



## Geothermische Stromerzeugung im Verbund mit Wärmenetz

Abb. 1



- ▶ **Erstes geothermisches Kraftwerk in Süddeutschland**
- ▶ **Temperatur und geförderte Wassermenge höher als ursprünglich erwartet**
- ▶ **Im Projektverlauf wechselte Schwerpunkt von Strom- auf Wärmenutzung**
- ▶ **Nach nur 18 Monaten deckt die Geothermie 25% des örtlichen Wärmebedarfs**

*In Unterhaching ging die erste Kalina-Anlage zur Stromerzeugung in der EU in Betrieb. Im Gebäude des geothermischen Kraftwerks befindet sich auch die Förderpumpe für das Thermalwasser sowie die oberirdische Anlage mit den Plattenwärmetauschern für das Wärmenetz.*

**D**ie Region zwischen Schwäbischer und Fränkischer Alb und dem Nordrand der Alpen, bekannt auch als süddeutsches Molassebecken, verfügt über große Erdwärmeressourcen (Geothermie). Dank der in einer Tiefe von 1.500 bis 5.000 m zu findenden Warmwasservorkommen gibt es hier seit Jahrzehnten viele Kurorte mit Thermalbädern. In den letzten Jahren haben bereits einige Gemeinden begonnen, die Geothermie in ihre örtliche Wärmeversorgung zu integrieren.

Die Gemeinde Unterhaching, südlich von München gelegen, nutzt bereits seit 2007 diese Geothermievorkommen in einem kommunalen Wärmenetz. Im Frühjahr 2009 ging hier das erste geothermische Kraftwerk in Süddeutschland in Betrieb. Zehn Jahre zuvor hatte die Gemeinde mit einem Energiekonzept begonnen und als ersten Schritt einen Wärmetlas erstellen lassen. Hieraus entwickelte sich der Plan, bis 2015 mindestens 50% des örtlichen Energiebedarfs durch effizientere Systeme zu decken. 2001 entschied sich der Gemeinderat für den Bau einer Geothermieanlage. Zwei Bohrungen fanden in Unterhaching ergiebige Warmwasservorkommen mit mehr als 120 °C. Das ursprüngliche Nutzungskonzept hatte eine stromgeführte Betriebs-

weise vorgesehen, d. h., die Erdwärme sollte in erster Linie zur Stromerzeugung und anschließend zur Wärmeversorgung kommunaler Gebäude eingesetzt werden. Motiviert durch die zwischenzeitlich stark gestiegenen Preise für fossile Energieträger und die unerwartet hohen Temperaturen und Förderraten des Thermalwassers, wurde im Projektverlauf die Priorität auf eine flächendeckende Wärmeversorgung der Kommune verlagert. So entstand ein neues Fernwärmenetz, das derzeit bereits 25% des örtlichen Bedarfs abdeckt und weiter ausgebaut wird. Nur die nicht benötigte Wärme wird in einem Kraftwerk verstromt, das speziell für Niedertemperaturwärme ausgelegt ist. Erstmals in der EU wurde dabei im Kraftwerksprozess ein Stoffgemisch aus Wasser und Ammoniak als Arbeitsmedium eingesetzt (Kalina-Verfahren).

Auch im Projektmanagement, z. B. bei den Themen Fündigkeitsversicherung, Bohrverträgen und Tarifgestaltung für die Fernwärmekunden, wurden Musterlösungen gefunden, die ähnliche Vorhaben andernorts erleichtern können. Die geologische Erkundung und die Erprobung einer Kalina-Anlage wurden durch das Bundesumweltministerium (BMU) gefördert.

## ► Geologie im Molassebecken

Ein großes Reservoir für geothermische Energie befindet sich in den Kluft-Karst-Aquiferen des Malm, einer anderen Bezeichnung für das Obere Jura. Die Gesteine des Malm befinden sich im tieferen Untergrund einer geologischen Struktur, die als süddeutsches Molassebecken bezeichnet wird (Abb. 2, 3). Das Becken erstreckt sich über eine Fläche von 700 km in Ost-West-Richtung und 250 km in Nord-Süd-Richtung. Vor Millionen von Jahren lagerte hier ein urzeitliches Meer Kalke, Sande und Tone ab, die sich im Untergrund zu kalkigem Feinsandstein, Karbonaten und Mergel verfestigten. Durch tektonische Rissbildungen und Wasserausspülungen entstand der sogenannte Karst, der im Bereich der Klüfte sehr wasserdurchlässig sein kann.

Die für eine Geothermienutzung interessanten Schichten (Oberer- oder Top-Malm) liegen in einer Tiefe zwischen rund 1.500 und 5.000 m und weisen Temperaturen zwischen 85 und mehr als 140 °C auf. Im Süden der Molasse, unterhalb einer Tiefe von ca. 3.000 m, sind Thermalwasservorkommen mit mehr als 100 °C zu finden, die für eine

geothermische Stromerzeugung geeignet sind. Nach Süden hin nimmt die Verkarstung ab, sodass hier geothermische Suchbohrungen möglichst genau geologische Störzonen treffen müssen, um erfolgreich zu sein. In diesen Zonen ermöglichen Brüche, Risse und Klüfte in der Tiefe hohe Fördermengen von Thermalwässern. Bereits in früheren Jahrzehnten hatten Suchbohrungen nach Erdöl Hinweise auf Warmwasservorkommen in der Molasse geliefert. Die damals ermittelten Daten wurden im Zuge des Geothermieprojekts zur Analyse des lokalen Verlaufs der Störzonen neu ausgewertet und zur Festlegung der Bohrplätze genutzt. Die gesuchte Gesteinsformation befindet sich in Unterhaching in einer Tiefe zwischen 3.000 und 3.600 m und besteht überwiegend aus feinporesem Kalkstein und Dolomit. Sowohl die vorgefundene Wassertemperatur als auch die erreichbaren Fördermengen übertrafen die ursprünglichen Erwartungen deutlich.

Abb. 2: Geothermisches Potenzial im Voralpenland

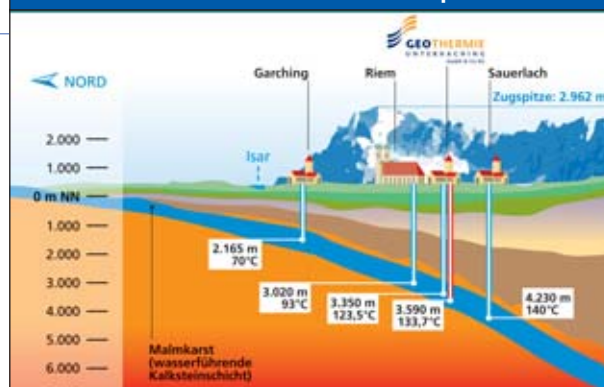
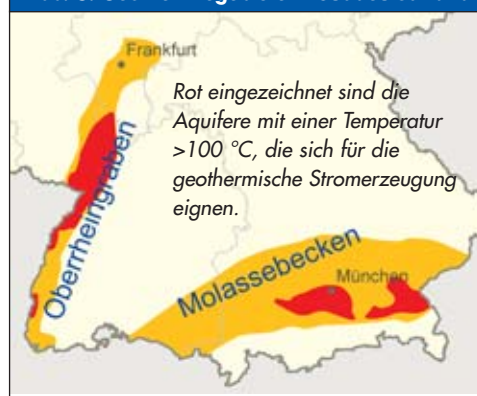


Abb. 3: Geothermiegebiete in Süddeutschland



## ► Geothermische Anlage

Zur Geothermieanlage Unterhaching (Abb. 4, 5) gehören zwei Bohrungen (Bohrdublette). Das Thermalwasser wird in der Förderbohrung an die Erdoberfläche gepumpt. Dann durchströmt es in einer Thermalwasserleitung die obertägige Anlage mit Wärmetauschern und fließt zum Erhalt der Aquifere schließlich abgekühlt in der Injektionsbohrung wieder in die Tiefe. Weitere Komponenten sind ein neues Fernwärmenetz, eine Stromerzeugungsanlage nach Kalina-Ver-

fahren sowie ein fossil befeuertes Redundanz- und Spitzenlastheizwerk. Die beiden Bohrungen liegen rund 3,5 km voneinander entfernt. Nach erfolgreicher Bewältigung geologischer und technischer Schwierigkeiten erreichte die Fördermenge 150 l/s. Überraschenderweise lag die vorgefundene Wassertemperatur in der Injektionsbohrung höher als in der Förderbohrung. Kurzzeitig wurde daher ein Wechsel der Fließrichtung des Thermal-

Abb. 4: Geothermieanlage Unterhaching

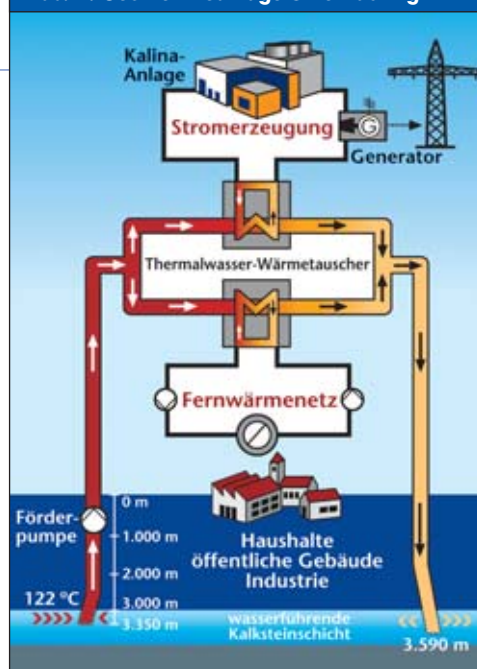


Abb. 5: Zeitplan und Kennwerte der Anlage Unterhaching

Zeitplan		Kennwerte	
1995 – 1997	Wärmeatlas für Gemeinde	<b>Förderbohrung</b> Länge der Bohrung Temperatur	3.446 m 122 °C
2001 – 2002	Geologische Voruntersuchung und Machbarkeitsstudie. Beschluss für Geothermie-Anlage. Zentrale Bedingung: Fündigkeitsversicherung	<b>Injektionsbohrung</b> Länge der Bohrung Temperatur	3.864 m 133 °C
2004	Förderbohrung	<b>Fördermenge</b>	bis zu 150 l/s
2006 – 2007	Injektionsbohrung	<b>geoth. Wärmeleistung</b> <b>foss. Wärmeleistung</b> (Spitzenlast, Redundanz)	bis zu 38 MW bis zu 47 MW
2006 – 2007	Aufbau von Wärmenetz, Obertageanlage und Redundanz-Heizwerk	<b>Fernwärmenetz (31.12.08)</b> Anschlussleistung	28 km Länge 30,4 MW (entspricht dem Wärmebedarf von ca. 3.000 Haushalten)
2007	Beginn der geothermischen Wärmeversorgung	Jahresheizleistung 2008	47.000 MWh
2006 – 2008	Bau und Inbetriebnahme der Kalina-Anlage	<b>geoth. Stromerzeugung</b> Elektrische Leistung Jährliche Stromerzeugung	3,4 MW (Mittelwert) 21,5 Mio. kWh (entspricht dem Jahresverbrauch von ca. 6.000 Haushalten)
Feb. 2009	Geothermische Stromerzeugung beginnt	<b>Jährliche CO<sub>2</sub>-Einsparung</b>	bis zu 35.000 t (nach Abschluss aller Ausbaumaßnahmen)
2. Jun. 2009	Offizielle Eröffnung	<b>Gesamtinvestitionen</b> (31. Dez. 2008)	ca. 80 Mio. Euro

wasserkreislaufs geprüft, der aber wegen des erforderlichen finanziellen Mehraufwands durch nachträgliche Änderungen verworfen wurde.

Das geförderte Thermalwasser weist einen Salzgehalt von 600 – 1.000 mg/l (hauptsächlich: Hydrogencarbonat) sowie gelöste Gase (z. B. Methan, Stickstoff) auf. Um chemische Ausfällungen und einen Eintrag von Sauerstoff in die Aquifere zu vermeiden, wird der Thermalwasserkreislauf mittels Stickstoff permanent unter Druck gehalten. Die Thermalwasserleitung zwischen den Bohrstellen besteht aus glasfaserverstärktem Kunststoff, um Korrosionsproblemen vorzubeugen.



Pro Jahr werden bei vollem Betrieb 4,7 Mrd. Liter Wasser durch die Thermalwasserleitung transportiert. Die Gesamtanlage kommt mit einer einzigen Förderpumpe aus. Für die bisher marktverfügbaren Pumpen stellten sowohl die Fördermenge

als auch das Temperaturniveau eine große Herausforderung dar. Seit Mitte 2009 wird der Prototyp einer für Geothermieanlagen optimierten Tiefpumpe eingesetzt, der diese Fördermenge bewältigen kann. Die geothermische Wärme wird über zwei parallel

installierte Wärmetauschergruppen für die Wärmeversorgung und die Stromerzeugung ausgekoppelt.

## ► Energiekonzept

Geothermische Energie ist mittlerweile eine feste Größe in der lokalen Energieversorgung. Das ursprünglich stromgeführte Nutzungskonzept wurde im Projektverlauf durch ein wärmegeführtes ersetzt. Angesichts der gestiegenen Preise für fossile Energieträger war es unter den örtlichen Gegebenheiten wirtschaftlich günstiger, die vorhandenen geothermischen Ressourcen zur flächendeckenden Wärmeversorgung einzusetzen und nur den Wärmeüberschuss zu verstromen. Dazu übernimmt eine automatisierte Steuerung die Aufteilung des Thermalwassers in die beiden Prozesse entsprechend dem Bedarf der angeschlossenen Fernwärmekunden.

Ein neues Wärmenetz mit 28 km Länge wurde in nur 18 Monaten verlegt. Es ist das größte neu installierte Fernwärmenetz in Deutschland seit den 1980er Jahren. Bis zum Jahr 2020 soll es auf 70 – 80 MW Anschlussleistung ausgebaut werden. Bei den Bürgern in Unterhaching stieß die Möglichkeit zum Anschluss an die Fernwärme auf reges Interesse. Entscheidend dazu beigetragen hat ein transparentes Preissystem mit konkurrenzfähigen Arbeitspreisen. Eine einmalige Anschlussgebühr sowie ein monatlich anfallen-

**Abb. 6: Preisbeispiel Fernwärme Unterhaching**

	Einfamilienhaus	Reihenhaus
<b>Geschätzter Verbrauch</b>	25.000 kWh/Jahr Umrechnung: 1 m <sup>3</sup> Gas = 9,18 kWh; 1 l Heizöl = 10,08 kWh	17.500 kWh/Jahr
<b>Jährliche Verbrauchskosten</b>	2.106 €/Jahr*	1.699 €/Jahr*
<b>Einmalige Anschlusskosten</b>	1.234 €* inkl. Wärmetauscher und 5 m Fernwärmeleitung auf Privatgrundstück	1.234 €* inkl. Wärmetauscher und 5 m Fernwärmeleitung auf Privatgrundstück

*Hinweise:*  
 1. Der geschätzte Verbrauch beruht auf einem angenommenen Jahreswirkungsgrad, der im Einzelfall abhängig vom Verbrauchsverhalten abweichen kann.  
 2. \* zzgl. Mehrwertsteuer  
 3. Stand 10/2009 – gültig bis 10/2010  
 4. Unter [www.geothermie-unterhaching.de](http://www.geothermie-unterhaching.de) steht ein aktuelles Preisblatt

der Grundpreis und Messpreis kommen noch hinzu (Abb. 6). Dieses Preissystem beruht auf einer Preisgleitklausel, die mit festen prozentualen Anteilen an die Indizes für Investitionsgüter, Lohnkosten, Strom und Gas gekoppelt ist. So ermöglicht Fernwärme eine vergleichsweise günstige Wärmeversorgung und Investitionskosten in private Heizkessel entfallen. Mittlerweile wurde eine Anschlussleistung vergleichbar mit 3.000 Haushalten (Stand: 12/2008) erreicht. Dabei zählen zu den Abnehmern der Fernwärme neben Privathaushalten auch öffentliche Einrichtungen wie Rathaus, Schule und Schwimmbad sowie Gewerbebetriebe. In den angeschlossenen Häusern ist eine

Wärmeübergabestation (Abb. 7) installiert, die mit ihren kompakten Maßen problemlos unterzubringen ist.

Der Bedarf des Wärmenetzes wird derzeit ganzjährig über die geothermische Wärme gedeckt. Im Zuge der steigenden Anschlussleistung und bei extrem kalten Temperaturen kann das fossile Heizwerk als Spitzlastsystem zugeschaltet werden. Dieses verfügt über zwei Kessel á 23,5 MW, die jeweils sowohl mit Erdöl als auch Erdgas befeuert werden können. Im Bedarfsfall kann dieses Heizwerk auch die Komplettversorgung der Fernwärmekunden übernehmen.

**Abb. 7: Wärmeübergabestation beim Endverbraucher (bis 200 kW)**



## Kalina-Verfahren

Um im Niedertemperaturbereich zwischen 90 und 200 °C Strom erzeugen zu können, kommen nur spezielle Kraftwerksverfahren in Betracht, die andere Arbeitsmittel als Wasserdampf verwenden. Neben dem Organic-Rankine-Verfahren (ORC), das mit einem einzigen Arbeitsmittel (z. B. Isopentan) arbeitet, gibt es das Kalina-Verfahren (Abb. 8), das ein Gemisch von Ammoniak und Wasser nutzt. Dank des Siedepunkts von -33,7 °C verdampft Ammoniak schneller als Wasser. Im eingesetzten Mischungsverhältnis siedet das Arbeitsmittel bereits ab 50 °C. Es kann so über einen großen Temperaturbereich optimal Wärme aufnehmen und eine Turbine antreiben. Der elektrische Wirkungsgrad des Kraftwerks liegt bei ca. 10 – 13%.

Wie in einem Standard-Kraftwerksprozess wird die geothermische Wärme in einem Verdampfer auf das in einem geschlossenen Kreislauf zirkulierende Arbeitsmittel übertragen. Dieses erhitzt sich, dehnt sich aus und wird über eine Turbine, die einen Generator antreibt, wieder entspannt. Anschließend wird das Arbeitsmittel in einem Kondensator, der in Unterhaching an einen separaten Kühlkreislauf mit Kühlturm angeschlossen ist, wieder verflüssigt.

**Abb. 8: Prinzip eines Kalina-Prozesses**



## ► Projektmanagement

Für die Gemeinde Unterhaching standen zwei Ziele im Vordergrund: die Wirtschaftlichkeit und die technische Qualität des Projekts. Einige Risiken (z. B. Fündigkeit, technische Zuverlässigkeit von Komponenten) waren zu Beginn unbekannt und konnten erst im Projektverlauf bestimmt und kalkuliert werden. Angesichts der vielen Einzelentscheidungen entschloss sich die Kommune zur Zusammenarbeit mit einem externen Projektmanager. Gemeinsam mit diesem

wurden eine wirtschaftliche Sensitivitätsanalyse zur Frage „strom- oder wärmegeführt“ durchgeführt und eine Tarifstruktur für die Wärmekunden inkl. einer langfristigen Preisgleitklausel entwickelt. Besonders zu erwähnen ist die Entwicklung von Bohrverträgen speziell für die Anforderungen der Geothermie. Erstmals einigten sich bei den Verträgen in Unterhaching beide Seiten auf einen Festpreisvertrag abhängig von den Bohrm Metern. Auch eine Fündig-

keitsversicherung wurde neu entwickelt, die das geologisch-ökonomische Risiko für die Gemeinde Unterhaching absicherte. Eine derartige Versicherung war vom Gemeinderat 2001 für die erste Bohrung als unverzichtbarer Projektbestandteil gefordert worden, aber bis dahin gab es auf dem freien Markt hierfür keine Angebote. Mittlerweile bieten verschiedene Versicherungsunternehmen derartige Produkte an.

## ► Fazit und Perspektiven

Das geothermische Kraftwerk in Unterhaching produziert seit Anfang 2009 Strom. Die Akzeptanz der Fernwärme bei den Kunden ist hoch und ein weiterer Netzausbau ist bereits beschlossen. Die Gemeinde ist auf dem Weg, eine langfristige, wirtschaftliche, umweltfreundliche und lokale Energieversorgung zu erreichen. Dies ist auch ein Standortvorteil. Von der Inbetriebnahme des Wärmenetzes 2007 bis zur offiziellen Eröffnung der Stromerzeugungsanlage hat die Geothermie in Unterhaching 22.500 t CO<sub>2</sub> eingespart. Durch die hinzugekommene Stromerzeugung und nach Abschluss des Wärmenetzausbaus wird die jährliche CO<sub>2</sub>-Einsparung bei ca. 35.000 t liegen. Besonders durch das erheblich vergrößerte Wärmenetz sind die Investitionskosten im Projektverlauf beträchtlich gestiegen. Die Amortisation wird in ca. 15 Jahren erwartet. Dabei hat ein kommunaler Träger den Vorteil, langfristiger orientierter investieren zu können.

Abb. 9: Generator und Ammoniakbehälter



spricht. Lokale Wärmenetze sind dabei ein Schlüsselement, um Erdwärme und andere erneuerbare Energien bedarfsgerecht nutzen zu können.

Auch in Zukunft sind weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten für die Geothermie notwendig. Themen sind u. a. Verbesserungen der Bohrtechnik und der speziellen Kraftwerkstechnik sowie die Entwicklung von Tiefpumpen speziell für die Geothermie. Seit 2009 verbessert das Datenbanksystem Geotis (s. u.) den Zugang zu Daten über die örtlichen geothermischen Ressourcen. Dies erleichtert die Bewertung des Fündigkeitsrisikos. Mittlerweile sind im bayerischen Molassebecken, u. a. angeregt durch das Beispiel Unterhaching, bereits mehr als 100 geothermische Erlaubnisfelder erteilt worden.

Eine Herausforderung war, die Anlagen in eine gewachsene Gemeinde zu integrieren. Kompromisse bei Standortentscheidungen waren notwendig. Das Projekt zeigt, dass eine kombinierte Nutzung geothermischer Ressourcen für die Strom- und Wärmeversorgung ökonomische Vorteile ver-

### ► PROJEKTADRESSEN

- Geothermie Unterhaching GmbH & Co. KG  
Bahnhofsweg 8  
82008 Unterhaching  
[www.geothermie-unterhaching.de](http://www.geothermie-unterhaching.de)

#### Weitere Beteiligte:

#### Projektmanagement

- Rödl & Partner GbR  
81925 München  
[www.geothermieprojekte.de](http://www.geothermieprojekte.de)

#### Geotechnologische Beratung

- Geothermie Neubrandenburg  
17033 Neubrandenburg  
[www.gtn-online.de](http://www.gtn-online.de)

#### Kalina-Anlage

- Siemens AG  
80333 München  
[www.powergeneration.siemens.de](http://www.powergeneration.siemens.de)

#### Geophysikalische Grundlagen

- Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG)  
30655 Hannover

Geothermisches Informationssystem für Deutschland (GEOTIS)

[www.geotis.de](http://www.geotis.de)  
[www.liag-hannover.de](http://www.liag-hannover.de)

### ► ERGÄNZENDE INFORMATIONEN

#### Literatur

Zur Nutzung geothermischer Energie sind als BINE-Projektinfo bereits erschienen:

- Geothermische Stromerzeugung in Soultz-sous-Forêts (4/2007)
- Geothermische Stromerzeugung in Landau (14/2007)
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin (Hrsg.): Bericht der Bundesregierung über ein Konzept zur Förderung, Entwicklung und Markteinführung von geothermischer Stromerzeugung und Wärmenutzung. Berlin. März 2009. Bezug: [www.erneuerbare-energien.de](http://www.erneuerbare-energien.de) (→Geothermie)

Einen aktuellen Überblick über die laufenden Forschungsprojekte zur Geothermie und allen anderen erneuerbaren Energietechniken bietet das Portal [www.forschungsjahrbuch.de](http://www.forschungsjahrbuch.de)

#### Abbildungsnachweis

- Abb. 1,4,6–9: Geothermie Unterhaching
- Abb. 2: Rödl&Partner GbR
- Abb. 3: LIAG

#### Service

- Dieses Projektinfo gibt es auch als online-Dokument unter [www.bine.info](http://www.bine.info) im Bereich Publikationen/Projektinfos. In der Rubrik „Service“ finden Sie ergänzende Informationen wie weitere Projektadressen und Links.

### PROJEKTORGANISATION

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

Projektträger Jülich  
Forschungszentrum Jülich GmbH  
Dr. Lothar Wissing  
52425 Jülich

Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie  
80538 München

- Förderkennzeichen  
0327503, 0327573, 0325041

### 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 Energieforschung für die Praxis

BINE Informationsdienst berichtet zu Energieeffizienztechnologien und Erneuerbaren Energien.

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

BINE Informationsdienst ist ein Service von FIZ Karlsruhe und wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) gefördert.

#### Kontakt

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

Tel. 0228 92379-44

 **BINE**  
Informationsdienst

FIZ Karlsruhe, Büro Bonn  
Kaiserstraße 185 – 197  
53113 Bonn

[kontakt@bine.info](mailto:kontakt@bine.info)  
[www.bine.info](http://www.bine.info)