



## Solarthermische Kraftwerke werden Praxis

Abb. 1



- ▶ **Markteinführung von Parabolrinnenkraftwerken ist am weitesten fortgeschritten**
- ▶ **Im Sonnengürtel der Erde erzeugen solarthermische Kraftwerke den kostengünstigsten Solarstrom**
- ▶ **Ziel 2020 der deutschen Roadmap: Weltweit mindestens 12.000 MW sowie deutliche Senkung der Strom- und Investitionskosten**
- ▶ **Gesetzliche Einspeisevergütung in Spanien ist wichtige Motivation für solarthermische Kraftwerke**

*Solarthermische Kraftwerke, hier eine Parabolrinne, brauchen einen hohen Anteil direkter Sonnenstrahlung. Nur diese lässt sich so auf Punkte oder Linien bündeln, dass hohe Temperaturen entstehen.*

**B**ereits seit rund 20 Jahren existieren im Süden der USA neun solarthermische Kraftwerke mit insgesamt 354 MW<sub>el</sub> Leistung. Zwar gab es in den Jahren danach national wie international kontinuierliche Forschungsaktivitäten, aber bis etwa zum Jahr 2006 stagnierte die weitere Markteinführung. Seither gehen wieder neue solarthermische Kraftwerke mit optimierter Technik in Betrieb und weltweit sind viele weitere Projekte in Planung. Immer mehr Länder im Sonnengürtel wollen angesichts der hohen Energiepreise, der Klimaproblematik und wachsender Stromnachfrage ihre natürlichen Möglichkeiten nutzen, solare Hochtemperaturwärme in Kraftwerken zur CO<sub>2</sub>-freien Stromerzeugung einzusetzen. Diese Solarkraftwerke können im Verbund mit fossiler Kraftwerkstechnik als Hybridkraftwerk arbeiten und eignen sich auch sehr gut für die Meerwasserentsalzung. Deutsche Forschungsinstitute und Firmen sind seit Jahren in der Entwicklung solarthermischer Kraftwerkstechnik engagiert. Sowohl bei den Komponenten als auch bei Auslegung und Konzeption kompletter Systeme inklusive der Kraftwerkstechnik zählen sie technologisch zur Weltspitze. Die Forschungsförderung durch das

Bundesumweltministerium hat dazu beigetragen, die Kollektor-, Absorber- und Speicherkomponenten auf das heutige technologische Niveau zu entwickeln.

Vier verschiedene Typen solarthermischer Kraftwerke, unterschieden nach der Art des Spiegelsystems, sind auf dem Markt: Parabolrinnenkraftwerke, solare Turmkraftwerke, Dish-Stirlingsysteme und die Fresnelsysteme. In Europa wurden Konzepte und Komponenten auf dem internationalen Testfeld Plataforma Solar de Almería in Spanien erprobt, mit dem Deutschland seit mehr als 30 Jahren eng zusammenarbeitet. Motiviert durch die in Spanien seit 2004 gesetzlich garantierte Vergütung für Strom aus solarthermischen Kraftwerken entstanden dort Planungen für kommerzielle Parabolrinnenkraftwerke. Mit Andasol I geht im Sommer 2008 das erste derartige Kraftwerk in Süds Spanien in Betrieb, zwei weitere werden folgen. Jedes Kraftwerk kann etwa 200.000 Menschen mit Solarstrom versorgen. Auch die Forschungen an Solarturmkraftwerken laufen weiter. Ende 2008 wird in der deutschen Stadt Jülich ein Turmkraftwerk als Forschungsprojekt ans Netz gehen.

## ► Solarthermische Kraftwerke

Auf dem Markt der solarthermischen Kraftwerke stehen heute vier Technologien zur Verfügung, die sich in unterschiedlichen Entwicklungsstadien befinden. Parabolrinnen-, Fresnel und Turmkraftwerke sind größere, netzintegrierte Kraftwerke. Einzelne Dish-Stirling-Systeme werden meist für kleine, dezentrale Anwendungen eingesetzt; mehrere dieser Anlagen lassen sich auch zu einer „Solarfarm“ verbinden und ins Netz integrieren.

### Parabolrinnenkraftwerke

Lange, verspiegelte und parabol-förmige Rinnen, die durch Drehung um die Längsachse dem Sonnenstand nachgeführt werden, sammeln das Sonnenlicht ein und konzentrieren es um das 80-fache auf eine Brennlinie (Abb. 1, 2). Dort befindet sich ein Stahlrohr mit einer selektiven Beschichtung als Absorber. In dieser Rohrleitung zirkuliert als Wärmeträger ein Thermoöl, das Temperaturen knapp unter 400 °C erreicht. Um Wärmeverluste zu vermeiden, umhüllt eine evakuierte Glasröhre das Stahlrohr; die gesamte Komponente wird dann Receiver (Abb. 3) genannt. Bei Parabolrinnenkraftwerken sind Hunderte von Rinnen in einem Raster angeordnet. Im Zentrum der Anlage befindet sich ein zentrales Gebäude mit dem konventionellen Kraftwerksteil. Hier münden alle Absorber-

Abb. 2: Bei Parabolrinnen werden die Spiegel über eine Achse dem täglichen Sonnenstand nachgeführt.

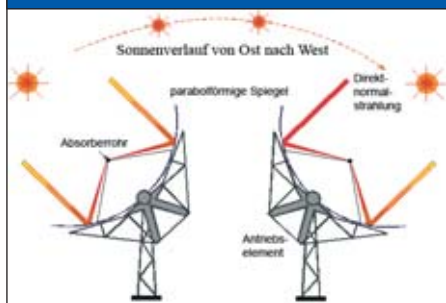


Abb. 3: Ein Receiver in der Produktion



rohre. Die „geerntete“ Wärme geht über einen Wärmetauscher an einen Dampferzeuger über. Mittels einer Dampfturbine wird dann ein Generator betrieben. Parabolrinnenkraftwerke sind bislang die kostengünstigste Form der solarthermischen Kraftwerke.

### Solare Turmkraftwerke

Turmkraftwerke bestehen aus einem zentralen, 50 – 170 m hohen Turmbauwerk mit einem Strahlungsempfänger (Receiver) und einem Feld darauf ausgerichteter, ebener Spiegel (Heliostaten). Diese zweiachsig der Sonne nachführbaren Spiegel reflektieren das einfallende Sonnenlicht und konzentrieren es um das 500 – 1.000-fache auf eine Zielfläche des Receiver am Turm (Abb. 4). Die dort entstehende Wärme erhitzt Wärmeträgermedien, welche Temperaturen zwischen 300 bis 1.100 °C, abhängig von der eingesetzten Technologie, erreichen können. Konventionelle Kraftwerksprozesse schließen sich an. Die bisher gebauten oder geplanten kommerziellen Turmkraftwerke liegen im Leistungsbereich von 10 – 20 MW<sub>el</sub>.

Abb. 4: Jeder Spiegel "zielt" auf den Receiver des Turms (Almeria)



Abb. 5: Der „EuroDish“ (8,5 m Durchmesser)



### Dish-Stirling Kraftwerke

Diese Kraftwerke sind für dezentrale Anwendungen konzipiert und ein großer Spiegel bündelt das Sonnenlicht auf eine Zielfläche. Hier befindet sich als stromerzeugende Einheit ein Stirlingaggregat, das typischerweise 5 – 50 kW elektrische Leistung erbringt (Abb. 5). Die Größe des Spiegels, der zweiachsig nachführbar ist, wird durch mögliche Windlasten begrenzt und beträgt bis zu 21 m Durchmesser.

### Solare Hochtemperatur und Kraftwerksprozesse

Die Effizienz von Wärme-Kraft-Prozessen steigt mit Temperatur und Druck. Das in fossilen Kraftwerken bislang übliche Temperaturniveau von nahe 600 °C erreichen Parabolrinnenkraftwerke mit 400 °C im Wärmeträgermedium nicht. Aber diese Temperatur reicht bereits für einen sinnvollen Wärme-Kraft-Prozess aus, wenn die Dampfturbinen entsprechend angepasst sind. Höhere Effizienz verspricht eine Temperaturanhebung auf 500 °C bei 100 bar Druck. Hierfür werden ein passendes Wärmeträgermedium sowie neue Materialien und Konstruktionen benötigt. Eine zweite Möglichkeit für einen effizienteren Prozess sind Direktverdampfersysteme, bei denen Wasserdampf als Wärmeträger direkt im Absorberrohr der Kollektorrinnen erhitzt wird. Diese Systeme arbeiten ohne Wärmetauscher und zeichnen sich daher durch geringere Temperaturverluste aus.

Solarturmkraftwerke können mit bis zu 1.100 °C deutlich höhere Temperaturen als Parabolrinnenkraftwerke erreichen. Die bislang üblichen Wärmeträgermedien Wasserdampf, Salzschnmelze oder Thermoöl arbeiten in einem Temperaturbereich (Dampfzustände von 250 bis 550 °C), der nur einen konventionellen Dampfturbinenprozess ermöglicht. Setzt man stattdessen Luft als Wärmeträger in einem geschlossenen System ein, kann ein Solarturmkraftwerk den Temperaturbereich (> 1.000 °C) für einen kombinierten Gas- und Dampfturbinen-Prozess erreichen. Dies verspricht eine etwa 25 – 35% höhere Stromausbeute bzw. ca. 20% geringere Stromgestehungskosten (derzeit 15 – 20 €-Cent/kWh).

Die Versorgung solarthermischer Kraftwerke mit notwendigem Kühlwasser ist im Sonnengürtel oft schwierig. Setzt man für diesen Zweck Meerwasser ein, kann man die Abwärme zur Meerwasserentsalzung nutzen.

### Solarstrom auch bei Nacht

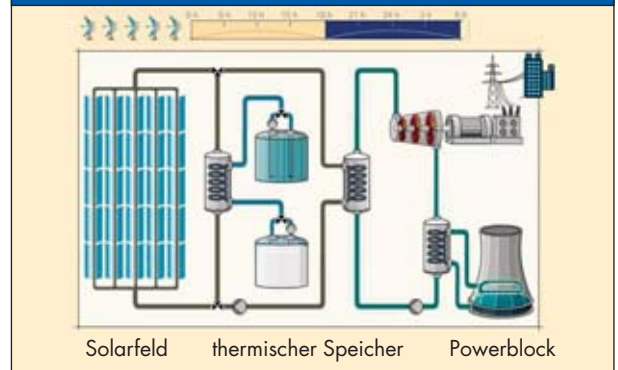
Solarthermische Kraftwerke produzieren Strom – gut prognostizierbar – zunächst nur während der Tagesstunden und bei Sonnenschein. Einerseits liegt damit die Stromproduktion zeitgleich zu hohem Strombedarf in Netzen, z. B. zum Kühlen oder Klimatisieren. Andererseits könnte eine Stromproduktion auch nach Sonnenuntergang zur Wirtschaftlichkeit beitragen und würde auch Mittel- bzw. Grundlasten des Netzes abdecken. Eine Möglichkeit hierfür ist, tagsüber einen Wärmeüberschuss, der nicht zur direkten Verstromung benötigt wird, in großen thermischen Speichern einzulagern, z. B. mit einer Salzschnmelze als Wärmeträger. Salze sind ungiftig und geschmolzen lassen sie sich drucklos speichern. Nach Sonnenuntergang wird die im geschmolzenen Salz gespeicherte Wärme über einen Wärmetauscher dem Kraftwerksprozess wieder zugeführt und verlängert so die Zeit der solaren Stromproduktion um entscheidende Stunden. Derartige Kraftwerke können bis zu 3.600 Volllaststunden erreichen, was sie als Mittellastkraftwerke qualifizieren würde. Vorteil wären bis zu 20% niedrigere Stromgestehungskosten. Eine zweite Möglichkeit sind sogenannte Hybridkraftwerke, bei denen z. B. ein Erdgaskessel parallel oder ergänzend zum Solarkraftwerk betrieben wird.

# ► Andasol I – das erste Parabolrinnenkraftwerk in Europa

Abb. 6: Kraftwerk Andasol I in der Bauphase (im Hintergrund die Sierra Nevada)



Abb. 7: Kraftwerk Andasol I



Nach zwei Jahren Bauzeit geht im Sommer 2008 in der spanischen Provinz Andalusien das kommerzielle Rinnenkraftwerk Andasol I in Betrieb. 624 Rinnen (je 150 m lang und 5,5 m breit) ergeben insgesamt 510.000 m<sup>2</sup> Spiegelflächen. Das Kraftwerk hat eine Leistung von 50 MW<sub>el</sub> und soll im Jahr 178 Mio. kWh Strom erzeugen. Dies deckt etwa den Bedarf von 200.000 Menschen. Zwei baugleiche Kraftwerke (Andasol II und III) werden in der Nachbarschaft errichtet und 2009/2010 ans Netz gehen. Deutsche Firmen sind in den Bereichen Planung, Auslegung und

Bauüberwachung sowie bei den zentralen Komponenten Spiegel, Receiver, Dampfturbine und der Steuerung beteiligt. Die Sonneneinstrahlung am Standort Andasol würde an einem normalen Tag eine sechsstündige Stromproduktion ermöglichen, was im Jahr etwa 2.000 Volllaststunden entspricht. Um durch eine längere Stromproduktion pro Tag die Wirtschaftlichkeit der Anlage zu verbessern, wurde ein Hochtemperatur-Wärmespeicher in das Kraftwerk integriert (Abb. 7). Die Kollektoren sind so ausgelegt, dass bei voller Einstrahlung kontinuierlich

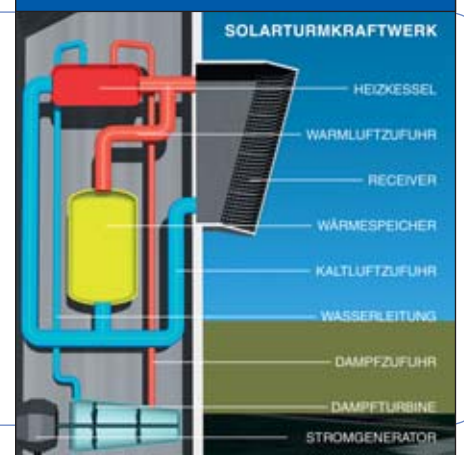
ein Wärmeüberschuss anfällt. Dieser wird in einem großen Salzspeicher (28.500 t Salz-mischung) eingelagert. Das Salz erwärmt sich auf 390 °C, verflüssigt sich dabei, wird dann nach Sonnenuntergang über einen Wärmetauscher geführt und in den zweiten Speicher gepumpt. Die dabei ausgekoppelte Wärme ermöglicht dem Kraftwerk weitere 7 Stunden Stromproduktion. So ist täglich eine Stromerzeugung über 13 Stunden möglich, was sich im Jahr auf 3.600 Volllaststunden addiert.

## ► Versuchskraftwerk „Solarturm Jülich“

Ende 2008 wird in Jülich ein Solarturmkraftwerk mit insgesamt 20.000 m<sup>2</sup> Spiegelflächen und einem 49 m hohen Turm zu Forschungszwecken ans Netz gehen. Bei diesem Projekt wird konzentrierte Strahlung in einem porösen, keramischen Material in Hochtemperatur gewandelt (Abb. 8). Dieses wird von Luft durchströmt, die dabei Temperaturen von 700 °C erreicht (offen volumetrisches System). Es schließt sich dann ein Dampfkreislauf mit Generator an. Das Turmkraftwerk wird über 1,5 MW Leistung verfügen und etwa 1 Mio. kWh

Strom pro Jahr erzeugen. Dank der Speicherung von überschüssiger Wärme in einem isolierten Stahltank mit einer keramischen Schüttung kann das Kraftwerk auch eine Stunde bedeckten Himmel überbrücken. Ziel des Projekts ist, Erfahrungen mit dem Zusammenspiel der einzelnen Komponenten als Gesamtsystem zu sammeln. In einer späteren Projektphase sind die Integration einer Biomasseverbrennung und der kombinierte Gas- und Dampfturbinenprozess angedacht.

Abb. 8: Schnitt durch den Receiver und den Kraftwerksteil im Solarturm



## ► Ziele der deutschen Energieforschung

Mittelfristig sollen die Stromgestehungskosten solarthermischer Kraftwerke konkurrenzfähig zu konventionellen Kraftwerken werden. Parabolrinnenkraftwerke sind am weitesten entwickelt, Turmkraftwerke haben durch die erreichbaren höheren Temperaturen noch erhebliche Entwicklungschancen. Schwerpunkt der vom Bundesumweltministerium moderierten „Roadmap für den Ausbau solarthermischer Kraftwerke“ (2006) ist die Nutzung aller Kostensenkungspotenziale. Als weitere Ziele sind zu nennen: eine kontinuierliche Optimierung aller Komponenten, höhere Temperaturen im Kraftwerksprozess, die Integration von Gasturbinen und ein automatisierter Anlagenbetrieb sowie die Entwicklung neuer Materialien,

**Abb. 9: Ausgewählte, 2007 begonnene deutsche Forschungsprojekte** (blau = Projekte, gelb = Studien)

Bezeichnung	Technologie	Ziel
REAL-DISS	P	Entwicklung von Speichercomponenten und Absorber für 500 °C und 100 bar Dampfdruck im Kraftwerksbereich
ANDA-NT	P	Optimierung des Kollektorfelds, z. B. durch genauere Fokussierung. Ziel sind Kostensenkung, andere Kollektorkonstruktionen, neue Materialien.
QUARZ-CSP	P	Zertifizierungsfähige Standards und Prüfverfahren für die technische Zuverlässigkeit der Komponenten und deren Zusammenspiel
FRESDEMO	F	Fresnel-Demonstrationskollektor mit 1.500 m <sup>2</sup> (Flach-) Spiegelfläche und 400 °C Temperatur sowie Direktverdampfertechnologie
FUTUR	T	Entwicklung eines geschlossenen Receiver (Temperaturen über 1.000 °C), u. a. für hocheffizientes Gas- und Dampfturbinenkraftwerk
USHYNE	T	Machbarkeitsstudie für ein hybrides Gasturbinensystem mit Meerwasserentsalzung
AQUA-CSP	All.	Potenziale und Einsatzmöglichkeiten solarthermischer Kraftwerke zur Meerwasserentsalzung in Nordafrika und dem Mittleren Osten
MEDIFRES	All.	Konzepte und Anwendungen für solarthermische Kraftwerke für mittlere und niedrige Leistungsbereiche

innovativer Speichersysteme und der Direktverdampfer-Technologie (Abb. 9).

P = Parabolrinnen; T = Solarturm; F = Fresnelssysteme; All = übergreifende Themen

## Der Sonnengürtel der Erde

Zwischen dem nördlichen und südlichen 35. Breitengrad (mit Einschränkungen im Äquatorialgürtel), dies entspricht etwa der Lage des afrikanischen Kontinents, herrscht ein hoher Anteil direkter Sonneneinstrahlung vor. Nur diese lässt sich mit Spiegelsystemen fokussieren und für eine solarthermische Stromerzeugung nutzen. In Europa liegen vergleichbare Einstrahlungsbedingungen im Süden Spaniens, Portugals, Italiens, Griechenlands sowie auf Malta und Zypern vor. Neben den Kraftwerken in Spanien und den USA sind weitere Projekte in Italien, Nordafrika, dem Mittleren Osten, Australien, China und Indien in Planung oder im Bau. Wirtschaftlich ist solarthermische Stromerzeugung nur im Sonnengürtel sinnvoll. Das hier vorhandene, technisch nutzbare Potenzial ist um ein Mehrfaches größer als der weltweite Strombedarf.

## ► Interkontinentaler Solarstromverbund

Rein rechnerisch reicht bereits etwa 1% der Fläche der Sahara aus, um den Strombedarf der Menschheit zu decken. Bereits die in Südeuropa und Nordafrika vorhandene Solarstrahlung würde für eine enorme Solarstromproduktion ausreichen. Damit ließe sich der lokale Strombedarf decken, mittels Meerwasserentsalzung auch Wasserprobleme lösen und ein Stromüberschuss für einen interkontinentalen Stromhandel erwirtschaften. Nach heutigem Stand böte ein derartiger Stromverbund ökonomisch und ökologisch große Chancen, aber diese Konzepte haben eher langfristig eine Perspektive. Einerseits gibt es in Europa noch kein Hochspannungs-Gleichstromnetz, welches für einen verlustarmen Stromtransport über derart lange Distanzen Voraussetzung wäre. Andererseits müssen die nordafrikanischen Staaten erst einmal große Anstrengungen unternehmen, ihren wachsenden eigenen Strombedarf zu decken, d. h. es gibt keine Stromüberschüsse in den nächsten Jahren. In Ägypten und Marokko entstehen derzeit erste Hybridkraftwerke mit Parabolrinnen.

## ► Fazit und Perspektiven

Eine Markteinführung neuer, technologisch verbesserter solarthermischer Kraftwerke hat begonnen. Immer mehr Länder des Sonnengürtels planen oder bauen bereits Anlagen. Ende 2007 sind weltweit 29 solarthermische Kraftwerksprojekte mit ca. 1.800 MW elektrischer Leistung bekannt, von denen mehr als ein Drittel auf die Projekte in Spanien entfallen. In vielen dieser Projekte sind deutsche Firmen bzw. von ihnen entwickelte Produkte und Know-how beteiligt.

In den Ländern des Sonnengürtels können solarthermische Kraftwerke bereits heute dazu beitragen, den wachsenden Strombedarf klimafreundlich zu decken. Heute liegen die Stromgestehungskosten bei ca. 15 – 20 €/Cent/kWh. Bis zum Ende des kommenden Jahrzehnts sollen sie, abhängig von den Rohstoffpreisen und dem zu realisierenden technischen Fortschritt, auf 6 – 15 €/Cent/kWh abgesenkt werden. Solarthermische Kraftwerke könnten bis zum Jahr 2020 in den Bereich von 12.000 – 20.000 MW<sub>el</sub> vorstoßen.

### ► PROJEKTADRESSEN

- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)  
Institut für Technische Thermodynamik  
Abteilung Solarforschung  
Prof. Dr. Robert Pitz-Paál  
Linder Höhe, 51147 Köln  
[www.dlr.de/tt/](http://www.dlr.de/tt/) (→ Solarforschung)

#### Weitere Beteiligte:

- Solar Millenium AG (Andasol):  
[www.solarmillenium.de](http://www.solarmillenium.de)
- Schott AG (Andasol, Receiver):  
[www.schott.de](http://www.schott.de) (→ Solar)
- Fa. Flabeg (Andasol, Spiegelsysteme)  
[www.flabeg.de](http://www.flabeg.de) (→ Solar Mirrors)
- Stadtwerke Jülich (Solarturm Jülich),  
[www.stadtwerke-juelich.de](http://www.stadtwerke-juelich.de)
- Solarinstitut Jülich (Solarturm Jülich)  
[www.fh-aachen.de/solar-institut.html](http://www.fh-aachen.de/solar-institut.html)
- Kraftanlagen München  
(Solarturm Jülich):  
[www.ka-muenchen.de](http://www.ka-muenchen.de)  
(→ Energie- und Umwelttechnik)

### ► ERGÄNZENDE INFORMATIONEN

#### Internet

- BINE-Projektinfo 12/03  
„Solarthermische Kraftwerke“
- Eine Linkliste zu einigen der erwähnten Studien finden Sie unter  
[www.bine.info](http://www.bine.info) (Service/Infoplus)

#### Internet

- DLR-Abt. Thermodynamik/Solarforschung:  
[www.dlr.de/tt/](http://www.dlr.de/tt/)
- Almeria-Testzentrum: [www.psa.es](http://www.psa.es)
- Solarpaces-Netzwerk: [www.solarpaces.org](http://www.solarpaces.org)  
(Implementing agreement der IEA)

#### Abbildungsnachweis

- Abb. 1,2,6,7: Solar Millenium AG
- Abb. 3: Schott AG
- Abb. 4: DLR
- Abb. 5: Prof. Quaschnig
- Abb. 8: Stadtwerke Jülich

## PROJEKTORGANISATION

- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)  
11055 Berlin

Projektträger Jülich  
Forschungszentrum Jülich GmbH  
Dr. Hermann Bastek  
52425 Jülich

- Förderkennzeichen  
0329609A – C, 0329285A – B,  
03UM0090 – 0094,  
03UM0083 – 0084,  
03UM0095,  
03UM0069,  
03UM88,  
03UM0062

## IMPRESSUM

- ISSN  
0937 – 8367
- Version in Englisch  
Dieses Projekt-Info bieten wir Ihnen als PDF auch in englischer Sprache unter [www.bine.info](http://www.bine.info) an.
- Herausgeber  
FIZ Karlsruhe  
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1  
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  
Uwe Milles

## BINE Informationsdienst Kompetenz in Energie

BINE informiert zu Energieeffizienztechnologien 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 Technologie geförderter Informationsdienst von FIZ Karlsruhe.

#### Kontakt

Fragen zu diesem **projektinfo**?  
Wir helfen Ihnen weiter:

**Tel.: 0228 92379-44**

 **BINE**  
Informationsdienst

FIZ Karlsruhe, Büro Bonn  
Kaiserstraße 185 – 197  
53113 Bonn

Tel.: 0228 92379-0  
Fax: 0228 92379-29

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