



Geothermische Stromerzeugung in Soultz-sous-Forêts

Abb. 1



- ▶ Tiefe und heiße Gesteinsschichten lassen sich energetisch nutzen
- ▶ In 5.000 m Tiefe erfolgreich Fließwege zwischen den Bohrungen durch Stimulationsmaßnahmen geöffnet
- ▶ Stromproduktion hat begonnen
- ▶ Ähnliche Geo-Kraftwerke künftig auch mit geringeren Bohrtiefen realisierbar

Teil der ORC-Anlage des geothermischen Kraftwerks in Soultz

Im Sommer 2008 nahm nahe dem elsässischen Ort Soultz-sous-Forêts (Oberrheingraben) erstmals ein geothermisches Kraftwerk den Probetrieb auf, das die in Tiefengesteinen gespeicherte Wärme nutzt. Im Unterschied zu anderen Geo-Kraftwerken, die natürliche Heißwasser- oder Dampfvorkommen anzapfen, wurden bei dieser Anlage in 5.000 m Tiefe vorhandene Risse und Spalten im 200 °C heißen Granit durch Wasserinjektion erweitert und zu einem geologischen Wärmetauscher verbunden. Über mehrere Bohrungen kann Wasser durch diesen untertägigen Wärmetauscher zirkuliert und dabei erhitzt werden. Die so gewonnene Wärmeenergie lässt sich an der Oberfläche zur Stromerzeugung bzw. zur Wärmeversorgung nutzen. Dieses Verfahren wird oftmals auch als „Hot-Dry-Rock-Technologie“ bezeichnet. Vorteil ist, dass es sich großräumig, unabhängig von Wasser- bzw. Dampfvorkommen anwenden lässt.

Für die geothermische Energienutzung gehört der Oberrheingraben zu den besonders interessanten Regionen. Selbst dort zeichnet sich der Standort Soultz durch einen ungewöhnlich raschen Temperaturanstieg mit zunehmender Bohrtiefe aus. In mehreren Bohrphasen haben

mittlerweile drei Bohrungen die angestrebte Endtiefe von 5.000 Metern erreicht. Das durch den geologischen Wärmetauscher zirkulierende Wasser wird mit Temperaturen bis ca. 175 °C gefördert, in einem Kraftwerk mit spezieller Technologie (ORC) zur Stromerzeugung genutzt und dann abgekühlt wieder in die Tiefe gepumpt.

Damit fand ein, von der Europäischen Union, Frankreich, Deutschland und in der Anfangsphase auch Großbritannien gefördertes, internationales Forschungsprojekt einen erfolgreichen Abschluss. Französische und deutsche Energieversorgungsunternehmen sowie Forscherteams auch aus weiteren Staaten haben sich an dem Projekt intensiv beteiligt. Insbesondere die in Soultz mit der Stimulation dichter Gesteinsformationen gesammelten Erfahrungen kommen sowohl den Anlagen nach dem HDR-Verfahren als auch denen auf Basis von Thermalwasseraquiferen zugute. So lassen sich zukünftig auch geologische Wärmereservoirs zur Energieversorgung nutzen, die bislang wegen fehlender oder unzureichender Thermalwasserzirkulation für die Energieversorgung nicht oder nur mit Einschränkungen in Betracht kamen.

► Anlagenkonzept

Die Geothermie-Anlage Soultz-sous-Forêts basiert auf drei Tiefbohrungen. Zwei davon fördern das heiße Wasser mithilfe von Tauchpumpen. Diese Tiefenwässer sind korrosiv, enthalten ca. 100 g/l gelöster Salze und zudem Gase, vor allem N₂ und CO₂. Daher wird dieses heiße Wasser an der Oberfläche unter Überdruck in einem geschlossenen, primären Kreislauf zirkuliert und über Röhrenwärmetauscher wird ihm Wärme entzogen. Anschließend erfolgt die Re-Injektion in die Tiefe über die dritte

Bohrung. Hier strömt es erneut durch das Rissystem im Gestein, erhitzt sich und gelangt nach einiger Zeit wieder in den Bereich der Förderbohrungen, wo es angesaugt wird. Dieser geschlossene Kreislauf vermeidet negative Umweltauswirkungen. Oberirdisch wird die Wärme in Röhrenwärmetauschern auf ein organisches Arbeitsmittel in einem zweiten, ebenfalls geschlossenen Kreislauf übertragen. Das Arbeitsmittel wird über eine Turbine mit angekoppeltem Generator entspannt und anschließend in

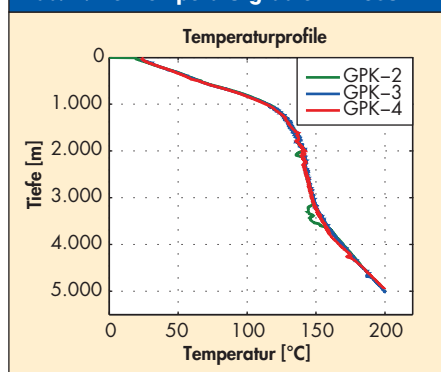
einem Luftkühlungssystem mit Ventilatoren abgekühlt und wieder verflüssigt. Dieses spezielle Kraftwerksverfahren heißt Organic-Rankine-Kreisprozess (ORC). Die hierbei eingesetzten organischen Arbeitsmedien (in Soultz: Isobutan) haben im Vergleich zu Wasser, das ansonsten als Arbeitsmedium in Kraftwerken üblich ist, einen niedrigeren Siedepunkt. Mit der ORC-Technologie lässt sich damit auch Wärme auf vergleichsweise niedrigem Temperaturniveau (ab ca. 90 °C) zur Stromerzeugung nutzen. ■

► Der Untergrund

Soultz-sous-Forêts liegt ca. 50 km nördlich von Strasbourg im französischen Teil des Oberrheingrabens und im Zentrum der größten geothermischen Wärmeanomalie Mitteleuropas. In 1.000 m Tiefe herrschen hier Temperaturen von 100 °C, statt der „normalerweise“ zu erwartenden 40 °C. Diese Wärmeanomalie wird in Soultz auf den Aufstieg heißer Tiefenwässer zurückgeführt. Unterhalb von 1.000 m flacht der Temperaturgradient allerdings ab (Abb. 2). Das kristalline Gestein (Granit) beginnt in einer Tiefe von 1.400 m und weist bereits von Natur aus Risse und Spalten auf.

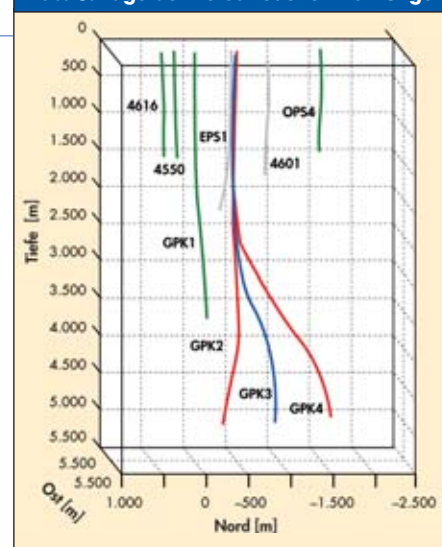
Für den Standort Soultz sprachen die aktive Grabenstruktur und die damit verbundene relativ niedrige Gebirgsspannung. Dadurch können vorhandene Risse im Gestein mit verhältnismäßig geringem Druck geöffnet werden. Die Bohrungen GPK 2, 3 und 4 haben 5.000 m Tiefe erreicht. Dabei wurden GPK 3 und 4 als abgelenkte Bohrungen niedergebracht (Abb. 3). Dank dieses speziellen Verfahrens sind die Bohrungen an der

Abb. 2: Der Temperaturgradient in Soultz



Oberfläche lediglich 6 m und in der Tiefe hingegen jeweils ca. 600 m voneinander entfernt. Bis 4.500 m Tiefe sind sie verrohrt und darunter offen, um Wasser aufzunehmen bzw. zurückzuleiten. In sechs benachbarten Bohrlöchern (z. B. GPK 1, EPS 1, alte Erdölbohrungen) wurden Lauschgeräte (Geophone, Hydrophone, Beschleunigungsmesser) installiert, die während der hydraulischen Stimulationen die Bruchgeräusche aufzeich-

Abb. 3: Lage der verschiedenen Bohrungen



neten. Aus diesen Daten ließ sich die Geometrie des unterirdischen Wärmetauschers ableiten (Abb. 5). Diese Kenntnisse wurden genutzt, um die späteren Bohrungen gezielt an den Rand bereits stimulierter Gebiete zu platzieren. ■

Schritt für Schritt zum Ziel

Das Projekt Soultz begann 1988. Die damals existierenden HDR-Pilotanlagen in den USA, Japan und Deutschland „verloren“ entweder Wasser in der Tiefe, schafften keine Verbindung zwischen den Bohrungen oder waren noch zu flach und „kalt“. In Soultz wurde das HDR-Verfahren weiterentwickelt

und erstmals ein Konzept umgesetzt, das die im Gestein bereits vorhandenen Rissysteme und natürliche Wasservorkommen konsequent einbezieht. Daher ist die Bezeichnung „Hot-Dry-Rock (HDR)“ heute historisch. Neben Namen wie „Hot-Wet-Rock (HWR)“, „Hot-Fractured-Rock (HFR)“ oder „Petro-

thermale Systeme“ spricht die Fachwelt heute meist von Enhanced Geothermal Systems (EGS). Mit diesen „verbesserten geothermischen Systemen“ wird betont, dass Ingenieurmaßnahmen eingesetzt werden müssen, um die vorgefundenen natürlichen Gegebenheiten zu optimieren.

1984 – 1987 Vorbereitende geologische Arbeiten. 1987 wird das deutsch-französische Kooperationsabkommen für das Projekt, mit Beteiligung der Europäischen Union und weiterer Partnerländer, unterzeichnet.

1987 – 1992 Machbarkeitsstudie. Das Konzept zur Weitung vorhandener natürlicher Risse wird entwickelt.

1993 – 1997 2 Bohrungen (GPK 1 und 2) erreichen 3.500 m Tiefe und es wird ein erster geologischer Wärmetauscher (in Abb. 5 grün dargestellt) mittels hydraulischer Stimulation eröffnet.

1997 Zwischen beiden Brunnen zirkuliert Wasser über 450 m Distanz. Es lassen sich in einem Test über 4 Monate 25 l/s mit einer Temperatur von 142 °C fördern.

1998 – 2000 Die Bohrung GPK 1 wird nur noch zur Beobachtung genutzt, während die Bohrung GPK 2 auf 5.000 m vertieft wird. Es werden 203 °C erreicht und mit der hydraulischen Stimulation begonnen.

2001 – 2005 2 weitere Bohrungen (GPK 3 und 4) erreichen 5.000 m Tiefe. Zwischen diesen Bohrungen finden Stimulationsmaßnahmen statt und der untere Wärmetauscher (in

Abb. 5 blau und rot dargestellt) entsteht. Der unterirdische Teil ist einsatzfähig.

2006 – 2008 Die wissenschaftliche Beobachtung des thermischen und hydraulischen Verhaltens des Wärmetauschers geht weiter. Ein geothermisches Kraftwerk, zunächst mit geringerer Leistung als ursprünglich geplant, wird gebaut.

Juni 2008 Das Kraftwerk geht als Dublettenanlage (GPK 2 und 3) im Testbetrieb ans Netz. Die künftige Einbeziehung des Brunnens GPK 4 und damit ein Ausbau des Kraftwerks werden derzeit geprüft.

► Hydraulische und chemische Stimulation

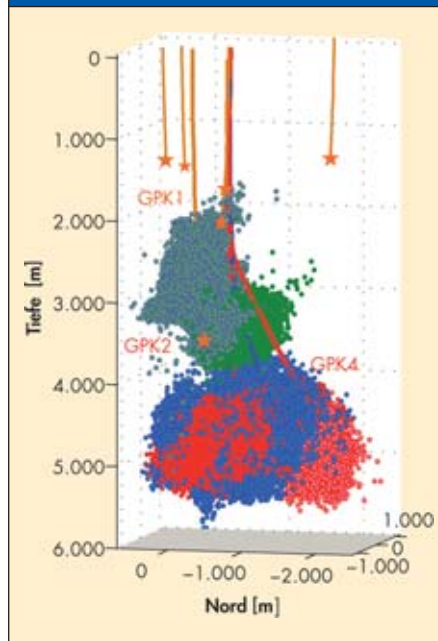
Mit drei Bohrungen 5.000 m Tiefe erreicht zu haben und dabei 3.500 m in den Granit vorzudringen, war technologisch eine Herausforderung. In der nächsten Stufe mussten diese drei Bohrungen in der Tiefe „verbunden“ werden. Mittels hydraulischer Stimulation, die Fließwege über mehrere 100 m Distanz aufweiten kann, und ergänzend einer chemischen Stimulation, die bohrlochnahe Widerstände löst (z. B. Mineralien in den Rissflächen), konnte im Gestein ein dauerhaftes, verbundenes Rissystem geschaffen werden. Beim hydraulischen Verfahren wurden jeweils mehrere 10.000 m³ Wasser mit Überdruck und ohne Stützmittel in die Bohrlöcher verpresst (Abb. 6). Erfolgreich ist eine hydraulische Stimulation dann, wenn (bei gleicher Injektionsrate) der Druck nach einer Stimulation deutlich geringer ist als vorher. Die Bohrung GPK 3 war bereits natürlicherweise durch die Anbindung an eine sehr gut durchgängige Struktur gekennzeichnet und die Produktivität stieg nach der Injektion „nur“ von 0,2 auf 0,3 l/s bar. Bei den Bohrungen GPK 2 und 4, deren Produktivität natürlicherweise bei 0,01 – 0,02 l/s bar lag, stieg der Wert nach der hydraulischen Stimulation auf das 20-Fache.

Im Jahr 2005 ergab ein erster Zirkulationsversuch der drei Bohrungen mit mehr als 200.000 m³ Wasser, dass zwischen den Bohrungen GPK 2 und 3 eine gute hydraulische

Abb. 4: Die Anlage in Zahlen

Fördermittel	80 Mio. €
Gesamte Bohrlänge	20 km
Volumen geologischer Wärmetauscher	2 – 3 km ³
Fläche geologischer Wärmetauscher	bis 3 km ²
Geförderte Wassermenge	35 l/s
Geförderte Wärme	13 MW _{th}
Temperatur gefördertes Wasser	175 °C
Temperatur reinjiziertes Wasser	ca. 70 °C
Stromproduktion brutto	2,1 MW
Eigenverbrauch Strom des Werks	0,6 MW
Stromproduktion netto	1,5 MW

Abb. 5: Oberer und unterer geologischer Wärmetauscher



Verbindung entstanden war. Ohne Einsatz einer Produktionspumpe wurden ca. 80% des Wassers aus der GPK 2 gefördert. Zwischen GPK 3 und 4 blieben die Fließwege unzureichend durchlässig und GPK 4 trug nur mit 20% zur gesamten Produktion bei. Auf eine weitere Intensivierung der hydraulischen Stimulation wurde zunächst verzichtet, weil die Sorge bestand, spürbare Erschütterungen im Untergrund auszulösen. Bei der Stimulation, zehn Jahre zuvor, des oberen Wärmetauschers in 3.500 m Tiefe waren derartige mikroseismische Ereignisse nicht zu verzeichnen.

Für die chemische Stimulation wurden dem Fluid verschiedene Säuren in geringer Konzentration (0,1 – 0,4%) zugegeben, um Mineralien (z. B. Calcit, Dolomit, Feldspäte) aufzulösen. Die Kombination beider Stimulationsmaßnahmen konnte die Produktivität der Bohrungen bis zum 50-Fachen steigern. Die erreichte Produktivität der GPK 2 (0,8 l/s bar) und die gute hydraulische Verbindung zur

Abb. 6: Gemessene Kopfdrücke und Fließraten während der hydraulischen Stimulation

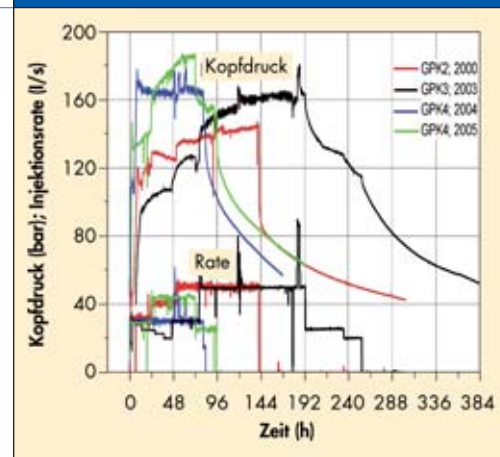
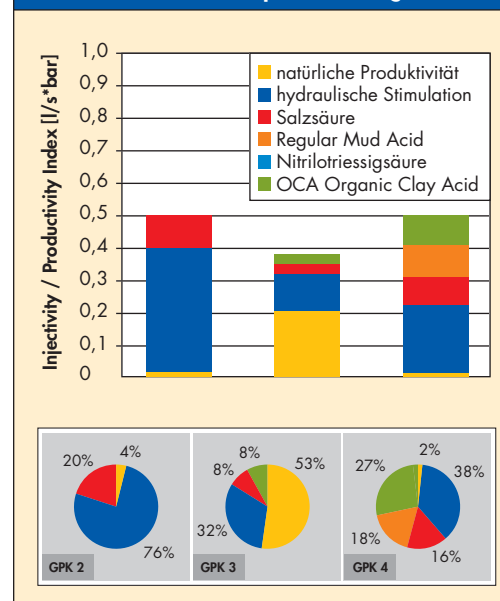


Abb. 7: Ergebnisse einzelner Stimulationsmaßnahmen an jeder Bohrung



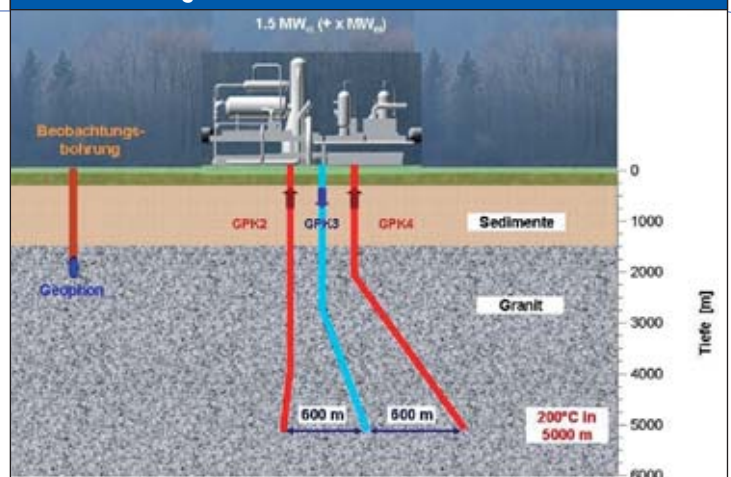
Injektionsbohrung GPK 3 hatten auch nach der Stimulation Bestand und erreichten die angestrebten Zielwerte für die Errichtung eines Pilotkraftwerks. Bisher gelang dies für die Verbindung zwischen GPK 3 und 4 noch nicht.

► Das Pilotkraftwerk

Das Kraftwerk auf Basis der guten Verbindung GPK 2 und 3 nahm im Sommer 2008 den Testbetrieb auf. Parallel hierzu wird die Verbindung GPK3 – 4 in einem separaten Kreislauf weiter zirkuliert und verbessert. Dabei wird in der Bohrung GPK 4 eine neu entwickelte elektrische Tauchpumpe bei hohen Temperaturen und geologisch wie chemisch anspruchsvollen Bedingungen getestet.

Bei einer ausreichenden Leistung der hydraulischen Verbindung aller drei Bohrungen kann zukünftig ein zweites ORC-Aggregat hinzukommen, womit dann eine Gesamtleistung von ca. 3 MW_{el} erreicht würde. Die geologische Wärmeressource würde einen Kraftwerksbetrieb über mehrere Jahrzehnte ermöglichen.

Abb. 8: Zukünftig soll das Kraftwerk noch erweitert werden



► Fazit und Perspektiven

Das europäische Geothermieprojekt in Soultz-sous-Forêts hat den weltweit tiefsten geothermischen Wärmetauscher geschaffen. Die in Soultz erzielten wissenschaftlichen und technologischen Ergebnisse haben geothermische Kraftwerke nach dem HDR-Verfahren der Praxis deutlich näher gebracht. Entscheidende Voraussetzung hierfür war das Konzept, großräumig vorhandene Risse und Spalten und das darin gespeicherte Tiefenwasser für den Wärmetauschprozess zu nutzen. Hinzu kommen Erfahrungen mit massiven Stimulationsmaßnahmen über lange Distanzen, Zirkulationstests und der Betriebsphase. Die Messtechnik bewährte sich trotz hoher Temperaturen und Drücke.

Abb. 9: Kraftwerk und oberirdische Anlagen



Erfahrungen aus Soultz zeigen, dass für ein vergleichbares Projekt Bohrtiefen von 3.000 bis 4.000 m ausreichend wären. Ein Hinweis auf den wissenschaftlichen Erfolg sind sicher auch die über das Projekt erarbeiteten 40 Doktorarbeiten und etwa 200 weitere Publikationen. Ein „Best Practise Handbook“ zum Thema „EGS“ ist online erschienen (s. u.). Die wissenschaftliche Forschung in Soultz geht weiter. Vorgesehen sind Langzeitbeobachtungen von Druck, Temperatur, chemischer Zusammensetzung des gefördertem Wassers sowie der Mikro-seismik. Im Mittelpunkt dieses Monitorings steht das thermische und hydraulische Verhalten des unterirdischen Wärmetauschers. Ein derartiges geothermisches Kraftwerk nutzt unterirdisch ein Terrain von etwa zwei bis drei Quadratkilometern. In der Region um Soultz liegen in einem 30 km breiten Streifen, der sich mehr als 100 km von Nord nach Süd erstreckt, ähnlich günstige geologische Bedingungen vor, die geothermisch genutzt werden können.

Der in geothermischen Kraftwerken produzierte Strom steht witterungsunabhängig rund um die Uhr zur Verfügung und ist daher als Beitrag für eine klimafreundliche Stromversorgung im Grundlastbereich von großem Interesse. Sollte es daneben noch gelingen, lokale Wärmeabnehmer einzubinden, würde dies die Wirtschaftlichkeit und die Energieeffizienz der Anlagen steigern.

► PROJEKTADRESSEN

Koordination:

- EWIV Wärmebergbau
BP 38 – Route des Soultz
67250 Kutzenhausen, Frankreich

Weitere Projektbeteiligte in Deutschland:

- Fa. BESTEC GmbH
76829 Landau
- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
30655 Hannover
- EnBW AG
76131 Karlsruhe
- Evonik Industries AG
45128 Essen
- GTC Kappelmeyer GmbH
76131 Karlsruhe
- MeSy Geo Meßsysteme
44807 Bochum
- Pfalzwerke AG
67061 Ludwigshafen

Ein ausführliches Verzeichnis finden Sie unter www.bine.info

► ERGÄNZENDE INFORMATIONEN

Internet

- http://engine.brgm.fr/Documents/ENGINE_BestPracticeHandbook.pdf (Das o. g. Best-Practise-Handbook als PDF)
- www.soultz.net
- www.bgr.bund.de
- www.geothermie.de
- www.bestec-for-nature.com

Literatur

- Zur Nutzung geothermischer Energie sind als BINE-Projektinfo bereits erschienen:
„Geothermische Stromerzeugung in Landau“ (14/2007)
„Geothermische Stromerzeugung in Neustadt-Glewe“ (9/2003)

Abbildungsnachweis

- Abb. 1, 3, 8: BESTEC GmbH
- Abb. 2, 4: Schindler, M., u. a.
- Abb. 5: Tischner, T., u. a.
- Abb. 6, 9: EWIV Wärmebergbau
- Abb. 7: Nami, P., u. a.

Service

- Dieses Projektinfo gibt es auch als online-Dokument unter 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. Dieter Rathjen
52425 Jülich

European Commission
DIRECTORATE-GENERAL FOR RESEARCH
B-1049 Brussels, Belgien

ADEME
06560 Valbonne, Frankreich

- Förderkennzeichen
0329950A-D, 0327097

IMPRESSUM

- ISSN
0937 – 8367

- Version in Englisch
Dieses Projekt-Info bieten wir Ihnen als PDF auch in englischer Sprache unter 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 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
www.bine.info