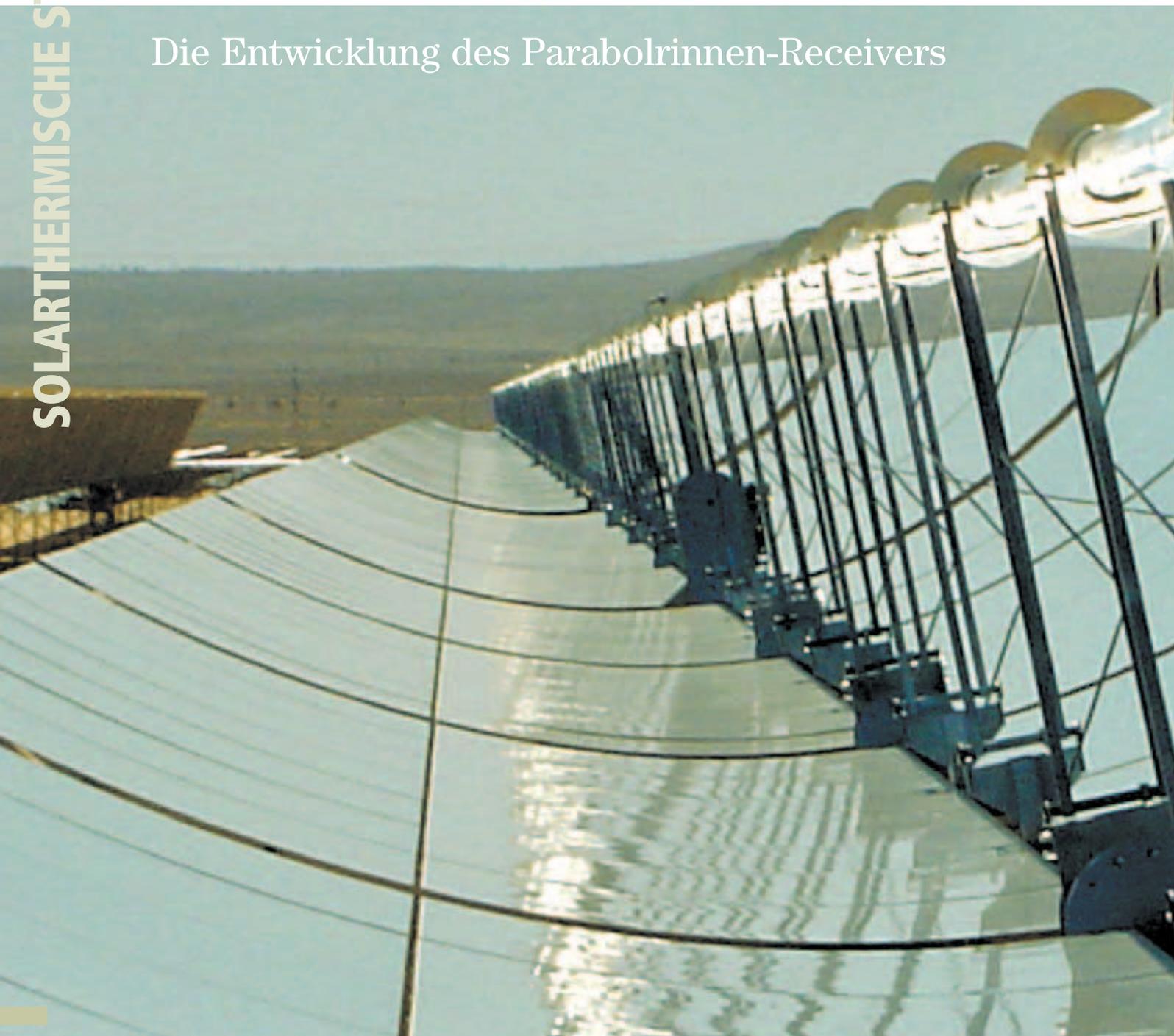


Abb.: Montage eines Kollektors SKAL-ET150.

Von Nikolaus Benz und Christoph Fark

Schlüsseltechnologie für die solare Kraftwerkstechnik

Die Entwicklung des Parabolrinnen-Receiver



A close-up photograph of a parabolic trough receiver, a key component of solar thermal power plants. The receiver is a long, cylindrical metal tube with a highly reflective, polished surface. It is supported by a complex metal truss structure. The background shows a clear blue sky and the structural elements of the tower. The receiver is positioned to capture and focus sunlight onto a central receiver tube.

Solarthermische Kraftwerke auf Basis von Parabolrinnenkollektoren werden seit Ende der 80er Jahre erfolgreich in Kalifornien betrieben. Die Schlüsselkomponente stellt der Parabolrinnenreceiver dar. Er ist das sensible solartechnische Bauteil und der Schlüssel für eine autarke solare Kraftwerkstechnik.

Voraussetzungen für eine erfolgreiche Markteinführung über die weltweit zahlreich in Planung befindlichen Kraftwerke sind:

- hohe Wirkungsgrade und hohe Zuverlässigkeit, um das bestmögliche Preis-Leistungs-Verhältnis zu erreichen.
- eine durch Prozessverkettung und Einsatz modernster Fertigungstechnik optimierte Herstellungstechnologie zur Senkung der Herstellungskosten.

Die Entwicklung bei SCHOTT hat zum Ziel, aufbauend auf dem erreichten Stand der Solartechnik die notwendigen Schritte für die Markteinführung eines in Deutschland hergestellten Receivers für Parabolrinnenkraftwerke zu gehen und deren weltweiten Einsatz zu beschleunigen. Das Vorhaben unterstützt somit die Bemühungen und Verpflichtungen der Bundesregierung zur Verminderung des globalen Kohlendioxid-ausstoßes bei gleichzeitiger Schaffung von Arbeitsplätzen.

Der Receiver

Das Receiverrohr besteht aus einem vier Meter langen, mit Glas ummantelten Stahlrohr mit strahlungsselektiver Absorberbeschichtung. Eine evakuierte Hülle sorgt für niedrige Wärmeverluste. Die Temperaturunterschiede zwischen Umgebung und Wärmeträgermedium (rund 400 Grad Celsius) und die konzentrierende Strahlung stellen extremste Anforderungen an die Glas-Metall-Verbindung.

Praktische Anwendbarkeit

Über einen sechs Meter weiten und bis zu 150 Meter langen, der Sonne nachgeführten Parabolrinnenspiegel wird Solarstrahlung circa 80-fach auf das Receiverrohr konzentriert. In ihm wird solare Strahlung in Wärme umgewandelt und durch Übertragung auf ein Wärmeträgeröl nutzbar gemacht. Der vier Meter lange Receiver konvertiert die konzentrierte Solarstrahlung mit einem Wirkungsgrad von über 60 Prozent. Erreicht wird dies durch eine optimierte Strahlungsabsorption bei minimierten Wärmeverlusten.

Das auf knapp 400 Grad Celsius erwärmte Öl wird zur Dampferzeugung genutzt. Mit dem gewonnenen Dampf wird eine konventionelle Turbine zur Stromerzeugung betrieben. Die Solarstrahlung ersetzt somit den fossilen Brennstoff in einem Kraftwerk. In einem 50 Megawatt-Kraftwerk werden rund 15.000 Receiver zu einer Gesamtlänge von 60 Kilometer verbaut.

Zurzeit gibt es weltweit solare Kraftwerke mit einer insgesamt installierten Leistung von 365 Megawatt. Die Nachfrage nach Strom in Spitzenzeiten der solaren Einstrahlung (z.B. durch Klimaanlageanlagen) nimmt zu. Solare Kraftwerke werden diesem steigenden Bedarf gerecht und das ohne Schadstoffe zu produzieren.

Vorgehensweise und Ergebnisse bei der Entwicklung des Receivers

Die bis zum Serienprodukt nötigen Forschungs-, Entwicklungs- und Planungstätigkeiten wurden von einem Kernteam bei

Schott Rohrglas in Mitterteich koordiniert. Kollegen aus anderen Standorten und Ländern sowie externe Institute, darunter das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), wurden in das Projekt einbezogen. Dabei standen folgende Innovationen im Mittelpunkt:

- Neue hochtransparente, abriebfeste Antireflex-Beschichtung: Ein neues Verfahren zur Herstellung von AR-Beschichtungen auf der Basis von SiO₂-Nanopartikeln in alkoholischer Lösung wurde entwickelt. Das Verfahren zeichnet sich gegenüber herkömmlichen Sol-Gel Verfahren durch eine einfache und kostengünstige Prozessführung aus. Ein Transmissionsgrad ≥ 96 Prozent wird erreicht, die Abriebfestigkeit gegenüber dem Wettbewerber wurde um Faktor zehn erhöht.
- Neue bruchfeste Glas-Metall-Verbindung: Bei SCHOTT wurde mit thermisch angepassten Materialien unter Verwendung eines neuen Glastyps ein Herstellungsverfahren für eine Glas-Metall-Verbindung entwickelt.
- Durch die TWIN-MAG-Sputtertechnik in MF-Betriebsweise und eine gezielte Vorbehandlung der Substrate konnte ein kostengünstiger Beschichtungsprozess für den Absorber realisiert werden. Der solare Absorptionsgrad ist ≥ 95 Prozent, der thermische Emissionsgrad bei 400 Grad Celsius ist ≤ 14 Prozent.
- Durch eine platzsparende Anordnung von Faltenbalg und Glas-Metall-Verbund wurde eine Vergrößerung der Apertur und eine Minimierung der Wärmeverluste erreicht, welche eine Steigerung von zwei Prozent im Wirkungsgrad zur Folge hat.

Staatliche Förderung des Entwicklungsprojektes

Im Zeitraum 2002 bis 2003 wurde das Entwicklungsprojekt durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit mit den Partnern DLR und FLAGSOL GmbH im Rahmen des Verbundprojektes PARASOL mit rund 1,7 Millionen Euro gefördert. Die Markteinführung und Weiterentwicklung soll nun im Projekt PARFOR bis 2006 mit weiteren 2,1 Millionen Euro gefördert werden.

Praktische Anwendbarkeit und Marktpotenzial

Nach gut drei Jahren Entwicklungszeit wird in Mitterteich nun eine Fertigungslinie aufgebaut. Weltweit befinden sich Projekte in der Planungsphase (darunter z.B. in Spanien, USA, Indien). Die Marktaussichten sind nach einer Greenpeace-ESTIA-Studie sehr positiv. Bis zum Jahr 2020 wird mit einer weltweiten Kapazität von 21.540 Megawatt gerechnet.

Arbeitsplatzeffekte

Durch den Aufbau der Fertigungsanlagen in Mitterteich werden 50 Arbeitsplätze gesichert und neu geschaffen. Besonders in der vom Strukturwandel betroffenen Region Nördliche Oberpfalz bieten sich so neue Beschäftigungsmöglichkeiten.

Dr. Nikolaus Benz ist Leiter der Entwicklung Solarthermie bei SCHOTT-Rohrglas GmbH in Mitterteich. Christoph Fark leitet das Marketing Solarthermie. ◀

Abb. vorhergehende Seite: Parabolrinne mit SCHOTT PTR70® Receivern in Kramer Junction, USA.

Abb.: Detail der Rohrenden eines SCHOTT PTR70® Receivers.



Von Gerrit Koll und Bernhard Hoffschmidt

DIE ZUKUNFT DER STROMERZEUGUNG

Die Entwicklung der Luftrezeivertechnologie bei Kraftanlagen München

Ein wichtiges Ziel der Solarenergieforschung seit vielen Jahren besteht in der Entwicklung eines Systems mit dem, ähnlich wie bei konventionellen Kraftwerken, Energie mit hoher Energiedichte und in großen Leistungen zu niedrigen Kosten erzeugt werden kann. Damit könnte schnell ein Teil des Verbrauchs an fossilen Brennstoffen substituiert und ein wichtiger Schritt in Richtung auf eine nachhaltige Energieversorgung getan werden. Ein Beispiel für die Entwicklung in diesem Bereich ist die Luftrezeivertechnik, die ihren Einsatz in solaren Turmkraftwerken findet und mit deren Hilfe Luft nur durch Sonnenenergie auf ähnliche Temperaturen erhitzt werden kann, wie bei konventionellen Verbrennungsprozessen.



Abb.: Der offene volumetrische Receiver Solair3000 (drei Megawatt thermisch) im Dauertest.

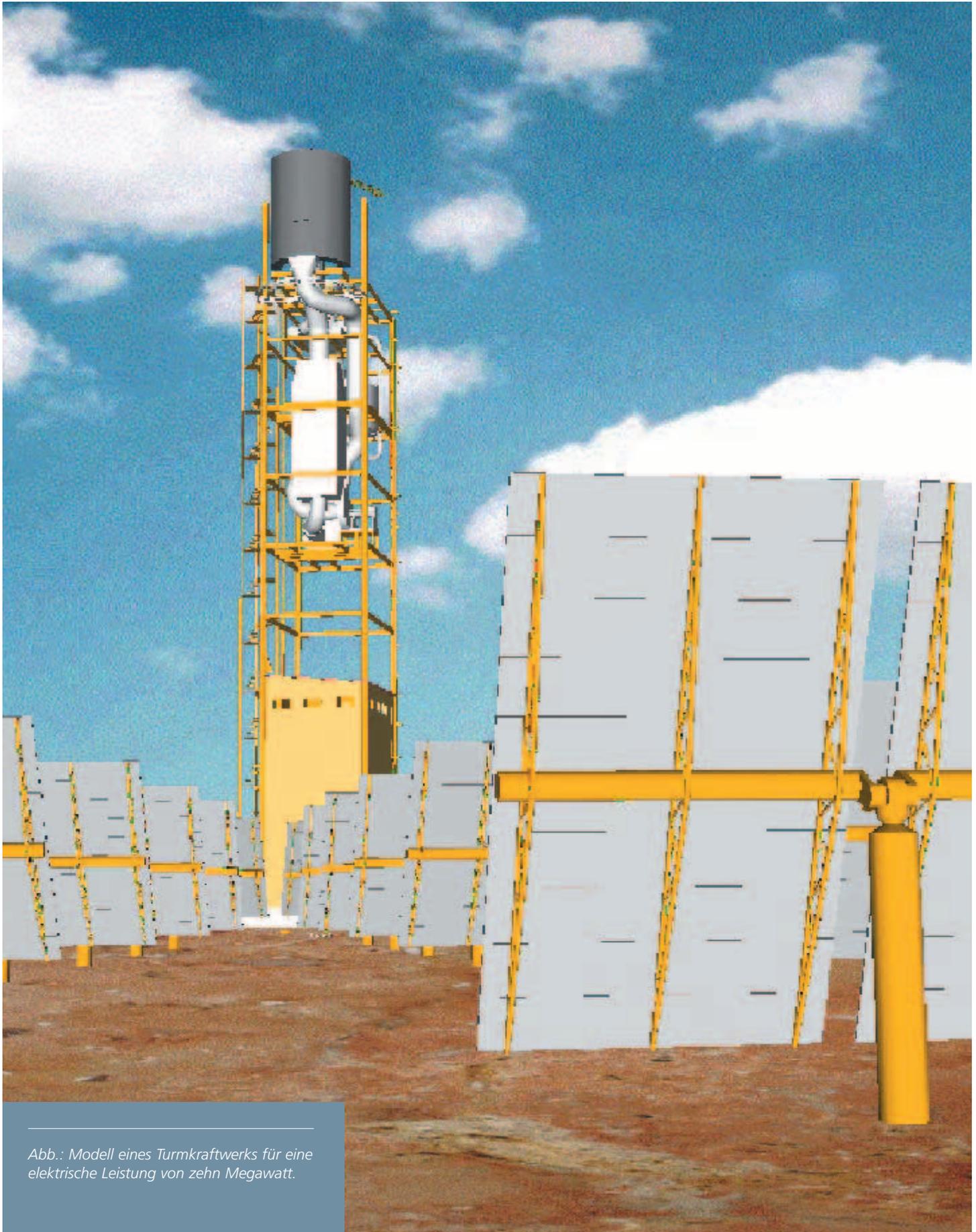


Abb.: Modell eines Turmkraftwerks für eine elektrische Leistung von zehn Megawatt.

Funktionsweise

Bei dem Verfahren handelt es sich um solare Hochtemperatur-Stromerzeugung, bei der die Sonnenenergie durch bewegliche, der Sonne nachgeführte Spiegel auf einen Brennpunkt konzentriert wird. Diese Konzentration bringt die geringe Energiedichte der Sonne im Brennpunkt auf ein im Bereich der Feuerung von großen Kraftwerken übliches Niveau.

Die so gewonnene hochwertige thermische Energie gilt es effizient in mechanische Arbeit umzusetzen. Dazu wird ein Wärmetauscher (Receiver) verwendet, der sich im Konzentrationsfeld der Strahlung befindet.

Er wird mit Luft durchströmt, die in der keramischen Absorber-Struktur auf circa 700 Grad Celsius erwärmt wird. Dieser Effekt findet in der Tiefe der „porösen“ keramischen Struktur statt. Man spricht deshalb von einem „volumetrischen Receiver“.

Die erhitzte Luft gibt ihre Wärme in einem Abhitzeessel an ein Arbeitsmedium, vornehmlich Wasser, ab. Das im entstehenden Dampf enthaltene Arbeitsvermögen (Enthalpie) wird in einer handelsüblichen Dampfturbine in mechanische Arbeit und dann in elektrische Energie umgewandelt.

Als Abhitzeessel findet ein modifizierter Gasturbinenabhitzeessel Anwendung. Die Dampfparameter können dabei bis zu 100 bar und 500 Grad Celsius betragen und liegen damit in der für mittlere konventionelle Dampfkraftwerke typischen Größenordnung. Deshalb ist der Wirkungsgrad des Kraftwerksprozesses ähnlich gut wie der eines entsprechenden „konventionellen Kraftwerks“.

Im Zentrum der Entwicklungsarbeit stehen derzeit vor allen Dingen der Luftreceiver, die Komponenten des Luftkreislaufs sowie die Anpassung des konventionellen Kraftwerksteil an die Anforderungen aus dem solaren Betrieb.

Der Luftreceiver

Der Luftreceiver ist das Herzstück der Energieumsetzung. Aufgabe des Receivers ist es die gebündelte Solarstrahlung „einzufangen“ (absorbieren) und bei möglichst hohen Temperaturen an das Wärmeträgermedium Luft abzugeben.

Aus den auftretenden Temperaturen von über 700 Grad Celsius sowie den hohen Strahlungsflussdichten von bis zu 900 Kilowatt pro Quadratmeter, ergeben sich höchste Anforderungen an die Belastbarkeit der zum Einsatz kommenden Werkstoffe. Deshalb wurde die besonders temperaturbeständige Keramik als Werkstoff für die der hochkonzentrierten Solarstrahlung direkt ausgesetzten Bauteile gewählt.

Zur Lösung der anspruchsvollen konstruktiven Aufgaben ist der Receiver modular aus verschiedenen Komponenten aufgebaut:

- keramische Absorber
- metallische Trägerstruktur
- Heißluftsammler
- Kaltluftrückführung.

Die Luft wird durch den Absorber angesaugt und erwärmt, tritt dann rückseitig aus den jeweiligen Sub-Receivermodulen aus und wird dann über ein Heißluftsammlerrohr dem Abhitzeessel oder dem Heißluftspeicher zugeführt.

Das abgekühlte Heißgas verfügt dann nach dem Austritt aus dem Abhitzeessel noch über erhebliche Restenergie und wird deshalb dem Receiver wieder zugeführt. Dies geschieht über die Kaltluftführung, die innerhalb des Receivers gleichzeitig zur Kühlung der metallischen Struktur dient.

Der Einsatz keramischer Werkstoffe stellt insbesondere im Zusammenhang mit großen Receiverflächen und der damit verbundenen ungleichen Strahlungsverteilung auf der Receiveroberfläche gegenüber möglichen anderen metallischen Strukturen (Drahtgeflechte) einen erheblichen Vorteil dar.

Der Luftkreislauf

Der Luftkreislauf dient dem Transport des Energieträgermediums „Luft“ zum Abhitzeessel sowie der Rückführung der kal-

ten Luft zum Receiver. Aus der Heißlufttemperatur von ca. 700 Grad Celsius ergeben sich besondere Anforderungen an die Wärmedämmung und Isolierung des Heißgasteils. Eine wichtige Rolle bei der Dimensionierung und Rohrleitungsführung spielt die Kompensation der auftretenden Wärmedehnungen.

Wichtigste Funktion des Luftkreislaufes ist neben dem Energietransport die Kühlung des Receivers. Hierbei spielt die richtige Verteilung der Kaltluft auf die verschiedenen Bereiche des Receivers eine bedeutende Rolle beim Ausgleich von ungleichmäßig verteilter Strahlung auf der Receiveroberfläche.

Um eine gleichmäßige Kühlung des Receivers sicherzustellen, verfügt der Luftkreislauf sowohl auf der kalten als auch auf der heißen Seite über verschiedene Klappen und Regelorgane, mit denen der Luftmassenstrom vom Prozessleitsystem abhängig vom Betriebszustand und der Temperaturverteilung geregelt werden kann.

Zum Ausgleich tageszeitlicher Schwankungen in der Sonneneinstrahlung und zur Überbrückung kürzerer Bewölkungsphasen ist das Verfahren mit einem Energiespeicher ausgestattet. Dieser speichert die thermische Energie der heißen Luft aus dem Receiver in einem beim Beladen durchströmten Speichermedium und gibt diese Energie beim Entladen im Gegenstrom wieder ab.

Die Kraftwerkstechnik

Das Konzept sieht die Unterbringung aller Kraftwerkskomponenten im Turm selbst vor. Durch diese Aufstellungsart der Anlage werden zusätzlich zum Turm selbst keine weiteren Gebäudeteile notwendig. Die Anlage kann so sehr kompakt gebaut werden, was kurze Wege für alle Strom-, Signal- und Medienleitungen zur Folge hat.

Die Anlage ist so konzipiert, dass sie einfach als Hybridanlage ausgeführt werden kann. Neben der Möglichkeit der Zufeuerung mit Biogas, kann grundsätzlich auch das Abgas aus einer Gasturbine genutzt werden.

Eine weitere besondere Anforderung an den konventionellen Kraftwerksteil, stellt der stark intermittierende Betrieb des Solarkraftwerkes dar. Durch einen entsprechend dimensionierten Speicher kann die Anlage auch während mehrtägiger Stillstände warm gehalten werden und so bei erneuter Sonneneinstrahlung schnell in Betrieb genommen werden.

Vorteile der Luftreivertechnologie

- Hoher Systemwirkungsgrad:
Der Dampfturbinenprozess kann mit hohen Dampfparametern betrieben werden, wie diese in der konventionellen Kraftwerkstechnik üblich sind. Dadurch lassen sich vergleichbar hohe Wirkungsgrade erzielen und so die angebotene Solarenergie optimal nutzen.
- Umweltfreundlichkeit:
Als Arbeitsmedien und Wärmeträger werden bei der Luftreivertechnologie nur Luft und Wasser bzw. Wasserdampf verwendet. Gefährliche Stoffe und Medien kommen nicht zum Einsatz. Daher bietet die Luftreivertechnologie hohe Sicherheit und Schutz vor Belastungen der Umwelt.
- Zuverlässigkeit:
Die Anlage kann zu großen Teilen aus bewährten Komponenten des konventionellen Kraftwerkbaus errichtet werden. Daher können Betriebssicherheit, Ersatzteilversorgung sowie der neueste Stand der Technik immer gewährleistet werden.
- Kostendegression:
Im Solarteil kommen einfache und baugleiche Heliostaten in großer Stückzahl zum Einsatz. Hierdurch sowie durch den modularen Aufbau des Receivers ist eine kostengünstige Serienfertigung der solaren Komponenten auch schon für mittlere Kraftwerksgrößen möglich.
- Modularer Aufbau:
Die Anlagen können trotz hoher Standardisierung individuell an die erforderliche Leistung und die Verhältnisse vor Ort angepasst werden. Dadurch kann bei optimaler Ausnutzung der angebotenen Solarenergie eine bedarfsgerechte Versorgung gewährleistet werden.

- Hybridisierung:
Das Anlagenkonzept kann um eine Zusatzfeuerung erweitert werden. So ist ein einfacher Hybridbetrieb möglich. Durch Erweiterung um eine Gasturbine entsteht ein solares Hybrid-GuD-Kraftwerk, das zur kostengünstigen und umweltfreundlichen Versorgung auch an entlegenen Standorten eingesetzt werden kann.

- Leistungsverfügbarkeit:
Durch den Einsatz des Heißgasspeichers kann die Energieerzeugung der Anlage an den Bedarfsverlauf angepasst werden. Ständige Schwankungen in der Erzeugung, wie bei einigen anderen regenerativen Stromerzeugungstechniken üblich, treten nicht auf. Zusätzliche konventionelle Kraftwerke zur Stützung des Netzes sind deshalb nicht erforderlich.

- Erweiterte Einsatzmöglichkeiten:
Grundsätzlich eignet sich die Luftreivertechnik auch für eine Reihe von chemischen Hochtemperaturprozessen, wie z.B. für die solare Wasserstoffsynthese. Damit bietet die Technologie Weiterentwicklungsmöglichkeiten für neue umweltfreundliche Alternativverfahren.

Künftige Entwicklungsaufgaben

Zu Schwerpunkten bei der Forschung und Entwicklung der Luftreivertechnologie gehören neben der Weiterentwicklung und Kostenreduzierung bei den Heliostaten insbesondere die Optimierung der Reivertechnologie.

Die ungleichmäßige Verteilung der konzentrierten Strahlung macht eine aktive Regelung der Luftverteilung über die Receiveroberfläche bei großen zylindrischen Receivern erforderlich. Die Entwicklung der Mess- und Regelungstechnik zur optimalen Energieausbeute ist eine der zentralen Entwicklungsaufgaben für die Luftreivertechnologie.

Neue, kostengünstigere Werkstoffe und Geometrien bei den Absorbern müssen entwickelt werden, um den Receiver bei niedrigeren Kosten noch zuverlässiger und effizienter zu gestalten.

Durch verbesserte Simulation und Berechnung der Strahlungsflusssimulation können die Betriebsverhältnisse im Receiver und für das gesamte Kraftwerk bereits im Vorfeld einer Planung ermittelt werden und so zuverlässige Prognosen über die am Standort zu erwartenden Energieerträge erstellt werden.

Das gewählte Konstruktionsprinzip ist offen für den Ausbau von größeren Einheiten von einem mehrfachen der momentan geplanten Leistung. Hiermit wird in Zukunft ein weiterer Schritt in Richtung Kostendegression und Nutzungsgradverbesserung möglich.

Ausblick und Chancen

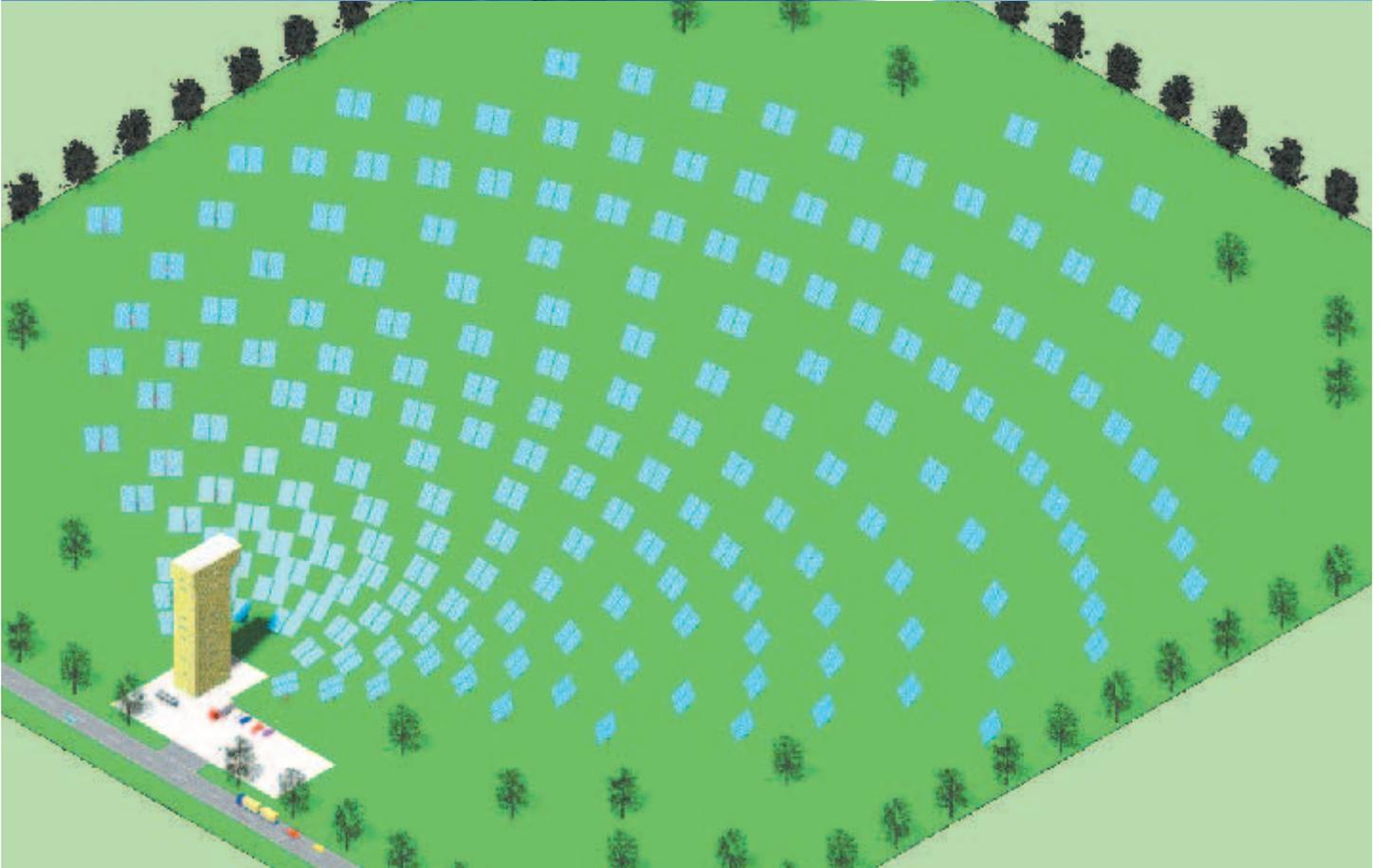
Die Sonne ist die Energiequelle, aus der fast alle anderen auf der Erde verfügbaren Energieformen hervorgehen. Die direkte Nutzung und Umsetzung der Sonnenenergie erzeugt keine Emissionen oder Treibhausgase. Ein Hindernis bei der Nutzung der Solarenergie ist ihre geringe Energiedichte im Vergleich zu fossilen Brennstoffen.

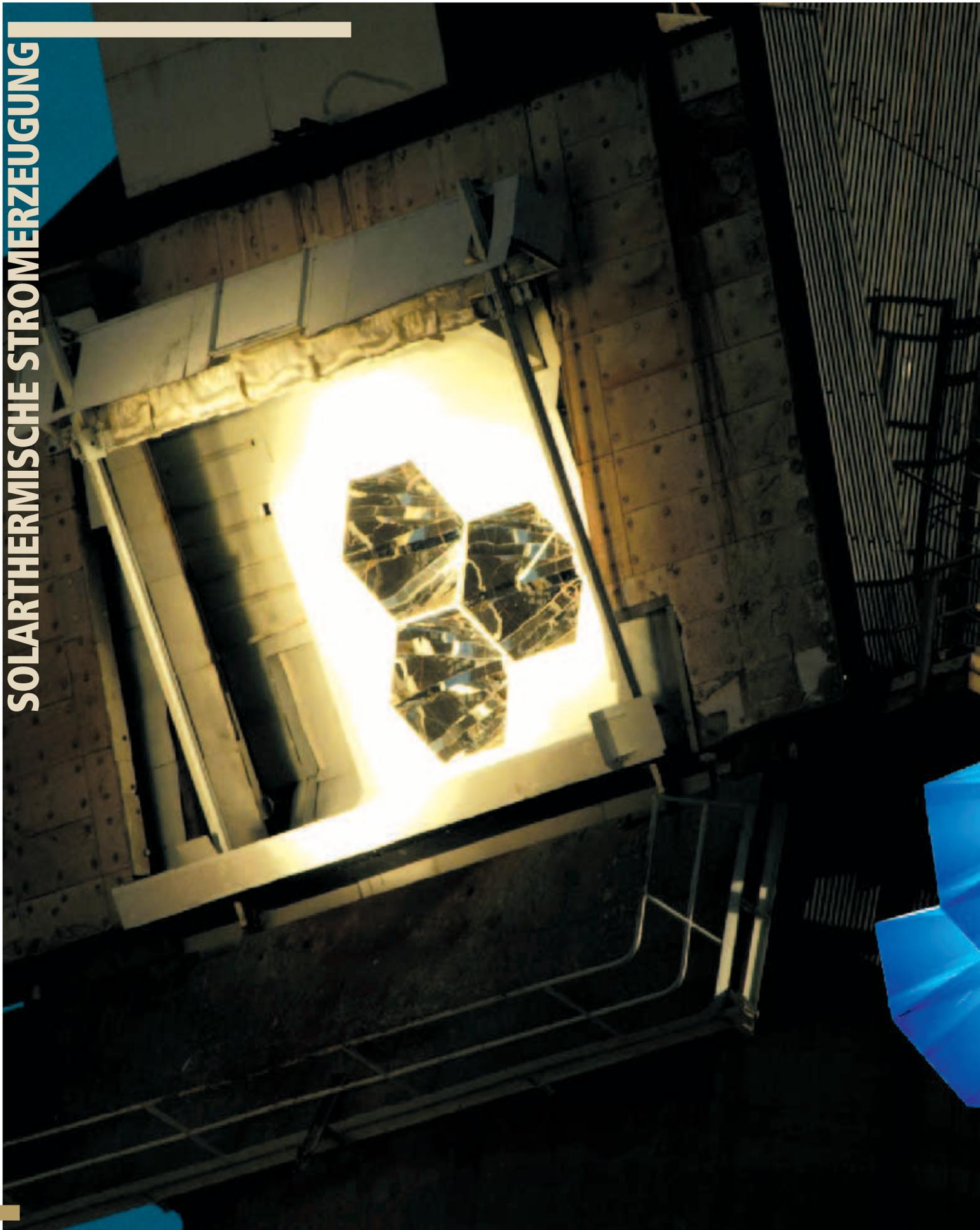
Hier setzen die solaren Hochtemperaturverfahren an. Sie bieten die Chance zur schrittweisen Substitution und Integration regenerativer Energie in die bestehende Kraftwerkstechnologie, ohne Einschränkungen bei der Verfügbarkeit, Betriebssicherheit und im Wirkungsgrad der Anlagen hinnehmen zu müssen.

Mit der Luftreivertechnik kann die Sonnenenergie effizient und kostengünstig genutzt werden, damit Strom aus solaren Kraftwerken künftig seinen festen Bestandteil im Energiemix Europas erhält.

Dipl.-Ing. Gerrit Koll ist Leiter der Abteilung Projektentwicklung/Vertrieb im Geschäftsbereich Energie- und Umwelttechnik der Kraftanlagen München GmbH. Prof. Dr. Bernhard Hoffschmidt ist Leiter des Solar Instituts Jülich an der FH Aachen, Abt. Jülich. ◀

Abb. oben: Volumetrischer Testreceiver Solair3000 unter Bestrahlung auf der Plataforma Solar de Almería, Spanien.
Abb. unten: Anlagenkonzept eines 1,7 Megawatt Versuchskraftwerkes.







Von Reiner Buck

SONNENSTROM AUS GASTURBINEN

Gasturbinen werden üblicherweise dadurch angetrieben, dass ein Brennstoff das verdichtete Arbeitsmedium Luft erhitzt, das anschließend in der Turbine entspannt wird. Anstelle der Brennstoffzufuhr kann die Erhitzung der Luft auch durch Einkopplung von Solarenergie erfolgen. Interessant ist dieses Konzept vor allem für die Einkopplung von Solarwärme in Kombikraftwerke (Gas- und Dampfturbinenkraftwerke), die sehr hohe Wirkungsgrade erreichen.

In einem konventionellen Kombikraftwerk wird im Verdichter der Gasturbine Luft komprimiert und dann in einer Brennkammer durch Gaszufuhr auf hohe Temperatur erhitzt. Die Entspannung der heißen Luft erfolgt in der Turbine, die Restwärme dient zum Antrieb eines Dampfprozesses. Moderne Kraftwerke dieser Bauart erreichen Wirkungsgrade von annähernd 60 Prozent. Solarenergie kann in diesen Kraftwerksprozess eingekoppelt werden, indem die verdichtete Luft vor der Brennkammer durch absorbierte Solarstrahlung erhitzt wird. Je nach Auslegung der solaren Komponenten können damit bis zu 100 Prozent des Brennstoffes eingespart werden.

Bisherige Konzepte solarthermischer Kraftwerke nutzen die solar erzeugte Wärme ausschließlich in einem Dampfprozess, dessen Wirkungsgrad deutlich unter dem eines Kombikraftwerks liegt. Die Einkopplung in einen Kombikraftwerksprozess ermöglicht es, den Umwandlungswirkungsgrad der solaren Energie in elektrische Energie gegenüber dem bisherigen Konzept zu erhöhen. Damit kann die Fläche des zur Konzentration der Solarstrahlung notwendigen Spiegelfeldes deutlich verringert werden. Da das Spiegelfeld den Hauptkostenfaktor einer solchen Anlage darstellt, können die Gesamtkosten für den Solarteil erniedrigt werden, und es ergeben sich günstigere Stromgestehungskosten.

Unter den solaren Kraftwerkssystemen weist das Konzept der Luftherhitzung für Gasturbinen ein sehr hohes Potenzial zur Kostenreduktion auf. Gleichzeitig kann es in einem breiten Leistungsbereich eingesetzt werden, wobei der solare Anteil bei der Auslegung der Anlage in weiten Grenzen ausgewählt werden kann. Ein weiterer Vorteil des Konzeptes ist die hybride Betriebsweise. Bei ungenügender Solarstrahlung oder in der Nacht wird die fehlende Leistung zur Erhitzung der Luft durch Brennstoffzufuhr ausgeglichen, wobei auch hier der hohe Umwandlungswirkungsgrad des Kombikraftwerkes vorteilhaft ist. Damit kann die volle Kapazität des Kraftwerks zu jeder Zeit genutzt werden, zusätzliche Kraftwerkskapazitäten oder teure Speicher zum Ausgleich von Zeiten ohne Solarenergie-Angebot sind nicht erforderlich.

Zur Einkopplung der Solarenergie in die Gasturbine sind hohe Lufttemperaturen erforderlich, die nur durch sehr hohe Konzentration der Solarstrahlung mit gutem Wirkungsgrad erreicht werden kann. Im Bereich großer Leistungen nutzt man dazu so genannte Solarturmanlagen. In diesen Anlagen erfolgt die Konzentration der Solarstrahlung mit einer Vielzahl von Heliostaten (große, leicht gekrümmte Spiegelflächen), die der Sonne so nachgeführt werden, dass die Strahlung jederzeit auf einen Punkt auf einem Turm gebündelt wird. In diesem Punkt, dem Brennpunkt,

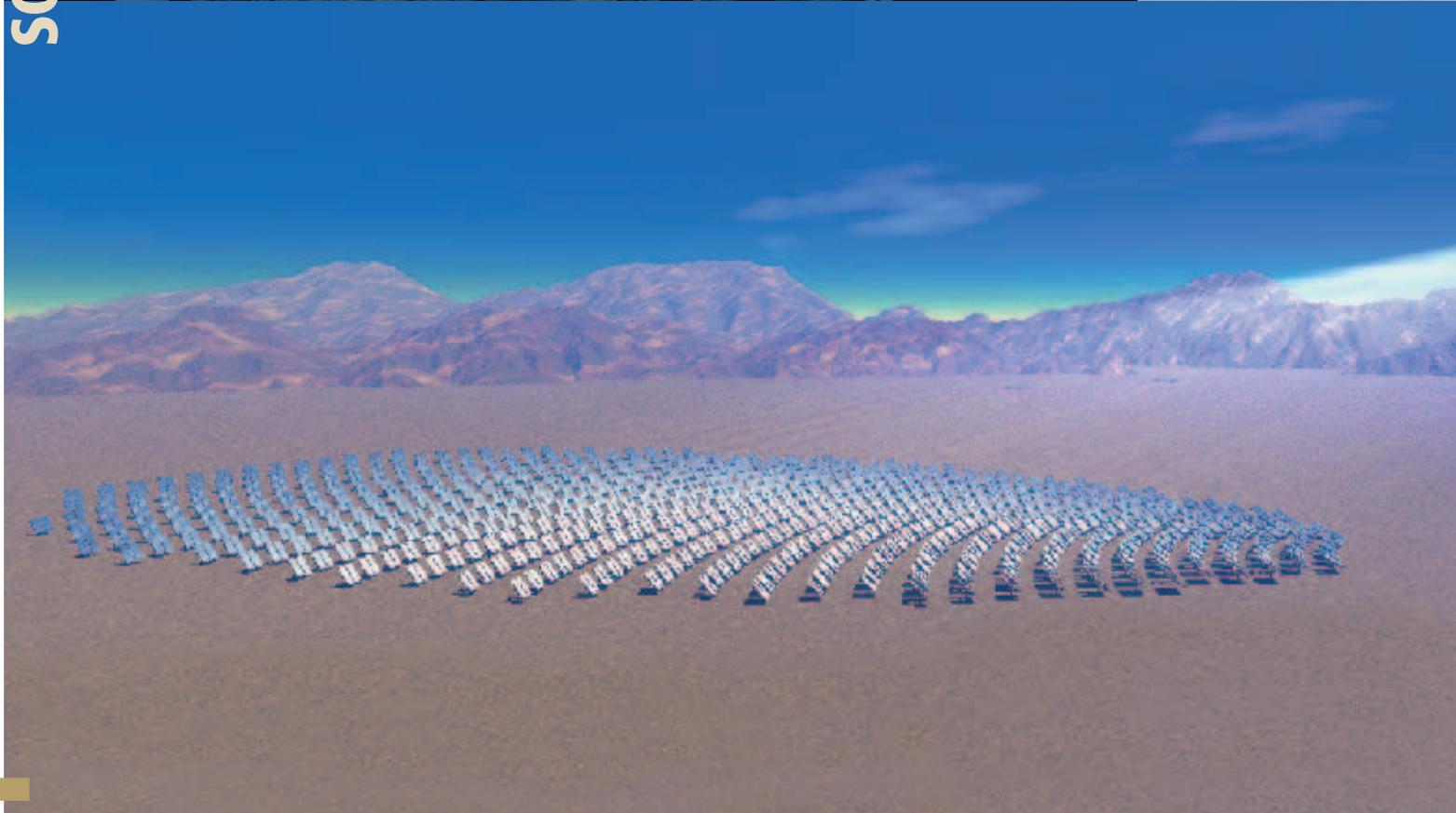
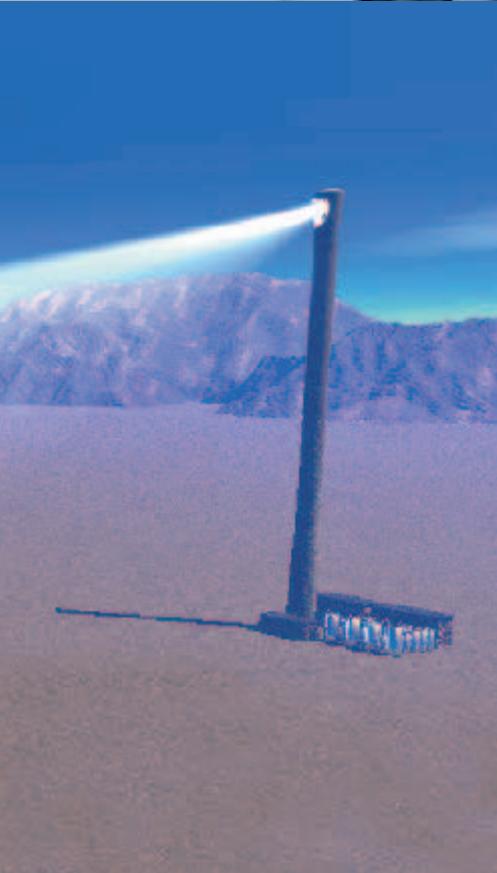


Abb. oben links: Durch Heliostaten bestrahlter Test-Receiver auf dem Versuchsturm CESA1 auf der PSA, Almería, Spanien.

Abb. oben rechts: Receiverinheit aus Nieder- bis Hochtemperatur-Einzelmodulen.

Abb. unten: Die Zukunft solarthermischer Turmkraftwerke. (Artist view)



befindet sich der Receiver oder Strahlungsempfänger, der die etwa 500-fach konzentrierte Strahlung in Wärme umwandelt und an den Kraftwerksprozess weitergibt.

Als Receiver wurden am DLR mehrere Modulvarianten für verschiedene Temperaturbereiche entwickelt. Jedes dieser Module besteht aus einem Sekundärkonzentrator mit sechseckiger Eintrittsapertur und der am Austritt angebrachten Receiverinheit. Die Leistungsskalierung der Module erfolgt durch wabenförmige Anordnung der Module im Brennfleck mit entsprechender Verschaltung in serieller und paralleler Weise. Für Temperaturen bis etwa 600 Grad Celsius können direktbestrahlte Rohrreceiver eingesetzt werden, die kostengünstig herstellbar sind. In mehreren parallel geschalteten, spiralförmig gebogenen Rohren wird die Luft direkt erhitzt. Bei höheren Temperaturen werden so genannte „volumetrische“ Receiver installiert. Bei diesem Receiver befindet sich hinter der Austritts-Öffnung des Sekundärkonzentrators ein gewölbtes Quarzglas-Fenster, das die Strahlung weitgehend verlustfrei zum dahinter angeordneten Absorber durchlässt. Dieses Fenster, das in einen Druckkessel eingesetzt ist, ermöglicht den Betrieb des Receivers bei Drücken bis zu 15 bar. Der Absorber besteht aus mehreren Lagen eines porösen Materials, das die Strahlung in der Tiefe (im Volumen, daher „volumetrisch“) des Absorbers aufnimmt und in Wärme umsetzt. Für Temperaturen bis 800 Grad Celsius werden Drahtgewebe aus hochtemperaturbeständigem Metalldraht eingesetzt, bei höheren Temperaturen besteht der Absorber aus keramischen Schäumen mit hoher Porosität.

Im Rahmen mehrerer Verbundprojekte mit Förderung durch den Bund bzw. die EU wurde die Leistungsfähigkeit der Receiver-technologie im Verbund mit einer Gasturbine demonstriert. Die solaren Tests erfolgten auf der Solarturm-Testanlage der Plataforma Solar de Almeria (PSA) in Südspanien in Kooperation mit der spanischen Forschungseinrichtung CIEMAT und anderen internationalen Partnern. Die Komponenten sind im Turm in 60 Metern Höhe eingebaut und können mit bis zu 93 Heliostaten beaufschlagt werden. Die maximale Receiverleistung des aktuellen Aufbaus mit drei in Serie geschalteten Receivermodulen beträgt ein Megawatt (thermisch).

Im Verlauf der bisherigen Tests wurden Lufttemperaturen von über 1.000 Grad Celsius am Receiveraustritt erreicht. Der

maximale Betriebsdruck lag bei 15 bar. Die Gasturbine hat dabei ihre Nennleistung von 230 Kilowatt erreicht und ins Stromnetz eingespeist. Die Kopplung von Receiver und Gasturbine hat sich als zuverlässig und gut steuerbar erwiesen.

Begleitende Untersuchungen zur Auslegung und Optimierung solar-hybrider Gasturbinenanlagen haben das Potential des Konzeptes bestätigt. Bei Anlagenleistungen im Bereich von 100 Megawatt werden Umwandlungswirkungsgrade im Kraftwerksprozess von über 50 Prozent erreicht. Mit Receiveraustrittstemperaturen von 1.000 Grad Celsius können je nach Gasturbinentyp bis zu 90 Prozent der Leistungszufuhr im Auslegungsfall durch Solarenergie bereitgestellt werden. Im Detail wurde ein Prototypsystem mit einer elektrischen Auslegungsleistung von 15 Megawatt untersucht. Für den Betrieb mit 3.500 Volllaststunden jährlich ergibt sich ein solarer Deckungsgrad von 70 Prozent, die Stromgestehungskosten liegen bei 10,5 Cent pro Kilowattstunde. Bei Anlagen mit höherer Leistung ergeben sich weitere Kostenreduktionen durch Skalierungseffekte und einen höheren Kraftwerkswirkungsgrad.

Trotz der erzielten Erfolge müssen noch weitere Entwicklungsschritte bewältigt werden, bevor die Technologie in großem Umfang eingesetzt werden kann. Erfahrungen aus dem Langzeitbetrieb der Komponenten stehen noch aus, die zur Ermittlung des Betriebs- und Wartungsaufwandes sowie zur Einschätzung des technologischen Risikos benötigt werden. Ein Markteinstieg über Großanlagen, die das technische Potenzial voll ausnützen können, ist daher kurzfristig nicht realisierbar. Eher Erfolg versprechend ist die Markteinführung über kleine solar-hybride Gasturbinensysteme, die durch Kraftwärmekopplung einen hohen Gesamtnutzungsgrad erreichen. Als Beispiel für ein solches System steht eine Projektbeteiligung des DLR an einer solarunterstützten Energieversorgung eines im Bau befindlichen Krankenhauses in Empoli, Italien. Hier ist das DLR maßgeblich an der Auslegung und Fertigung der Receiver für zwei kleine Solarturmanlagen beteiligt. Jede der beiden Anlagen soll 80 Kilowatt Strom erzeugen, die Abwärme wird zur Klimatisierung und Wassererwärmung genutzt.

Dr. Reiner Buck ist Leiter des Fachgebiets „Solare Hochtemperatursysteme“ im DLR-Institut für Technische Thermodynamik, Stuttgart. ◀

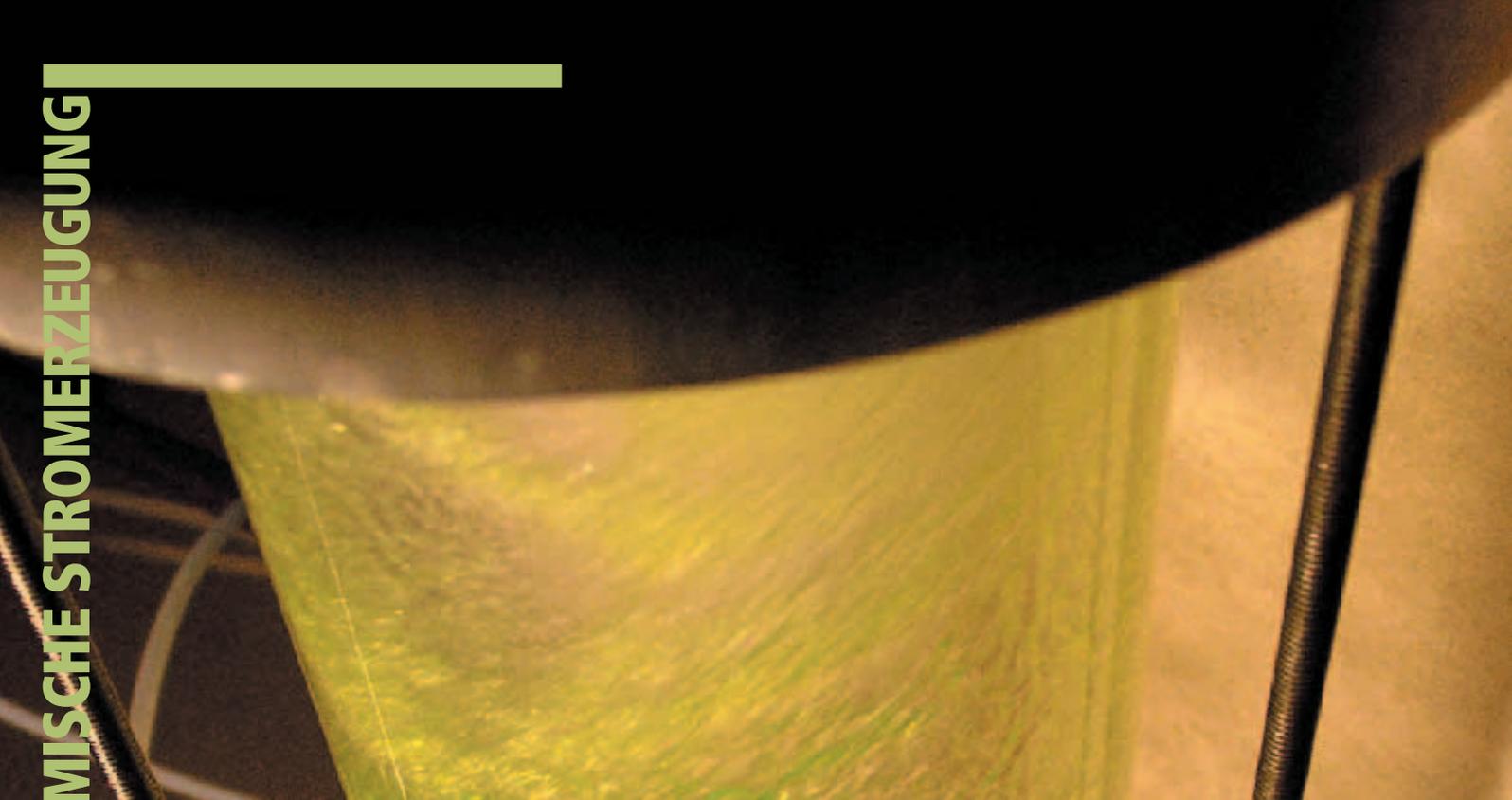
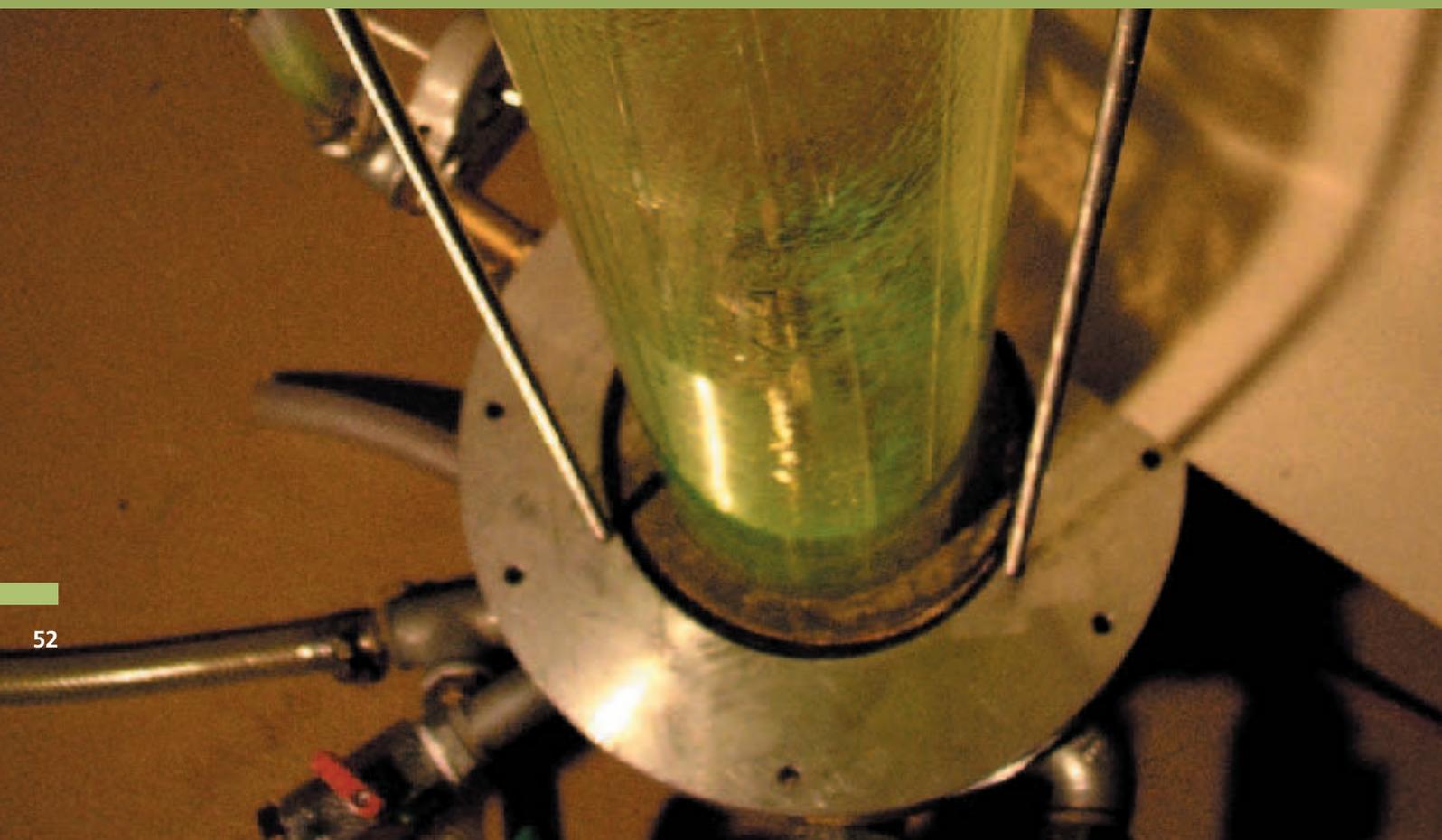


Abb.: Zyklon-Abscheider während des Betriebs an der Wasser-Luft-Anlage des DLR.



Von Markus Eck

Die Sonne macht Dampf

Parabolrinnenkraftwerke sind die bewährteste Technologie zur solaren Stromerzeugung im Kraftwerksmaßstab. Seit Ende der 80er Jahre wurden in der kalifornischen Mojave Wüste bereits neun Kraftwerke mit einer Gesamtleistung von 354 Megawatt installiert, die bis heute erfolgreich betrieben werden. Alle aktuellen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf dem Gebiet der Parabolrinnenkraftwerke zielen auf die Senkung der Stromgestehungskosten ab. Dies kann durch die Optimierung einzelner Komponenten, wie dem Kollektor oder dem Absorberrohr, den Effekten der Massenproduktion oder durch eine Verbesserung des Gesamtsystems erreicht werden. Bei der Verbesserung des Gesamtsystems hat das DLR mit seinen nationalen und internationalen Partnern die solare Direktverdampfung zur Einsatzreife gebracht. Eine Senkung der Stromgestehungskosten um zehn Prozent ist hier in naher Zukunft erreichbar.

Bei den so genannten SEGS-Kraftwerken (Solar Electric Generating System) wird ein Wärmeträgeröl in den Absorberrohren der Parabolrinnenkollektoren auf fast 400 Grad Celsius erhitzt. In Wärmeübertragern gibt das Öl seine thermische Energie an einen konventionellen Wasser-Dampf-Kreislauf ab. Der so erzeugte komprimierte Dampf wird in einer Turbine entspannt und treibt einen Generator an. Bei diesen Anlagen werden im alltäglichen Betrieb Spitzenwirkungsgrade von 22 Prozent und mittlere Jahreswirkungsgrade von über 14 Prozent erreicht.

Vereinfachung und Verbesserung eines bewährten Systems

Wird nun das Wasser direkt in den Absorberrohren verdampft und überhitzt, so entfallen das Wärmeträgeröl, die Wärme-

übertrager und alle weiteren öl-relevanten Komponenten. Durch diesen Schritt können die Investitionen deutlich gesenkt werden. Das Arbeitsmedium Wasser hat aber noch weitere Vorteile. Konnten die bisherigen Systeme nur bis zu der maximalen Einsatztemperatur des verwendeten Wärmeträgeröls von 400 Grad Celsius betrieben werden, so sind mit dem Arbeitsmedium Wasser Temperaturen von über 500 Grad Celsius denkbar und damit entsprechend höhere Systemwirkungsgrade erreichbar. Zudem ist Wasser im Gegensatz zum bisher verwendeten Wärmeträgeröl nicht toxisch und deutlich kostengünstiger.

Anfängliche Skepsis

Neben diesen Vorteilen besitzt die solare Direktverdampfung Nachteile, die dazu geführt haben, dass bei der Errichtung der SEGS-Kraftwerke die Direktverdampfung

noch nicht berücksichtigt wurde. Zum damaligen Zeitpunkt hielt man die auftretende Zweiphasenströmung in horizontalen Verdampferrohren nicht für beherrschbar. Je nach Betriebszustand können sich unterschiedliche Strömungsformen einstellen, die, wie im Falle einer Schichtströmung keine ausreichende Kühlung der Absorberrohre gewährleisten oder, wie bei der Pfropfenströmung, zu einer mechanischen Zerstörung der Verbindungsleitung führen können. Es existierten zudem keine Erfahrungen mit Verdampfersystemen vergleichbarer geometrischer Abmessungen. Des Weiteren wird ein Teil der Kostenersparnis durch die Notwendigkeit aufgezehrt, die gesamte Verrohrung des Kollektorfeldes auf den maximalen Betriebsdruck des Systems von über 100 bar auszulegen.

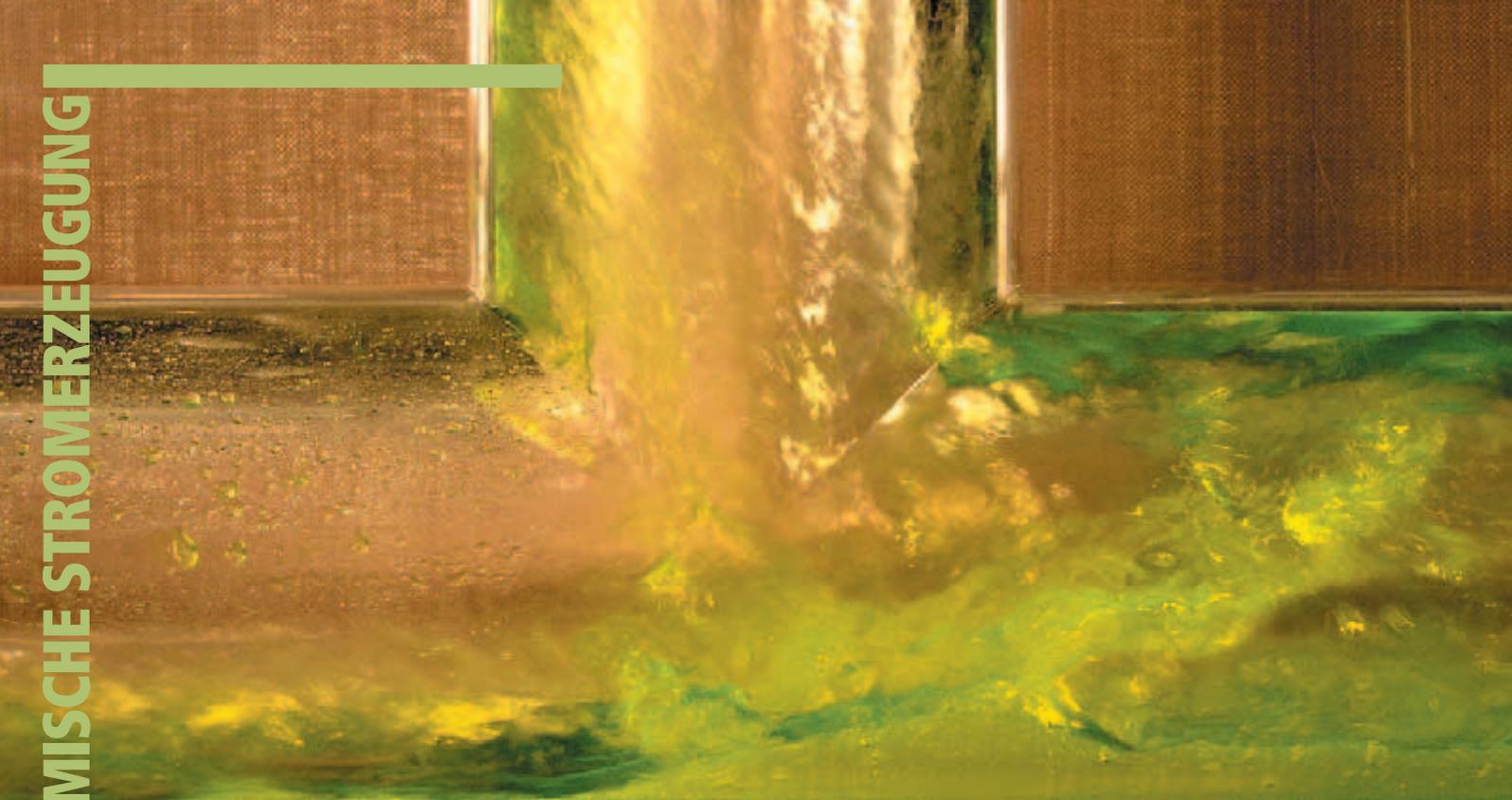
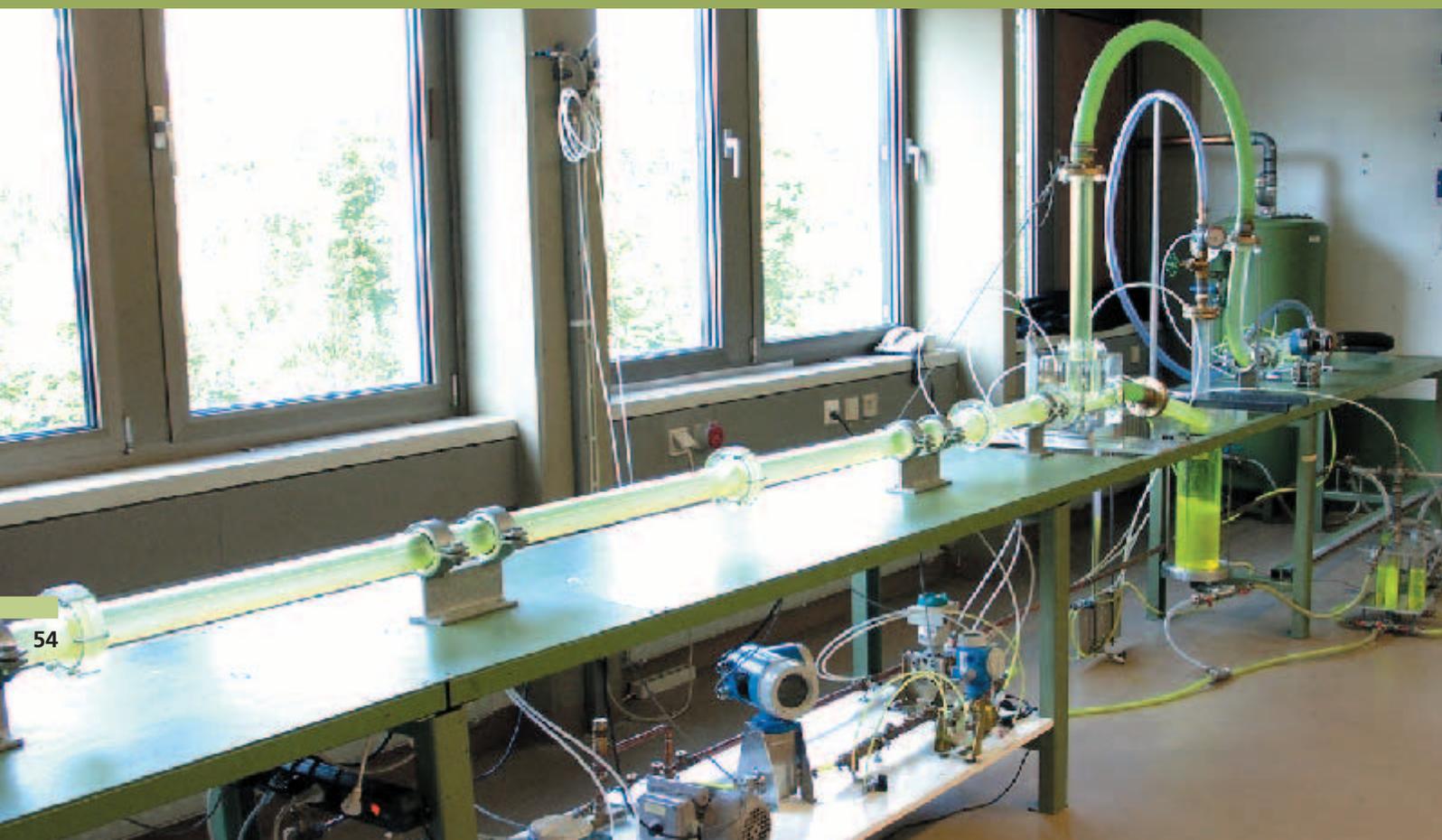


Abb. oben: T-Stück-Abscheider während des Betriebs an der Wasser-Luft-Anlage des DLR.

Abb. unten: Die Wasser-Luft-Anlage am DLR-Institut für Technische Thermodynamik.

Abb. rechts: Parabolrinnen-Anlage zur Solarthermischen Stromerzeugung – vom Labor zum Feldversuch.



Von der Idee zur Einsatzreife

Seit Anfang der 90er Jahre wird die solare Direktverdampfung in Europa unter wesentlicher Beteiligung des DLR untersucht. Zu Beginn setzte man sich mit den grundlegenden thermohydraulischen Aspekten der auftretenden Zweiphasenströmung in horizontalen Verdampferrohren auseinander. Die am DLR entwickelten und anhand zahlreicher Experimente validierten Modelle haben maßgeblich zum tieferen Verständnis der Strömungs- und Verdampfungsvorgänge innerhalb des Absorberrohres beigetragen. Mit Hilfe dieser Modelle konnte auch die weltweit erste Anlage zur solaren Direktverdampfung im realen Maßstab ausgelegt werden. Auf der Plataforma Solar de Almería wurde Mitte der 90er Jahre die DISS (Direct Solar Steam) Testanlage in Betrieb genommen. Der errichtete Kollektorstrang hat eine Länge von 500 Metern

massenstrom am Eintritt des Kollektorstranges beliebig vorgegeben werden, so dass gezielt eine Ringströmung eingestellt wird, die stets eine ausreichende Kühlung des Absorberrohres gewährleistet. Weiterhin gibt es ein fest definiertes Ende des Verdampferbereiches, womit unzulässig hohe Temperaturschwankungen in den Absorberrohren infolge eines wandernden Verdampfungsendpunktes verhindert werden. Die anfänglichen Bedenken gegenüber der Beherrschbarkeit der auftretenden Zweiphasenströmung konnten somit ausgeräumt werden.

Der Weg in die Anwendung

Aufgrund dieser positiven Erfahrungen wurde beschlossen, im laufenden, von der EU geförderten Projekt INDITEP den Bau eines ersten solarthermischen Kraftwerkes mit solarer Direktverdampfung vorzuberei-

gen des Potenzials der solaren Direktverdampfung in Südeuropa und Nordafrika, bei denen hochauflösende Satellitendaten analysiert werden. Nach diesen Studien reicht allein das solarthermische Stromerzeugungspotenzial in Spanien aus, um 50 Prozent des EU-Strombedarfes zu decken.

Bei der gewählten kleinen Anlagengröße nimmt der Anteil der Betriebs- und Wartungskosten an den Stromgestehungskosten überproportional zu. Um dennoch einen wirtschaftlichen Betrieb zu ermöglichen, widmet sich das DLR in dem vom BMU geförderten Projekt SOLDI in besonderem Maße der Optimierung und möglichen Automatisierung einzelner Betriebsabläufe. Ständig wiederkehrende Betriebsabläufe, wie der An- und Abfahrvorgang, werden hier systematisch, vor allem mit Hilfe dynamischer Simulationen untersucht und optimiert. Die optimierten Betriebsabläufe



und besteht aus elf Kollektoren mit einer Aperturweite von je 5,76 Metern. Im Auslegungspunkt produziert die Anlage Dampf bei 100 bar und 400 Grad Celsius mit einer thermischen Leistung von anderthalb Megawatt. An ihr konnte in mehr als 5.000 Betriebsstunden die Einsatzfähigkeit der solaren Direktverdampfung eindrucksvoll demonstriert werden. Während der gesamten Betriebszeit traten keinerlei Probleme mit den solarspezifischen Komponenten auf. Der flexible Aufbau dieser Versuchsanlage erlaubt die Untersuchung verschiedener Betriebskonzepte und Strategien. Das Hauptaugenmerk der ersten Testkampagne wurde auf die Untersuchung und Bewertung des Durchlauf-, Einspritz- und Rezirkulationskonzeptes gelegt. Bei den Versuchen zeigte sich, dass das Rezirkulationskonzept den anderen vor allem in Bezug auf Betriebssicherheit und Regelverhalten deutlich überlegen ist. Im Falle des Rezirkulationskonzeptes kann der Wasser-

ten. Mit maßgeblicher Beteiligung des DLR wird von einem Europäischen Konsortium, bestehend aus den spanischen Partnern Ciemat, Iberdrola, Initec und GES und den deutschen Partnern Flagsol, Framatome und ZSW, ein Kleinkraftwerk mit einer elektrischen Leistung von fünf Megawatt detailliert ausgelegt und die Ausschreibungsunterlagen erstellt. Diese kleine Leistung wurde gewählt, um das finanzielle Risiko für die Investoren gering zu halten und flexibler auf die Anforderungen eines liberalisierten Marktes reagieren zu können. Daneben werden wesentliche Komponenten des Kollektorfeldes, wie ein thermischer Speicher oder kompakte Wasser-Dampf Abscheider, entwickelt bzw. optimiert. Voruntersuchungen können hier effizient und mit geringem Aufwand an der Wasser-Luft Anlage am DLR-Institut für Technische Thermodynamik in Stuttgart durchgeführt werden. Abgerundet werden diese Arbeiten durch intensive Abschätzun-

können anschließend dank der ständigen Präsenz von DLR-Personal auf der Plataforma Solar de Almería, direkt an der DISS Testanlage, unter realen Bedingungen nachgefahren werden.

Das kürzlich in Spanien erlassene Stromeinspeisegesetz macht den Bau und Betrieb solarthermischer Anlagen für Anleger interessant. Vor diesem neuen Hintergrund wird in den nächsten Monaten eine Entscheidung zum Bau der fünf Megawatt Anlage erwartet. Durch sein jahrelanges Engagement hat sich das DLR mit seinen nationalen und internationalen Partnern so positioniert, dass es ein unverzichtbarer Partner bei der Realisierung der ersten vorkommerziellen Anlage sein wird.

Dr.-Ing. Markus Eck ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am DLR-Institut für Technische Thermodynamik, Stuttgart . ◀

Von Peter Heller und Wolfgang Schiel

DISH/ STIRLING- SYSTEME

Dish/Stirling-Systeme sind Anlagen zur solaren Stromerzeugung im Bereich 1 bis 50 Kilowatt. Sie konzentrieren direktes Sonnenlicht mit Hilfe eines der Sonne nachgeführten Parabolkonzentrators (engl. „Dish“) auf einen Wärmetauscher eines Stirlingmotors, der mit Hilfe der Sonnenenergie mechanische Energie erzeugt und diese über einen angekoppelten Generator in Strom wandelt.





Abb.: EuroDish mit Stirling-Motor (zehn Kilowatt elektrisch) im Testbetrieb auf der Plataforma Solar de Almería, Spanien.



Stirlingmotoren können im Vergleich zu kleinen Dampf- oder Gasturbinen sehr hohe Wirkungsgrade von über 40 Prozent erzielen. Da anders als bei Explosionsmotoren die benötigte Energie von außen über einen Wärmetauscher („Receiver“) zugeführt wird, entstehen im Motorinnenraum keine Verbrennungsrückstände. Deshalb gelten sie als sehr wartungsarm und eignen sich hervorragend auch für die dezentrale



Das DLR hat sich in den vergangenen Jahren gemeinsam mit dem Systementwickler Schlaich, Bergemann und Partner (SBP) und weiteren deutschen und europäischen Industrie- und Forschungspartnern an der Entwicklung des Eurodish-Systems mit einer Leistung von zehn Kilowatt und Systemkosten bei einer Kleinserienfertigung von unter 5.500 Euro pro Kilowatt beteiligt. Das System basiert auf einem kostengünstigen neuartigen Konzentratoren in Sandwichbauweise aus zwölf glasfaserverstärkten Einzelfacetten, die zu einer Schale verklebt werden. Diese wiederum wird in einem Drehgestell über die beiden Drehachsen automatisch der Sonne nachgeführt. Im Brennfleck dieser Parabol-Schale ist der aus 78 Metallröhrchen bestehende Wärmetauscher einer SOLO 161-Stirlingmaschine positioniert und überträgt die von ihm absorbierte Solarenergie auf das die Röhrchen durchströmende Arbeitsgas (Helium oder Wasserstoff). Der Receiver ist zwischen den beiden V-förmig angeordneten Zylindern angebracht, deren Kolben die mechanische Energie aus der Expansion des Arbeitsgases über einen Kurbeltrieb direkt auf den Generator übertragen. Ein Wasserkühler am Kompressionszylinder kühlt das Arbeitsgas zurück. Ein Regenerator zwischen Receiver und Kühler verbessert durch wechselweise Aufnahme und Abgabe von Wärme des Arbeitsgases die Effizienz des Kreisprozesses.

wie Receiver-Cavity, steht die Erhöhung der Zuverlässigkeit und die Kostenreduktion von Bauteilen im Vordergrund. Weiterhin wurden drei sogenannte Länderreferenzanlagen in Odeillo (Frankreich), Sevilla (Spanien) und Würzburg errichtet. Diese sollen die Markteinführung durch die Präsenz in interessanten Märkten unterstützen. Somit sind derzeit neben den beiden Prototypen auf der Plataforma Solar de Almería, einer Demo-Anlage in Mailand (Italien) und einer in Indien insgesamt sieben Prototypen in der Erprobung.

Dish/Stirling-Systeme könnten sich wegen ihrer hohen Wirkungsgrade und niedriger Systemkosten bei entsprechend hoher Fertigungsstückzahl bei einer schnellen und erfolgreichen Markteinführung einen großen Markt erschließen. Dies erfordert jedoch ein hohes Maß an Zuverlässigkeit, Wartungsarmut und Langlebigkeit. Um diese Aspekte erfolgreich verbessern zu können, wird nun ein größerer Feldtest anvisiert. Demgegenüber werden sich die F&E-Arbeiten auf die Entwicklung von Hybridsystemen für netzferne Anwendungen konzentrieren. Dies beinhaltet im Wesentlichen die Nutzung von verschiedenen flüssigen oder gasförmigen Brennstoffen in sogenannten „Multifuel“-Brennern und deren effiziente Umsetzung und Übertragung auf den Stirling-Receiver.

Stromerzeugung. Sie können zudem vergleichsweise einfach „hybridisiert“, das heißt mit einer weiteren Energiequelle wie Biogas gekoppelt werden, um einen 24 Stunden Betrieb zu gewährleisten. Dies ist neben dem hohen Kostenpotenzial ihr wesentlicher Vorteil gegenüber PV-Systemen, die auf Batteriesysteme zur Energiespeicherung angewiesen sind.

Die derzeitigen F&E-Arbeiten konzentrieren sich auf die Verbreiterung der Datenbasis, auf die Analyse von Fehlern und die Detailverbesserungen einiger Komponenten. Neben der Steigerung des Wirkungsgrades durch Verbesserungen an Komponenten,

Dr.-Ing. Peter Heller ist Projektgruppenleiter für punktkonzentrierende Systeme am DLR-Standort Almería. Dipl.-Phys. Wolfgang Schiel ist Geschäftsführer der SBP GmbH. ◀

Abb.: Stirling-Motor zur Stromerzeugung.

T H

*Von Rainer Tamme, Doerte Laing
und Wolf-Dieter Steinmann*

M I S

S P E I

F U

S O L

K R A F T

E R -

C H E

C H E R

E R

A R E

W E R K E

Der Einsatz effizienter thermischer Speicher senkt deutlich die Stromgestehungskosten eines Solar- kraftwerks. Speicher ermöglichen zudem die Kompen- sation von Schwankungen in der solaren Einstrahlung und vereinfachen somit die Integration auch großer solarthermischer Kraftwerkskapazitäten in bestehende elektrische Versorgungsnetze. Dahersind Energiespei- cher für eine erfolgreiche Positionierung der solaren Kraftwerkstechnologie zwingend notwendig.

Die wichtigsten Kriterien bei der Entwicklung von Speichersystemen sind die Kapazität (definiert als die während des Entladens vom Kraftwerk abgegebene elektrische Energie), die Leistung, die beim Lade- und Entladevorgang übertragen werden kann sowie die Lebensdauer des Speichers, die im Bereich von Jahrzehnten liegen soll.

Speicher für Parabolrinnen mit Thermoöl

Für Rinnenkollektoren mit Thermoöl wird am DLR das Feststoffspeicher-Konzept verfolgt, bei dem die thermische Energie zwischen dem Thermoöl und einem gießfähigen Feststoff (z.B. Beton) übertragen wird. Diese Feststoffspeicher weisen gegenüber alternativen Konzepten, wie beispielsweise Flüssigsalz-Speichern, ein deutliches Kostensenkungspotenzial auf. Im Rahmen des vom BMU geförderten WESPE Vorhabens (2001 bis 2003) wurden jeweils zwei 350 Kilowatt in der Stunde (thermisch) Speichermodule auf Basis von Beton und Gießkeramik entwickelt und auf der Plataforma Solar erfolgreich im Parabolrinnen-Testloop erprobt. Die im WESPE Vorhaben erzielten Ergebnisse zeigen, dass hiermit eine technisch und wirtschaftlich attraktive Lösung mit Investitionskosten von ca. 20 Euro pro Kilowattstunde thermischer Speicherkapazität realisiert werden kann.

Gemeinsam mit industriellen Partnern soll eine weitere Material- und Designverbesserung im laufenden WANDA-Vorhaben (2004 bis 2006) – finanziert durch BMU – erreicht werden. Durch die Identifizierung der optimalen Speicherintegration in das Solarkraftwerk soll der Nutzungsgrad des Speichers durch eine angepasste, modulare Be- und Entladung der Speicherblöcke erhöht werden. Damit wird die Basis für die nachfolgende kommerzielle Umsetzung geschaffen.

Speicher für Rinnenkraftwerk mit Direktverdampfung

Für die solare Direktverdampfung bietet sich eine Kombination von sensibler Wärmespeicherung und Nutzung von Latentwärme an. Vor allem der hohe Energiebedarf der Verdampfung bei konstanter Temperatur macht den Einsatz von Latentwärmespeichern attraktiv. In dem von der EU geförderten Projekt DISTOR (2004 bis 2007) werden drei Konzepte im Labormaßstab untersucht:

- Analog zum Feststoffspeicher werden Rohre in das Latentmaterial eingebettet. Hierfür ist ein Verbundmaterial mit hoher Wärmeleitfähigkeit erforderlich, was durch Mikrokapselung des Latentmaterials in einer Matrix mit sehr gutem Wärmeleitvermögen erreicht werden soll.



Abb.: Rohrregister mit externer PCM Anordnung.

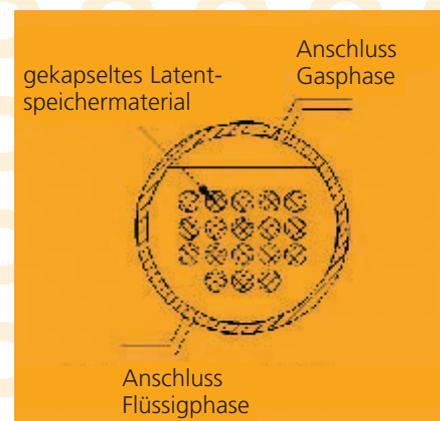


Abb.: Gekapseltes Latentspeichermaterial im Druckbehälter.

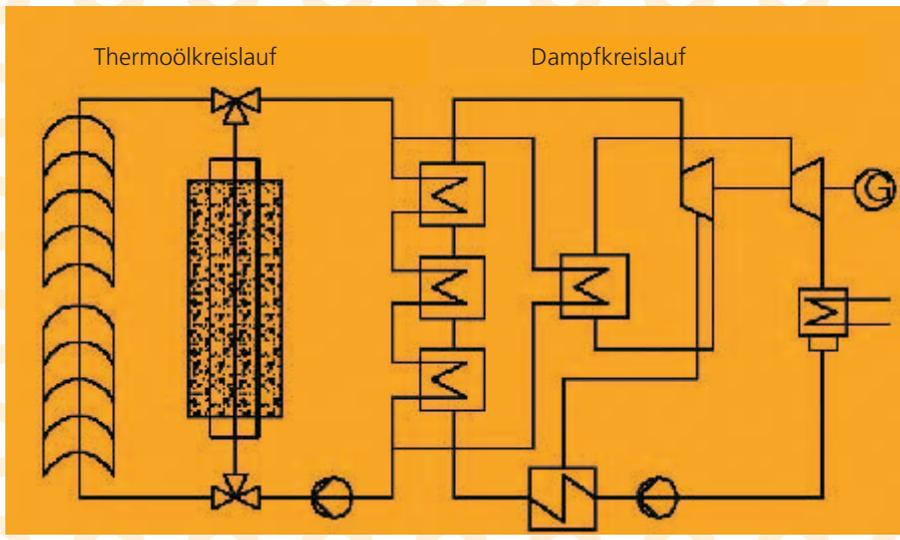


Abb.: Prinzipdarstellung der Einbindung des Speichers in Parabolrinnenkraftwerke.

- Das Latentspeichermaterial wird in dünnwandige Behälter gekapselt und direkt im wasser- bzw. dampfführenden Druckbehälter angeordnet. Hierdurch lassen sich große wärmeübertragende Flächen und eine sehr effektive Wärmeübertragung realisieren.
- Die Übertragung der Energie zwischen Dampf und Speichermedium erfolgt über ein Hilfsmedium.

Abschließend wird das erfolgreichste System im 100 Kilowattstunden Maßstab unter solaren Randbedingungen erprobt.

Speichersimulation und Systemtechnik

Zur Auslegung von Speichersystemen und für systemtechnische Untersuchungen wurde beim DLR die Simulationsumgebung StorageTechThermo entwickelt, die die Analyse des dynamischen Verhaltens des Speichers in Wechselwirkung mit Kraftwerksblock und Kollektorfeld ermöglicht. Die Beschreibung erfolgte in der Simulationssprache MODELICA. Die entwickelten Modelle der Komponenten wurden in umfangreichen Bibliotheken organisiert, was deren Verwendung für ein breites Anwendungsspektrum im Bereich Kraftwerkstechnik, rationelle Energieumwandlung und Speichertechnik effektiv ermöglicht.

Erste systemtechnische Simulationen haben gezeigt, dass sich durch eine verbesserte Abstimmung des Speichers auf Kollektorfeld und Kraftwerksblock die nutzbare Speicherkapazität signifikant erhöhen lässt. Dies führt zu einer weiteren Kostensenkung.

Dr. Rainer Tamme ist Leiter der Organisationseinheit Thermische Prozesstechnik, Doerte Laing und Dr. Wolf-Dieter Steinmann sind wissenschaftliche Mitarbeiter des DLR-Instituts für Technische Thermodynamik, Stuttgart. ◀

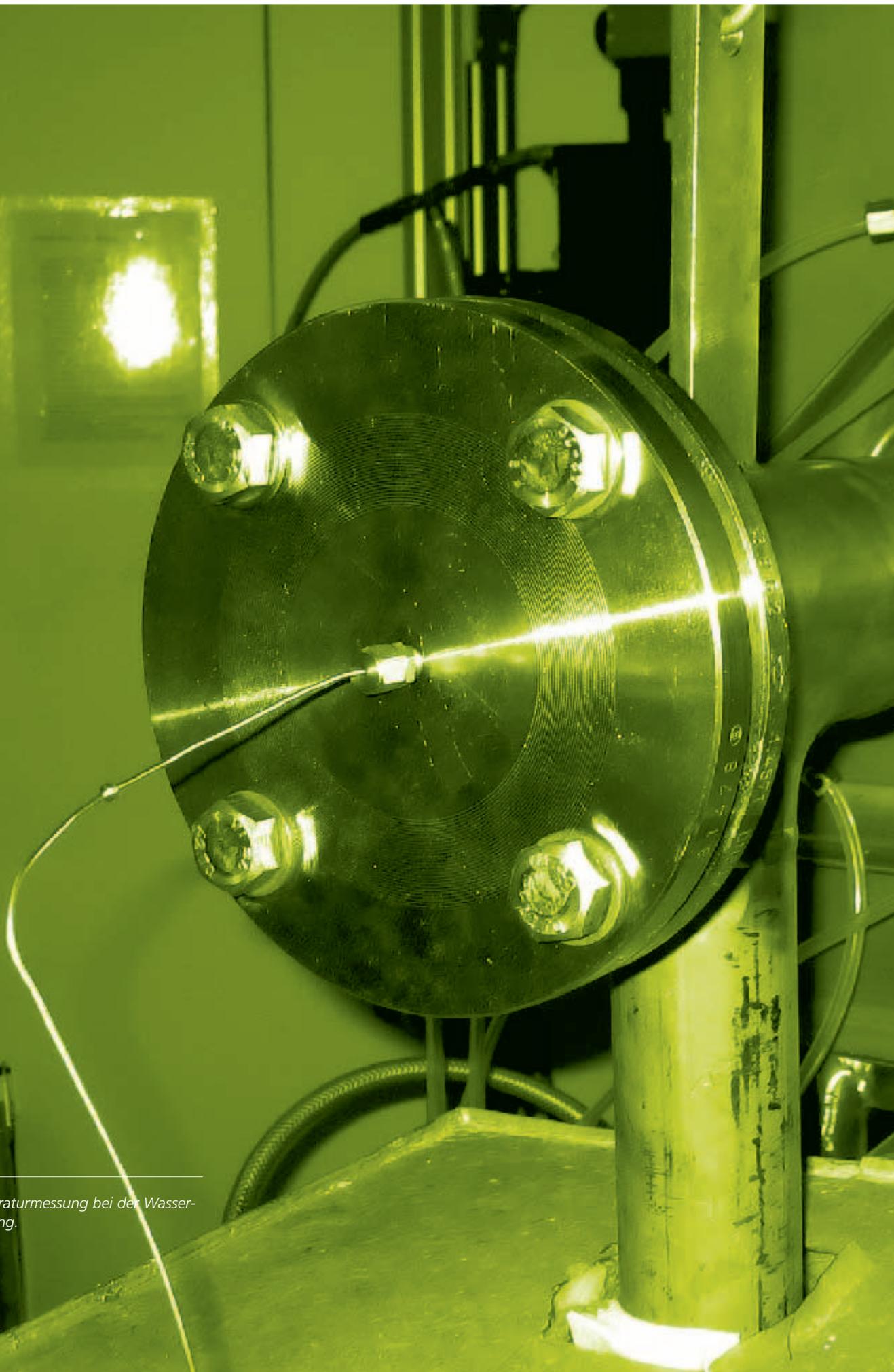


Abb.: Temperaturmessung bei der Wasserstoffherzeugung.



Von Christian Sattler und Paul Lucchese

Energieträger der Zukunft

Wasserstoff versus fossile Brennstoffe

Wasserstoff wird weltweit als ein wesentlicher Energieträger der Zukunft angesehen. Seine Faszination kommt vor allen Dingen daher, dass bei seiner Nutzung lediglich Wasserdampf und kein Kohlendioxid als Abgas entsteht. Allerdings besitzt Wasserstoff auch Nachteile, die im Rahmen von Forschung und Entwicklung minimiert werden müssen. Wasserstoff soll mittelfristig die kohlenstoffhaltigen Energieträger Kohle, Öl und Gas ergänzen und möglicherweise auf lange Sicht ersetzen. Diese Vision ist jedoch nur dann nachhaltig, wenn bei der Wasserstofferzeugung keine zusätzlichen klimafährenden Emissionen wie CO_2 , SO_2 , NO_x entstehen.

H heute wird Wasserstoff hauptsächlich in der chemischen Industrie als Grundstoff verwendet. Er wird dazu nahezu ausschließlich über die so genannte Dampfreformierung von Erdgas erzeugt. Bezogen auf die nutzbare Energie entsteht bei diesem Prozess jedoch mehr CO_2 , als wenn das Erdgas direkt verbrannt werden würde, weil zusätzlicher Brennstoff benötigt wird, um den Prozess anzutreiben.

Die Forschung zur Wasserstoffproduktion fokussiert sich daher derzeit auf zwei Ziele. Zum einen wird daran gearbeitet, das entstehende CO_2 zu speichern. Bei dieser Sequestrierung genannten Technik soll das Gas hoch komprimiert in ausgeschöpften Bergwerken oder Öl- und Gasquellen gelagert werden. Zum anderen werden Verfahren entwickelt, bei denen für die mittelfristige Anwendung der Einsatz fossiler Brennstoffe reduziert werden kann, wie bei der solaren Dampfreformierung und langfristig kohlenstofffrei Wasserstoff erzeugt werden kann wie bei thermochemischen Kreisprozessen.

Das DLR legt den Schwerpunkt seiner Arbeiten auf die Entwicklung dieser Technologien, weil sie langfristig das Potenzial haben, erneuerbaren Wasserstoff für eine breite Anwendung zugänglich zu machen.

Die Europäische Union hat zur Beschleunigung der Entwicklung von Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie und ihrer Anwendung die Europäischen Wasserstoff- und Brennstoffzellenplattform eingerichtet (www.hfpeurope.org). Parallel wird im 6. Forschungsrahmenprogramm der EU durch mehrere Ausschreibungen die Forschung auf diesem Gebiet vorangetrieben.

Für eine erfolgreiche Umsetzung der Technologien in die Anwendung ist es von großer Bedeutung, sich zum gegenwärtigen Zeitpunkt europaweit zu vernetzen und sich an den weltweiten Diskussionen und Entwicklungen zu beteiligen. Die Solarforschung des DLR engagiert sich daher derzeit in fünf europäischen Projekten zum Thema nachhaltige Wasserstofferzeugung.



Abb.: Hochtemperatur-Abgasleitung (500 Grad Celsius) hinter dem Versuchsaufbau.



Ein wesentlicher Partner für das DLR ist dabei das französische Commissariat à l'Énergie Atomique CEA, das zwei dieser Projekte koordiniert. Dabei ist der auf den ersten Blick erkennbare Widerspruch zwischen erneuerbarer und nuklearer Energie auf den zweiten die große Stärke dieser Projekte. Hier eröffnen sich Möglichkeiten die unterschiedlichen Herangehensweisen und das unterschiedliche Know-how miteinander zu verknüpfen um Technologie für unterschiedliche Rahmenbedingungen zu entwickeln. Ziel ist es, bewerten zu können, wann und wo welche Technologie sinnvoll einsetzbar ist.

Um die großen Mengen Wasserstoff erzeugen zu können, die die Verfügbarkeit transportabler Energieträger bei einem rückläufigen Einsatz fossiler Energieträger bei gleichzeitig steigendem Weltbedarf sichert, ist die Effizienz der Produktionsverfahren zu maximieren.

Langfristig gilt es, kohlenstofffreie Verfahren zu entwickeln, um die Emission von Klima gefährdenden Stoffen wie CO_2 , SO_2 und NO_x zu vermeiden. Nahe liegend erscheint die Elektrolyse von Wasser. Diese Technologie ist heute verfügbar jedoch wird der Energieinhalt des Primärenergieträgers (Sonne, Wind, Wasser, Kernkraft) durch den Umwandlungsschritt in elektrischen Strom verringert. Um trotzdem optimierte Wirkungsgrade zu erzielen, entwickelt das DLR in einem europäischen Verbund im Projekt Hi_2H_2 eine Hochtemperaturelektrolysezelle ausgehend von den Entwicklungen im Bereich der Hochtemperaturbrennstoffzellen.

Noch effizienter erscheint der direkte Einsatz von Primärenergie zur Wasserspaltung. Da die thermische Wasserspaltung erst oberhalb von ca. 2.500 Grad Celsius mit hinreichend großen Umsätzen abläuft sind Umwege über so genannte thermochemische Kreisprozesse notwendig um in Temperaturbereiche zu gelangen, die technisch realisierbar sind.

Diese Prozesse wurden bereits in den 70er Jahren des letzten Jahrhunderts entwickelt um Kernkraft für die Erzeugung von Wasserstoff nutzbar zu machen. Es wurden mehrere hundert solcher Verfahren beschrieben. Die Erfolg versprechendsten sind dreistufige wie der Schwefel/Iod oder General Atomics Prozess und der Westinghouse Prozess. Beachtenswert sind auch zweistufige Prozesse auf Metalloxidbasis.

CEA ist in Europa führend thermochemische Kreisprozesse an die neusten Kernreaktorgenerationen anzupassen. Allerdings wurde bei General Atomics bereits bei der Entwicklung des Prozesses vor 30 Jahren der Einsatz von Solarthermie für den Energie intensiven Schritt der Schwefelsäurespaltung vorgeschlagen. Dessen Wirkungsgrad steigt bei Temperaturen über 1.000 Grad Celsius exponentiell an. Derart hohe Temperaturen können auch von Hochtemperaturkernreaktoren der neuesten Generation nicht erreicht werden, wohl aber von thermischen Solaranlagen. Daher entwickeln CEA und DLR gemeinsam mit weiteren europäischen Partner aus Industrie und Forschung Konzepte um die verfügbaren Energieträger bei den verschiedenen Prozessschritten optimal einzusetzen, mit dem Ziel, sowohl technisch als auch wirtschaftlich und ökologisch effizient Wasserstoff in großen Mengen zu erzeugen.

Es werden parallel mehrere Wege eingeschlagen. Zum einen wird in einem so genannten „Coordination Action“-Projekt die aktuelle Situation der Möglichkeiten zur Wasserstoffherzeugung beschrieben und auf dieser Basis Vorschläge für die europäische Wasserstoffplattform entwickelt um die heute und in Zukunft verfügbaren Technologien in die Energiewirtschaft einzuführen. Parallel werden in dem Forschungsprojekt HYTHEC der General Atomics und der Westinghouse Prozess modelliert. Anhand von einem extern beheizbaren Rohrreaktor und einem strahlungsbeheizten Aerosolreaktor wird die Thermodynamik der Prozesse und ihre Anwendbarkeit überprüft und es werden Szenarien simuliert wie sich die Prozesse technisch realisieren und wenn möglich hybridisieren lassen.

Da der neue Anlauf in eine nachhaltige Wasserstoffwirtschaft gerade erst begonnen hat, sind noch viele Anstrengungen notwendig, um die Technologien aus dem Labor in die Anwendung zu bringen. Daher sind weitere europäische Kooperationen geplant.

Dr. Christian Sattler ist Fachgebietsleiter für Solare Stoffumwandlung in der Solarforschung des DLR-Instituts für Technische Thermodynamik, Köln-Porz. Paul Luchese ist Direktor des Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Programms am CEA, Frankreich. ◀

SOLARE



Von Stephan Möller und Michael Epstein

ERDGASREFORMIERUNG

Die Erdgasreformierung kommt in der Chemieindustrie vielfach zum Einsatz. Sie ist derzeit die kostengünstigste Methode, um z.B. Wasserstoff im großen Maßstab herzustellen. Deswegen wird die Erdgasreformierung bei der Realisierung einer Wasserstoffwirtschaft eine bedeutende Rolle spielen. Da aber Erdgas (Hauptbestandteil ist Methan) oder andere fossile Brennstoffe auf absehbare Zeit hauptsächlich zum Einsatz kommen werden, trägt dieses Verfahren nicht zur Einsparung von fossilen Energieträgern und zum Klimaschutz bei, auch wenn Wasserstoff als sauberer Treibstoff zur Verfügung gestellt wird. Erst zu einem späteren Zeitpunkt ist der Einsatz von erneuerbaren kohlenstoffhaltigen Rohstoffen angedacht.

Abb. vorhergehende Seite: Solarreformer am „The Weizmann Institute of Science“ (WIS) in Rehovot, Israel.

Abb. oben: Spiegelfeld und Empfängerturm mit bestrahltem Reformer an der Spitze.

In der konventionellen Reformierung erfüllt Erdgas zwei Funktionen: Zum einen wird es im Reformer mit Wasserdampf oder CO_2 in ein wasserstoffreiches Gasgemisch, dem Synthesegas, umgesetzt. Zum anderen muss Erdgas verbrannt werden, um die für die Reaktion benötigte Prozesswärme bereitzustellen. Ein Grossteil der Prozesswärme wird dabei verwendet, um den Ausgangsstoff Erdgas zum Produkt Synthesegas energetisch aufzuwerten.

Der große Vorteil bei der solaren Reformierung ist nun, dass die benötigte Prozesswärme komplett durch konzentrierte Solarstrahlung bereitgestellt wird. Erdgas muss daher nicht verbrannt werden und kann so bei diesem Prozess bis zu 40 Prozent eingespart werden. Der Anteil an Solarenergie am Brennwert von Synthesegas bzw. Wasserstoff beträgt etwa 22 Prozent. Dadurch wird zum Beispiel auch die Stromproduktion über solar reformiertes Synthesegas interessant, weil der Strom dann teilweise erneuerbar ist.



Im Rahmen des EU-Projektes SOLASYS wurde die solare Dampfreformierung eines methanhaltigen Gases erfolgreich in einem Solarreformer am Weizmann Institute of Science (WIS) in Rehovot, Israel, getestet. Der notwendige Solarreformer wurde beim DLR entwickelt, im 400 Kilowatt (thermisch) Maßstab gebaut und getestet. Der neuartige Druckreformer wird mit konzentrierter Solarstrahlung, welche durch ein gewölbtes Quarzglasfenster in den Reformer, beheizt. Im Reformer trifft die Strahlung dann auf eine hochporöse und damit gasdurchlässige Keramikstruktur, welche katalytisch aktiv ist. Die Strahlung wird im Volumen dieser Struktur absorbiert und erhitzt diese auf ca. 800 Grad Celsius oder höher. Das durchströmende methanhaltige Gas heizt sich auf und reagiert an der Katalysatoroberfläche zum Synthesegas.

Der solare DLR-Reformer wurde im Jahr 2001 in Israel in die bestehende Testanlage eingebaut und in Betrieb genommen. Ab Mai 2002 wurden Reformierungstests erfolgreich durchgeführt. In einem ther-

mischen Leistungsbereich von 100 bis 220 Kilowatt (thermisch), wurde Methan entsprechend dem theoretischen Gleichgewicht umgesetzt.

Im Rahmen einer Kostenvorstudie konnte gezeigt werden, dass es möglich ist, Wasserstoff aus Erdgas in einer 50 Megawatt (thermisch) großen Produktionsanlage für fünf Cent/Kilowattstunde (Heizwert Wasserstoff) bereitzustellen. Bei einer Verdoppelung des heutigen Erdgaspreises von angenommenen 20 Cent pro Normkubikmeter wird der solarbetriebene Prozess unter den gemachten Annahmen profitabel. Damit ermöglicht die solare Reformierung den Einstieg in die erneuerbare Wasserstoffwirtschaft zu einem akzeptablen Preis.

Im April 2004 startete das EU-Projekt SOLREF unter der Koordination des DLR, an dem Partner aus sieben Ländern beteiligt sind: Deutschland, Israel, die Niederlande, England, Griechenland, Italien und die Schweiz. Im SOLREF soll aufbauend auf den positiven Ergebnissen des SOLASYS Projektes, der Reformer dahingehend

modifiziert werden, dass er höhere Betriebstemperaturen und Drücken standhält. Weiterhin sollen durch innovative Neuerungen der Betrieb des Reformers verbessert und der Reformer wirtschaftlich konkurrenzfähiger gemacht werden. Parallel dazu werden Studien auf dem Gebiet der Sozioökonomie, Wirtschaftlichkeit und Markteinführung durchgeführt. Diese Vorarbeiten werden benötigt, um im nächsten Schritt eine Testanlage in einem größeren Maßstab in einem Erdgasfördergebiet in Süditalien zu realisieren.

Über diese Projekte hinaus versucht die Solarforschung im DLR die solare Reformierung in internationaler Zusammenarbeit, zum Beispiel auch mit Japan und Australien, weltweit zur Marktreife zu führen.

Dr. Stephan Möller ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am DLR-Institut für Technische Thermodynamik, Stuttgart und Koordinator des EU-Projektes SOLREF. Dr. Michael Epstein ist Direktor der Solar Research Unit am The Weizmann Institute of Science, Israel. ◀

Von Martin Roeb und Andrew Steele

SOLARER WASSERSTOFF

Thermochemische Spaltung von Wasser

Wasserstoff als möglicher Energieträger der Zukunft kann direkt aus dem Rohstoff Wasser hergestellt werden. Die Umsetzung dieses kohlenstofffreien Rohstoffs hinterlässt keine Klima beeinflussenden Emissionen. Ebenso kann auch beim Produktionsprozess die Bildung von CO_2 weitgehend vermieden werden, wenn man erneuerbare Energiequellen, insbesondere Sonnenenergie, nutzt.

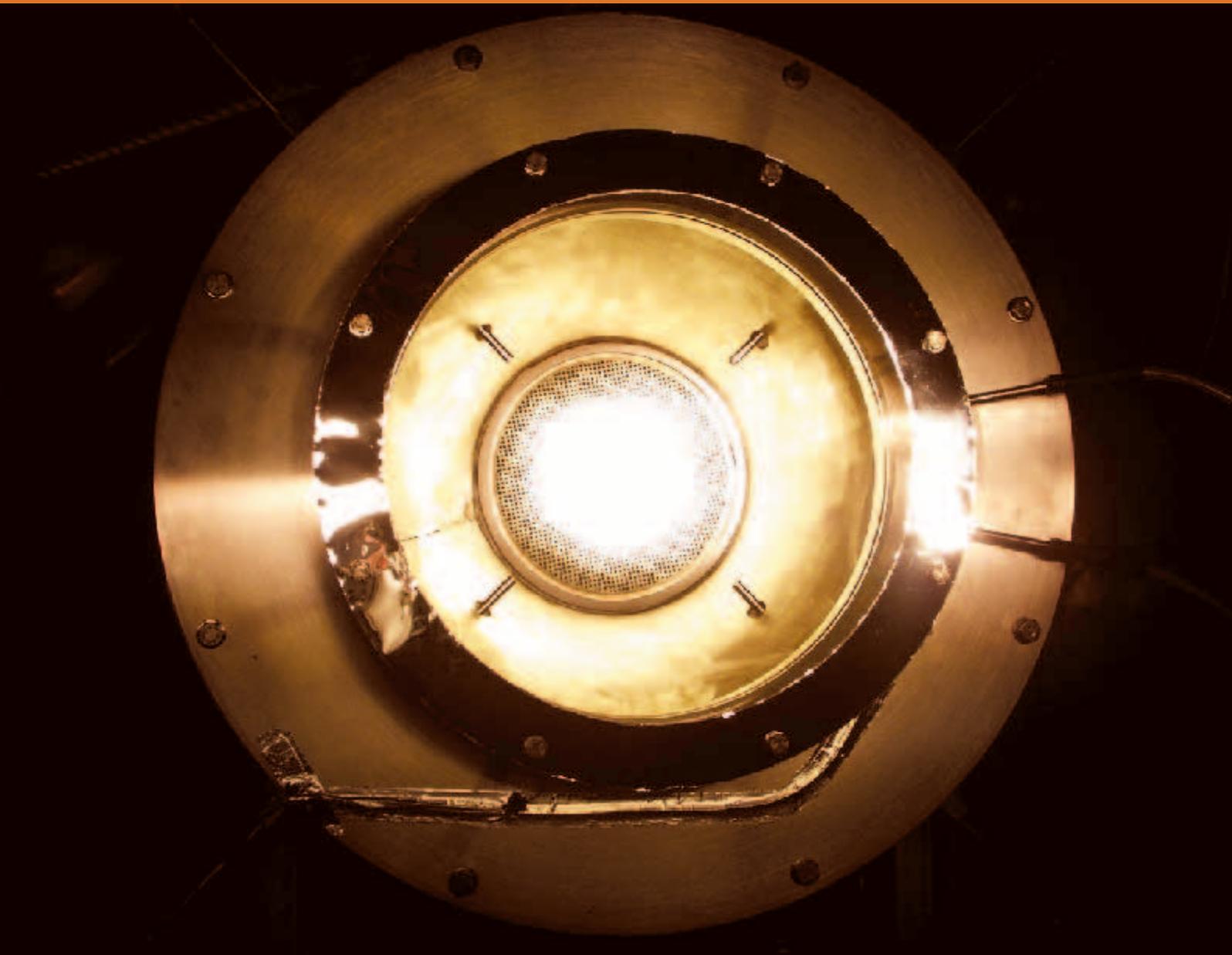


Abb.: Blick auf die bestrahlte Apertur des Reaktors.

Eine nahe liegende Lösung wäre die Elektrolyse von Wasser mit Solarstrom. Die Technologie dazu ist bereits verfügbar. Allerdings beinhaltet diese Lösung eine Serie von Energiewandlungsschritten: Sonnenenergie wird solarthermisch in Wärme und Dampf umgesetzt und danach durch eine Turbine in mechanische Energie. Diese wird in einem Generator in elektrische Energie umgewandelt. Anschließend wird der erzeugte Strom gleich gerichtet und in einen Elektrolyseur eingekoppelt, um schließlich in Form von Wasserstoff chemische Energie zu speichern. Jeder dieser Wandlungsschritte beinhaltet Verluste und macht so den produzierten Wasserstoff teuer.

Thermische Kreisprozesse

Mit einem Potenzial zu höheren Wirkungsgraden und daher auch mit einer verbesserten Wirtschaftlichkeit ist bei Prozessen zu rechnen, die gegenüber der Elektrolyse weniger Energiewandlungsschritte aufweisen. Dies ist der Fall bei der direkten Umwandlung von solarer Wärme in chemische Energie in Form von Wasserstoff, z.B. durch die thermische Spaltung von Wasser.

Eine direkte, rein thermische Spaltung von Wasserdampf führt erst oberhalb von 2.500 Grad Celsius zu einer ausreichenden Bildung von Wasserstoff und Sauerstoff. Allerdings erscheint eine ökonomische Nutzung dieser Reaktion wegen Materialproblemen und vor allem wegen der nicht erfüllbaren Notwendigkeit einer kontinuierlichen Wiedergewinnung und Erhaltung der Hochtemperaturwärme auf absehbare Zeit unmöglich. Im Gegensatz zur direkten Wasserspaltung ist eine indirekte thermische Wasserspaltung bei moderaten Temperaturniveaus (<1.300 Grad Celsius) durch das Ausnutzen von Kombinationen chemischer Reaktionen möglich. Führt man alle verwendeten Chemikalien außer dem eingesetzten Wasser und den produzierten Gasen Sauerstoff und Wasserstoff im Kreis, so spricht man von thermochemischen Kreisprozessen. Die Summenreaktion dieser Reaktionsfolge mit mindestens zwei Teilreaktionen ist stets die Spaltung von Wasser, das als einziger Stoff zugeführt werden muss, zu Wasserstoff und Sauerstoff, die als einzige Stoffe dem Kreisprozess entzogen werden.

Zwei dieser Kreisprozesse sind Inhalt aktueller Untersuchungen in europäischen Projekten unter Beteiligung von DLR und Johnson Matthey. Im Zentrum der Aktivitäten steht jeweils die Entwicklung von Konzepten und Technologien zur Einkopplung konzentrierter Strahlung in die jeweiligen Wasserstofferzeugungsprozesse.

Testanlage Sonnenofen

Das zentrale Instrument, das eine Qualifizierung und Verbesserung der entwickelten Technologie ermöglicht, ist der Sonnenofen in Köln, mit dem Reaktoren zur Wasserstofferzeugung getestet werden. Der Sonnenofen deckt durch Konzentrierung von Solarstrahlung die in den Reaktionen benötigten Wärmetönungen und stellt die Reaktionstemperaturen zwischen 800 und 1.300 Grad Celsius bereit. Der Sonnenofen als Testanlage fungiert dabei als Modell für eine Solarturmanlage, die zum Betreiben der genannten Prozesse im technischen Maßstab zum Einsatz käme.

Das Projekt HYDROSOL

In dem europäischen Projekt HYDROSOL wird zurzeit ein zweistufiger Kreisprozess auf Basis eines Metalloxid-Systems (hauptsächlich Ferrite) untersucht, das Sauerstoff aus Wassermolekülen abspalten und reversibel in seine Kristallstruktur einbinden kann. Im ersten Schritt wird der am Metalloxid vorbeiströmende heiße Wasserdampf durch Bindung des Sauerstoffs an das angeregte Metalloxidgitter bei Temperaturen von etwa 600 bis 800 Grad Celsius gespalten und H_2 freigesetzt. Im zweiten Schritt wird bei Temperaturen von 1.100 bis 1.300 Grad Celsius der zuvor in das Gitter eingebaute Sauerstoff wieder abgegeben und das Metalloxid regeneriert.

Die zentrale Innovation des Projekts ist die Kombination einer keramischen Träger- und Absorberstruktur, die mit konzentrierter Solarstrahlung auf hohe Temperaturen erhitzt werden kann, mit einer Metalloxidbeschichtung, die in der Lage ist, Wasser zu spalten. Dies beinhaltet Vorteile gegenüber vergleichbaren Verfahren, da hier der komplette Prozess in einem einzigen Konverter durchgeführt werden kann. Somit müssen keine Feststoffe im Kreis geführt werden, und die Produktseparierung reduziert sich auf eine Gastrennung.

Mit diesem Prozess ist es vor kurzem erstmals im Sonnenofen des DLR in Köln-Porz gelungen, Wasserdampf durch konzentriertes Sonnenlicht thermisch zu spalten und dadurch solaren Wasserstoff zu erzeugen. Beide Schritte der solarthermischen Wasserspaltung konnten in mehreren aufeinander folgenden Zyklen durchgeführt werden. Ein Schwerpunkt der nun folgenden Arbeiten wird die Optimierung von Stoffumsatz und Ausbeute sowie die Verbesserung der Langzeitfestigkeit der verwendeten Metalloxidsysteme sein.

Das Projekt HYTHEC

In einem weiteren europäischen Verbundprojekt (HYTHEC) wird der so genannte Schwefel-Iod-Kreisprozess sowie der damit technisch verwandte Westinghouse-Prozess untersucht. Diesen Prozessen werden im Vergleich mit anderen Kreisprozessen die höchsten – technisch erreichbaren – Wirkungsgrade und das größte Potenzial für eine technische Umsetzbarkeit prognostiziert.

Beide Prozesse haben einen Reaktionschritt gemeinsam. Es ist der Hochtemperaturschritt zur Spaltung von Schwefelsäure. Hierzu wird die meiste Energie benötigt. Dieser Schritt wird daher auch der wichtigste Ansatzpunkt für die Einkopplung konzentrierter Solarstrahlung sein. Ein Schwerpunkt der Technologieentwicklung im Projekt HYTHEC liegt auf der Auslegung, dem Bau und der Erprobung von so genannten Receiver-Reaktoren im Sonnenofen. Diese dienen gleichzeitig als Strahlungsabsorber und Behälter zum Durchführen der chemischen Reaktion, hier der Schwefelsäurespaltung. In beiden Projekten werden Verfahren zur solaren Wasserstofferzeugung im Hinblick auf die Frage entwickelt, erprobt und schließlich bewertet, ob sie in der Zukunft dazu beitragen können, regenerativ erzeugten Wasserstoff wirtschaftlich konkurrenzfähig zu machen. Die ersten Ergebnisse stimmen optimistisch, dass dies erreicht werden kann.

Dr. Martin Roeb ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am DLR-Institut für Technische Thermodynamik, Solarforschung, Köln. Dr. Andrew Steele ist wissenschaftlicher Mitarbeiter bei Johnson Matthey Fuel Cell Ltd.. ◀

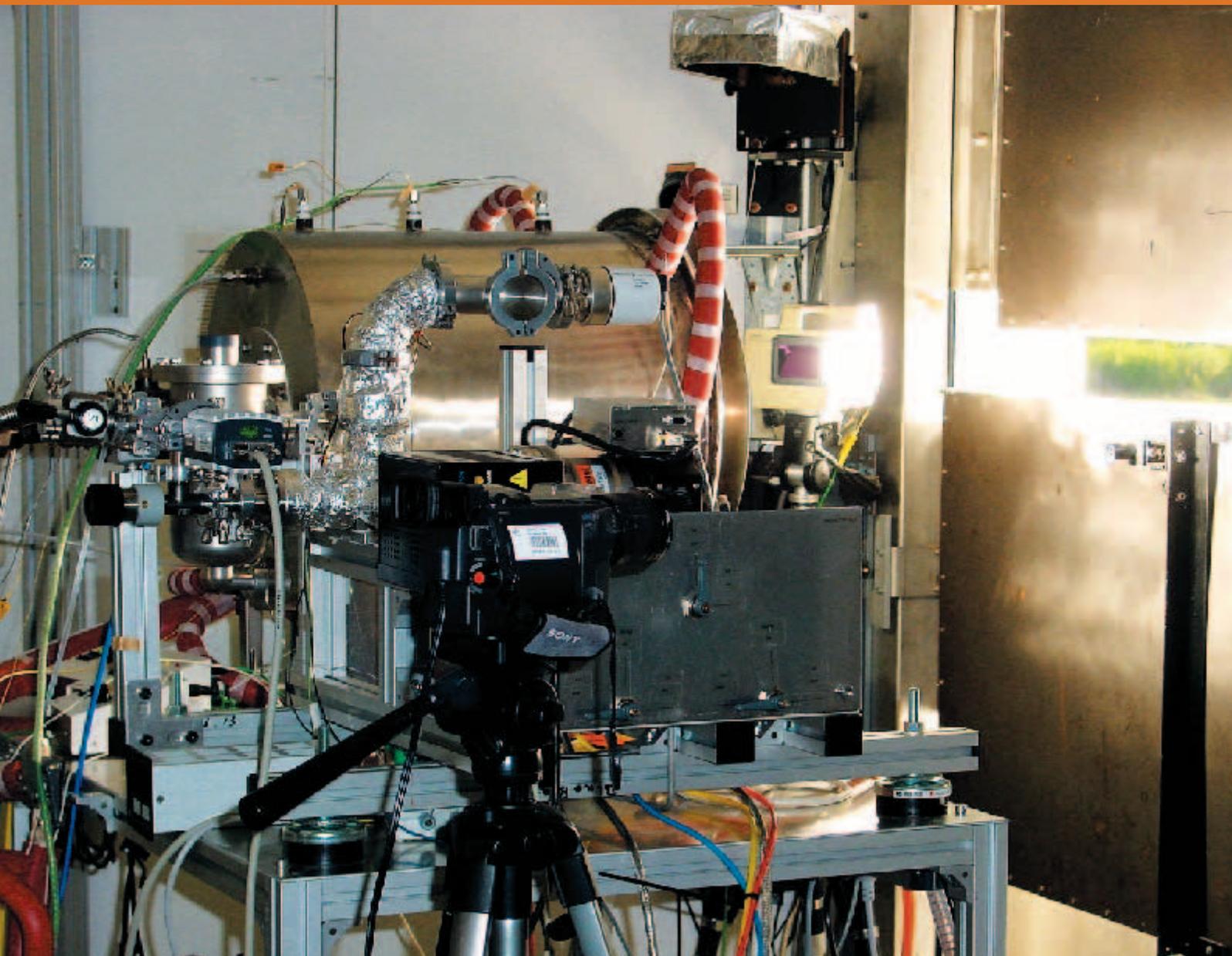


Abb.: Reaktor zur Wasserspaltung und Messtechnik im Betrieb.

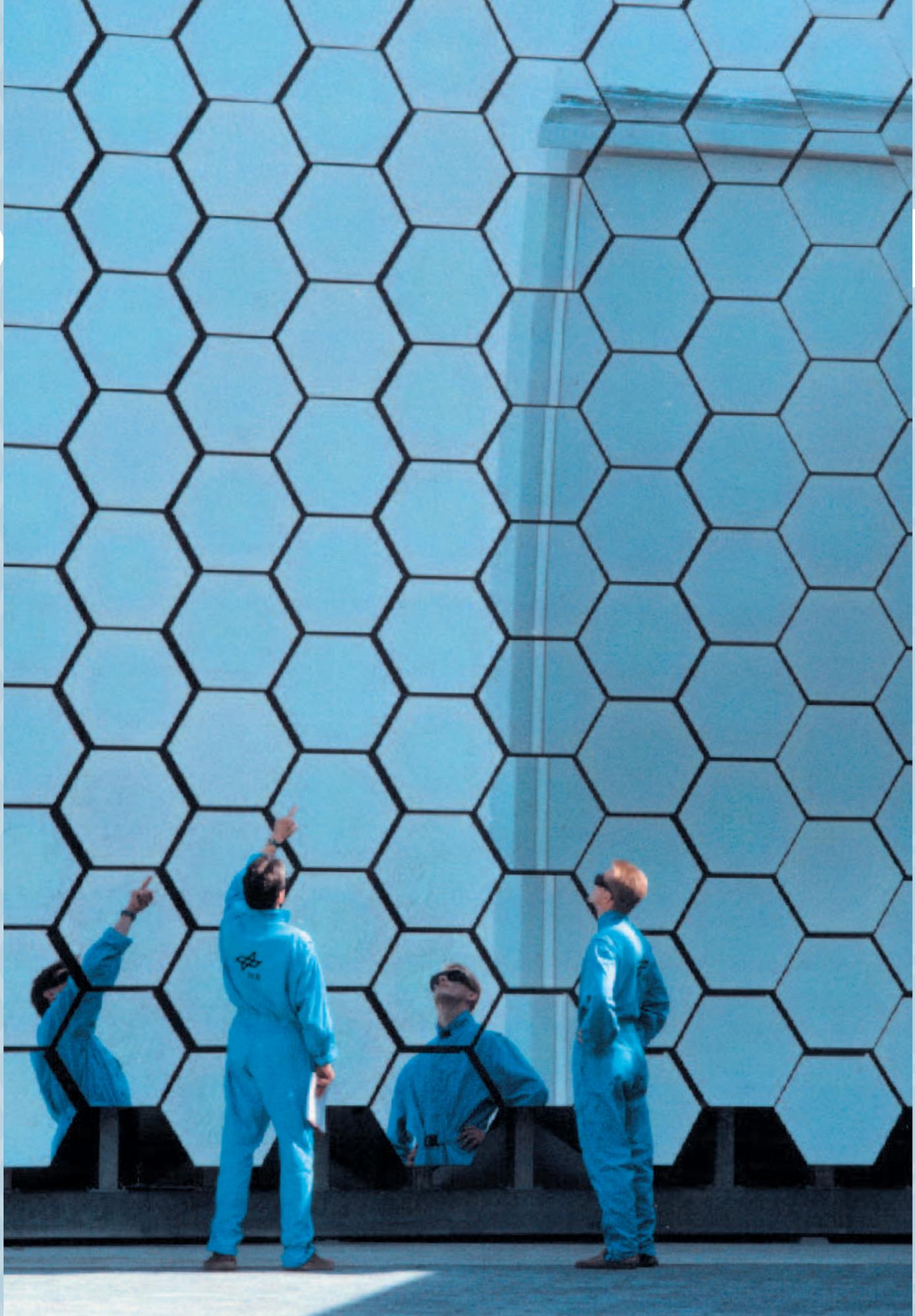
Von Andreas Neumann

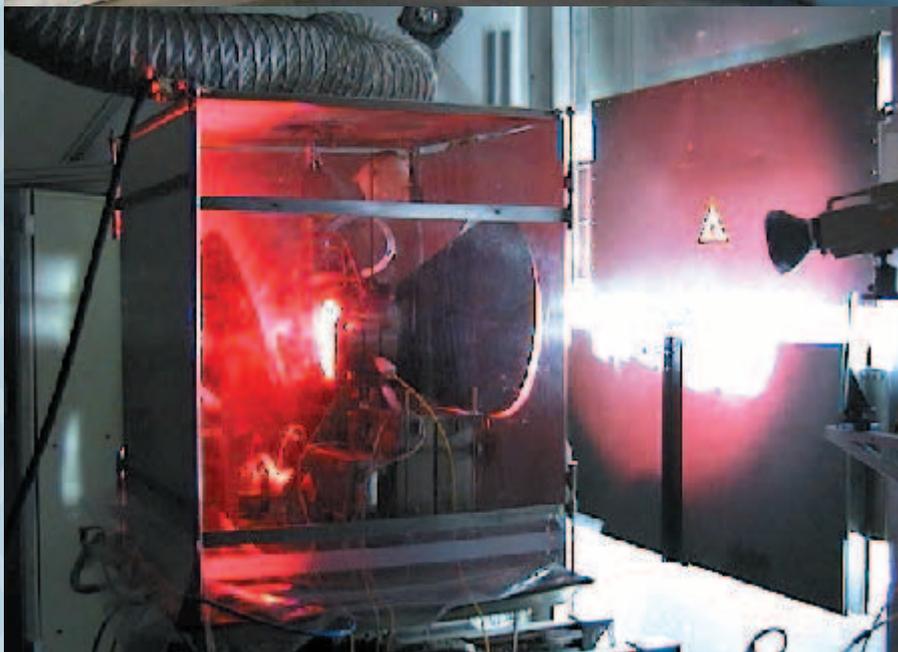
ZEHN JAHRE SONNENOFEN

Rückblick – Highlights – Perspektiven

Ende der achtziger Jahre hatten mutige Wissenschaftler des DLR die Idee, einen Sonnenofen am Standort des DLR in Köln zu errichten. Als sehr fruchtbarer Umstand für die Umsetzung kam hinzu, dass das Land Nordrhein-Westfalen die Arbeitsgemeinschaft Solar (AG Solar) ins Leben gerufen hatte, in deren Projekträgerschaft ein solches Vorhaben sehr gut hineinpasste. Die Projektförderung begleitete den Sonnenofen bis in das Jahr 2002, wobei sowohl der Sonnenofen selbst wie auch zahlreiche Experimente unterstützt werden konnten. Zu den Themen der Solartechnik gab es noch viele offene Fragestellungen. Der Sonnenofen sollte dazu dienen, viele dieser Themen im Rahmen von Forschungsprojekten anzugehen.

Abb. rechts: Der Konzentrador als Herzstück des Sonnenofens.





Weltweit gibt es einige Beispiele für den erfolgreichen Betrieb von Sonnenöfen für Forschungszwecke. Hervorzuheben ist hier der ein Megawatt Sonnenofen im französischen Odeillo, in den Pyrenäen, und der mit zehn Kilowatt deutlich kleinere Sonnenofen des National Renewable Energy Laboratory in Golden bei Denver in den USA. Die besonders engen Kooperationen mit diesen und weiteren Einrichtungen hat auch wesentlich zum Erfolg des DLR-Sonnenofens beigetragen.

Mit dem Sonnenofen wurde damals für die solare Energietechnik in Köln der erste Schritt weg von Managementaufgaben in Richtung Experimentiereinrichtungen unternommen. Dies begann 1992 mit einer Wetterstation auf dem Verwaltungsgelände des DLR. So wurden die ersten Daten zur solaren Direktstrahlung genau am Standort des DLR in Köln gewonnen, die uns Aussagen geben sollten über das für einen Sonnenofen nutzbare Potenzial. Für diesen Betrieb mit Sonne stehen im Mittel im Kölner Raum 1.500 Sonnenstunden zur Verfügung. Dies bestätigen unsere Messdaten seit 1992, wobei das Jahr 2003 mit seinen 2020 Sonnenstunden hier die Rekordmarke setzte. Etwa die Hälfte der Stunden können für einen effizienten Betrieb des Sonnenofens genutzt werden. Dies ist ein wichtiges Ergebnis aus unserer nunmehr zehnjährigen Betriebserfahrung.

Der Sonnenofen

Das Konzept der Anlage im amerikanischen Golden hatte Merkmale, die besonders vorteilhaft für unsere Anwendungen erschienen. Ein ortsfester Brennpunkt, der Fokus, der in einem Laborgebäude hohe Bestrahlungsstärken zur Verfügung stellt, und auch die so genannte Off-Axis Geometrie, bei der die Experimentaufbauten nicht den Lichtkonzentrator abschatten.

Abb. oben: Sonnenofenanlage und Testgelände im DLR, Köln.

Abb. Mitte: Konzentrador und Strahl Eintrittsöffnung im Laborgebäude.

Abb. unten: Solarreaktor für photochemische Produktionsprozesse.

Insbesondere für photochemische Experimente ist auch der Gehalt an ultravioletter Strahlung im Sonnenlicht wichtig, so dass die Reflektoren (Heliostat und Konzentrator) auch UV übertragen müssen.

Messtechniken

Die Experimente im Sonnenofen erfordern den Umgang mit intensiver Lichtstrahlung sowie auch das Messen und Verfolgen hoher Temperaturen. Es ist wichtig, Strahlungsverteilungen flächig aufzulösen, um auch thermische Belastungsspitzen, sogenannte Hotspots, herauszufinden.

Um eine Beeinflussung der Probekörper und Flächen zu vermeiden, werden am DLR-Sonnenofen in erster Linie berührungsfreie Messmethoden eingesetzt. Diese spezialisierten Systeme müssen weiterentwickelt und neue Ansätze erprobt werden. Diese den Sonnenofen begleitenden Arbeiten münden zum Teil in Patente.

Betrieb

Die offizielle Inbetriebnahme des Sonnenofens fand am 21. Juni 1994 statt.

Während der ersten Betriebsphase mussten neben den experimententypischen Fragen und Problemen auch Neuland beschritten werden, was den Betrieb einer vom Wetter abhängigen Anlage angeht. Es fehlten statistische Grundlagen zur Erstellung monatlicher Test-Zeitpläne, es waren keine Erfahrungen in Bezug auf die Personaleinteilung in Betriebs- und Bereitschaftszeiten und ein schneller Wechsel zwischen beiden vorhanden. Auch extrem lange Sonnentage im Sommer (Sonne von sechs Uhr morgens bis 21 Uhr abends) und Wochenend-Arbeit galt es zu klären.

Auf Wunsch des Geldgebers, das Land NRW, wurden ab 1999 dann auch die Betriebskosten der Anlage den Kunden in Rechnung gestellt, so wie das bei anderen Prüfständen (Windkanäle, Brennkammerteststände) im DLR üblich ist. Hierfür wurde ein einsichtiger und für die

Nutzer nachvollziehbarer Modus zur Erfassung der Betriebsstunden unter Sonne gefunden.

Experiment

Die Experimente kamen aus ganz unterschiedlichen Disziplinen. Angefangen bei Werkstoff-Experimenten, bei denen briefmarkengroße keramische Proben für kurze Zeit Thermoschocks ausgesetzt wurden, über Absorberstrukturen für solarthermische Kraftwerke, bis hin zu komplexen chemischen Prozessierungs-Experimenten, bei denen noch zusätzliche Löscheinrichtungen installiert werden mussten, um den sicheren Umgang mit brennbaren Stoffen zu gewährleisten.

Die Experimente können in verschiedene Gruppen eingeteilt werden:

- Werkstoff-Experimente: hier wird der Sonnenofen als Licht- oder Wärmequelle benutzt, unabhängig von einem Nutzen für solare Energietechniken.
- Photochemische Experimente: hierbei werden von Photonen angetriebene chemische Reaktionen untersucht, z.B. für den Schadstoffabbau oder auch für Synthesereaktionen.
- Komponententests: hiermit sind Tests an Bauteilen gemeint, z.B. Absorberstrukturen, die speziell für solarthermische Anwendungen, vorwiegend im Kraftwerksbereich, vorgesehen sind.

Hier seien einige Beispiele genannt:

- Tests an Hochtemperaturwerkstoffen, durch die Ruhruniversität Bochum
- keramische Verbundsysteme, Institut für Werkstoff-Forschung des DLR
- Experiment zur Photooxidation, Solare Chemie, DLR
- Drehrohrreaktor für Aluminiumrecycling, Solare Chemie, DLR
- Hochtemperaturschmelze, Universität Dortmund
- Receivertests, Solarthermie, DLR
- druckaufgeladener Receiver, DLR
- Blauer Strahl, Lackalterung, DLR und BASF
- Fotooxidation, Solare Chemie, DLR
- internationale Radiometer Vergleichskampagne 2000 (DLR, Frankreich, Israel, Spanien)
- Solar Cell Test für Mission Bepi Colombo, Galileo Avionica (I)
- EU-Verbundprojekt Hydrosol/Solarer Wasserstoff

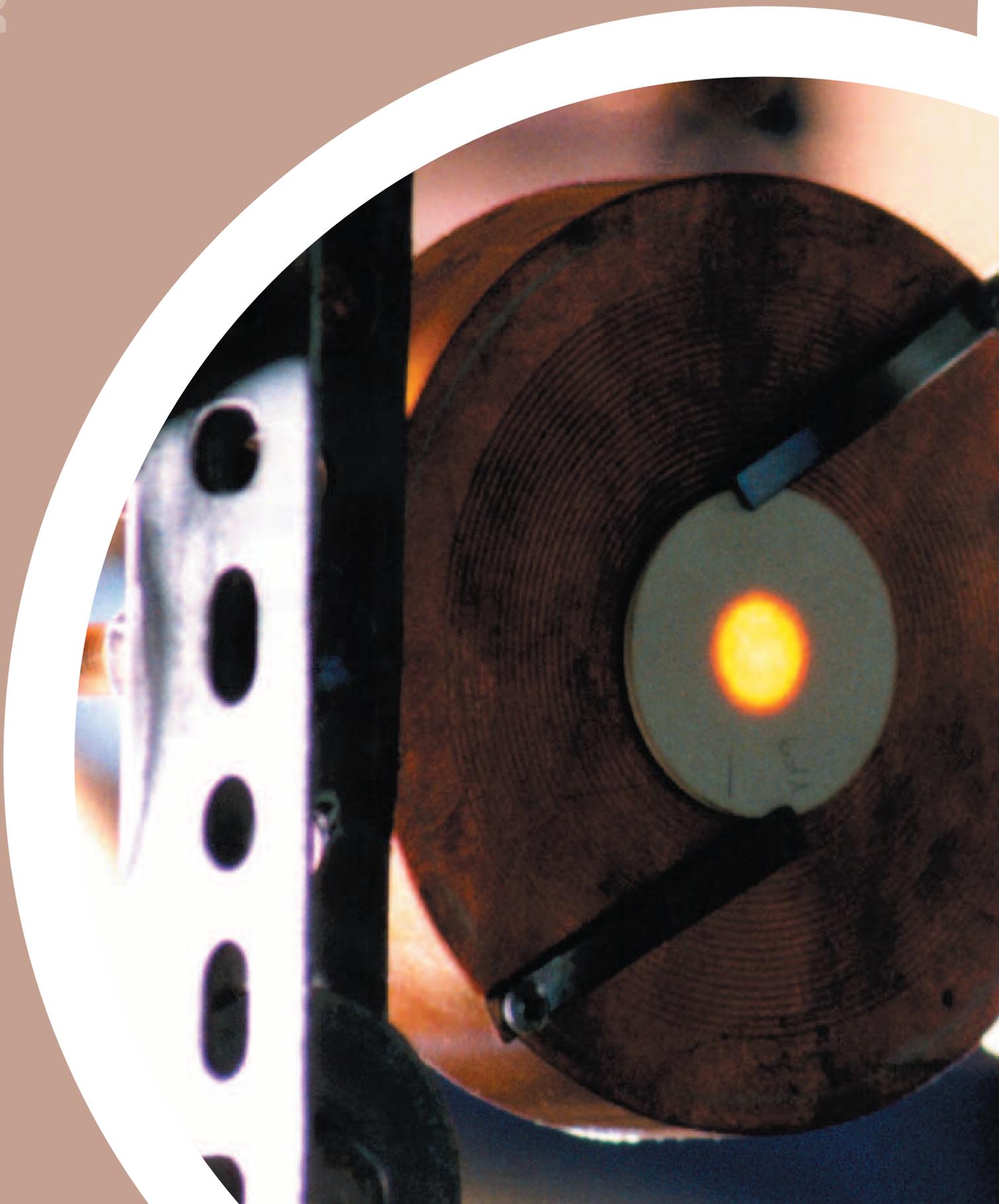
Man erkennt aus dieser Aufstellung, dass es auch Experimente gab, die sich nicht unbedingt in eine der obigen drei Gruppen einordnen ließen. So werden seit 2002 auch Forschungs- und Testexperimente für Weltraumanwendungen im Industrieauftrag durchgeführt. Diese benötigen zwar auch das Sonnenspektrum, um möglichst realitätsnahe Ergebnisse zu erzielen. Sie sind aber durch die Vakuumbedingungen und teilweise auch Kühlanforderungen von -180 Grad Celsius ungleich aufwendiger in der Durchführung.

Perspektiven

Nach nunmehr zehnjährigem Betrieb des Hochflusssdichte-Sonnenofens mit einer sehr hohen Auslastung konnten wir einen großen Erfahrungsschatz zusammenbringen, sowohl was die Durchführung von Experimenten aus ganz unterschiedlichen Forschungsbereichen angeht, wie auch in Bezug auf die Nutzung und betriebswirtschaftliche Führung einer Solaranlage unter den Kölner Einstrahlungsbedingungen, die sicher nicht mit Standorten aus dem Sonnengürtel zu vergleichen sind. Eindeutig positiv bei der Standortwahl ist zu bemerken, dass die gute Infrastruktur des DLR mit seinen Werkstätten und Forschungsinstituten ein flexibles Reagieren auf Kundenwünsche oder Probleme bei Experimenten ermöglicht. Dies dokumentieren besonders die komplexen Experimente der letzten Jahre.

So konnte der Sonnenofen auch nach der Beendigung der NRW-Förderung und trotz der allgemeinen Engpässe in der Forschungslandschaft erfolgreich weiterbetrieben werden. Große EU-Projekte, z.B. zur solaren Wasserstoff-Herstellung, oder einige Industrieaufträge geben uns eine solide Perspektive auch für die nächsten Jahre.

Dr. A. Neumann ist wissenschaftlicher Mitarbeiter und Leiter des Sonnenofens im DLR-Institut für Technische Thermodynamik, Köln-Porz . ◀



Von Martin Schmücker

Material- forschung im Sonnenofen

Werkstoffprüfung unter
extremen Bedingungen



Mit konzentrierter Sonnenstrahlung können extreme Temperaturen erreicht werden. Hohe Aufheiz- und Abkühlraten sind möglich; im Allgemeinen kann auf begrenzende Ofenwandungen verzichtet werden. Damit stellt der Sonnenofen, in Verbindung mit einer geeigneten Mess- und Regeltechnik, ein einzigartiges Prüfwerkzeug für Hochtemperaturwerkstoffe dar, wie Kooperationen mit dem DLR-Institut für Werkstoff-Forschung gezeigt haben.

Qualifizierung von keramischen Strukturwerkstoffen

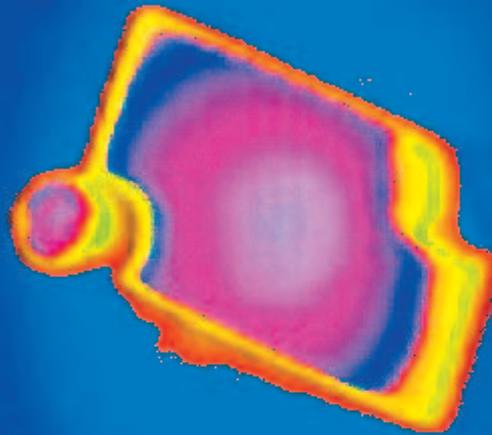
Der Einsatz von Keramik wird häufig durch das inhärent spröde Bruchverhalten und die damit verbundene Thermoschockempfindlichkeit begrenzt. Große Anstrengungen werden unternommen, keramische Werkstoffe mit einem quasiduktilen, schadenstoleranten Verformungsverhalten zu entwickeln, beispielsweise durch den Einbau hochfester keramischer Langfasern. Das Schadensverhalten keramischer Werkstoffe kann im Sonnenofen einfach und schnell durch einen „Hot-Spot-Test“ abgeschätzt werden. Dabei bewirkt eine im Strahlengang des Sonnenofens eingebrachte gekühlte Lochblende, dass plattenförmige Proben in der Mitte aufgeheizt werden, während die Randbereiche auf niedriger Temperatur verbleiben. Es bildet sich in radialer Richtung ein Temperaturgradient aus, der mit Hilfe einer Infrarotkamera registriert wird. Der

Temperaturgradient verursacht mechanische Spannungen, die zum Probenversagen führen können. Der maximal erreichbare Temperaturgradient gilt als Maß für die Thermoschockbeständigkeit der untersuchten Keramik.

Oxidationsschutz für kohlenstoffbasierte Werkstoffe

Kohlenstofffaserverstärkter Kohlenstoff (C/C) ist aufgrund seiner überwiegend kovalenten chemischen Bindung thermisch und mechanisch äußerst stabil. Allerdings versagen ungeschützte C/C-Werkstoffe oberhalb 300 bis 400 Grad Celsius durch Oxidation. Seit vielen Jahren wird daher intensiv an Schutzschichten für C/C- und C/C-SiC-gearbeitet. Als aussichtsreiche Beschichtungswerkstoffe gelten derzeit die Yttriumsilikate Y_2SiO_5 und $Y_2Si_2O_7$ sowie Mullit. Die Wirksamkeit der Beschichtungssysteme kann im Sonnenofen praxisnah simuliert werden. Hierzu werden die versiegelten Kohlenstoffwerkstoffe in Luftatmosphäre bei Temperaturen

gen ungeschützte C/C-Werkstoffe oberhalb 300 bis 400 Grad Celsius durch Oxidation. Seit vielen Jahren wird daher intensiv an Schutzschichten für C/C- und C/C-SiC-gearbeitet. Als aussichtsreiche Beschichtungswerkstoffe gelten derzeit die Yttriumsilikate Y_2SiO_5 und $Y_2Si_2O_7$ sowie Mullit. Die Wirksamkeit der Beschichtungssysteme kann im Sonnenofen praxisnah simuliert werden. Hierzu werden die versiegelten Kohlenstoffwerkstoffe in Luftatmosphäre bei Temperaturen



bis 1.800 Grad Celsius getestet und durch schroffe Temperaturwechsel (z.B. zwischen 800 und 1.400 Grad Celsius) zyklisch belastet, während die Oxidation des Grundwerkstoffs gravimetrisch verfolgt wird.

Stabilität von keramischen Wärmedämmschichten auf Nickelbasislegierungen

Durch den Einsatz von ZrO_2 -Wärmedämmschichten auf heißgasleitenden metallischen Triebwerkskomponenten (z.B. Turbinenschaufeln) können Lebensdauer und Wirkungsgrad von Flug- und Gasturbinen signifikant erhöht werden. Das Belastungsprofil der metallkeramischen Schichtverbunde kann im Sonnenofen real-

tätsnah und zeitraffend simuliert werden, indem die metallseitig gekühlten Proben durch gepulste Sonnenstrahlung auf unterschiedlichen Temperaturniveaus thermisch zyklert werden. Nachfolgende mikrostrukturelle Analysen ermöglichen ein tieferes Verständnis der möglichen Schädigungsmechanismen.

Radartransparenz bei hohen Temperaturen

Suchkopfabdeckungen (Radome) konventioneller Flugkörper bestehen aus radartransparenten Polymerwerkstoffen. Die Radome zukünftiger Hyperschall-Flugkörper sind deutlich höheren thermischen und erosiven Belastungen ausgesetzt, so dass die bisherigen Materialien durch faserverstärkte Keramik ersetzt werden sollen. Über die temperaturabhängige Strahlungsdurchlässigkeit von keramischen Verbundwerkstoffen ist bisher jedoch nur wenig bekannt. Für Untersuchungen zur Radartransparenz bei hohen Temperaturen ist der Sonnenofen beson-

ders geeignet, da störende Ofenwandungen oder nahe der Probe positionierte Strahlungsquellen, die die spektroskopischen Messungen beeinträchtigen würden, nicht vorhanden sind.

PD Dr. Martin Schmücker ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im DLR-Institut für Werkstoff-Forschung, Köln-Porz. ◀

Abb. vorhergehende Seite: Versuchsaufbau zur Hochtemperaturprüfung von Keramikwerkstoffen.

Abb. links: Temperaturverteilung bei thermischer Zyklierung von Schichtwerkstoffen.



Abb. rechts: Venus-Express Sonde (Artist View).

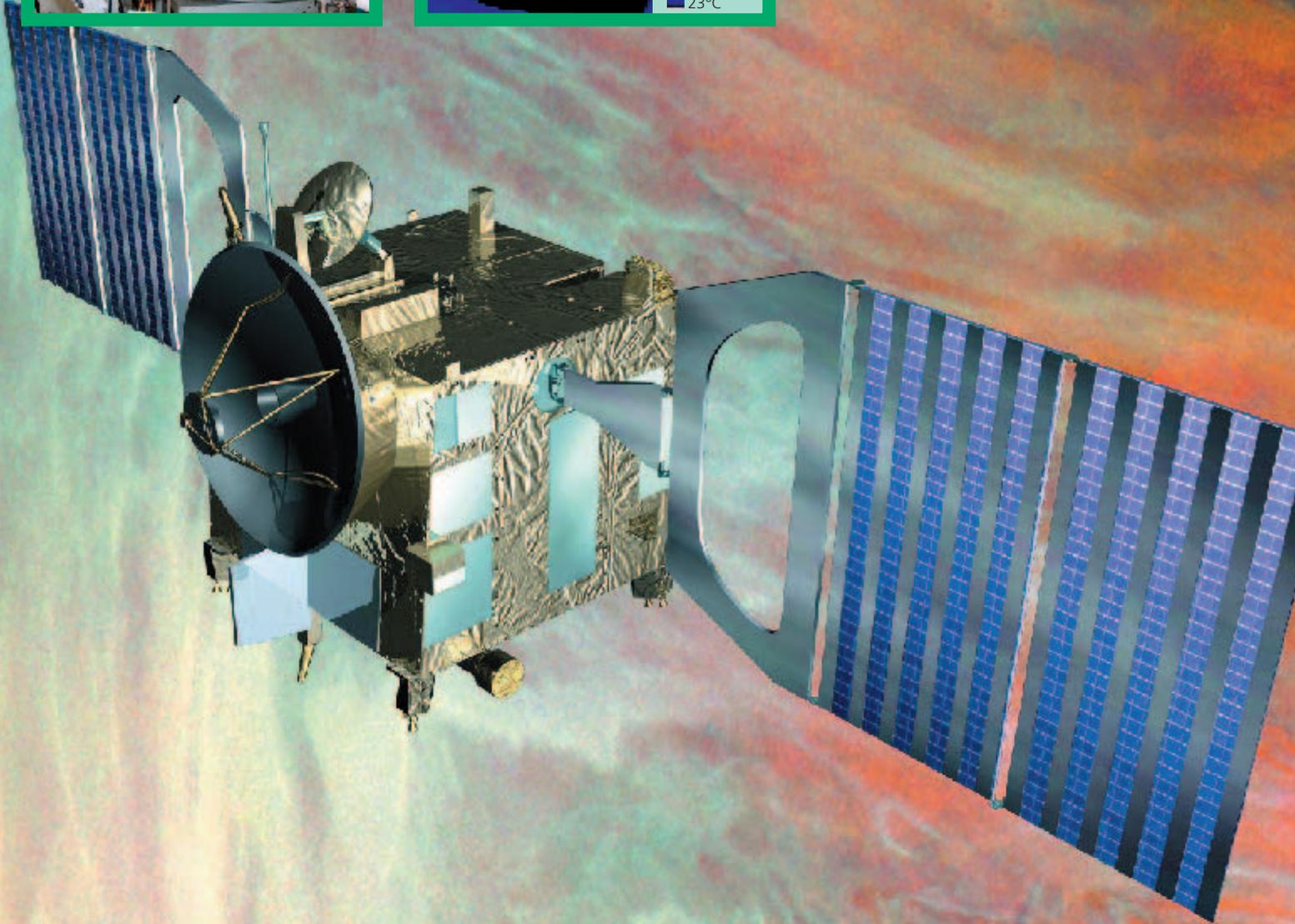
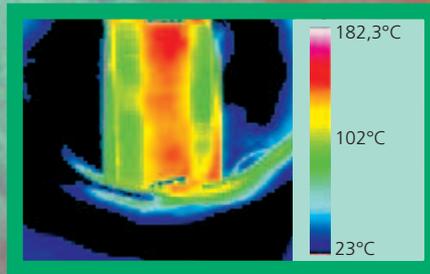
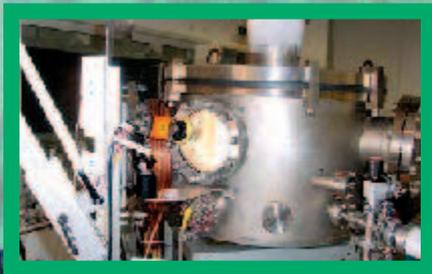
Abb. kleine Bilder von links nach rechts:
Raumsonde Venus-Express;
Vakuumkammer unter Bestrahlung;
Temperaturverteilung auf dem Solarzellen-
array.

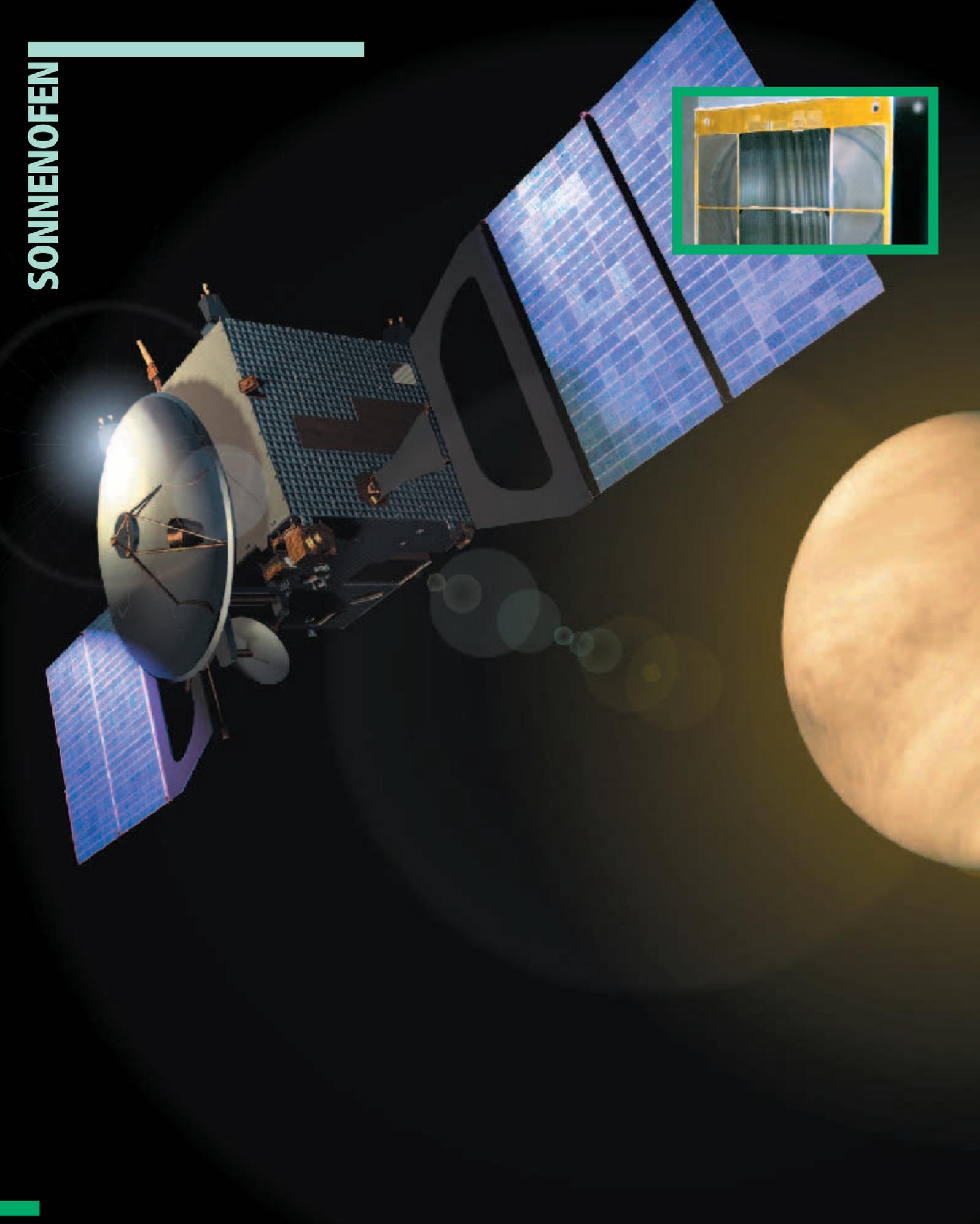
Von Andreas Brandl

VENUS EXPRESS

Belastungstests im Sonnenofen des DLR

Ende 2005 soll die erste ESA-Mission zur Venus vom russischen Weltraumbahnhof Baikonur zum heissesten Planeten unseres Sonnensystems starten. Nach einer etwa 150-tägigen Reise zu dem von dichten Wolkenschichten umhüllten Planeten wird die Sonde für mehrere Jahre die dortige Atmosphäre und Plasmaumgebung aus einer stark elliptischen Bahn untersuchen und unter anderem neue Erkenntnisse über den Treibhauseffekt sammeln können.





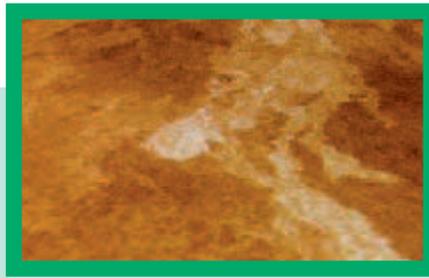
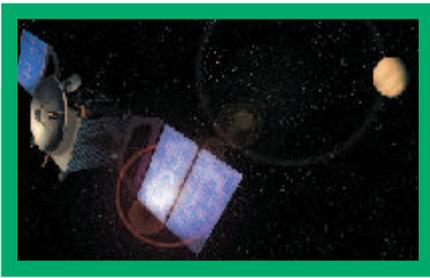


Abb. links: Mars-Express Sonde.

Abb. kleine Bilder von links nach rechts:
Teilansicht PV-Array;
Mars-Express Sonde;
Bergkette auf dem Mars

Die Herausforderung

Anders als die bereits erfolgreich arbeitende „Schwestersonde“ MarsExpress, erfordert die Nähe des Planeten Venus zur Sonne, der Abstand beträgt nur etwa 0,72 AU (1 AU entspricht der Entfernung von der Erde zur Sonne), einen besonderen Schutz vor der intensiven Sonnenstrahlung, die mit etwa 2.600 Watt pro Quadratmeter ungefähr doppelt so hoch ist wie in Erdnähe. Zusätzlich ist das Rückstrahlvermögen (Albedo) der Venus weitaus höher als das der Erde, was zu einer zusätzlichen Strahlenbelastung im optischen und im infraroten Bereich führt. Diese extremen Bedingungen können die Sonde und vor allem die für die Stromerzeugung verwendeten Solarzellen und deren Träger soweit erhitzen, dass sie nicht mehr zuverlässig funktionieren oder gar zerstört werden können. Das Solar Array Centre der Firma EADS Astrium in Ottobrunn bei München kann auf eine langjährige Erfahrung in der Entwicklung und im Bau der für die Stromversorgung zuständigen Solarpanele zurückblicken und ist auch bei VenusExpress maßgeblich an der Entwicklung, Bau sowie den Tests beteiligt. Besonderes Augenmerk musste bei der Entwicklung auf die Thermalkontrolle gelegt werden. Hierfür wurden sehr viele zeitintensive Berechnungen durchgeführt, die nicht nur die Wärmebelastung durch die hohe Sonnenintensität umfassten, sondern auch die bei den zu erwartenden Temperaturen von bis zu 150 Grad Celsius eingeschränkte mechanische Stabilität der Solarpanele betrafen. Diese wurden im Auftrag von EADS Astrium bei EADS Space Transportation in Ottobrunn durchgeführt. Aufgrund dieser Berechnungen wurden um-

fangreiche Tests der Solarpanele durchgeführt um die für die Auslegung benötigten Berechnungen zu verifizieren sowie die Funktionsfähigkeit aller Komponenten zu garantieren.

Einsatz des Sonnenofens

Besonders hilfreich erwies sich der vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) betriebene Sonnenofen in Köln-Porz. Mittels zahlreicher Spiegelsysteme kann hier Sonnenlicht auf einen Punkt in einen vakuumisierten Probenraum gebündelt werden. Diese Anordnung erreicht mühelos die Strahlenintensität, wie man sie in Venusnähe erwartet und ist daher eine geeignete Versuchsanordnung, um die zu erwartenden Bedingungen an einem auf VenusExpress verwendeten Solarzellenarray zu simulieren. Für die im August 2003 durchgeführten Experimente wurde ein etwa 25 mal 25 Zentimeter großer Versuchsträger gebaut, auf dem sich eine Reihe von Solarzellen und zwei Reihen von Hitzeschutzkacheln befinden und der auf VenusExpress verwendeten Anordnung sehr ähnlich sind. Ziel dieser Kampagne war es, die auftretende Temperaturverteilung des für diesen Versuch hergestellten Solarzellenarrays mit einer Infrarotkamera zu messen und mit den vorher durchgeführten Berechnungen abzugleichen sowie auf Schäden durch die herrschenden Temperaturgradienten hervorgerufenen mechanischen Spannungen zu achten. Während der Mission treten auf dem Solarpanel große Temperaturunterschiede zwischen der von der Sonne beschienenen und der Sonne abgewandten Seite auf, die durchaus zu Beschädigungen führen können. Ebenso kritisch sind Phasen, in denen die

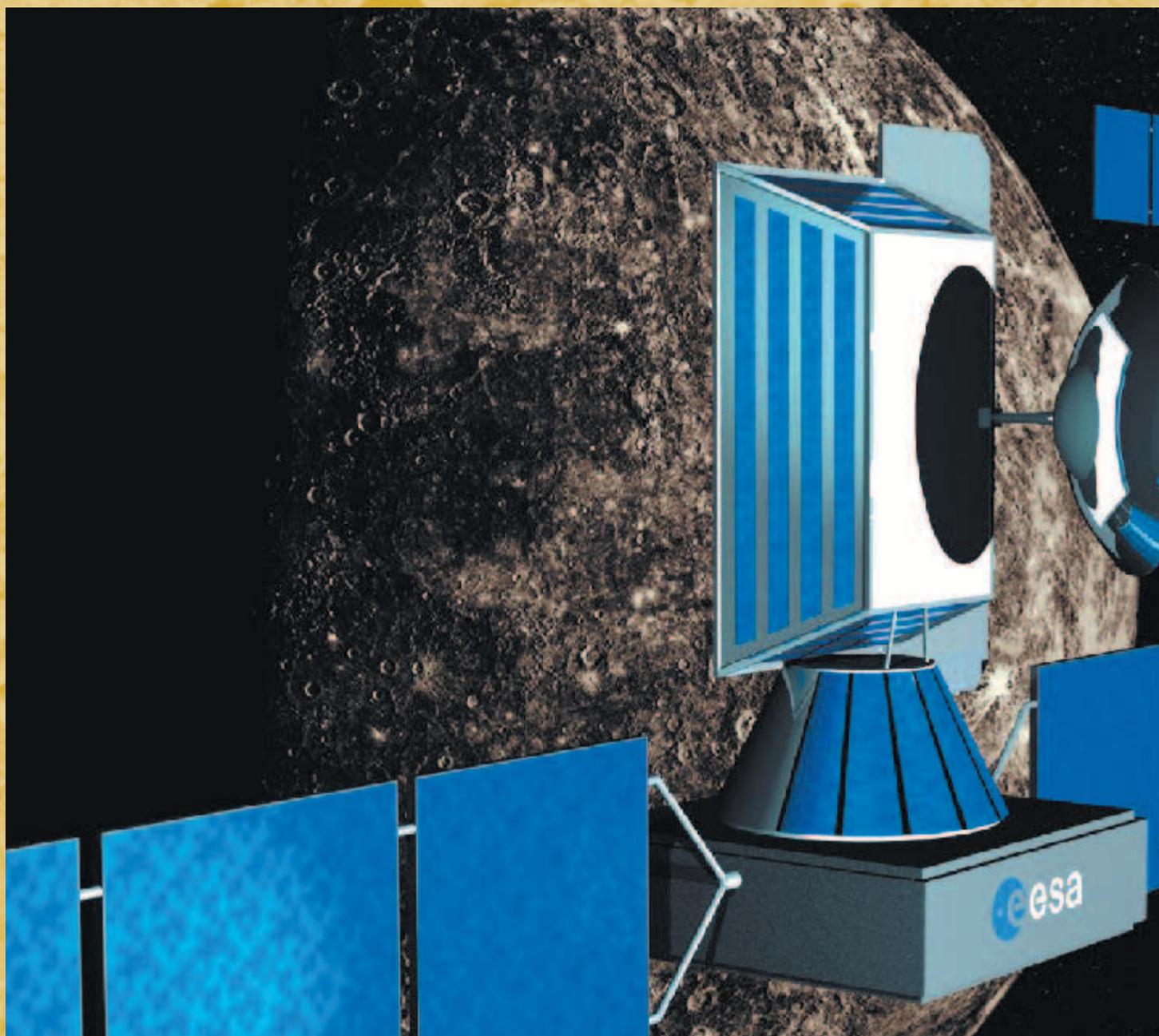
Sonde in den Venus Schatten eintaucht. Diese sprunghafte Änderung der Strahlenbelastung kann durch das unterschiedliche Abkühlverhalten der Materialien zu starken mechanischen Belastungen bis hin zur Rissbildung führen. Diese Situation wurde im Sonnenofen ebenso simuliert, wie der Einfluss elektrischer Komponenten auf die Temperaturverteilung des Solarzellenarrays. In einer ersten Versuchsreihe wurde das Solarzellenarray für etwa 30 Minuten einer Strahlenintensität von 2,5 Kilowatt pro Quadratmeter ausgesetzt und die sich einstellende Temperaturverteilung gemessen, deren Maximum sich knapp unterhalb von 150 Grad Celsius einstellte. In der sich anschließenden Versuchsreihe wurde die Temperatur nicht konstant gehalten, sondern sollte von -120 Grad Celsius bis etwa 90 Grad Celsius in mehreren Zyklen von jeweils bis zu 40 Minuten variieren, um die Temperaturverteilung während der Aufheiz- und Abkühlphasen zu bestimmen. Die durchgeführten Messreihen ergaben eine hervorragende Übereinstimmung mit den von uns durchgeführten Berechnungen. Es zeigte sich weiterhin, dass die gewählte Anordnung von Hitzeschildkacheln und Solarzellen ohne weiteres den Bedingungen in Venusnähe widerstehen kann und nicht durch die enorme Belastung beschädigt oder zerstört wird. Die Kombination von Berechnung und Tests im Sonnenofen des DLR war hier eine notwendige Voraussetzung für die erfolgreiche Entwicklung der Solarpanele für VenusExpress.

Dr. Andreas Brandl, EADS Astrium, Ottobrunn. ◀

Von Heiko Ritter

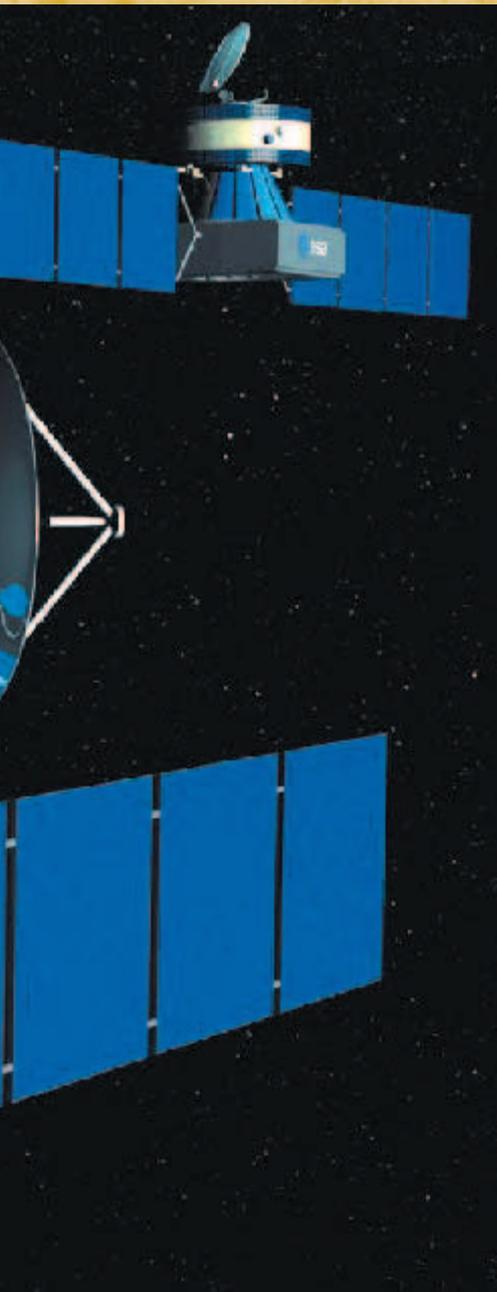
REISE INS INNERE

THERMISCHE TESTS FÜR



SONNENSYSTEM

„BEPICOLOMBO“



Die Europäische Raumfahrtagentur ESA entwickelt derzeit unter dem Namen BepiColombo eine Mission zum Planeten Merkur. BepiColombo wurde im September 2000 von ESA's **Space Science Advisory Committee (SSAC)** als fünfte Meilenstein-Mission vorgeschlagen.

BepiColombo beinhaltet zwei wissenschaftliche Satelliten, einen Europäischen **Mercury Planetary Orbiter (MPO)** sowie einen Japanischen **Mercury Magnetospheric Orbiter (MMO)**. Beide Satelliten sollen im Jahr 2012 gemeinsam an Bord einer Soyuz/Fregat Rakete gestartet werden und nach einer etwa vierjährigen Reise beim Merkur ankommen. Dort werden die beiden Satelliten getrennt, um in unterschiedlichen Umlaufbahnen ihre jeweiligen wissenschaftlichen Missionen durchzuführen.

Die Entwicklung der BepiColombo Mission befindet sich derzeit in der Definitions-Phase. Im Rahmen zweier paralleler Verträge arbeiten zwei europäische Industriekonsortien unter Führung von Alenia Spazio bzw. Astrium GmbH unabhängig voneinander an der Definition der Mission und ihrer Komponenten.

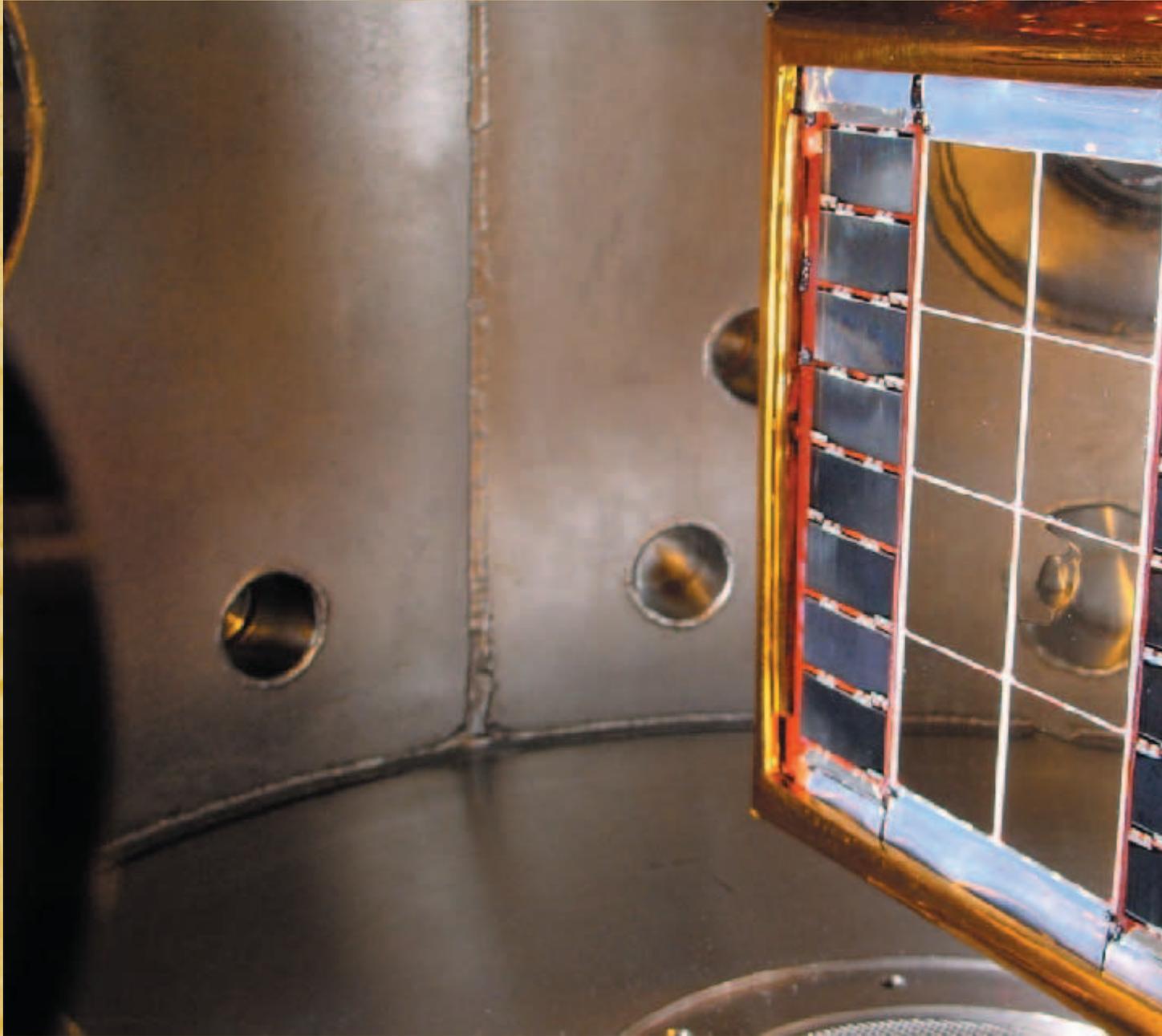
Aufgrund der Nähe von Merkur zur Sonne ist die Sonnenbestrahlung in seiner Umgebung bis zu zehnmal größer als in einer Umlaufbahn um die Erde und erreicht damit eine Intensität von bis zu 14.500 Watt pro Quadratmeter. Dies gilt auch für die UV-Strahlung, welche insbesondere für die Degradation von thermo-optischen Ober-

flächeneigenschaften verantwortlich ist und daher eine wesentliche Bedeutung für die Thermalkontrolle hat. Weiterhin werden erhebliche Belastungen von Partikelstrahlung erwartet, hier insbesondere Elektronen und Protonen, die ebenfalls zu Degradationen führen. Hinzu kommt eine sehr intensive IR-Eigenstrahlung des Planeten aufgrund der hohen Temperaturen auf seiner Tagseite.

Parallel zu BepiColombo werden derzeit Studien für einen Solar Orbiter zur weiteren Erforschung unserer Sonne durchgeführt. Der sonnennächste Punkt des geplanten Orbits liegt deutlich innerhalb der Merkurbahn. Die bei einer solchen Mission zu erwartenden Wärmelasten auf den Satelliten betragen daher bis zu 25 Solarkonstanten oder etwa 35.000 Watt pro Quadratmeter.

All diese Belastungen müssen in der Definition der Testprogramme bei der Entwicklung der Mission berücksichtigt werden. Dabei ist zu unterscheiden zwischen Entwicklungstests, welche die Funktion einzelner Technologien unter den erwarteten Bedingungen demonstrieren, und Tests an kompletten Instrumenten oder eines gesamten Satelliten, welche die Integrität des Systems und seine Zuverlässigkeit unter Extrem-Bedingungen sicherstellen.

Abb. links: BepiColombo beim Vorbeiflug an Merkur.





Im Rahmen der Entwicklung der Bepi-Colombo Mission und gegebenenfalls der Solar Orbiter Mission sowie der erforderlichen Technologien sind eine Vielzahl von thermischen Tests erforderlich. Eine wesentliche Herausforderung im Vergleich zu bisherigen Raumfahrtmissionen ist dabei die hohe Wärmelast von bis zu zehn bzw. 25 Solarkonstanten. Im Vergleich dazu liegt die maximale Sonneneinstrahlung bei einer Venus-Mission nur bei etwa zwei Solarkonstanten.

Der Solarbrennofen des DLR in Köln bietet die Möglichkeit, auf einem Durchmesser von etwa einem halben Meter eine weitgehend homogene Verteilung dieser hohen Strahlenlasten bereitzustellen. Eine erste Testreihe wurde Anfang 2003 im Solarofen an einem Space Solar Array durchgeführt, welches derzeit für BepiColombo entwickelt wird. Zwei Arrays mit unterschiedlichen Substraten und verschiedenen Anordnungen der Solarzellen wurden getestet. Die Solarzellen selbst basieren auf GaAs-Technologie und werden für eine Anwendung bis über 250 Grad Celsius entwickelt. Um das Array unter diesem Temperaturlimit zu halten, sind zwischen den Solarzellen so genannte **Optical Solar Reflectors (OSR)** montiert. Diese absorbieren nur sehr wenig Sonnenenergie, haben

*Abb. links: Solar Array Prüfling umhüllt in Mehrschichtisolation und montiert in der Vakuum-Kammer. Die blauen Zonen sind die Solarzellen, die silbernen Elemente so genannte **Optical Solar Reflectors (OSR)**.*
Abb. oben rechts: Merkur ist der sonnennächste Planet in unserem Sonnensystem.
Abb. oben Mitte: Mosaikaufnahme des Merkur, aufgenommen von Mariner 10. Entfernung zum Merkur: 200.000 Kilometer.
Abb. oben links: Solarforschung im Solarofen des DLR.

aber zugleich eine starke Eigenstrahlung. Die Temperatur der OSR ist daher deutlich geringer als die der Solarzellen.

Ziel der Testreihe war es, eine Datenbasis für die Korrelation eines mathematischen thermostrukturellen Modells bereitzustellen, welches in Zukunft eine weitere optimierte Auslegung der Solar Arrays ermöglichen soll. Dazu wurden die Arrays in verschiedenen Orientierungen sich ändernder Strahlungsintensitäten ausgesetzt und dabei das Temperaturverhalten an kritischen Stellen gemessen. Zudem wurde eine Anzahl so genannter Schock-Tests durchgeführt. Dabei wurde der Moment simuliert, in welchem der Satellit aus dem Merkur-Schatten austritt. Das in jenem Moment sehr kalte Solar Array wird dann schockartig der intensiven Sonnenstrahlung ausgesetzt wird.

Die durchgeführten Tests haben die Eignung des Sonnenofens zur Durchführung thermischer Tests für Missionen ins innere Sonnensystem bewiesen. Zu erwähnen ist hier auch, dass die Testreihe im Winter durchgeführt wurde, dies aber nicht zu wesentlichen Beeinträchtigungen führte. Eine Limitierung stellt die vorhandene Vakuumkammer dar. Diese begrenzt derzeit die Größe des Testobjekts auf Abmessungen von etwa 20 Zentimeter. Zudem führten Reflexionen an der Kammerwand zu Problemen. Die derzeit geplante Installation einer größeren Kammer mit gekühlten schwarzen Wänden wird die Möglichkeiten des Sonnenofens zur Durchführung thermischer Tests für Missionen ins innere Sonnensystem daher erheblich erweitern.

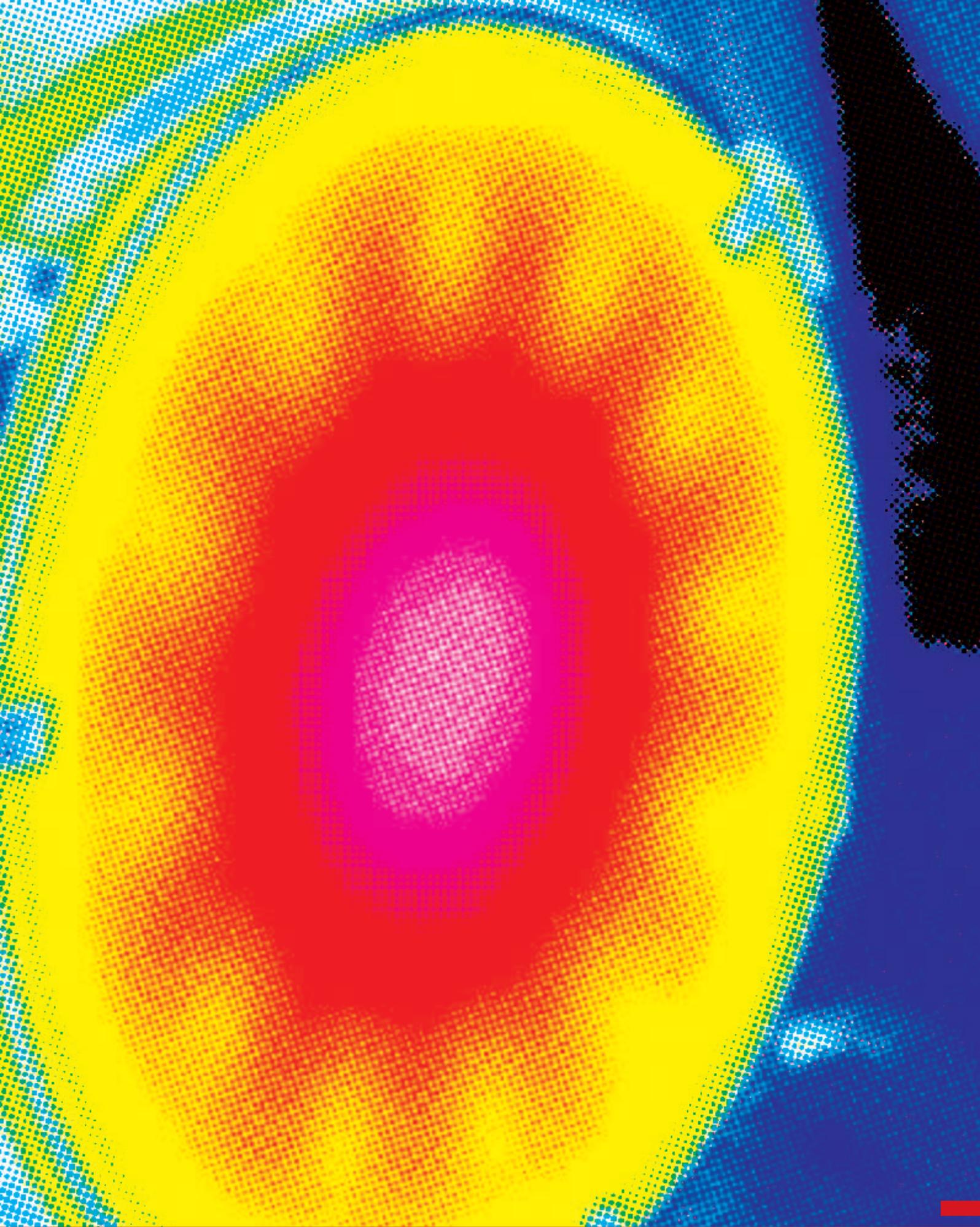
Heiko Ritter, ESA, Noordwijk. ◀

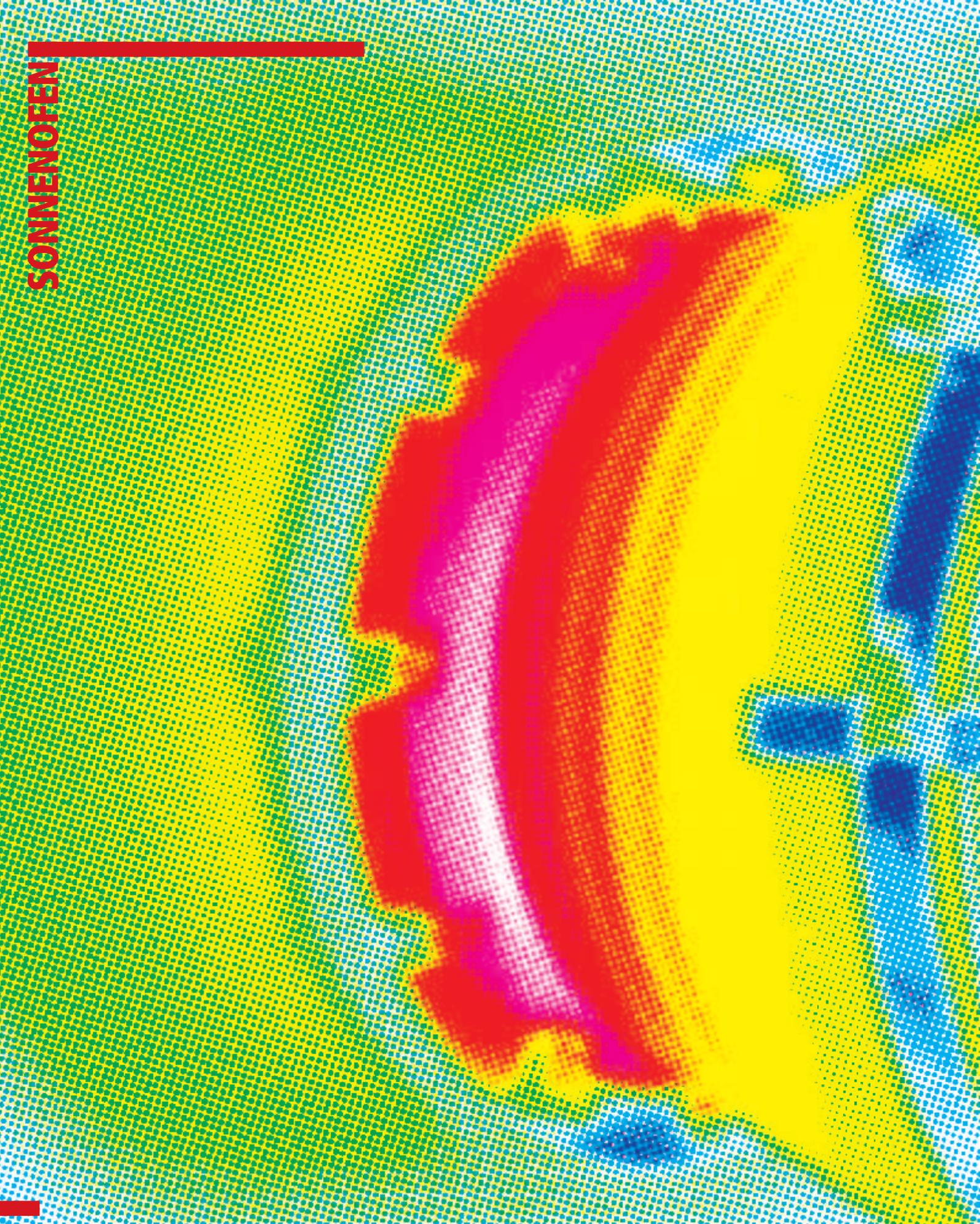
Von Karl-Heinz Funken und Ina Ollenschläger

SOLARE PROZESS- TECHNIK

SOLAR BEHEIZTE DREHROHRREAKTOREN

Stoffumwandelnde und metallurgische Industrien sind die bedeutendsten Nutzer von Hochtemperaturprozesswärme. Zur ihrer Bereitstellung in einer zukünftigen, nachhaltigen Industriewirtschaft könnte konzentrierte Sonnenstrahlung die Rolle übernehmen, die heute durch Verbrennen fossiler Energieträger erfüllt wird. In dem Hochflusssdichte-Sonnenofen wurde das Rezyklieren von Aluminiumschrott in einem Temperaturbereich von 750 bis 850 Grad Celsius getestet, um an konkretem Beispiel zu experimentell gesicherten Aussagen zu kommen.





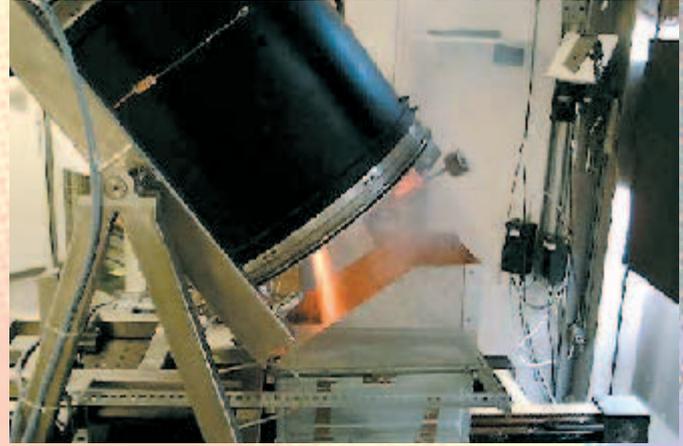
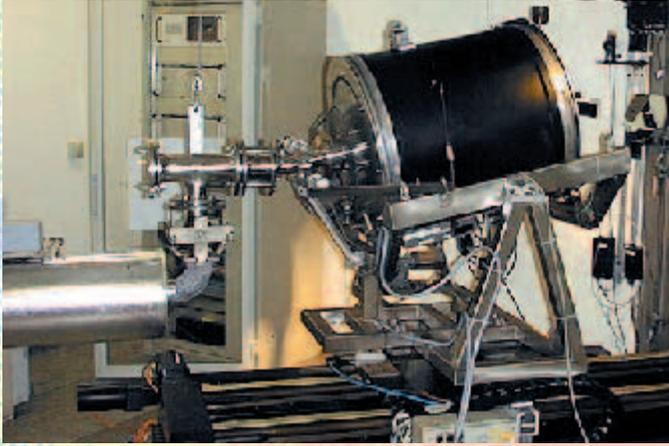


Abb. vorhergehende Seite rechts und diese Seite links: Wärmebild des bestrahlten Sekundärkonzentrators: Das einströmende Gas kühlt und spült die Quarzglasfrontscheibe.

Abb. oben links: Das Bild zeigt den Drehrohr-Receiver-Reaktor in betriebsbereitem, jedoch unbestrahltem Zustand.

Abb. oben rechts: Ausgießvorgang von solar aufgeschmolzenem Aluminium.

Drehrohre und Drehtrommelöfen sind wichtige Apparate der thermischen Hochtemperaturprozesstechnik. Sie werden beispielsweise beim Umschmelzen von Aluminiumschrotten eingesetzt. Am wachsenden und in der Primärerzeugung für seinen hohen spezifischen Energiebedarf bekannten Aluminiummarkt hat der Anteil des Sekundärmetalls in den letzten Dekaden überproportional zugenommen. Mit Unterstützung der Arbeitsgemeinschaft Solar Nordrhein-Westfalen (<http://www.ag-solar.de>) wurde ein strahlungsbeheiztes Drehrohr zum Test im Sonnenofen entwickelt. Ziel dieser Arbeiten war der Nachweis, dass unter reproduzierbaren Bedingungen ein sicherer Betrieb im Mini-Plant-Maßstab technisch machbar ist. Dieser Nachweis ist Voraussetzung für Maßstabsvergrößerung und für eine mögliche industrielle Nutzung. Pro Tag waren mehrere Chargierzyklen durchführbar. Solarthermisch erzeugtes Sekundäraluminium ist konventionell erzeugtem Produkt qualitativ ebenbürtig.

Durch eine frontseitige Öffnung wird die konzentrierte Sonnenstrahlung in das Drehrohr geleitet, wo sie in erster Linie einen Schmelzfilm erhitzt, der an der Feuerfestauskleidung des Ofens haftet. Wird das Drehrohr mit einem Sekundärkonzentrator ausgestattet, so steigt die Effizienz der Anlage deutlich an. In einer besonderen Variante ist die frontseitige Öffnung durch eine – strahlungsdurchlässige – Quarzglaschei-

be abgedeckt. Hierbei ist eine thermische Behandlung des Materials auch unter Inertgasatmosphäre möglich. Mit sinkendem Sauerstoffanteil in der Ofenatmosphäre nimmt die Ausbeute des Sekundäraluminiums zu.

Wesentliche Bestandteile eines solaren Prozesses sind neben dem Drehtrommelofen, der gleichzeitig als zentraler Receiver fungiert, ein Heliostatfeld und eine Rauchgasreinigungsanlage. Für den Standort Almería betrage für einen Drehtrommelofen mit einem Fassungsvermögen von acht Tonnen Aluminiumschrott plus Salz die Gesamtspiegelfläche circa 6.000 Quadratmeter.

Neben der Einsparung fossiler Brennstoffe besitzt das solar betriebene Verfahren zwei wesentliche Vorteile: Zum Einen ist die Menge des zu reinigenden Abgases deutlich kleiner, da kein Rauchgas aus der Verbrennung von Erdgas mit Luft wie in einem konventionell befeuerten Ofen erzeugt wird. Dieses ist außerdem mit teilweise toxischen Verbrennungsprodukten aus Anhaftungen des Aluminiumschrotts beladen. Da der solare Prozess andererseits auch unter inerten Bedingungen betrieben werden kann, sind die Aluminiumabbrandverluste niedriger als unter den oxidierenden Bedingungen eines konventionellen Prozesses.

Die zu erwartenden Kosten für Bau und Betrieb einer solaren Anlage mit einer Kapazität von beispielsweise 7.300 Tonnen

Sekundäraluminium pro Jahr wurden mit denen einer konventionellen, fossil befeuerten Anlage gleicher Kapazität für den Standort Almería verglichen. Die Investitionskosten der solar betriebenen Anlage sind höher. Dieser Nachteil wird allerdings durch Einsparungen bei der Rauchgasbehandlung teilweise kompensiert. In einer ausschließlich solar betriebenen Anlage sind außerdem die Betriebskosten aufgrund des kleineren Erdgasverbrauchs niedriger, sofern an einem Standort mit den Almería vergleichbaren Einstrahlungsbedingungen der Erdgaspreis 0,02 Euro pro Kilowattstunde übersteigt. In einem Szenario, das von einer Verdoppelung bis Verdreifachung der Erdgaspreise ausgeht, ist ein solar betriebenes Verfahren sogar kostenmäßig einem konventionell befeuerten Verfahren überlegen. Bei einer Arbeitsweise unter inerten Bedingungen kommt als weiterer wirtschaftlicher Vorteil die größere Ausbeute des Sekundäraluminiums hinzu. Sie dominiert die Wertschöpfung des Prozesses.

Dr. Karl-Heinz Funken ist Standortleiter Solarforschung Köln-Porz des DLR Instituts für Technische Thermodynamik. Dr. Ina Ollenschläger ist Manager Recycling, Hydro Aluminium Köln. ◀

Was ist Licht, was Energie, und, ... was ist eine Zahl?

Vor Einstein war die Welt noch in Ordnung. Seit Einstein ist manches unordentlich. Licht zum Beispiel, das gleichzeitig eine doppelte Natur besitzt. Albert Einstein selbst soll auch ein unordentlicher Mensch gewesen sein. Was ihn als Persönlichkeit auszeichnet, beschreibt David Chotjewitz in der Einstein-Biografie „Das Abenteuer des Denkens“ kenntnis- und detailreich. Gab Einstein uns ein neues Bild des Kosmos, so bringt uns der Kosmologe John D. Barrow kosmische Fragestellungen, die mehr als ungewöhnlich sind. Sein „Himmel voller Zahlen“ ist ein abstraktes Universum, lebendig beschrieben. Uwe Wandrey schließlich zählen wir zu den besten Jugendbuchautoren Deutschlands. „Kraftwerk Sonne“ nimmt eine Ausnahmestellung unter den Jugendbüchern über natürliche Energiequellen ein. Viel Freude beim Lesen!

Wieso sollte die Natur Gesetzen gehorchen, die der Mensch sich ausgedacht hat? Wie ist Licht tatsächlich beschaffen? Schon den jungen Albert Einstein beschäftigten solche, scheinbar einfachen Fragen besonders. Hatten doch schon viele Wissenschaftler wie Newton und Maxwell Theorien über die Natur des Lichtes und die Naturgesetze aufgestellt. Sie müssten nur noch wie Mosaikteilchen zusammengesetzt und ergänzt werden, um so den wirklichen Charakter des Lichts zu erklären.

Das Abenteuer des Denkens

beschreibt eingängig und eindrucksvoll das Leben von Albert Einstein und zeichnet ein sehr menschliches und einfühlsames Bild des bedeutendsten Wissenschaftlers des 20. Jahrhunderts. In dem Jugendbuch von David Chotje-

witz begleitet der Leser Einstein durch die wichtigsten Phasen seines Lebens: Die erste Hälfte der Reise beginnt bei der Kindheit des physikbegeisterten Jungen, führt durch die schwierige Jugend des rebellischen, einsamen Albert und durchlebt die tragischen Umstände seiner ersten Ehe.

Chotjewitz versteht es geschickt, Kapitel mit verständlichen Details über Physik und den wichtigsten Theorien einzufügen, die mit Einsteins Arbeit in Verbindung stehen. In Anlehnung an Einsteins Leben sind die übrigen Kapitel versehen mit geschichtlichen Einzelheiten der Vor- und Nachkriegszeit sowie politischen und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen. Insbesondere die Entwicklung des Nationalsozialismus und die Verworrenheit der 20-er und 30-er Jahre werden lebendig beschrieben: Kommunisten, Sozialdemokraten und Rechte im Interessenkonflikt, dazwi-

schen der Pazifist Einstein, an dessen öffentlichen Stellungnahmen sich die Geister scheiden. Chotjewitz zeigt Einstein als eine fehlbare Persönlichkeit, der es schwer fällt, sich in die Gefühlswelt anderer Menschen hineinzusetzen, die sich in schwierigen Situationen in Musik flüchtet oder die Schönheit der Natur genießt. Auch Äußerlichkeiten, Ruhm und Reichtum bedeuten ihm nicht viel. Durch seine direkte unkonventionelle Art und dem Hang zu Wutanfällen verscherzt er sich den Umgang mit einigen Lehrern, Professoren und gesellschaftlich angesehenen Persönlichkeiten. Einsteins Eigenart und Humor lassen gleichzeitig den Leser des Öfteren schmunzelnd oder gar lachend vom Buch aufsehen. Wie z.B. bei seinem Ausspruch: „Erfolg (A) ist gleich Arbeit (x) plus Spiel (y) plus Maulhalten (z) $A = x + y + z$.“ Zusätzlich lässt die Weisheit

und Bescheidenheit des großen Physikers den Leser viele Male staunen. So wird er beispielsweise nach dem Verfassen der Relativitätstheorie zitiert: „Ich habe etwas gefunden, was schon immer vorhanden gewesen ist, das nur noch kein Mensch vor mir gesehen hat.“ Dieses Jugendbuch ist auch ein Buch für erwachsene Leser, die tragische und menschliche Geschichten lieben, nicht zuletzt auch eine Biografie für alle, die sich für die Naturwissenschaften, Geschichte und Politik begeistern können.

(Jennifer Kirschniok)
Carlsen Verlag GmbH

Was ist eine Zahl? Diese Frage ist so überwältigend schlicht, dass eine Antwort selbst Mathematikern oder Physikern schwerfällt. Ja, gerade in Mathematikvorlesungen wird sie so gut wie nie gestellt. Dies behauptet zumindest John D. Barrow in seinem furiosen Buch



Das Abenteuer des Denkens



Ein Himmel voller Zahlen

dessen englischer Titel: „Pi in the Sky“ viel besser ist: Pi liest sich nämlich auch wie Pie, und dies spielt Barrow bewusst an. Barrow schreibt nun aber keine trockene Mathematikgeschichte; er erz(e)hlt die Geschichte des Zählens, forscht nach dem Ursprung dieser vielleicht menschlichsten Denkweise und wirbt für eine Philosophie der Genauigkeit – ohne je den Leser mit einer Formel, Gleichung oder Rechenart zu belasten. Dies alles beschreibt er mit leichter Hand und Feder. Manche Sätze haben poetische Schönheit: „Die Entwicklung der Menschheit durchläuft zwei Stadien: Zuerst denken wir über die Dinge nach, im zweiten beginnen wir, über das Denken nachzudenken. Wenn wir erkennen,

dass das, was wir wahrnehmen, eine Darstellung der Wirklichkeit ist, die sich möglicherweise wesentlich von dieser Darstellung unterscheidet, haben wir die Philosophie erfunden“. Und wer dieses Buch bis zum Ende liest, erfährt sogar im letzten Absatz noch eine Überraschung. Barrows Bücher leben dabei von seiner humorvollen, trockenen Sprache. Womöglich deshalb, weil er auch Mathematiker ist. Seine Kapitel hält er erfrischend kurz. Apropos Ausgangsfrage: „Was ist eine Zahl?“ Der Autor gibt auf diese Frage eine Antwort, die wir hier nicht verraten, denn es macht zu viel Freude, das Buch zu lesen. Und darauf möchten wir Sie gespannt machen. Dürfen wir auf Sie zählen?

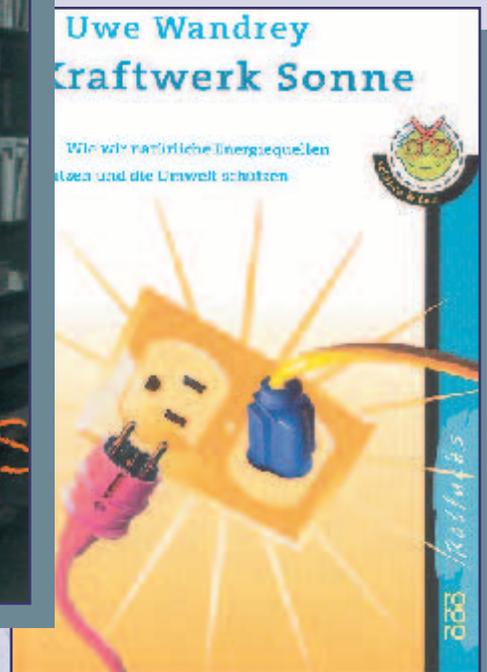
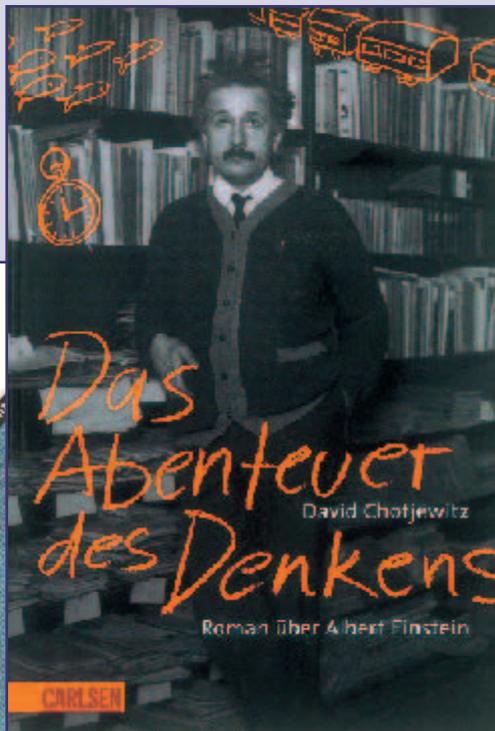
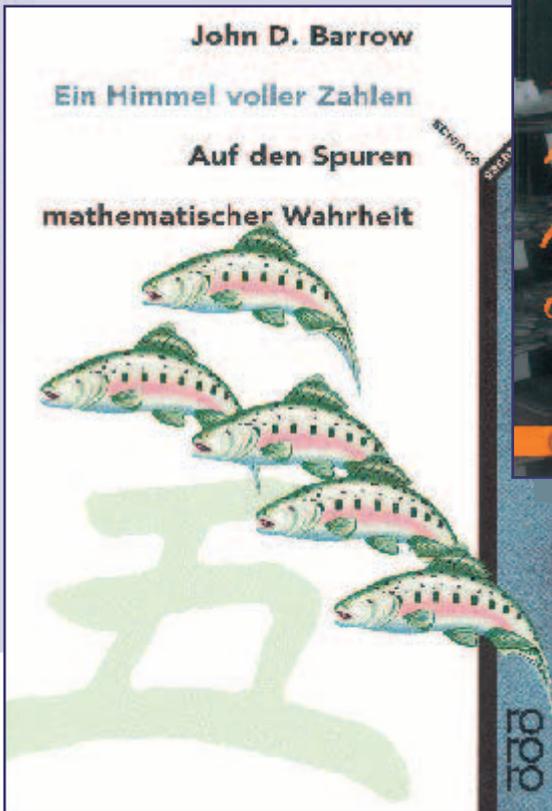
rowohlt Taschenbuch Verlag

Unter den Jugendbuchautoren nimmt Uwe Wandrey in Deutschland eine Sonderstellung ein. Seine Texte allein sind unglaublich bildkräftig, einfach, verständlich. Ganz abgesehen davon, dass er komplexe Themen kompetent und umfassend für die Zielgruppe beschreibt. Mit seinem

Kraftwerk Sonne

hat er unlängst für junge Leute die Sonne vom Himmel geholt. Antje von Stemm, Jugendliteraturpreisträgerin und Papieringenieurin, steuerte einen umweltfreundlichen Sonnenofen bei, den man sich selbst basteln kann – für die kleinen Mahlzeiten zwischendurch. „Kraftwerk Sonne“ ist einfach gegliedert: „die Sonne – ein Feuerball, der Leben spendet; die Sonne – eine

Wärmequelle, die uns einheizt; die Sonne – ein Stromspender, der uns elektrisiert; Die Sonne – Energienahrung für grüne Pflanzen“. Darüber hinaus gibt es gute, knappe Experimentanleitungen und kapitelweise eine Rubrik „Nachgefragt“, in der Wesentliches knapp zusammengefasst wird. Nur einen Wermutstropfen fand der Rezensent: Wie viele, so tappt auch Wandrey in die Falle, Jugendlichen (auch) Ideologie vermitteln zu wollen, statt sie selbst denken und werten zu lassen. Ob man Wandreys politischen Wertungen folgt oder nicht: Informativ und als Einstieg für Jugendliche in das Thema „Solarenergie“ zählt „Kraftwerk Sonne“ zu den Besten auf dem Jugendbuchmarkt. *rororo rotfuchs rowohlt Taschenbuch Verlag* ◀





In dieser Rubrik stellt das DLR Partnerorganisationen und deren Projekte vor – in der heutigen Ausgabe das **CIEMAT, „Centro de Investigaciones Energéticas, MedioAmbientales y Tecnológicas“** – Forschungszentrum für Energie, Umwelt und Technologie.

Die Forschungsschwerpunkte von CIEMAT sind:

- Entwicklung alternativer Energiequellen
- Verbesserungen in der Nutzung von Energieressourcen und -Wandlungssystemen
- Entwicklung von Problemlösungen für die spanische Industrie bezüglich Energienutzung und daraus resultierenden Umwelteinflüssen.

Organisation

CIEMAT gehört zum spanischen Ministerium für Bildung und Wissenschaft. Es untersteht einem Lenkungsausschuss, der sich aus dem Staatssekretär für Universitäten und Forschung als Präsident sowie einem Vizepräsidenten zusammensetzt. Dem Generaldirektor unterstehen die Abteilungsleiter von fünf Fachabteilungen (Kernspaltung, Fossile Brennstoffe, Kernfusion und Elementarteilchen, Erneuerbare Energien, Umweltwirkungen der Energienutzung) sowie vier weiteren Stabs- und administrativen Abteilungen.

Mission

CIEMAT hat den Auftrag, energiebezogene Forschungs- und Entwicklungsprojekte durchzuführen, die den

Ansprüchen an internationale Spitzenforschung genügen. Dies soll in enger Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen mit ähnlicher Zielsetzung verwirklicht werden. Als technologisches Forschungszentrum bildet es die Verbindung zwischen der hauptsächlich in akademischen Einrichtungen angesiedelten Grundlagenforschung und der nationalen Industrie. Daher müssen die Forschungsergebnisse in die Industrie übertragbar sein, um hier möglichst effizient zu Aufbau und Umsetzung eigenen Know-Hows unter Berücksichtigung von Umweltaspekten beizutragen. Darüberhinaus berät CIEMAT verschiedene nationale Behörden im Bereich von Technologie- und Energiestrategie.

Arbeitsweise

CIEMAT arbeitet hauptsächlich im Bereich der Auftragsforschung mit folgenden Merkmalen:

- Bearbeitung spezifischer Projekte mit genauen Zielvorgaben, die sowohl von den eigenen Forschern als auch externen Auftraggebern definiert und von CIEMAT genehmigt werden
- Die Finanzierung erfolgt über öffentliche Einrichtungen, Firmen oder aus Eigenmitteln
- Arbeits- und Finanzplanung wird laufend überwacht
- Je nach Vertrag können die Eigentumsrechte an Projektergebnissen zwischen CIEMAT und Auftraggebern geteilt werden oder allein beim Auftraggeber verbleiben, gegebenenfalls wird Vertraulichkeit über die Ergebnisse vereinbart

Arbeitsgebiete

- Steigerung von Effizienz und Umweltverträglichkeit bei Anwendung fossiler Energieträger
- Fortschritte in der Sicherheit der Kernspaltung
- Demonstration von Kernfusion als zukünftige alternative Energiequelle
- Verbesserung der Wirtschaftlichkeit von Erneuerbaren Energien auf dem Energiemarkt
- Umsetzung der Zielsetzungen zur Umweltverträglichkeit in Abstimmung mit der Industrie und Bereitstellung entsprechender Technologien.

Im Rahmen dieser Arbeitsgebiete werden Grund- und angewandte Forschung sowie Entwicklungsarbeiten zum Technologietransfer durchgeführt. Weiterhin werden Tests und Zertifizierungsarbeiten sowie Dienstleistungen auf überwiegend kommerzieller Basis angeboten sowie Ausbildung zur Weiterqualifikation von Forschern.

Als Leistungsindikatoren dienen für die Grundlagenforschung Veröffentlichungen in internationalen Fachzeitschriften und Konferenzbeiträge; für die angewandte Forschung Patente und Verfahren; für technische Entwicklungen Vereinbarungen, Verträge und Prototypen und für kommerziell orientierte Test- und Dienstleistungsaktivitäten Kunden- und Drittmittel-einnahmen.

*MADRID, Centro de la Moncloa.
Avda. Complutense, 22 -
28040 (Madrid)*

Tel: 91-346.60.00 (centralita)

Fax: 91-346.60.05 (central)

Email: cau@ciemat.es

*ALMERÍA (Tabernas),
Plataforma Solar de Almería (PSA).*

*Carretera Senés s/n -
04200 Tabernas (Almería)*

Apdo. de Correos, 22

Tel: 950-38.79.00 (centralita)

Fax: 950-36.50.15/950-36.53.00 (central)

Email: info@psa.es ◀