



**BINE**

Informationsdienst



## Solarthermische Kraftwerke

Abb 1



- ▶ Solares Potenzial im Sonnengürtel der Erde kann auf Dauer ein Vielfaches des Weltstrombedarfs decken
- ▶ Parabolrinnenkraftwerke sind derzeit die kostengünstigste Technik zur Erzeugung von Solarstrom
- ▶ Solarthermische Kraftwerke lassen sich leicht mit Wärmespeichern kombinieren
- ▶ Mehrere Kraftwerksprojekte in Spanien in Vorbereitung

*Parabolrinnenkollektoren auf der Plataforma de Solar Almería  
(Foto: Quaschnig)*

In sonnenbegünstigten Regionen der Erde sind solarthermische Kraftwerke eine wichtige Technologieoption für eine umwelt- und klimafreundliche Stromversorgung. Nur ein Prozent der Fläche der Sahara würde theoretisch ausreichen, um den gesamten Elektrizitätsbedarf der Erde zu decken. Solarthermische Stromerzeugung basiert auf einem einfachen Prinzip: Solarstrahlung wird mit konzentrierenden Spiegeln gebündelt und in thermische Energie umgesetzt. Die anfallenden hohen Temperaturen werden für den Antrieb konventioneller Dampf- und Gasturbinen oder einer Stirling-Maschine verwendet.

Die derzeit kostengünstigste Variante, um aus Sonnenenergie Strom zu gewinnen, sind Parabolrinnensysteme. In den Vereinigten Staaten wurden seit Mitte der achtziger Jahre Parabolrinnenkraftwerke errichtet. Die Leistung der neun Kraftwerke in der Mojave-Wüste in Südkalifornien beträgt insgesamt 354 MW, produziert werden jährlich etwa 800 Megawattstunden Solarstrom. Auch in Europa werden solarthermische Kraftwerke künftig Strom liefern. Unter spanischer Sonne sind zur Zeit mehrere Kraftwerksprojekte geplant. Die im

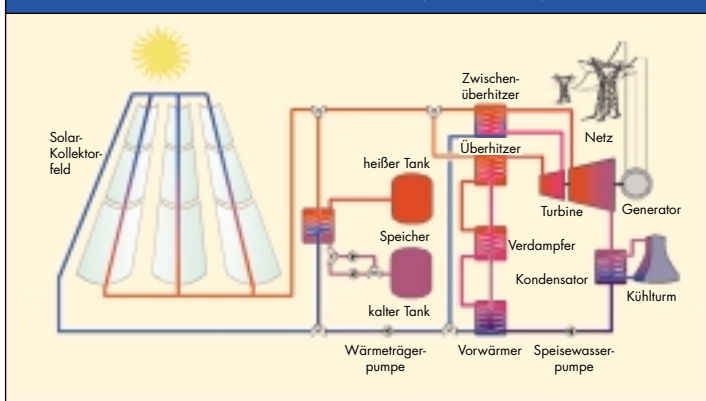
reinen Solarbetrieb unter den dortigen Bedingungen erzielbaren Stromgestehungskosten werden hier bei ca. 16 ct/kWh liegen.

Solarthermische Kraftwerke sind leicht mit Wärmespeichern auszurüsten, zudem eignen sich diese Technologien auch für hybride Konzepte. Der solar erzeugte Dampf ist außerdem relativ einfach mit konventionell erzeugtem Dampf kombinierbar. Ohne Reservekapazitäten lässt sich Strom so rund um die Uhr und auch bei Schlechtwetterlagen mit hohem Marktwert produzieren.

Bei Solarturmkraftwerken können durch Einkopplung von Solarenergie in Gasturbinensysteme, insbesondere hocheffiziente Gas- und Dampfkraftwerke, weitere Kostenreduktionspotenziale erschlossen werden. Auf diese Weise lassen sich risikoarme Markteinführungsstrategien entwickeln, bei denen ein zunehmender Anteil fossiler Energie solar ersetzt wird. Die Bundesregierung hat die Entwicklung solarthermischer Stromerzeugung mit dem Ziel der Markteinführung im Rahmen des Zukunftsinvestitionsprogramms (ZIP) seit 2002 mit rund zehn Millionen Euro gefördert. Künftig wird die Förderung im Rahmen der allgemeinen Forschungsförderung fortgeführt.

## ► Parabolrinnensysteme

Abb 2: Schema Parabolrinnenkraftwerk (Quelle: DLR)



Die Parabolrinnentechnik ist derzeit die kostengünstigste Technik, um aus Sonnenlicht elektrischen Strom zu gewinnen. Wie bei konventionellen Kraftwerken wird Dampf für einen Turbinenprozess erzeugt, nur eben nicht durch die Verbrennung fossiler Energieträger sondern durch konzentrierte Solarstrahlung. Die einzelnen, einachsiger Sonne nachgeführten Kollektoren haben einen parabolförmigen Querschnitt. In der Brennlinie des Spiegels befindet sich ein Absorberrohr, das von einem zirkulierenden Arbeitsmedium durchflossen wird. Als Wärmeträgerfluid kommen synthetische Thermo-Öle und Salzschnmelzen in Frage. Das Sonnenlicht wird bis zum mehr als 80-fachen konzentriert und erhitzt so das Öl auf nahezu 400 °C. Die eingestrahlte Energie wird zu einem nachgeschalteten Dampferzeuger transportiert und der erzeugte Dampf in einem Dampfkraftprozess verstromt.

An den Reflektor werden hohe konstruktive Anforderungen gestellt, denn die erforderliche geometrische Präzision des Reflektors muss gegen alle Windlasten hinreichend widerstandsfähig sein. Eisenarmes Glas mit rückseitiger Verspiegelung ist als Reflektor bestens geeignet. Das solare Spektrum wird gut reflektiert und die Oberfläche ist resistent gegen Kratzer. Wirkungsgradverbesserungen

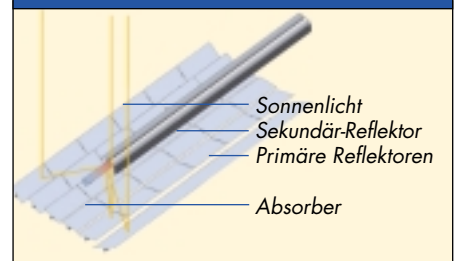
lassen sich u. a. durch eine selektive Beschichtung und konzentrieren das Sonnenlicht auf ein mehrere Meter darüber liegendes Absorberrohr. Ein Sekundär-Reflektor oberhalb des Absorberrohrs lenkt zusätzlich Strahlung in die Brennlinie. Ein Kollektor mit 24 Meter Breite und 1.000 Meter Länge könnte im Absorberrohr Dampf mit mehr als 500°C für eine Stromleistung von ca. 5 MW produzieren. Jede der 48 Spiegel-lamellen besteht aus einer Reihe von 500 Spiegeln mit 0,5 Meter Breite und 2,0 Meter Länge. Mehrere Kollektoren können zu Kollektorfeldern verschaltet werden, um Kraftwerksleistungen von mehreren hundert MW zu erreichen. Das Konzept hat einige Vorteile für eine Kostensenkung: Der Aufbau des Kollektors ist einfach und für die Massenfertigung gut geeignet. Zudem erfordert die geschlossene Anordnung der Spiegel weniger Raum und bietet andererseits unter der Konstruktion einen partiell verschatteten nutzbaren Raum, z.B. für den Gemüseanbau. Auf die Entwicklung von Fresnelkollektoren setzt neben einem australischen Hersteller die aus Belgien stammende Firma Solarmundo.

Die weltweit einzigen kommerziell betriebenen Solarkraftwerke sind neun Parabolrinnenkraftwerke (Solar Electric Generating Systems = SEGS), die seit mehr als 15 Jahren in der kalifornischen Mojave-Wüste Strom produzieren. Die Kraftwerke wurden in der Zeit von 1985 bis 1991 errichtet, die Betriebserfahrungen sind durchweg positiv. So erwiesen sich die Komponenten als sehr widerstandsfähig – auch unter den extremen klimatischen Bedingungen in der Wüste. In den letzten Jahren lag die technische Verfügbarkeit immer über 98 Prozent. In den neunziger Jahren wurde die Entwicklung einer eigenen Parabolrinnentechnologie in Europa gestartet. Der EuroTrough-Kollektor (Abb 1) ist eine Entwicklung der Industriepartner Abengoa, Flabeg Solar sowie Schlaich, Bergermann und Partner gemeinsam mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) und wurde bereits erfolgreich am Forschungszentrum Plataforma Solar de Almería getestet. Seit 2003 werden die EuroTrough-Kollektoren im Rahmen des SKAL-ET-Projektes in einem 800 Meter langen Kollektorstrang im kalifornischen Solarkraftwerk SEGS V am Standort Kramer Junction integriert auf ihre Zuverlässigkeit und ihr tatsächliches Optimierungspotenzial hin untersucht. Schwerpunkte der von deutscher Seite geförderten Forschung sind zur Zeit die Demonstration des EuroTrough-

## Fresnelkollektor

Statt der parabolisch gebogenen Kollektoren arbeiten Fresnel-Kollektoren (Abb.3) mit flachen Spiegelfacetten, die der Sonne nachgeführt werden. Die Spiegel sind parallel angeordnet und konzentrieren das Sonnenlicht auf ein mehrere Meter darüber liegendes Absorberrohr. Ein Sekundär-Reflektor oberhalb des Absorberrohrs lenkt zusätzlich Strahlung in die Brennlinie. Ein Kollektor mit 24 Meter Breite und 1.000 Meter Länge könnte im Absorberrohr Dampf mit mehr als 500°C für eine Stromleistung von ca. 5 MW produzieren. Jede der 48 Spiegel-lamellen besteht aus einer Reihe von 500 Spiegeln mit 0,5 Meter Breite und 2,0 Meter Länge. Mehrere Kollektoren können zu Kollektorfeldern verschaltet werden, um Kraftwerksleistungen von mehreren hundert MW zu erreichen. Das Konzept hat einige Vorteile für eine Kostensenkung: Der Aufbau des Kollektors ist einfach und für die Massenfertigung gut geeignet. Zudem erfordert die geschlossene Anordnung der Spiegel weniger Raum und bietet andererseits unter der Konstruktion einen partiell verschatteten nutzbaren Raum, z.B. für den Gemüseanbau. Auf die Entwicklung von Fresnelkollektoren setzt neben einem australischen Hersteller die aus Belgien stammende Firma Solarmundo.

Abb 3: Prinzip des linearen Fresnel-Kollektors von Solarmundo



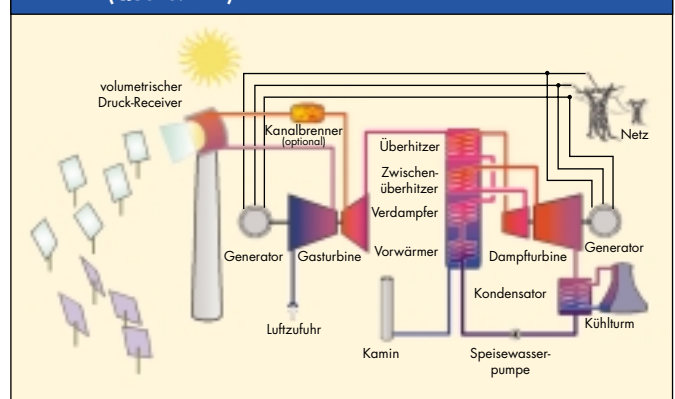
Kollektorstrang in Kalifornien, die Entwicklung eines Parabolrinnen-Receiver, die Entwicklung eines thermischen Energiespeichers aus Hochtemperaturbeton, die Planung des Demonstrationskraftwerks AndaSol und die Untersuchung der sogenannten Fresnelkollektoren.

## ► Solarturmtechnik

In Solarturmkraftwerken wird die Sonnenstrahlung durch ein großes Feld einzeln nachgeführter Planspiegel, so genannter Heliostaten, auf einen Turm fokussiert (Abb 4). Ein auf dem Turm angebrachter Strahlungsempfänger (Receiver) absorbiert die Strahlungsenergie und gibt die Energie an ein Wärmeträgermedium ab. Solarstrahlung kann so einige hundert Male konzentriert für die Erzeugung von Hochtemperaturwärme bis zu 1.100°C genutzt werden. Seit Beginn der achtziger Jahre wurden zehn Demonstrationskraftwerke errichtet. Der wesentliche Unterschied besteht in der Wahl des Wärmeträgermediums: Neben direkt erzeugtem Dampf und Salzschnmelzen kommt

Luft als Medium in Frage. Das Konzept mit Dampf als Wärmeträgermedium hat jedoch wesentliche Schwächen bei der technischen Umsetzung und führt bei der Speicherung zu nicht unerheblichen thermodynamischen Verlusten. Aber auch das recht kostengünstige Salz mit seinen guten Wärmeübertragungseigen-

Abb 4: Schema Solarturmkraftwerk – Einkopplung solarer Hochtemperaturwärme in Kombikraftwerk (Quelle: DLR)



schaften hat Nachteile, so müssen alle Rohrleitungen elektrisch beheizbar sein, um ein Ausfrieren des Salzes zu vermeiden. Dagegen ist Luft als Arbeitsmedium zwar ein relativ schlechter Wärmeüberträger, dafür aber auch technisch einfach handhabbar,

ungiftig und unbegrenzt verfügbar. Ein so genannter volumetrischer Luftreceiver kompensiert die geringe Wärmeübertragung der Luft durch eine große innere Oberfläche. Der Wärmeüberträger Luft bietet zudem die Möglichkeit, solare Hochtem-

peraturwärme bis 1.100°C in Gasturbinen und auch in hocheffiziente Kombikraftwerke einzukoppeln.

## ► Dish-Stirling-Systeme

Für die netzferne, dezentrale Stromerzeugung sind Dish-Stirling-Systeme eine Alternative zu herkömmlichen Dieselaggregaten. Die elektrische Leistung der Dish-Stirling-Anlagen liegt typischerweise zwischen 5 und 50 kW; für größere Leistungsbereiche lassen sich die Systeme zu einer Farm zusammenschalten. Der Konzentratorspiegel ist rotationssymmetrisch parabolisch gekrümmt. Im Brennpunkt des Spiegels, der zweiachsig der Sonne nachgeführt wird, ist der Receiver mit Stirlingeinheit angeordnet. Der Receiver absorbiert die Strahlung und führt sie als Hochtemperaturwärme an den Stirlingmotor ab, der gekoppelt mit einem Generator Strom erzeugt.

Seit Anfang der achtziger Jahre werden in den USA und in Deutschland leistungsfähige Dish-Stirling-Aggregate entwickelt. In den USA arbeiten drei Konsortien an der Markteinführung, in Deutschland entwickelt Schlaich, Bergermann und Partner mit sechs weiteren Partnern aus Deutschland und Spanien mit EU-Förderung ein fortgeschrittenes System unter dem Namen „EuroDish“

(Abb 5). Ziel des Projektes ist die Reduzierung der im Vergleich zu Vorgängermodellen hohen Anlagekosten. Ein Ansatzpunkt ist beispielsweise die bislang aufwändige Herstellung der Konzentratoren. Beim EuroDish wird nun der Konzentrator mit 8,5 Meter Durchmesser als dünnwandige Sandwichschale aus glasfaserverstärktem Epoxidharz hergestellt.

Um die Jahresenergieausbeute zu steigern wird beim EuroDish die Konzentratorfläche um 25% größer ausgelegt als für die Nennleistung des Stirlingmotors erforderlich ist. Bei maximaler Einstrahlung geht zwar so überschüssige Wärme verloren, die durch ein kleines auf die Receiverrohre gerichtetes Gebläse abgeführt wird. Bei mittlerer und geringer Einstrahlung jedoch kann der Stirlingmotor mit hohem Wirkungsgrad betrieben werden. Im Jahresmittel kann der Ertrag bei Standorten mit nur wenigen Stunden maximaler Einstrahlung um nahezu 30% gesteigert werden.

Seit Dezember 2000 bzw. Juni 2001 werden in Almería Betriebserfahrungen mit zwei

Abb 5: EuroDish (Foto: Quaschnig)



Prototypen des EuroDish-Systems gesammelt. Ziel der weiteren Entwicklungsarbeiten ist es, die Kosten bei der Komponentenherstellung und Montage weiter zu senken, um den Übergang in die Kleinserienfertigung zu ermöglichen. Um Montage, Betrieb und Wartung unter marktnahen Bedingungen zu erproben, wurden bereits so genannte Ländereferenzanlagen u. a. in Indien und Italien errichtet.

## ► Kraftwerksprojekte in Spanien

Im August 2002 hat die spanische Regierung eine erhöhte Vergütung für Strom aus solarthermischen Kraftwerken beschlossen. Solarthermische Kraftwerke mit einer elektrischen Leistung von maximal 50 MW erhalten danach einen Bonus von 0,12 Euro/kWh<sub>el</sub>. Voraussetzung ist, dass das Kraftwerk rein solar betrieben wird.

Vier Kraftwerksprojekte sind derzeit in Spanien in Vorbereitung - zwei Solarturm- und zwei Parabolrinnenprojekte (Abb 6). Das Solarturmkraftwerk PS10 wird derzeit 15 km westlich von Sevilla errichtet. Knapp 1.000 nachgeführte Heliostaten mit je 90 m<sup>2</sup> Fläche sollen über einen Satteldampf-Receiver erhitzen. In einem Dampfturbinen-Prozess wird eine elektrische Leistung von

11 MW erbracht werden. Um Leistungsschwankungen auszugleichen wird ein 305 m<sup>3</sup> großer Wärmespeicher integriert. Er dient dazu, die Energie für eine Volllaststunde speichern zu können. Der Betriebsbeginn ist für Mitte 2004 geplant.

Die größten Projekte in Spanien sind die Parabolrinnenkraftwerke AndaSol-1 und AndaSol-2 süd-östlich von Granada. Die 50 MW<sub>el</sub>-Anlagen werden mit EuroTrough-Kollektoren mit einer Gesamtfläche der Solarfelder von je 510.120 m<sup>2</sup> bestückt. Um die Auslastung des Kraftwerks und damit die Wirtschaftlichkeit zu steigern, wird ein Flüssigsalzspeicher mit einer thermischen Kapazität von 6 Volllaststunden eingebunden. Der Baubeginn ist für 2004 geplant.

Ab Ende 2006 werden die beiden Blöcke jährlich rund 160 GWh Solarstrom ins spanische Netz einspeisen.

Aufbauend auf den Erfahrungen mit dem zwischen 1996 und 1999 in Kalifornien betriebenen Solarturmkraftwerk „Solar Two“ ist ein Nachfolgeprojekt in Planung. „Solar Tres“ soll in der Nähe von Cordoba mit einer Leistung von 15 MW<sub>el</sub> an den Start gehen. Ein weiteres Parabolrinnen-Vorhaben ist EuroSEGS, ein auf 15 MW ausgelegtes Kraftwerk, das in der Provinz Navarra in der Nähe von Pamplona entstehen soll. Die Realisierung von Solar Tres und EuroSEGS ist in jüngster Zeit jedoch fraglich geworden.

Abb 6: Überblick solarthermischer Kraftwerksprojekte in Spanien

Projektname	Technik	Lokation	Leistung	Speicherkapazität	Investitionen	Beteiligte Firmen und Institutionen
PS10	Solarturm-Kraftwerk / Satteldampf-Receiver	Seville Province	11 MW	1 h	28 Mio. Euro	Abengoa, Inabensa, Solucar, CIEMAT, DLR
Solar Tres	Salzturm	Cordoba Province	15 MW	16 h	-	Ghersa, Nexant, Bechtel, Boeing
AndaSol 1 u. 2	Parabolrinnentechnik / EuroTrough	Granada Province	2 x 50 MW	6 h	Je Kraftwerk ca. 200 Mio. Euro	Solar Millennium, Flabeg, Schlaich, Bergermann & Partner
EuroSEGS	Parabolrinnentechnik / LS-2 und DS1 Troughs	Navarra Province	15 MW	0 h	-	EHN, Duke Solar, CIEMAT

## Fazit und Ausblick

Die weltweit bislang einzigen kommerziell betriebenen solarthermischen Kraftwerke produzieren unter kalifornischer Sonne elektrischen Strom zu konkurrenzfähigen Preisen. Die letzte der insgesamt neun Anlagen wurde 1991 errichtet. Nachfolgeprojekte blieben bislang aus. Die Situation hat sich in Europa insbesondere durch das novellierte Einspeisegesetz in Spanien grundlegend gewandelt. Am weitesten gediehen sind die Parabolrinnenprojekte der Solar Millennium AG. Die vorläufige Baugenehmigung des spanischen Industrieministeriums liegt vor. Ähnlich weit ist das Solarturm-Projekt bei Sevilla des spanischen Konzerns Abengoa.

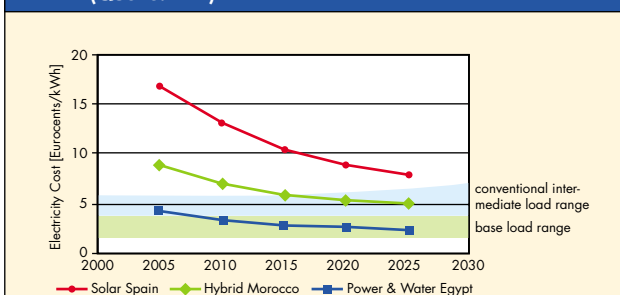
Weltweit sind eine Reihe von Demonstrationskraftwerken in der Planung. So fördert Global Environment Facility (GEF) unter anderem Kraftwerksprojekte in Mathania (Indien), Ain Beni Mathar (Marokko), Kuraymat (Ägypten) und Hermosillo (Mexiko). Einen Überblick bietet [www.solarpaces.org/projects.htm](http://www.solarpaces.org/projects.htm). Eine Zusammenstellung

der von der Bundesregierung geförderten Vorhaben finden Sie auf der BINE-Website unter der Rubrik „Service/InfoPlus“.

Neben der Technik werden energiepolitische Instrumente entwickelt, die die Markteinführung in Ländern des Sonnengürtels ermöglichen. Denn solarthermisch erzeugter Strom ist derzeit noch ca. 10 bis 15 ct/kWh teurer als fossil erzeugter Strom. Die Stromgestehungskosten hängen ab von den lokalen Gegebenheiten

wie der solaren Einstrahlung und der jeweils angewendeten Technik. Kosten können u. a. durch Skaleneffekte und höhere Volllastzeiten, durch Wärmespeicherung und Hybridbetrieb mit Brennstoffen reduziert werden. Eine Abschätzung der künftigen Kostenentwicklung unter verschiedenen lokalen Rahmenbedingungen bietet **Abb 7**.

**Abb 7: Kostenperspektive für solarthermische Kraftwerke (Quelle: DLR)**



**Solar Spain:** Solaranteil 100%, Direktstrahlung 1.900-2.200 kWh/m<sup>2</sup>a, Kapazitätsfaktor 20-50%

**Hybrid Morocco:** Hybride Stromerzeugung, Solaranteil 25-75%, Direktstrahlung 2.200-2.500 kWh/m<sup>2</sup>a, Kapazitätsfaktor 40-75%

**Power & Water Egypt:** Hybride Co-Erzeugung von Strom und entsalztem Trinkwasser; Solaranteil 25-75%, Direktstrahlung 2.500-2.850 kWh/m<sup>2</sup>a, Kapazitätsfaktor 85%, Erlös Trinkwasser 1 Euro/m<sup>3</sup>

**Allgemeine wirtschaftliche Annahmen:** Diskontsatz 8%, Anlagenlebensdauer 25 Jahre, Brennstoffkosten 2-4 Euro/GJ, Preissteigerung 0,5%/a.

## PROJEKTORGANISATION

### Förderung

Bundesministerium für Umwelt,  
Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)  
Postfach 12 06 29  
53048 Bonn

KfW Bankengruppe  
LlB2 (Kompetenz-Center Energie)  
Rolf Seifried  
Palmengartenstr. 5-9  
60325 Frankfurt/Main

## IMPRESSUM

### ISSN

0937 – 8367

### Herausgeber

Fachinformationszentrum Karlsruhe,  
Gesellschaft für wissenschaftlich-technische  
Information mbH  
76344 Eggenstein-Leopoldshafen

### Nachdruck

Nachdruck des Textes nur zulässig bei  
vollständiger Quellenangabe und gegen  
Zusendung eines Belegexemplares;  
Nachdruck der Abbildungen nur mit  
Zustimmung der jeweils Berechtigten.

### Autor

Paul Feddeck

## BINE Informationsdienst Kompetenz in Energie

BINE informiert zu Energieeffizienz-  
technologien und erneuerbaren Energien:

In kostenfreien Broschüren, unter  
[www.bine.info](http://www.bine.info) und per Newsletter zeigt  
BINE, wie sich gute Forschungsideen in  
der Praxis bewähren.

BINE ist ein vom Bundesministerium für  
Wirtschaft und Arbeit geförderter Infor-  
mationsdienst.

### Kontakt:

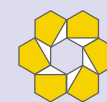
Fragen zu diesem **projektinfo?**

Wir helfen Ihnen weiter – wählen Sie  
die BINE Experten-Hotline:

Tel. 0228 / 9 23 79-44

### Allgemeine Fragen?

Wünschen Sie allgemeine Informationen  
zum energie- und umweltgerechten Pla-  
nen und Bauen? Dann wenden Sie sich  
bitte an die unten stehende Adresse.



# BINE

Informationsdienst

Fachinformationszentrum Karlsruhe  
Büro Bonn  
Mechenstraße 57, 53129 Bonn

Fon: 0228 / 9 23 79-0  
Fax: 0228 / 9 23 79-29

E-Mail: [bine@fiz-karlsruhe.de](mailto:bine@fiz-karlsruhe.de)  
Internet: [www.bine.info](http://www.bine.info)

## LITERATUR

- Pitz-Paál, R.: Solarthermische Kraftwerke. Wie die Sonne ins Kraftwerk kommt. Physik in un-serer Zeit, Spezial: Solarenergie, 35. Jahrgang, 1/2004, ISSN 0031-9252, (2004), S. 12-19.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Concentrating Solar Power Now, Clean Energy for sustainable development. July 2002.
- Forschungsverbund Sonnenenergie: Solare Kraftwerke. Berlin, 2003. ISSN 0939-7582
- Weinbe, G.; Laing, D.: Anhang B: Solarthermische Stromerzeugung. In: Kaltschmitt, M. (Hrsg.); Wiese, A. (Hrsg.); Streicher, W. (Hrsg.): Erneuerbare Energien. Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte. Berlin: Springer, 2003. ISBN 3-540-43600-6. S. 591-627
- Quaschnig, V.: Technology Fundamentals - Solar Thermal Power Plants. Renewable Energy World. Vol. 6 (2003) No 6, 109-113.

## ERGÄNZENDE INFORMATIONEN

### Service

- Ergänzende Informationen wie Literatur, Adressen und Internet-Links sind unter [www.bine.info](http://www.bine.info) in der Rubrik „Service/InfoPlus“ abrufbar.

### Links

- [www2.dlr.de/PSA](http://www2.dlr.de/PSA)
- [www2.dlr.de/TT/solartherm](http://www2.dlr.de/TT/solartherm)
- [www.fv-sonnenenergie.de](http://www.fv-sonnenenergie.de)
- [www.solarpaces.org](http://www.solarpaces.org)