

Thermal Energy Transition with Geothermal Energy: From Coal Mining to Heat Mining

The coal phase-out in Germany by 2038 constitutes a major challenge for regions and industries. Technologies, energy sources and labor markets are changing fundamentally. But there are also opportunities for local actors that are worth to be explored. Even old mines could contribute to the success of the transition of

energy production. The German Parliament installed the Fraunhofer Institute for Energy Infrastructures and Geothermal Energy (Fraunhofer IEG) as a contact point for the necessary application-oriented research in the regions that are most affected by structural change.

Wärmewende durch Geothermie: Vom Kohle- zum Wärmebergbau

Der Kohleausstieg bis 2038 stellt eine große Herausforderung für Regionen und Industrien dar. Technologien, Energieträger und Arbeitsmärkte ändern sich grundlegend. Doch es existieren auch Chancen für die Akteure vor Ort, die es auszuloten lohnt. Und sogar alte Bergwerke könnten zum Gelingen der Energiewende

beitragen. Als Anlaufstellen für die notwendige anwendungsnahe Forschung hat der Bundestag die Fraunhofer-Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geothermie (Fraunhofer IEG) in den Regionen installiert, die am stärksten vom Strukturwandel betroffen sind.

Introduction

Climate change, the energy transition and structural changes are the current keywords in social discussions. Even for experts, systems change quite unexpectedly and quickly. But at least the direction is clear: We want to establish a sustainable use of resources and leave a planet worth living in for future generations. Additionally, we want to use only renewable energies in all economic and everyday sectors.

In order to achieve this goal, social willingness, individual adaptability and, last but not least, technological innovations are required: By the many small and medium-sized technology companies that are opening up new markets, as well as by the “hidden champions” who bring their proven competencies to new applications.

A big task will be to integrate thermal energy into the energy transition process. Germany uses more than 50 % of its primary energy consumption for thermal energy provision for industry, trade, agriculture and heating. Most of this is required by the industry for process temperatures of 100 to 150 °C. Looking for sustainable resources, these can be found deep underground. Higher temperatures are encountered with increased depths. The average temperature increase amounts to roughly 30 degrees per kilometer. To supply thermal energy at 100 to 150 °C, relevant subsurface temperatures can be found at 3–5 km depth. As a result, the majority of all thermal processes relevant in industry, can be supplied by ge-

Einleitung

Klimawandel, Energiewende und Strukturwandel sind die aktuellen Schlagworte der gesellschaftlichen Diskussion. Systeme ändern sich selbst für Experten unerwartet schnell. Doch zumindest die Richtung ist klar: Wir wollen als Gesellschaft eine nachhaltige Ressourcennutzung etablieren und den nachfolgenden Generationen einen lebenswerten Planeten hinterlassen. Statt fossilen Energieträgern wollen wir nur noch erneuerbare Energien in allen Wirtschafts- und Alltagssektoren nutzen.

Dazu braucht es gesellschaftlichen Willen, individuelle Anpassungsfähigkeit und nicht zuletzt technologische Innovationen. Der schon sprichwörtliche deutsche Erfindergeist ist gefragt; in den vielen kleinen und mittleren Technologieunternehmen, die sich neue Märkte erschließen, ebenso wie bei den „Hidden Champions“, die ihre bewährten Kompetenzen in neue Anwendungen einbringen.

Ein wichtiger Entwicklungszweig wird es sein, die Wärme in die Energiewende zu integrieren. Deutschland verwendet über die Hälfte seiner Primärenergie als Wärme in Industrie, Gewerbe, Landwirtschaft und Wohnen. Die Industrie benötigt den größten Teil dieser Wärme für Prozesstemperaturen von 100 bis zu 150 °C. Schaut man sich nach nachhaltigen Quellen dafür um, findet man sie tief im Untergrund. Je tiefer man bohrt, desto höhere Temperaturen trifft man an. Schon bei einem durchschnittlichen Temperaturanstieg von 30 Grad pro Kilometer – dem sogenann-

othermal energy, e.g., district heating, chemical industry, agriculture, food production, metal, cement and construction industries and wood and paper processing, just to name a few.

Munich goes geothermal

Shallow geothermal energy has already proven its practical suitability and statistically provides heat to more than 650,000 two-person households heat – according to the figures of the Federal Geothermal Association. So far, however, only 37 further systems in Germany are in operation or planning, reaching depths of 400 m or more. Commonly, deep geothermal systems do consist of two boreholes, a production and an injection well. Hot water is being pumped up through one borehole to surface. Subsequently, the heat is being extracted from the water via heat exchangers, and the cold water is injected back into the earth via the second borehole. Thus, the cycle is being completed.

The city of Munich and its surrounding communities are the pioneers of geothermal energy in Germany. Over a dozen systems are already in operation and multiple more are planned. Munich plans to cover its district heating needs in a climate neutral manner by 2040 and will be therefore primarily relying on heat from geothermal energy. Limestone formations that extend from the Danube to the Alp are primarily used. These formations are usually fissured and therefore well permeable for water transport. The limestone formation is still at the surface in the Danube Valley. Whereas, the tectonic shift which developed the Alps upwards, pushed the limestone formation near the mountains deeper and deeper. Therefore, the rainwater in the Danube region can seep into the depths along the limestone layer for centuries. In Munich, the limestone formation is at a depth of approximately 3,000 m, while the water has a temperature of approximately 100 °C, which is the suitable temperature for urban district heating.

Thermal energy is everywhere

The Munich case seems to be an inimitable solution. Only a few regions such as the Upper-Rhine-Graben and parts of northern Germany seemed promising to gain sufficient thermal energy from deep underground. But what actually distinguishes them are the many years of oil and natural gas exploration and production have resulted in collection of extensive data about the subsurface. For the Rhineland, Ruhr, Central Germany and Lusatia districts these data are still missing. Due to the “shallow” coal mining, it has not been required to explore the greater depths in more detail. Now geologists are increasingly trying to close the knowledge gaps.

One of the largest geothermal reservoirs in Europe exists deep below North Rhine-Westphalia. It consists of limestone formations from the geological ages of the Devonian and Carboniferous, which today are found a few kilometers deep and are several 100 m thick (Figure 1). The limestone formation had developed approximately 300 to 400 million years ago through reef growth in an extended, shallow and warm sea, which covered the areas as we know them as German Plain, the Benelux countries and the North Sea. Today, similar conditions can be found at the Great Barrier Reef in Australia. Through tectonic movement and stress as well as karstification, crevices and cavities developed in the rock over time, which are often very permeable to water. In places like

ten globalen geothermischen Gradienten – kann man davon ausgehen, in 3 bis 5 km Tiefe Thermalwasser zu finden, welche die benötigte Temperaturspanne aufweisen. Mit Geothermie ließen sich also die meisten thermischen Konversionsverfahren betreiben: für Fernwärme, Chemieindustrie und Landwirtschaft, für Nahrungsmittelherstellung, Metall-, Zement- und Bauindustrie, für Holz- und Papierverarbeitung, um nur einige zu nennen.

München heizt geothermisch

Die oberflächennahe Geothermie hat ihre Praxistauglichkeit schon bewiesen und versorgt rechnerisch – nach den Zahlen des Bundesverbands Geothermie – über 650.000 Zwei-Personen-Haushalte mit Wärme. Bislang sind jedoch in Deutschland nur 37 Anlagen in Betrieb oder in Planung, die in Tiefen ab 400 m hinabreichen. In der Regel besteht eine tiefe geothermische Anlage aus zwei Bohrlöchern, einer Dublette: Das eine Bohrloch fördert heißes Wasser aus der Tiefe, über Wärmetauscher wird dem Wasser seine Wärme entzogen und durch das andere Bohrloch wird das abgekühlte Wasser wieder in die Tiefe gepumpt. Der Wasserkreislauf ist also geschlossen.

Vorreiter der Geothermie in Deutschland ist die Stadt München und ihr Umland, wo schon über ein Dutzend Anlagen in Betrieb und weitere in Planung sind. Bis 2040 wollen die Münchner ihren Bedarf an Fernwärme CO₂-neutral decken und setzen dafür überwiegend auf Wärme aus tiefer Geothermie. Sie nutzen dazu eine Kalksteinformation, die sich von der Donau bis zu den Alpen erstreckt. Sie ist zerklüftet und somit für Wasser gut durchlässig. Während sie im Donautal noch an der Erdoberfläche liegt, hat die Plattentektonik, welche die Alpen nach oben geschoben hat, die Kalksteine in Gebirgsnähe immer weiter nach unten gedrückt. Das Regenwasser der Donau-Region kann über Jahrhunderte entlang der Kalksteinschicht in die Tiefe versickern. Bei München liegt die Schicht rd. 3.000 m tief und hat mit rd. 100 °C die passende Temperatur für das städtische Fernwärmenetz.

Wärme ist überall

Manche halten das Beispiel München für eine unnachahmbare Lösung. Denn lange Zeit durften sich nur wenige Regionen – etwa der Oberrheingraben und Teile Norddeutschlands – Hoffnung machen, ausreichend Wärme aus der Tiefe zu gewinnen. Was diese Gegenden aber eigentlich auszeichnet, ist nicht so sehr ihre Geologie, sondern auch die Tatsache, dass die langjährige Erdöl- und Erdgas-Exploration und -Förderung umfangreiche Daten über den Untergrund gesammelt haben. Diese Daten fehlen noch für die Reviere Rheinland, Ruhr, Mitteldeutschland und Lausitz, weil der „oberflächennahe“ Kohleabbau es nicht notwendig machte, die Tiefe detaillierter zu erkunden. Diese Wissenslücken versuchen die Geologinnen und Geologen nun zunehmend zu schließen.

Unter Nordrhein-Westfalen etwa befindet sich das wohl größte geothermische Reservoir in Europa: die Kalksteine aus den Erdzeitaltern des Devons und des Karbons, die heute in einigen Kilometern Tiefe liegen und bis mehrere 100 m mächtig sind (Bild 1). Sie entstanden vor rd. 300 bis 400 Millionen Jahren durch Riffwachstum in einem ausgestreckten, flachen und warmen Meer, welches die Gebiete bedeckte, die wir heute als Deutsche Tiefebene, Beneluxstaaten und Nordsee kennen. Heutzutage



Fig. 1. Limestone from the Carboniferous and Devonian eras developed in warm and shallow parts of the sea over millions of years to a thickness of many hundreds of meters. Back at the surface again due to tectonics, they were extracted and used as construction stones as can be seen in this former quarry in the Rhineland. Deep underground and fissured they form a possible reservoir for thermal water.

Bild 1. Kalksteine aus den Erdzeitaltern des Karbons und des Devons bildeten sich in warmen und flachen Meeresteilen über Jahrtausenden in einer Mächtigkeit von vielen Hundert Metern. Wo sie aufgrund der Plattentektonik wieder an der Oberfläche liegen, wurden sie wie in diesem ehemaligen Steinbruch im Rheinland abgebaut und als Baustein genutzt. Tief im Untergrund und verkarstet bilden sie ein mögliches Reservoir für Thermalwasser. Photo/Foto: K. Schinarakis/Fraunhofer IEG

the German Aachen or the Belgian Spa, thermal water reaches the surface. It has temperatures of up to 72 °C and was used in spas and for local heating of buildings in ancient times. These rocks are now being utilized and used for other energy exploitation purposes via deep boreholes in Belgium and the Netherlands. District heating networks, greenhouses, industrial companies and thermal baths benefit from climate-friendly energy from layers that carry thermal water. The coal phase-out in Germany offers the opportunity to develop this sustainable potential here as well.

From tailor-made suit to standard clothing

Currently exist only a few standardized methods for geological exploration that are equally suitable for all potential locations. The framework conditions differ too much. Development work is still required, and many development paths now cross at the newly created Fraunhofer Institute for Energy Infrastructures and Geothermal Energy (Fraunhofer IEG). It was established to advance application-oriented research for the energy transition. One main

findet man ähnliche Bedingungen am Great Barrier Reef in Australien. Durch tektonische Bewegung und Beanspruchung sowie Verkarstung entstanden im Lauf der Zeit Klüfte und Hohlräume im Gestein, die oft sehr gut durchlässig für Wasser sind. An Orten wie Aachen oder dem belgischen Spa gelangt Thermalwasser so bis an die Oberfläche. Es weist hier Temperaturen von bis zu 72 °C auf und wurde schon in der Antike in Heilbädern und zur lokalen Gebäudebeheizung genutzt. Über Tiefbohrungen in Belgien und in den Niederlanden werden diese Gesteine heutzutage auch für weitere energetische Zwecke erschlossen und genutzt. Fernwärmenetze, Gewächshäuser, Industriebetriebe und Thermalbäder profitieren dort von klimafreundlicher Energie aus thermalwasserführenden Schichten. Der Kohleausstieg in Deutschland bietet die Chance, hier ebenfalls dieses nachhaltige Potential zu erschließen.

Vom Maßanzug zur Konfektionsware

Noch gibt es für die geologische Erschließung nur wenige Methoden „aus dem Katalog“, die für alle potentiellen Standorte gleichermaßen passen – dazu sind die Rahmenbedingungen zu unterschiedlich. Es ist noch Entwicklungsarbeit notwendig und die meisten Entwicklungspfade kreuzen sich nun an der neu geschaffenen Fraunhofer-Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geothermie (Fraunhofer IEG). Sie wurde gegründet, um die anwendungsnahe Forschung für die Energiewende voranzutreiben. Wesentliche Bestandteile der neuen Einrichtung sind die Integration des Internationalen Geothermiezentrums Bochum (GZB) und seiner langjährigen Expertise sowie der Aufbau weiterer Einrichtungsteile. Einer forscht in Cottbus zu zukünftigen Energieinfrastrukturen, einer in Jülich zur Sektorkopplung in Quartieren und Gebieten sowie ein weiterer in Aachen zu Georesourcen und Geospeichern. Die Standorte schlagen eine Brücke zwischen den vom Strukturwandel besonders betroffenen Regionen im Westen und Osten Deutschlands. Die Forschungsarbeit bei Fraunhofer IEG soll entlang der gesamten Prozesskette von der Idee bis zur Installation einer geothermischen Anlage laufen und – wenn es um die Konversion existierender Wärmeinfrastrukturen geht – sogar darüber hinaus.

Schritt eins ist die regionale geologische Vorerkundung. Sie trägt alle vorhandenen Daten über den Untergrund zusammen, identifiziert vielversprechende geologische Formationen und entwirft geowissenschaftliche und technische Erschließungskonzepte. Daten und Erkenntnisse liefern zunächst geologische Aufschlüsse – also freiliegende Felsen oder Gesteinswände – Steinbrüche, Bergwerke, geophysikalischen Messungen oder Bohrungen in der Region. Mit der Papierfabrik Kabel Premium Pulp & Paper (KPPP) vorerkundet das Fraunhofer IEG derzeit den Untergrund in Hagen. Der Papierhersteller möchte den energieintensiven Prozessschritt der Papiertrocknung bei 100 bis 200 °C vom fossilen Energieträger Erdgas in den nächsten Jahren auf die nachhaltige Erdwärme umstellen. Am Firmenstandort von KPPP verläuft eine bekannte Störungszone durch das Betriebsgelände, die erhöhte Wasserdurchlässigkeiten verspricht. Außerdem werden, laut Geologischem Dienst Nordrhein-Westfalen (GD NRW), devonische Kalksteine in einer geschätzten Tiefe von ca. 3.200 bis 4.100 m erwartet, die analog zu den Gegebenheiten in München ein potentielles Wärmereservoir darstellen.

component is the integration of the International Geothermal Center Bochum (GZB) and its many years of expertise, as well as the development of additional facilities. In Cottbus one division is researching future energy infrastructures, in Jülich the next one on sector coupling in quarters and areas, and another in Aachen on georesources and storage applications. The locations build a bridge between the regions in western and eastern Germany that are particularly hard hit by structural change. The research work at Fraunhofer IEG should run along the entire process chain from the idea to the operation of a geothermal system and even beyond, if it is about the conversion of existing heating infrastructures.

The regional geological exploration is step one, which compiles all available data about the underground, identifies promising geological formations and designs geoscientific and technical development concepts. Exposed rocks or rock walls, quarries, mines, geophysical measurements or boreholes in the region initially provide geological information. Together with Kabel Premium Pulp & Paper (KPPP) paper mill, Fraunhofer IEG is currently exploring the underground in Hagen. The paper manufacturer wants to convert the energy-intensive process step of paper drying at 100 to 200 °C from natural gas to sustainable geothermal energy in the next few years. A known fault zone runs through KPPP's premises, which promises increased water permeability. Additionally, Devonian limestones are expected at an estimated depth of approximately 3,200 to 4,100 m according to the Geological Survey of North Rhine-Westphalia (GD NRW). This would represent a potential thermal reservoir similar to the conditions in Munich.

The results of the preliminary exploration are expanded through current measurements. Seismic methods are used, i.e. sound waves similar to those used in an ultrasound examination by a doctor, to get more detailed information about the underground. Truck mounted vibration generators gently vibrate the ground so that long-wave sound waves travel through the rock layers. Depending on their physical properties, the geological layers reflect the waves back to the surface. A network of sensitive microphones, so-called geophones, are recording these waves so that the information about all wave transit times are put together by computer to form an ultrasound image of the subsurface. Additionally, shallow exploratory boreholes provide samples of the relevant layers, which are examined in the laboratory (Figure 2). Data from preliminary exploration, seismic investigations and the results from sample investigation of the rock laboratory enable the development of a geological model of the site.

The model can be used to estimate both, the probability of encountering usable thermal water and the effort involved in the actual drilling. The drilling effort can differ depending on the location. Loose sediments in the North German Plain can be drilled more quickly than the solid rock in the German low mountain range. At Fraunhofer IEG, a certified mobile 60 t double-head drilling rig including mud and high-pressure pumps as well as mud preparation offers the possibility of professionally drilling medium depth geothermal targets up to 1,500 m and thus conducting research in a practical manner (Figure 3). The cost of drilling accounts for the largest share of the investment budget in the development of geothermal power plant. One assumes 1 to 2 M €/km of borehole. Research and development which lower

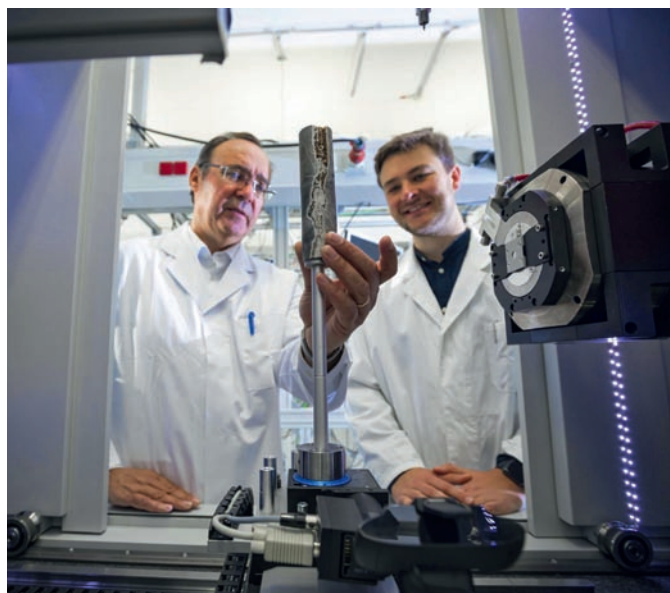


Fig. 2. Using the most modern devices from microscopes to X-ray computed tomographs, Fraunhofer IEG determines geophysical properties such as density, porosity, permeability, thermal conductivity and seismic wave speeds. In addition also on rock samples in the laboratory the physical-chemical interaction between rock and fluids, partly under the simulated pressures and temperatures of the reservoir.
 Bild 2. Mit modernsten Geräten vom Mikroskop bis hin zum Röntgen-Computertomograf bestimmt das Fraunhofer IEG an Gesteinsproben im Labor die geophysikalischen Eigenschaften wie Dichte, Porosität, Permeabilität, Wärmeleitfähigkeit und seismische Wellengeschwindigkeiten, aber auch die physikalisch-chemische Wechselwirkung zwischen Gestein und Fluiden, zum Teil unter den simulierten Drücken und Temperaturen des Reservoirs.
 Photo/Foto: S. Kreklau/Fraunhofer IEG

Die Ergebnisse der Vorerkundung werden durch aktuelle Messungen erweitert. Um in den Boden zu „blicken“, nutzt man seismische Methoden, also Schallwellen ähnlich denen bei der Ultraschalluntersuchung beim Arzt. Auf Lastwagen montierte Schwingungsgeneratoren bringen den Boden sacht zum Vibrieren und lassen langwellige Schallwellen durch die vielen Gesteinsschichten laufen. Je nach ihren physikalischen Eigenschaften reflektieren die geologischen Schichten die Wellen wieder nach oben, wo sie von einem Netz an empfindlichen Mikrofonen – sogenannten Geophonen – aufgezeichnet werden. Die Information über alle Wellenlaufzeiten wird am Computer zu einem „Ultraschallbild“ des Untergrunds zusammengesetzt. Zudem können erste flache Erkundungsbohrungen Proben der relevanten Schichten liefern, die im Labor untersucht werden (Bild 2). Die Daten aus Vorerkundung, aus seismischen Untersuchungen und die Ergebnisse der Proben aus dem Gesteinslabor fließen in das geologische Modell des Standorts ein.

Anhand des Modells lässt sich sowohl die Wahrscheinlichkeit abschätzen, auf verwertbares Thermalwasser zu stoßen, als auch der Aufwand, den die eigentliche Bohrung verursacht. Der Bohraufwand kann je nach Standort sehr unterschiedlich sein. Lockerere Sedimente in der Norddeutschen Tiefebene lassen sich in der Regel schneller durchbohren als feste Gesteine in den deutschen Mittelgebirgen. Am Fraunhofer IEG bietet eine zertifizierte mobile 60 t-Doppelkopf-Bohranlage



Fig. 3. BO.REX (Bochum Research and Exploration Drilling Rig) is a mobile 60 t drilling system for depths of up to 1,500 m. The Fraunhofer IEG is using it in its TRUDI demonstrator in Bochum and soon in the Rhineland demonstrator.

Bild 3. BO.REX (Bochum Research and Exploration Drilling Rig) ist ein mobiles 60 t-Bohrsystem für bis zu 1.500 m Tiefe. Das Fraunhofer IEG setzt es in seinen Reallaboren TRUDI in Bochum und bald im Reallabor Rheinland ein. Photo/Foto: S. Kreklau/Fraunhofer IEG

costs of drilling techniques have a great opportunity to increase the profitability of geothermal thermal power plants.

Drilling 2.0

Drilling technology uses the best practices of the oil and gas industry. Roller cone bits or diamond bits are rotated into the depths from the derrick with a drill rod, whilst a drilling fluid cools the bit and transports loosened rock upwards. But the essential processes of this technology, which has been developed over 100 years, take place at great depths at high pressures and temperatures and thus elude simple experimental access. That is why Fraunhofer IEG has developed a new type of test stand called match.BOGS (Figure 4). It should enable to simulate the processes during the drilling, the development and the usage phase of the reservoirs under real physical conditions in the laboratory. It thus forms the link between laboratory and real world application.

The central element of match.BOGS is a large autoclave. This heatable pressure vessel is able to take rock samples with a length of 3 m and 25 cm in diameter and expose them to the pressure and temperatures that prevail at depths of up to 5 km – i.e. about 1,250 bar and 180 °C. Special feedthroughs in the autoclave allow testing of borehole equipment such as pumps. Flow trough experiments in the autoclave are possible, even with corrosive fluids. Acoustic, optical and thermal sensors are attached along

samt Spülungs- und Hochdruckpumpen sowie einer Spülsauberung die Möglichkeit, vollumfänglich und fachgerecht Bohrungen im Bereich der mitteltiefen Geothermie bis 1,500 m auszuführen und so anwendungsnah zu forschen (Bild 3). Die Kosten der Bohrung machen den größten Anteil am Investitionsbudget eines geothermischen Kraftwerks aus. Man geht von 1 bis 2 Mio. €/km Bohrloch aus. Forschung und Entwicklung, die Bohrtechniken günstiger machen, haben also eine große Chance, die Wirtschaftlichkeit von geothermischen Wärmekraftwerken zu erhöhen.

Bohren 2.0

Die Technik der Bohrung nutzt die bewährten Verfahren der Erdöl- und Erdgasindustrie. Es werden Rollenmeißel oder Diamantmeißel mit einem Gestänge vom Bohrturm in die Tiefe getrieben, eine Bohrspülung kühlt den Meißel und transportiert abgetragenes Gestein nach oben. Doch die wesentlichen Prozesse dieser in über 100 Jahren entwickelten Technik spielen sich in großen Tiefen bei hohen Drücken und Temperaturen ab und entziehen sich damit dem einfachen experimentellen Zugang. Deswegen hat das Fraunhofer IEG einen neuartigen Versuchsstand mit dem Namen match.BOGS entwickelt (Bild 4). Er soll es ermöglichen, die Prozesse während des Bohrvorgangs, der Erschließung und der Nutzung der Reservoirs unter realen physikalischen Bedingungen im Labor zu simulieren. Damit bildet er das Bindeglied zwischen Labor- und Feldskala.

Das zentrale Element der match.BOGS bildet ein großer Autoklav. Dieser beheizbare Druckbehälter ist in der Lage, Gesteinsproben mit einer Länge von 3 m und 25 cm Durchmesser aufzunehmen und diese dem Druck und den Temperaturen auszusetzen, die in Tiefen bis zu 5 km herrschen – also etwa 1.250 bar und 180 °C. Spezielle Leitungsdurchführungen in den Autoklav erlauben es, darin Bohrlochausrüstung wie etwa Pumpen zu testen. Ein Durchströmen des Autoklaven – auch mit korrosiven Flüssigkeiten – ist möglich. Entlang der Gesteinsprobe sind akustische, optische und thermische Sensoren angebracht, um die Vorgänge



Fig. 4. At Fraunhofer IEG laboratory the match.BOGS equipment focuses on new drilling techniques and processes in underground geothermal reservoirs under real conditions. // Bild 4. Neue Bohrtechniken und Prozesse im Reservoir unter den realen Bedingungen im Untergrund nimmt die Anlage match.BOGS im Labor des Fraunhofer IEG in den Fokus. Photo/Foto: S. Kreklau/Fraunhofer IEG

the rock sample in order to enable recording of processes in the reservoir in detail. Drilling tools can be tested on rock blocks inside of the chamber under simulated downhole conditions with a feed force of up to 400 kN and a torque of up to 12 kNm. The installed measurement, control and regulation technology enables fully automated drilling processes to be carried out with changing rock properties.

Measurements with the match.BOGS test rig under real conditions can help to further develop proven drilling techniques in the laboratory. The wear of the drill bit is a constant research topic for geothermal energy, because replacing parts of the bottom hole assembly during the drilling process is very time consuming, especially in deep wells. Additionally to bit edges, the moving parts in percussion bits are susceptible to wear and tear, such as the valves of the hydraulic system. In the EU project Geo-Drill, Fraunhofer IEG and its partners are developing a purely liquid-based valve system without any moving parts and based on the Coanda effect, i.e. the tendency of currents to cling to surfaces (Figure 5).

The fluidic switch (see picture on the left in figure 5) consists of an inlet (1) and two outlets (5), which are connected to the upper and lower chambers of the percussion piston. Due to the Coanda effect, the fluid flows along the inner surface of the mixing chamber (2) to one of the two outlet openings. The feedback loops (3) cause the liquid flow to alternate between outlets as soon as a chamber is filled. A filled chamber is emptied through one of the outlet openings (4). The simulations from the computer are verified with the first prototype from the 3-D printer (illustration on the right).

Additionally, Fraunhofer IEG is testing completely new drilling concepts. The rock can be weakened with electricity, plasma or laser beams to support the grinding effect of the drill bit. It can also be advantageous to drill multiple horizontal boreholes from an existing vertical mother borehole to increase the flow rates of the thermal water. For this purpose, focused water jets or small turbine-driven drill bits could be used in the future, which are currently being researched in detail in laboratory and field tests.

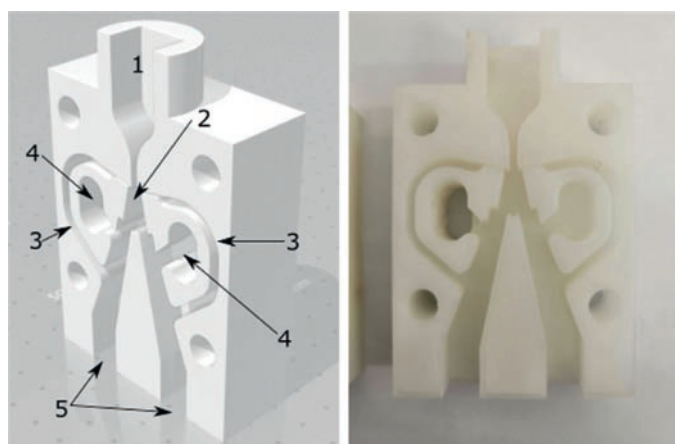


Fig. 5. Researchers at Fraunhofer IEG are developing a long-life hammer drill as part of the EU project Geo-Drill, that uses a liquid oscillator without moving parts instead of valves that are prone to wear.

Bild 5. Im Rahmen des EU-Projekts Geo-Drill entwickeln Forscher des Fraunhofer IEG einen langlebigen Schlagbohrhammer, der statt verschleißanfälligen Ventilen einen Flüssigkeits-Oszillator ohne bewegliche Teile nutzt. Source/Quelle: V. Wittig/Fraunhofer IEG

im Reservoir detailliert aufzeichnen zu können. Ein angeschlossener Bohrantrieb macht es möglich, unter realen Bedingungen im Inneren der Kammer Bohrwerkzeuge an den Gesteinsblöcken zu erproben – bei einer Vorschubkraft von bis zu 400 kN und einem Drehmoment von bis zu 12 kNm. Die installierte Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik ermöglicht die Durchführung von vollautomatisierten Bohrvorgängen bei wechselnden Gesteinseigenschaften.

Messungen mit dem Versuchsstand match.BOGS unter Realbedingungen können helfen, bewährte Bohrtechniken im Labor weiterzuentwickeln. So ist der Verschleiß des Bohrmeißels ein ständiges Forschungsthema für die Geothermie, weil sein Austausch beim Bohren tiefer Löcher viel Zeit verschlingt. Neben den Meißelschneiden sind die beweglichen Teile in Schlagbohrmeißeln anfällige Bauteile für Verschleiß, etwa die Ventile des hydraulischen Systems. Im EU-Projekt Geo-Drill entwickelt Fraunhofer IEG mit seinen Partnern ein rein flüssigkeitsbasiertes Ventilsystem ganz ohne bewegliche Teile und auf Basis des Coanda-Effekts, also der Neigung von Strömungen, sich an Oberflächen anzuschmiegen (Bild 5).

Der fluidische Schalter (Abbildung links in Bild 5) besteht aus einem Einlass (1) und zwei Auslässen (5), die mit der oberen bzw. unteren Kammer des Schlagkolbens verbunden sind. Das Fluid strömt aufgrund des Coanda-Effekts entlang der Innenfläche der Mischkammer (2) zu einer der beiden Auslassöffnungen. Die Rückkopplungsschleifen (3) bewirken, dass der Flüssigkeitsstrom zwischen Auslässen wechselt, sobald eine Kammer gefüllt ist. Eine gefüllte Kammer wird durch eine der Auslassöffnungen (4) entleert. Mit dem ersten Prototyp aus dem 3-D-Drucker (Abbildung rechts) werden die Simulationen aus dem Computer überprüft.

Daneben erprobt das Fraunhofer IEG auch vollkommen neue Bohrkonzepte. Um die zermahlende Wirkung des Meißels zu unterstützen, lässt sich das Gestein etwa mit elektrischem Strom, Plasma oder Laserstrahlen schwächen. Zur Steigerung der Flussraten der Thermalwässer kann es auch vorteilhaft sein, radial von der zentralen vertikalen Bohrung aus horizontal durch das Gestein zu bohren. Dazu könnten in Zukunft fokussierte Wasserstrahlen oder kleine turbinengetriebene Bohrmeißel genutzt werden, die derzeit in Labor- und Feldversuchen im Detail erforscht werden.

„Vor der Hacke ist es duster“

Auch wenn die wesentlichen Prozesse der Gesteinsbildung gut verstanden sind und die Vorerkundung valide Daten erhoben hat, können die Eigenschaften der geologischen Schichten von Ort zu Ort und auch innerhalb eines Bohrlochs stark variieren. Der Bohrverantwortliche hat daher ständig die Betriebsparameter seines Bohrequipments im Blick – etwa Meißelndruck, Spülwasserdruck und Drehmoment – und prüft anhand des gemahlten Gesteins in der Bohrspülung den tatsächlichen und den geplanten Bohrverlauf. Zusätzlich zu seiner Erfahrung kann er sich auf ausgefeilte Sensoren stützen. Mit dem Bohrkopf werden oft standardmäßig Neigungsmesser, Kompass und Thermometer mitgeführt, es können Druck, Vibrationen, Spülraten, natürliche Radioaktivität und elektrischer Widerstand des Gesteins erfasst werden. Reagiert das Gestein unerwartet, kann der Bohrverantwortliche den Betrieb anpassen. Die neueste Forschung befasst

“The way ahead is unknown”

The properties of the geological formations can vary greatly from place to place and also within a borehole, even if the essential processes of rock formation are well understood and the preliminary exploration has collected valid data. Therefore, the driller is always checking the operating parameters of his equipment, such as weight on bit, flowrate, torque and the quality of the cuttings, in order to verify the drilling progress. In addition to his experience, he can rely on sophisticated logging and measurement tools. Inclinerometers, compass and thermometer are often utilized during drilling operations. Pressure, vibrations, flow rates, natural radioactivity and electrical resistance of the rock can be recorded. The driller can adjust the operation as soon as something unexpected happens. The latest research also deals with the connection of optical fibers as a sensor. Coupled light scatters in the fiber and allows conclusions to be drawn about temperature, vibration or pressure in the vicinity of the glass fiber with a high spatial and temporal resolution. If the optical fiber is installed appropriately, these scatter signals also provide information about drilling operations, cementation and the properties of the geothermal reservoir during development and operation.

Noise of signals

In parallel to measuring devices in the borehole, seismometers are also set up on the surface around the borehole. The natural seismicity is documented as a reference signal in advance of the drilling process. The most sensitive seismometers can still detect the waves of the Atlantic Ocean from a distance of 500 km, not to mention the car traffic on the neighboring country road. Hardly noticeable earthquakes for humans below magnitude 3 on the Richter scale occur worldwide around 1,500 times a day. During drilling, the operation of the bit and the reaction of the surrounding rock can still be very sensitively tracked with the seismometers. The operation of a geothermal system, which means the conveying and pressing of thermal water, can also be found as a characteristic signal in the spectrum of seismic waves. If you know the characteristic shape of the various (interference) signals, the signal can be separated from the noise. Here, the current research paths are aimed at interlacing the data from as many different sensors as possible in order to filter the observations more closely and more quickly into relevant findings for operation. For this purpose, manual evaluation steps are increasingly being automated and machine learning methods are being tested in order to narrow the increasing complexity to the relevant findings and to provide those responsible for operations with the best analyzes in real time.

Once the target depth has been reached and the bit is back at the surface, the borehole is explored in detail with measuring probes and the rocks are characterized. Where necessary, the borehole will be cased and the annulus behind casing will be filled with cement. Once the amount and temperature of the thermal water has been determined, the operating concept of the geothermal system is finalized. It should be noted here that thermal waters could be full of dissolved salts due to their long time in the subsurface. This can enormously af-

sich auch mit der Anbindung von Glasfasern als Sensor. Einkoppeltes Licht streut in der Faser und erlaubt Rückschlüsse auf etwa Temperatur, Vibration oder Druck im Umfeld der Glasfaser mit einer hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung. Diese Streusignale geben bei geeigneter Installation der Glasfaser auch Informationen über Bohrbetrieb, Zementation und Eigenschaften des geothermischen Reservoirs bei Erschließung und bei Betrieb.

Ein Rausch an Signalen

Parallel zu Messgeräten im Bohrloch werden auch auf der Oberfläche rund um die Bohrung Seismometer aufgestellt. Schon im Vorfeld von Bohrungen wird die natürliche Seismizität als Referenzsignal dokumentiert. Die empfindlichsten Seismometer spüren noch den Wellenschlag des Atlantischen Ozeans aus 500 km Entfernung auf, ganz zu schweigen vom Autoverkehr auf der benachbarten Landstraße. Rd. 1.500 Mal am Tag ereignen sich weltweit für den Menschen kaum spürbare Erdbeben unterhalb der Magnitude 3 auf der Richterskala. Während der Bohrung kann man mit den Seismometern dennoch den Meißelbetrieb und die Reaktion des umgebenden Gesteins mit den Seismometern sehr empfindlich nachvollziehen. Und auch der Betrieb einer geothermischen Anlage – also das Fördern und Verpressen von Thermalwasser – ist als charakteristisches Signal im Spektrum der seismischen Wellen auffindbar. Wenn man die charakteristische Form der vielfältigen (Stör-)Signale kennt, lässt sich die Spreu vom Weizen trennen. Hier gehen die aktuellen Forschungspfade dahin, die Daten aus möglichst vielen verschiedenen Sensoren zu verschränken, um die Beobachtungen enghemmaschiger und schneller in relevante Erkenntnisse für den Betrieb zu destillieren. Dazu werden zunehmend manuelle Auswertungsschritte automatisiert und Methoden des Maschinellen Lernens erprobt, um die steigende Komplexität auf die relevanten Erkenntnisse zu verengen und den Betriebsverantwortlichen in Echtzeit mit den besten Analysen zu versorgen.

Ist die Zieltiefe erreicht und der Meißel geborgen, wird das Bohrloch mit Messsonden im Detail erkundet und die Gesteine werden charakterisiert. Wo notwendig, wird das Bohrloch noch verrohrt oder seine Wände werden auszementiert. Ist schließlich die gefundene Menge und Temperatur der Thermalwässer bestimmt, wird das Betriebskonzept der geothermischen Anlage finalisiert. Hierbei gilt es zu beachten, dass Thermalwässer aufgrund ihrer langen Zeit im Untergrund voller gelöster Salze sind, die der Kraftwerkstechnik enorm zusetzen können. Auf der anderen Seite könnten die Salze in Zukunft auch ökonomisch interessant sein, etwa wenn es sich um die Salze seltener oder nachgefragter Elemente wie Lithium handelt.

Technik für den extremen Einsatz

Salze und Temperatur setzen den tief im Bohrloch sitzenden Pumpen stärker zu als dem Equipment in der Erdölindustrie. Und auch über Tage wird die Kraftwerkstechnik nicht immer auf Technologien anderer Branchen zurückgreifen können. Ein zentraler Baustein sind die Hochtemperatur-Wärmetauscher, die den salzigen Bohrloch-Wasserkreislauf und den oberflächlichen Kraftwerkskreislauf trennen. Je nach Anwendungsfall kann es auch sinnvoll sein, Hochtemperatur-Wärmepumpen – betrieben mit nachhaltigem Strom – zu nutzen, um die Tem-

fect the power plant technology. On the other hand, the salts could also be economically interesting in the future, e. g., when it comes to the salts of rare or sought-after elements such as lithium.

Technology for extreme operation

The impact of salt and temperature on the pumps in the geothermal wells is higher than on the equipment in the oil industry. And also the power plant technology on the surface will not always be able to fall back on technologies from other industries. A central component are the high-temperature heat exchangers, which separate the salty reservoir water cycle and the reservoir power plant cycle. Depending on the application, it could make sense to use high-temperature heat pumps, operated with sustainable electricity, to increase the temperature level of the thermal water. The high temperature level and the necessary performance class usually require enormous know-how and tailor-made solutions from the system manufacturers.

At the interface of the EU projects DGE-ROLLOUT and HEATSTORE, Fraunhofer IEG is currently working with industrial partners to design a heat pump that can also bring water from the underground with "only" 60 °C to a temperature level of up to 120 °C and thus heat for a local district heating system. The flooded drift of an abandoned small colliery in the Ruhr area is to serve as a seasonal heat store. The colliery on the premises of Fraunhofer IEG in Bochum was drilled into a depth of 60 m for this very purpose. Parabolic solar collectors of a planned solar thermal

peraturniveau der Thermalwässer zu erhöhen. Das hohe Temperaturniveau und die erforderliche Leistungsklasse erfordern meist enormes Know-how und maßgeschneiderte Lösungen von den Anlagenbauern.

An der Schnittstelle der EU-Projekte DGE-ROLLOUT und HEATSTORE konzipiert das Fraunhofer IEG zusammen mit Industriepartnern derzeit eine Wärmepumpe, die auch Wasser aus dem Untergrund mit „nur“ 60 °C auf ein Temperaturniveau von bis zu 120 °C bringen kann und so Wärme für ein lokales Fernwärmenetz bereitstellen soll. Als saisonaler Wärmespeicher soll der geflutete Stollen eines stillgelegten Steinkohlenbergwerks im Ruhrgebiet dienen. Die Kleinzeche auf dem Gelände des Fraunhofer IEG in Bochum wurde gerade für diesen Zweck in einer Tiefe von 60 m angebohrt. Parabolrinnen-Sonnenkollektoren eines geplanten solarthermischen Kraftwerks (Bild 6) sollen in Zukunft im Sommer Wärme in die mit Wasser vollgelaufene Zeche einspeisen und das Wasser auf zunächst 70 °Celsius erwärmen. Im Winter könnte das so vorgewärmte Grubenwasser dann einer Hochtemperatur-Wärmepumpe als Wärmereservoir dienen, um Wasser auf die Betriebstemperatur des lokalen Nahwärmenetzes von über 100 °C zu bringen.

Für den Bedarf entwickeln

Ein weiteres Beispiel ist die Zeche Dannenbaum. Sie wird derzeit im EU-Projekt D2Grids als Wärme- und Kältespeicher für den Industrie- und Wissenschaftscampus „Mark 51°7“ erschlossen, welches auf dem ehemaligen Werksgelände des Autobauers



*Fig. 6. Solar collectors: Old hard coal mines in the Ruhr area could in future serve as heat storage for supply of business and households. The heat collected with solar collectors in summer is stored in the mine water and can be utilized within the district heating during the winter.
Bild 6. Sonnenkollektoren: Die alten Steinkohlenbergwerke des Ruhrgebiets könnten in Zukunft als Wärmespeicher für die Versorgung von Gewerbe und Haushalten dienen. Die mit Sonnenkollektoren im Sommer eingesammelte Wärme wird im Grubenwasser gespeichert und kann im Winter in die Wärmenetze eingespeist werden. Source/Quelle: Fraunhofer IEG*

power plant (Figure 6) are going to heat up the colliery, which is full of water, in the future with temperatures up to 60 °C. In winter, the preheated mine water could then be used by a high-temperature heat pump as a heat reservoir in order to bring water to the operating temperature of the local district heating grid of over 100 °C.

Customized development

Another example is the Dannenbaum colliery. It is currently being developed in the EU project D2Grids a heat and cold storage for the industry and knowledge campus "Mark 51°7", which is being built on the former factory site of the car manufacturer Opel in Bochum. In the medium term, buildings with approximately

Opel in Bochum entsteht. Auf knapp 70 ha könnten mittelfristig Gebäude mit rd. 6.000 Arbeitsplätzen beheizt und parallel Kühlleistung für Gewerbeanwendungen bereitgestellt werden. Geschätzt 200 ehemalige Steinkohlenbergwerke könnten in Deutschland direkt geothermisch oder als Wärmespeicher genutzt werden. Zur Erkundung und Erschließung ihrer Potentiale im Ruhrgebiet betreibt das Fraunhofer IEG das Untergrundlabor TRUDI (Bild 7). Es liegt im bergrechtlichen 50 km² großen Feld „Zukunftsenergie“ im Bochumer Süden. Das Labor verfügt über Testfelder zur Durchführung von bohrtechnischen Versuchen bis in Tiefen von über 5.000 m. Dort lassen sich z.B. Referenzbohrungen durchführen und Reservoirtechniken zur Erschließung dichter Gesteinsformationen anwenden.



*Fig. 7. Fraunhofer IEG is setting a good example at its location in Bochum, which it has developed with shallow geothermal energy which covers its heating and cooling requirements. In the future, it wants to explore the potential for deep geothermal energy in the TRUDI demonstrator.
Bild 7. Mit gutem Beispiel voran geht das Fraunhofer IEG an seinem Standort in Bochum, welches es mit flacher Geothermie erschlossen hat und so seinen Wärme- und Kältebedarf deckt. In Zukunft will es im Reallabor TRUDI auch das Potential für die tiefe Geothermie erkunden. Source/Quelle: Fraunhofer IEG*

Analog dazu plant das Fraunhofer IEG auch im Rheinischen Revier, ein Reallabor mit Observatorium und Forschungskraftwerk für die Tiefengeothermie aufzubauen (Bild 8). Der Standort zeichnet sich durch die räumliche Überlappung des Aachener Fernwärmenetzes, welches bislang aus der Abwärme des Braunkohlenkraftwerks Weisweiler gespeist wurde, an der Oberfläche mit dem vermuteten Verlauf der Thermalwasser führenden Kalksteinsedimente im Untergrund aus. Das Observatorium soll der Überwachung von Reservoirprozessen dienen. Das Forschungskraftwerk soll anschließend an einem der ambitioniertesten Forschungsstandorte des Rheinischen Reviers technologische Innovationen mit neuen Wertschöpfungspotentialen im Energiesektor verknüpfen. Der Demonstrator soll einerseits hydrothermales Wasser fördern und dessen Wärme in das regionale Fernwärmenetz einspeisen. Insbesondere dient die Anlage jedoch als Entwicklungsumgebung und Nukleus der Tiefengeothermieindustrie sowie als Aus- und Weiterbildungszentrum für geothermale Technologien.

6,000 workplaces can be heated and in parallel cooling capacity is provided for commercial applications. It is estimated that 200 former hard coal mines in Germany could be utilized for geothermal and or storage purposes. In order to explore and develop their potential in the Ruhr area, Fraunhofer IEG operates the TRUDI demonstrator (Figure 7). It is located in the 50 km² field “Future Energy” in the southern part of Bochum. Within the laboratory test field drilling tests to depths of over 5,000 m are possible. Reference drilling and reservoir utilization techniques could here be carried out, in order to develop dense rock formations for usage of geothermal energy production.

Fraunhofer IEG is in parallel planning to set up a demonstrator with an observatory and a research power plant for deep geothermal energy in the Rhenish area (Figure 8). The location is characterized by the spatial overlap of the Aachen district heating grid on the surface with the assumed layout of the thermal water-bearing limestone sediments underground, whereby the Aachen district heating network was previously fed with waste heat from the Weisweiler lignite power station. The subsurface observatory is intended to monitor reservoir processes. Afterwards, the research power plant has to combine technological innovations with new value-added potential in the energy sector at one of the most ambitious research locations in the Rhenish District. On the one hand, the demonstrator is intended to pump hydrothermal water and provide heat for the regional district heating network. In particular, however, the system serves as a development environment and nucleus of the deep geothermal industry as well as a training and further education center for geothermal technologies.

Concluding Remark

Fraunhofer IEG accepts its social mandate and develops ideas, technologies and strategies for the next phase of the energy transition. It makes a significant contribution to opening up the markets for the application of geothermal energy systems, the storage of energy carriers and technologies for coupling the energy sectors of heat, electricity and transport in an even more targeted manner with its partners from business and science. Thus, Fraunhofer IEG is working towards a sustainable future.

References / Quellenverzeichnis

Fraunhofer IEG: www.ieg.fraunhofer.de/de/geschaeftsfelder.html
 Fakten zur Geothermie: www.geothermie.de/geothermie/geothermie-in-zahlen.html
 Heatstore: www.ieg.fraunhofer.de/de/geschaeftsfelder/speicher-untertagesysteme.html
 D2Grids: www.geothermie.de/aktuelles/nachrichten/news-anzeigen/news/mark-51-7-ehemaliger-opel-standort-in-bochum-wird-mit-grubenwasser-geheizt-und-gekuehlt.html
 Wärme für die Papierindustrie: www.ieg.fraunhofer.de/de/presse/pressemitteilungen/ieg-kabel-premium-pu-pl-paper-untersuchten-ausbau-erneuerbarer-energien-standort-hagen.html
 Reibungsarme Bohrhämmer: www.geodrillproject.eu
 EU-Projekt DGE-ROLLOUT: www.nweurope.eu/projects/project-search/dge-rollout-roll-out-of-deep-geothermal-energy-in-nwe/



Fig. 8. Quarries like this one in Rhineland show many geological layers and help to better understand the structure of the subsurface. The cooling towers of the Weisweiler lignite power station can be seen in the background.

*Bild 8. Steinbrüche wie dieser im Rheinland legen viele geologische Schichten frei und helfen, den Aufbau des Untergrunds besser zu verstehen. Im Hintergrund erkennt man die Kühltürme des Braunkohlenkraftwerks Weisweiler.
 Photo/Foto: K. Schinarakis/Fraunhofer IEG*

Schlussbemerkung

Das Fraunhofer IEG nimmt seinen gesellschaftlichen Auftrag an und entwickelt Ideen, Technologien und Strategien für die nächste Phase der Energiewende. Mit seinen Partnern aus Wirtschaft und Wissenschaft leistet es einen wesentlichen Beitrag dazu, die Märkte für die Anwendung von geothermischen Energiesystemen, der Speicherung von Energieträgern und Technologien zur Kopplung der Energiesektoren Wärme, Strom und Verkehr noch gezielter zu erschließen. Es arbeitet so daran mit, den Weg in eine nachhaltige Zukunft zu ebnen.

Author / Autor

Prof. Dr. Rolf Bracke, Leiter der Fraunhofer-Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geothermie (Fraunhofer IEG) und Professor an der Ruhr-Universität Bochum, Bochum