

# Geothermische Stromerzeugung - Vom Reservoir bis zur Turbine

Dr. Ernst Huenges, Intl. Centre for Geothermal Research / Deutsches GeoForschungs-Zentrum

## 1. Einführung

Anspruchsvolle energie- und umweltpolitische Zielsetzungen stellen die Energieversorgung vor neue Herausforderungen: Der Energiemix der Zukunft soll ökologisch verträglich, ressourcensicher und wettbewerbsfähig sein. Langfristige Energiesicherheit und nachhaltige Energiekonzepte sind gefragt, ausgerichtet auf Energieeffizienzsteigerung in der Stromerzeugung und im Verbrauch, Ausweitung der erneuerbaren Energiebereitstellung durch Wind, Solar, Biomasse und Geothermie, Abtrennung von CO<sub>2</sub> bei der Nutzung fossiler Energien und dessen anschließende Sequestrierung als auch die Nutzung der Kernenergie.

Hohe Erwartungen werden in die Entwicklung der Erneuerbaren Energien gesetzt: Bis zum Jahr 2020 soll der Anteil dieser Energieträger am gesamten Energieverbrauch der EU auf 20 % steigen.

Das geothermische Potenzial ist dabei für den Energiemix der Zukunft ökonomisch und umweltpolitisch von großem Interesse. Anders als Wind und Sonne steht Erdwärme rund um die Uhr und ohne jahreszeitliche Schwankungen zur Verfügung. Mit ca. 11 GW installierter Leistung (siehe Abb. 1) gehört die Erdwärme bereits heute zu den weltweit meist genutzten regenerativen Energien. Nach Schätzungen von Goldstein et al. (2011) könnte sie in rund 40 Jahren weltweit 160 Gigawatt elektrische und mehr als 300 Gigawatt thermische Leistung grundlastfähig bereitstellen (siehe Abb. 2).

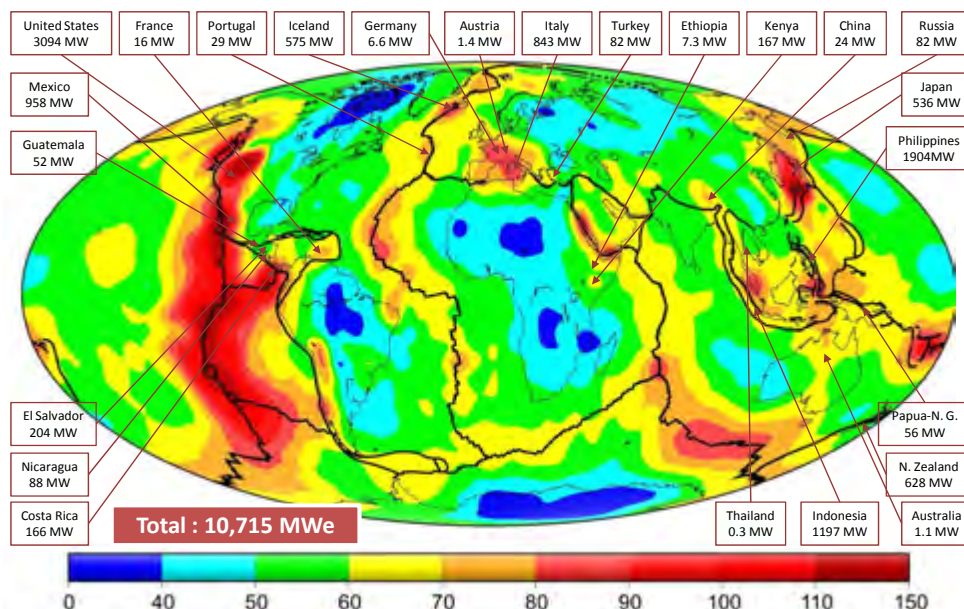


Abb. 1: 2010 weltweit installierte Kapazität geothermischer Kraftwerke verteilt auf Länder (Bertani, 2010). Die Abbildung zeigt außerdem die Verteilung der terrestrischen Wärmestromdichte in  $mW/m^2$  ermittelt aus geglätteten onshore und offshore Messdaten nach Hamza et al. (2008) sowie tektonische Plattengrenzen.

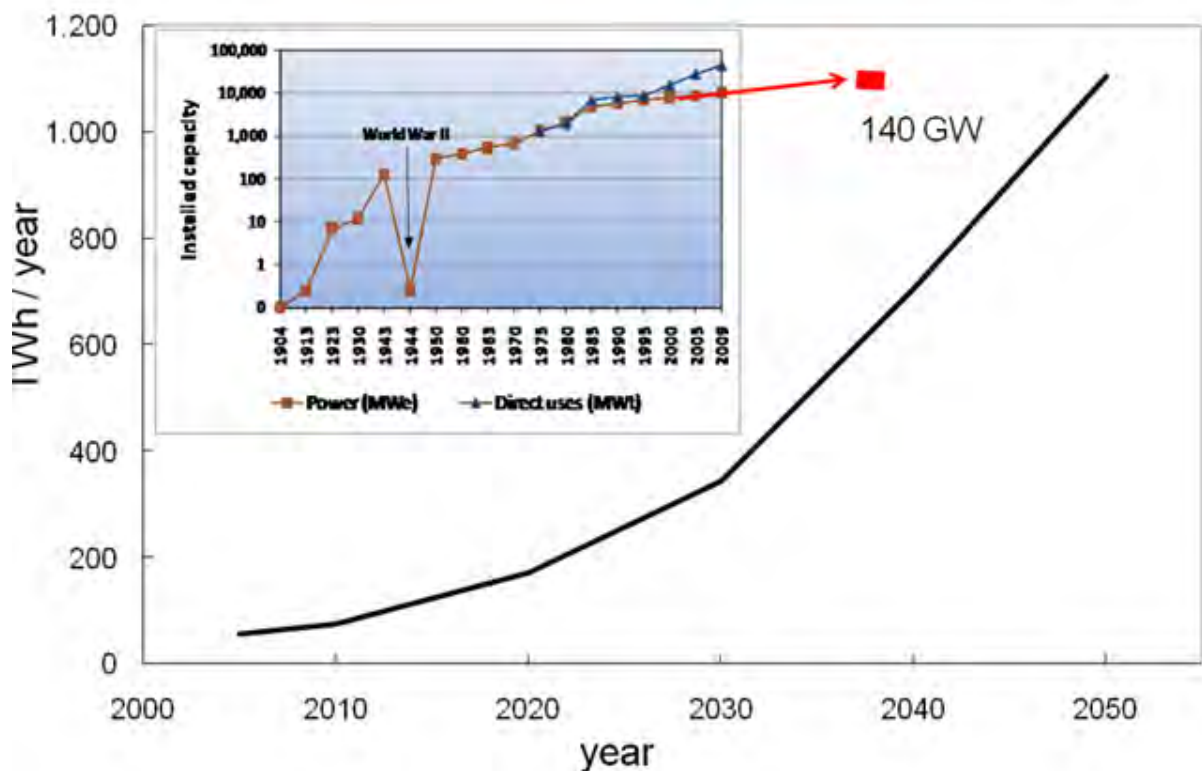


Abb. 2: Szenario für Entwicklung der weltweiten Strombereitstellung aus geothermischen Kraftwerken mit zuletzt 160 GW Kapazität bis 2050 / Fridleifsson et al., 2008, Historie nach Goldstein et al. (2011).

Geothermische Anlagen beanspruchen wenig Fläche und emittieren im Vergleich zur Verbrennung fossiler Energieträger nur einen Bruchteil der Menge an CO<sub>2</sub> (Abb.3). Als dezentral einsetzbarer grundlastfähiger und vor allem heimischer Energieträger stellt er somit eine ökologisch beispielhafte Alternative zu fossilen Energieträgern dar. Geothermie ist zudem mit anderen grundlastfähigen und nicht grundlastfähigen Energieträgern wie Biomasse, Braunkohle, Solarthermie und Windenergie sowie CCS-Technologie kombinierbar.

Aus Erdwärme kann Energie in Form von technisch nutzbarer Wärme oder elektrischem Strom bereitgestellt werden. Die geothermische Fündigkeit ist dabei nicht auf ausgeprägt vulkanische Gebiete beschränkt. Im Prinzip gibt es Erdwärme überall, auch in Mitteleuropa. In Deutschland eignen sich für die tiefe Geothermie zur Stromerzeugung bevorzugt drei Regionen: das süddeutsche Molassebecken, der Oberrheingraben und das Norddeutsche Becken. Allerdings muss man dort mehrere Kilometer tief bohren, um ein Temperaturniveau zu erschließen, das hoch genug ist, um über Dampfturbinen elektrische Generatoren anzutreiben. Die Erschließung stellt spezifische Anforderungen an Technik und Engineering und ist beim aktuellen Entwicklungsstand mit hohen Investitionen verbunden.

Das Ziel einer breiteren Nutzung tiefer Geothermieressourcen zur Bereitstellung von Grundlaststrom erfordert deshalb grundlegende technologische Weiterentwicklungen auf allen Stufen des Gesamtsystems. In der Geothermienutzung kommen Verfahren und Komponenten zum Einsatz, die zwar für viele Anwendungsbereiche etabliert sind, für die spezifischen Randbedingungen und das Zusammenwirken in geothermischen Anlagen jedoch

noch ein erhebliches Verbesserungspotenzial in Bezug auf Effizienz und Nachhaltigkeit aufweisen. Hier liegt ein großes Potenzial, um von der vorwettbewerblichen Demonstration zu einer breiteren Marktdurchdringung zu gelangen. Die Herausforderung besteht in der effektiven und kostensparenden Kombination und Integration der verschiedenen Systemkomponenten geothermischer Systeme, um eine effiziente wettbewerbsfähige Nutzung tiefer geothermischer Ressourcen zu erreichen.

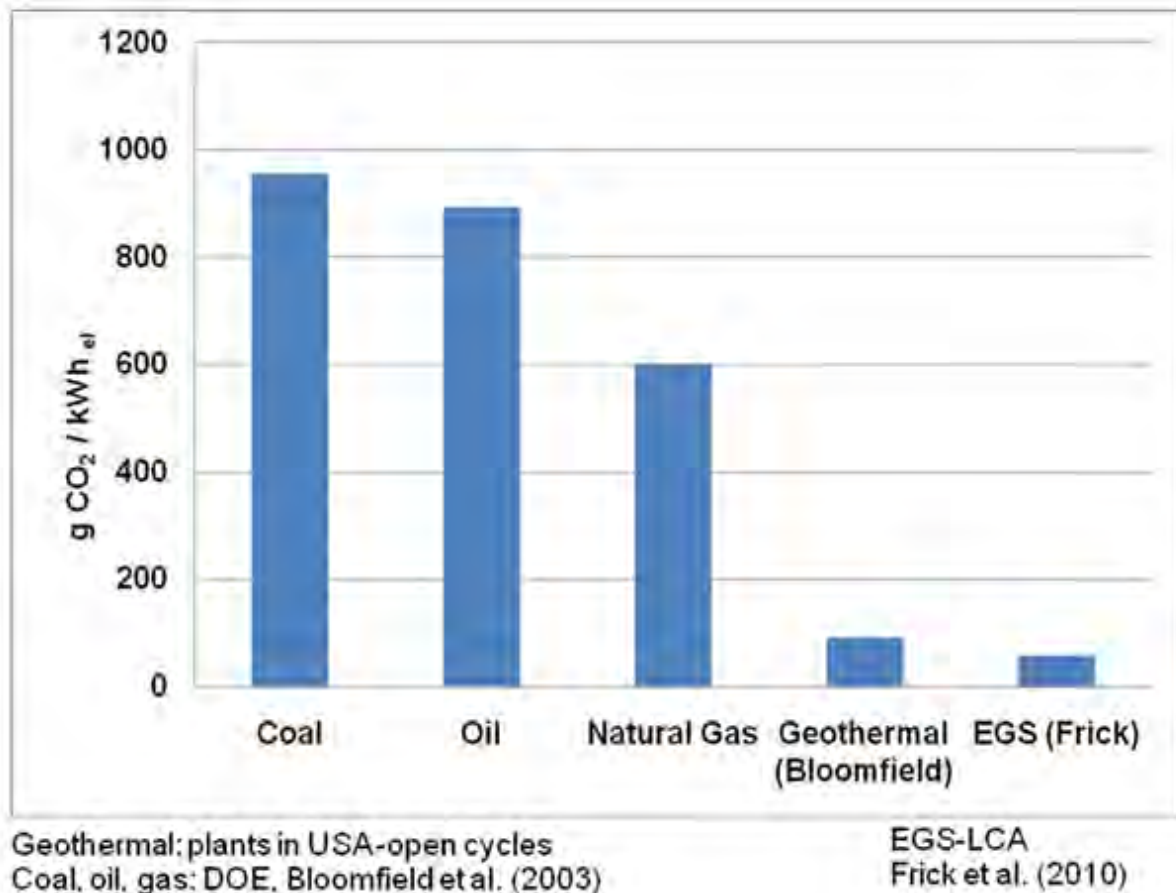


Abb. 3: CO<sub>2</sub> Emissionen fossiler und geothermischer Stromerzeugung. Bloomfield et al. berücksichtigen die natürlichen Emissionen bei der systemoffenen Gewinnung aus geothermischen Lagerstätten. Frick et al. haben die spezifischen Emissionen aus Lebenszyklusrechnungen (live cycle assessment LCA) mit Daten des heutigen Energiemixes von in der Regel mit geschlossenen Thermalwasserkreisläufen betriebenen EGS (Enhanced Geothermal Systems) bestimmt. Hier tragen insbesondere Arbeitsschritte vor Inbetriebnahme (z.B. Bohrungen) zu den Emissionen bei.

## 2. Lernkurve geothermischer Technologien in Deutschland

In Deutschland erlebte die Nutzung der Erdwärme in den vergangenen Jahren große Zuwachsraten. Seit 2008 sind mehr als ein Gigawatt Wärmeleistung aus der Geothermie installiert. Davon verteilten sich 130 MW<sub>th</sub> auf größere Anlagen, der überwiegende Anteil von allein schon über 1 GW<sub>th</sub> stammt jedoch aus Erdwärmesonden: Das sind Wärmequellenanlagen für Wärmepumpen, die Ein- oder Mehrfamilienhäuser beheizen. In Süddeutschland wird heißes Wasser aus der Tiefe in einigen Gemeinden für die zentrale

Wärmeversorgung genutzt, so zum Beispiel in Erding, Pullach und Unterschleißheim. Geothermische Anlagen in Mecklenburg-Vorpommern tragen bereits seit den 1980er Jahren zur Wärmeversorgung bei.

Aber auch in der Nutzung tiefer geothermischer Ressourcen zur Stromversorgung gibt es eine positive Entwicklung. Im November 2003 nahm im mecklenburgischen Neustadt-Glewe das erste geothermische Pilotkraftwerk Deutschlands mit einer Leistung von 0,2 MW<sub>el</sub> den Betrieb auf. Es demonstrierte, dass auch unter hiesigen geologischen Bedingungen Stromerzeugung aus geothermischen Ressourcen technisch möglich ist. Das erste größere industriell betriebene Erdwärmekraftwerk in Deutschland mit einer elektrischen Leistung von 3 MW<sub>el</sub> und einer Wärmeleistung zwischen 6 und 8 MW<sub>th</sub> ging 2007 im pfälzischen Landau ans Netz. Beide Anlagen arbeiten nach dem ORC-Prinzip. Sie besitzen einen separaten Turbinenkreislauf mit einem Arbeitsmittel, das schon bei niedrigeren Temperaturen als Wasser siedet, den heißes Wasser aus dem Untergrund über einen Wärmetauscher erhitzt.

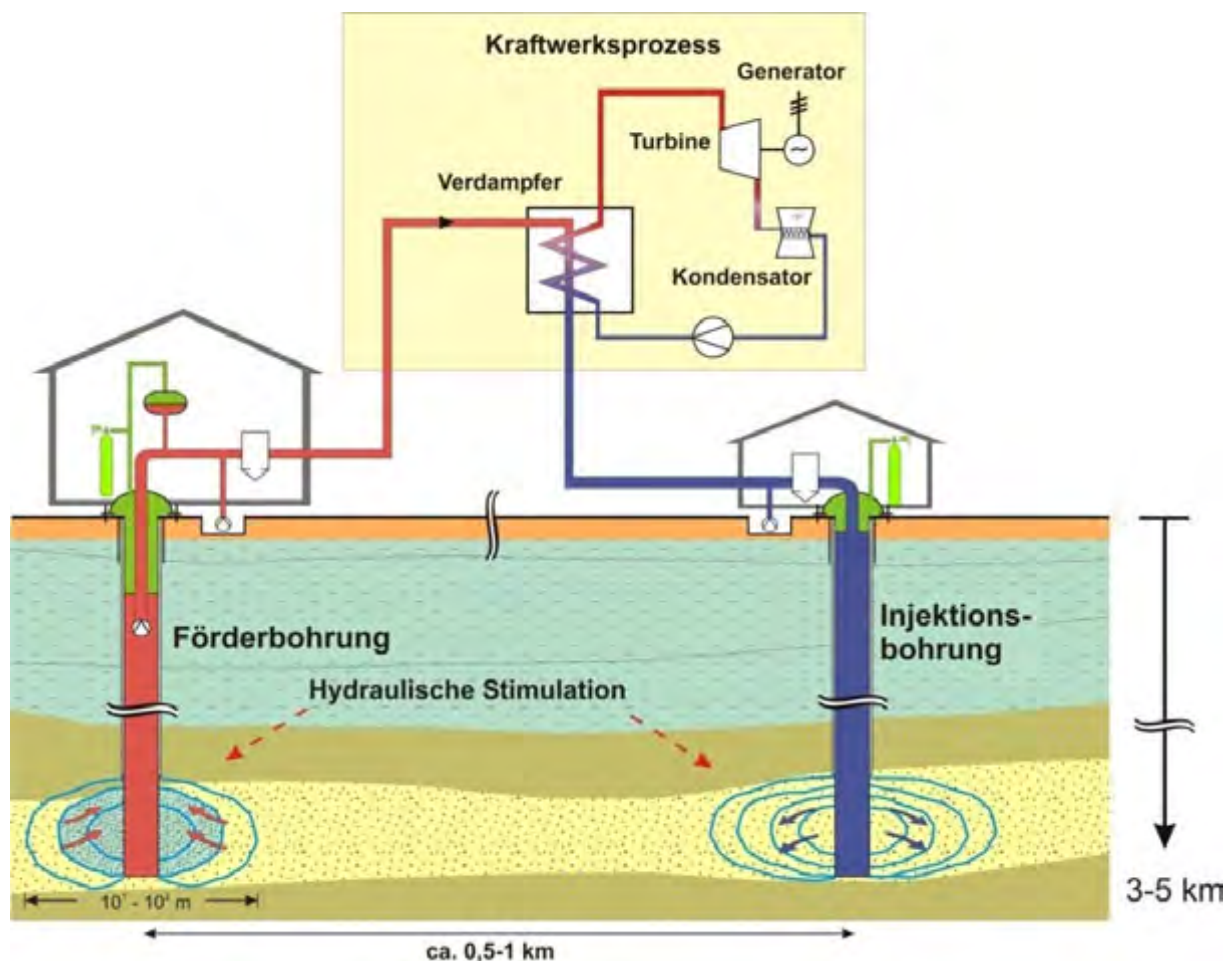


Abb. 4 : Geothermische Stromerzeugung nach dem ORC (Organic Rankine Cycle) Prinzip. Über eine Produktionsbohrung fördert eine Pumpe heißes Tiefenwasser nach oben. Mit der Wärme wird über einen Verdampfer im Kraftwerkskreislauf eine Turbine zur Stromgenerierung betrieben. Der Turbinenkreislauf enthält ein organisches Arbeitsmedium mit einer niedrigen Siedetemperatur (Organic Rankine Cycle). Das abgekühlte Wasser wird über eine Injektionsbohrung (blau) wieder in den Untergrund zurückgeführt. (Quelle: GFZ)



Im bayerischen Unterhaching versorgt seit Juni 2009 eine Kalina-Anlage die Gemeinde mit geothermischem Strom, nachdem bereits seit 2007 Wärme in das örtliche Fernwärmenetz eingespeist wird. Im Vergleich zum ORC-Prozess hat der Kalina-Prozess eine aufwändigere und damit teurere Anlagenkonstruktion. Der Kalina-Kreisprozess arbeitet unter Verwendung von Ammoniak-Wasser als Arbeitsmedium. Die Wärme des Thermalwassers wird an das Arbeitsmedium abgegeben. Der wesentliche Unterschied zum ORC-Verfahren ist die Verwendung eines Gemisches als Arbeitsfluid und dessen Konzentrationsänderungen – Desorption durch die Wärmezufuhr bzw. Absorption durch die Wärmeabfuhr. Desorption und Absorption verlaufen im Gegensatz zum ORC-Prozess nicht isotherm. Dadurch wird eine signifikant bessere Wärmeübertragung von der Niedertemperaturquelle erreicht.

### **3. Geothermische Reservoirs**

Die Nutzung des Untergrundes hängt im besonderen Maße von der effizienten Bewirtschaftung des Reservoirs ab. Dazu muss man das Gesamtsystem aus Bohrung und Reservoir im Untergrund qualitativ und quantitativ verstehen. Mit diesem Verständnis kann man die Prozesse in der Bohrung, im bohrlochnahen Bereich und im Reservoir in Grenzen gestalten.

Man unterscheidet hydrothermale und petrothermale Systeme. Hydrothermale Systeme sind durch existierende nutzbare wasserführende Schichten, so genannte Aquifere, charakterisiert. Bei petrothermalen Systemen wird geothermische Energie aus tiefen Gesteinsschichten unabhängig von den hydraulischen Eigenschaften des Erdwärmeleiters gewonnen. Während die Temperaturverteilung in der Erdkruste durch die Natur vorgegeben ist, können bei petrothermalen Systemen die Zuflussbedingungen zur Bohrung durch ingenieurtechnische Behandlungen, so genannte Engineered Geothermal Systems (EGS)-Technologien, verbessert werden. Enhanced oder auch Engineered Geothermal Systems sind Systeme, die mit produktivitätssteigernden Maßnahmen zur Wirtschaftlichkeit geführt werden (Huenges 2010).

Zu EGS-Systemen gehören auch die früher Hot Dry Rock (HDR) genannten Systeme. Das sind trockene Gesteinsformationen, die übertägig zugeführtes Wasser nutzen. Das Wasser nimmt die Wärme des Untergrundes über die natürlichen oder zuvor durch Stimulation künstlich geschaffenen Wärmetauscherflächen auf und transportiert es an die Oberfläche. EGS-Technologien werden für Standorte entwickelt, an denen die Wirtschaftlichkeit nicht von vornherein gegeben ist. Etwa 95 % des geothermischen Potenzials in Deutschland sind nur mit dieser Technologie erschließbar. Alle dazu notwendigen Systemkomponenten sind zwar prinzipiell verfügbar, arbeiten aber in der Zusammenschaltung oft noch nicht ausreichend zuverlässig und effizient. Da EGS-Systeme weltweit verbreitet sind, sind die Technologien nicht nur in Deutschland für die Geothermienutzung interessant. Sie können auf andere Standorte mit vergleichbaren geologischen Bedingungen übertragen werden und fließen in zukünftige Strategien zur Exploration und Erschließung tiefer sedimentärer geothermischer Systeme ein, insbesondere im Bereich des Zentralen Europäischen Beckens.

Die hydraulische Stimulation (Hydraulic Fracturing), ein in der Erdöl- und Erdgasindustrie gängiges Verfahren, hat sich in den letzten Jahren auch in der Erdwärmenutzung zu einem Schlüsselverfahren entwickelt. Um eine geeignete nachhaltige Thermalwasserproduktion zu erreichen, muss der Gesteinskörper hoch porös und gut durchlässig sein, also einen hohen Anteil hydraulisch verbundener Poren besitzen (Hot Fractured Rock). Allerdings ist in Tiefen mit Temperaturen um 150 °C die natürliche Permeabilität (Durchlässigkeit) der Gesteine meist gering. Sie werden durch Stimulation künstlich aufgebrochen, um eine ungehinderte Wasserzirkulation zu erreichen. Neben der

Erzeugung eines weitreichenden Rissystems wird der Anschluss an Wasser führende Klüfte hergestellt, die von Natur aus bereits vorhanden sind.

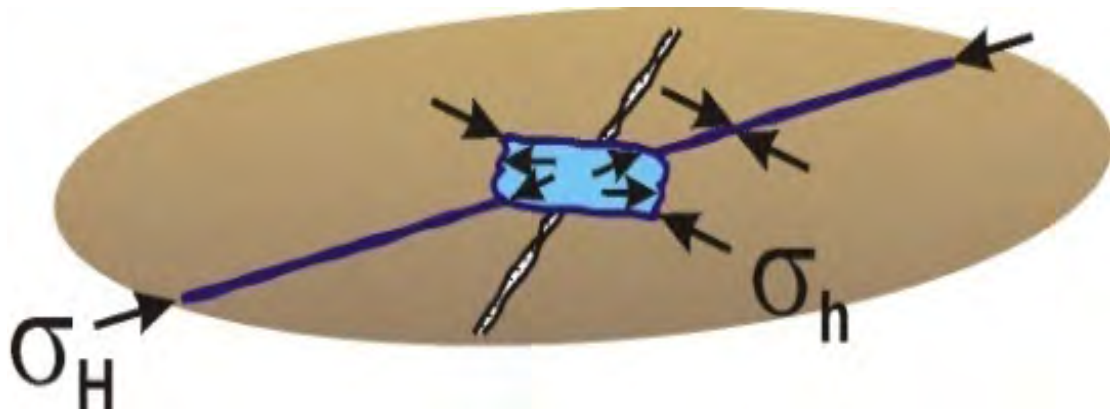


Abb. 5: Draufsicht auf einen Bohrungsquerschnitt mit Ausrichtung eines Zugrisses nach hydraulischer Stimulation  $\sigma_H$ - größte horizontale Spannung und  $\sigma_h$  kleinste horizontale Spannung.

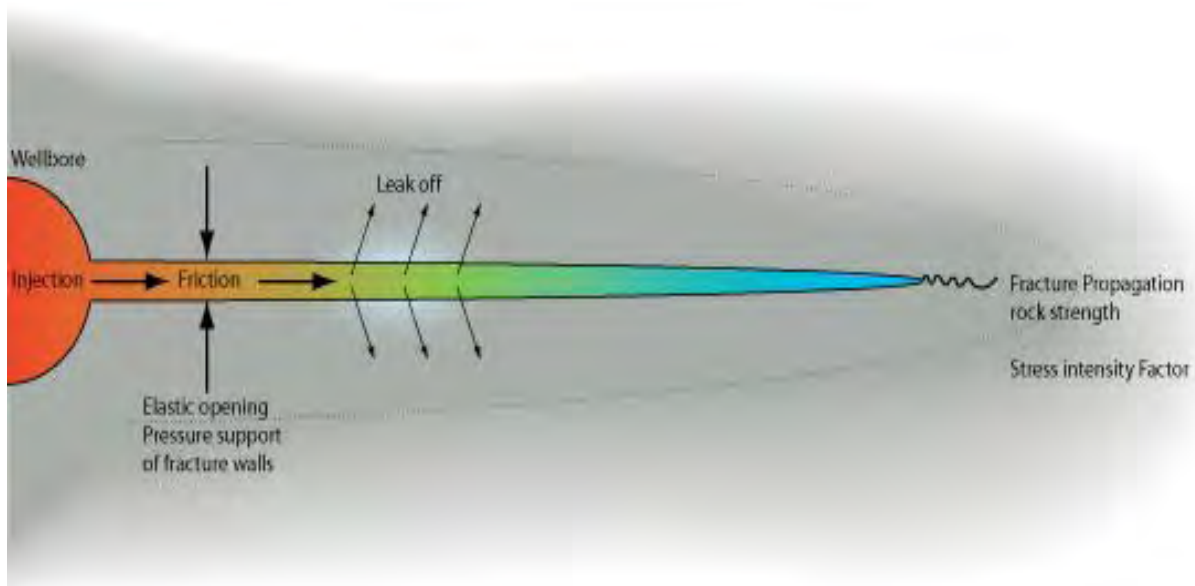


Abb. 6: Draufsicht auf einen Bohrungsquerschnitt bei hydraulischer Stimulation mit einhergehenden Prozessen (Fokker 2007).

Bei der hydraulischen Stimulation wird in kurzer Zeit unter hohem Druck ein Fluid, meist Wasser, über eine Bohrung verpresst. Der Druck des Fluids überschreitet die im Gebirge vorherrschenden Spannungen, erweitert vorhandene Risse im Gestein, verbindet sie und erzeugt neue Klüfte. Falls nötig, wird das Stimulationsfluid zur Sicherung der Rissöffnung mit Stützmitteln versetzt, zum Beispiel mit Keramikkügelchen von etwa 1 mm Durchmesser. Diese lagern sich in den hydraulisch erzeugten Rissen im Gestein ein und halten sie offen, wenn der Druck nachlässt. Durch Stimulation entsteht ein weit verzweigtes Kluftsystem, das dem Thermalwasser neue Fließwege zur Förderbohrung schafft. Es funktioniert sodann als Transportweg und als untertägiger Wärmetauscher mit großer Kontaktfläche.

## **4. In situ Geothermielabor Groß Schönebeck:**

### **4.1 Effiziente Systemlösungen zur Sicherung eines nachhaltigen Anlagenbetriebes**

Die Forschungsarbeiten am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ zur Entwicklung geothermischer Technologien konzentrieren sich seit 2001 auf einen Standort im Nordostdeutschen Becken, das Teil eines großen Sedimentbeckensystems ist, welches sich von Holland bis zu den baltischen Staaten erstreckt.

Zwei über vier Kilometer tiefe Bohrungen erschließen geothermisch interessante Horizonte des Norddeutschen Beckens in Tiefen zwischen 3.900 und 4.300 Metern bei Temperaturverhältnissen um 150 °C. Sie dienen als natürliches Labor für die Durchführung vielseitiger Entwicklungs- und Testprogramme zur Untersuchung geowissenschaftlicher und bohrtechnischer Methoden. Seit 2001 werden hier erfolgreich Serien hydraulischer Experimente und Bohrlochmessungen mit dem Schwerpunkt der kontrollierten Produktivitätssteigerung geothermischer Lagerstätten durchgeführt. Im Mittelpunkt stehen dabei langfristige Problemlösungen für die standortunabhängige Nutzung geothermischer Ressourcen. Der Schwerpunkt liegt auf der Entwicklung technologischer Maßnahmen zur kontrollierten Stimulation verschiedener Gesteinsformationen, um Erdwärme überall dort nutzen zu können, wo sie gebraucht wird.

Bei Stimulationsexperimenten in den Bohrungen Groß Schönebeck im August 2007 wurden 14.000 Kubikmeter Wasser unter hohem Druck in drei verschiedene Horizonte der 4,4 Kilometer tiefen Forschungsbohrung verpresst (Schulte et al. 2010). Bei einer Absenkung des Wasserspiegels in der Bohrung von 500 Metern konnte die Produktivität von 5 auf 50 Kubikmeter pro Stunde erhöht werden. Eine anschließende Bohrlochreinigung mit Salzsäure spülte die Poren und Risse im Gestein frei, so dass die Thermalwasserproduktivität bei gleicher Absenkung nochmals auf 65 bis 75 Kubikmeter pro Stunde gesteigert werden konnte.

Die durchgeführten Maßnahmen führen zu folgenden Schlussfolgerungen:

Die Nachhaltigkeit der Rissöffnung hängt entscheidend davon ab, ob überwiegend Scherrisse oder Zugrisse erzeugt wurden. Die Stimulationsmaßnahmen in Groß Schönebeck haben gezeigt, dass die Hinzugabe von Sand oder Stützmitteln die Nachhaltigkeit der Rissöffnung gewährleistet. Dieses gilt insbesondere für Produktionsbohrungen mit einem reduzierten Formationsdruck bei der Produktion. Für die Durchführung der Stimulationsmaßnahmen ergeben sich verschiedene Optionen zur Beeinflussung des Risswachstums durch Variation der Fließrate, der Dauer der Behandlung und der Verwendung von Fluiden mit unterschiedlichen Viskositäten. Die Optimierung dieser Parameter ermöglicht die Kontrolle des Risswachstums in horizontaler und vertikaler Richtung, und damit einen optimierten Anschluss an das Reservoirgestein.

Über die Entwicklung, Erprobung und Optimierung geothermiespezifischer Methoden und Verfahren soll langfristig mit innovativen Konzepten der Bau wirtschaftlich arbeitender Heizkraftwerke ermöglicht werden. Die Erkenntnisse zur Stimulierbarkeit werden jedoch nicht nur in der Geothermie, sondern generell bei Vorhaben benötigt, die Tiefenfluide fördern oder in denen zu speicherndes Material zusammen mit Fluiden in den Untergrund gebracht wird. So bilden die Ergebnisse auch verwertbare Ansätze für die CO<sub>2</sub>-Speicherung.

Neben Stimulationsverfahren wurden in Groß Schönebeck neue Methoden zum speicherschonenden Aufschluss geothermischer Lagerstätten und zum gerichteten Bohren im Speicherbereich angewandt. Geothermiebohrungen stellen eine besondere Herausforderung dar. Die angestrebte Nutzung eines geothermischen Reservoirs über zwanzig bis dreißig Jahre

erfordert einen speicherschonenden Aufschluss und einen sicheren Bohrungsausbau. Dabei werden in der Kohlenwasserstoffindustrie gängige Verfahren berücksichtigt, die Erfahrung zeigt aber, dass diese nicht unverändert auf die Geothermie übertragen werden können. So müssen neue Lösungen für eine geothermiespezifische Spülungs- und Komplettierungstechnik entwickelt werden. Weitere spezielle Zielsetzungen für die Geothermie sind eine minimale Schädigung der Lagerstätte beim bohrtechnischen Aufschluss, der Anschluss maximaler Reservoirzuflussflächen und der langlebige Bohrlochausbau in stark korrosiver Umgebung. Das betrifft z.B. die Bereiche Spüloptimierung, Erhöhung der Bohrgeschwindigkeit und untertägige Messtechnik für den Einsatz von Richtbohrtechnik. Ein schonender Speicheraufschluss minimiert hohe Kosten und Risiken bei der Lagerstättenerschließung und verbessert den Thermalwasserzufluss. Geothermische Lagerstätten können so gezielt für das langfristig angestrebte Nutzungskonzept über 20-30 Jahre vorbereitet und die Thermalwasserproduktivität positiv beeinflusst werden. In Anbetracht der stetig wachsenden Anzahl von Geothermieranlagen liegen hier erhebliche Kosteneinsparungspotenziale.

Mit standortunabhängig anwendbaren Nutzungskonzepten soll langfristig eine breitere Nutzung geothermischer Ressourcen auch außerhalb geothermischer Anomalien ermöglicht werden. Die Untersuchungsergebnisse am Referenzstandort Groß Schönebeck stellen damit die Voraussetzung für eine weiträumige Erschließung des Norddeutschen Beckens mit geothermischen Anlagen dar.

#### **4.2 Ausbau des *In situ* Geothermielabor Groß Schönebeck zur Forschungsplattform**

Für den Betrieb geothermischer Anlagen sind alle notwendigen Systemkomponenten verfügbar, es gibt allerdings erst wenige Projekte, in denen die Gesamttechnologie umgesetzt worden ist. Für einen sicheren Betrieb müssen die in den Komponenten ablaufenden Prozesse vertiefend untersucht werden. Sie finden ihre experimentelle Umsetzung in der zur Zeit im Aufbau befindlichen Forschungsplattform im *In situ* Geothermielabor Groß Schönebeck. Industriepartner unterziehen hier Systemkomponenten unter den anspruchsvollen Umgebungsbedingungen des in Groß Schönebeck geförderten hoch salinaren Fluids einem Härtestest und entwickeln sie weiter.

Die geothermische Systemkomponenten werden in einem betriebsnahen Umfeld unter anspruchsvollen Einsatzbedingungen getestet. Wärmeübertrager, Rohrleitungen, Pumpen und Armaturen werden hohen Temperatur- und Druckbedingungen sowie hochsalinaren Fluiden ausgesetzt und für den Langzeiteinsatz in geothermischen Anlagen weiterqualifiziert. Über den interdisziplinären Austausch zwischen Forschung und Industrie soll die Entwicklung anwendungsnaher Komponenten und Werkstoffe im Verbund vorangetrieben werden.

Der Bau des 2011 am Standort geplanten **Forschungskraftwerkes** komplettiert das Gesamtsystem von der Reservoirerschließung bis zur Energiebereitstellung und ermöglicht die ganzheitliche Demonstration geothermischer Stromerzeugung. Die Planung effizienter geothermischer Kraftwerke mit optimierter Nettoleistung muss mit einem ganzheitlichen Planungsansatz erfolgen, der die z.T. gegensätzlichen Einflüsse der einzelnen Anlagenteile (d.h. Thermalwasserkreislauf, Kraftwerkskreislauf, Kühlung) auf die erzeugte Bruttoleistung und den Stromeigenbedarf berücksichtigt.

Dieser fachübergreifende Forschungsansatz stellt eine neue Qualität in der geothermischen Technologieentwicklung dar. Mit effizienten Systemlösungen trägt das Projekt zum verlässlichen Betrieb geothermischer Anlagen und damit zu einer breiteren Nutzung tiefer geothermischer Ressourcen für die Strom- und Wärmeversorgung in



Deutschland bei. Die in Groß Schönebeck entstehende Forschungsplattform für geothermische Technologie wird die qualitative Entwicklung der Lernkurve vorantreiben.

## 5. Geothermie und Induzierte Seismizität

Stimulationsverfahren machen eine Lagerstätte erst wirtschaftlich nutzbar, haben aber den Nebeneffekt, dass Mikrobeben auftreten können. In geothermisch begünstigten Gebieten wie dem Oberrheingraben ist das natürliche Risiko seismischer Aktivität generell höher einzustufen als z. B. im Norddeutschen Sedimentbecken, wo kaum seismische Aktivität zu erwarten ist. Diese ist bis zu einem gewissen Grad sogar gewollt, weil die Lokalisierung des Mikrobebens hilft, die Wirkung der Wasserinjektion in der Tiefe geometrisch abzubilden. Der Untergrund ist aber komplex und heterogen. Jeder potenzielle Projektstandort erfordert umfangreiche geologische Voruntersuchungen und ein auf den jeweiligen Standort abgestelltes Erschließungskonzept. Besonderes Augenmerk verdient das seismische Monitoring, auf dessen Basis eine seismische Gefahrenabschätzung vorgenommen und Szenarien zur Risikominimierung entwickelt werden können. Bereits diese Voruntersuchungen entscheiden über das Für und Wider eines Projektes.

Im Rahmen des vom GFZ geleiteten EU-Projektes **GEISER (Geothermal Engineering Integrated Mitigation of Induced Seismicity in Geothermal Reservoirs)** entwickelt das GFZ in Kooperation mit Partnern aus Frankreich, Niederlande, Schweiz, Norwegen, Island und Italien Instrumente für Standorte mit einem erhöhten seismischen Risiko, die eine verlässliche Risikoabschätzung möglich machen. Dabei geht es um die Standortentscheidung: Wenn eine Lagerstätte keine sichere Geothermienutzung zulässt, muss ein anderer Standort gefunden werden, da kann ihr Erdwärmepotenzial noch so vielversprechend sein. Die Analyse induzierter Seismizität geothermischer Reservoirs verteilt über ganz Europa, das Verständnis der Geomechanik und der Prozesse bei induzierter Seismizität sowie die Einschätzung der Konsequenzen und die Entwicklung von Strategien zur Handhabung induzierter Seismizität sind die wesentlichen Zielstellungen.

## 6. Forschungsbedarf

Auf Grund des großen und noch weitgehend unerschlossenen geothermischen Potenzials werden *Enhanced Geothermal Systems (EGS)* in den letzten Jahren als besondere Option gesehen. Jedoch sind die Technologien zur Nutzung von EGS gegenwärtig noch nicht marktreif. Notwendige Schlüsselkomponenten von EGS-Anlagen, die hauptsächlich andere Anwendungen haben, z.B. zur Gewinnung von Kohlenwasserstoffen, sind bereits etabliert. Jedoch weisen diese für die Randbedingungen in EGS-Anlagen noch ein erhebliches technisches Verbesserungspotenzial auf. Die vergleichsweise hohen Kosten der verfügbaren Bohr-, Stimulations- und Fördertechnologien erschweren diese Entwicklung. Der bislang ausstehende Nachhaltigkeitsnachweis für EGS-Systeme ist ein weiteres Entwicklungshemmnis.

Aufgrund des noch frühen Standes der EGS-Technik gilt es, die F&E-Ansätze und bisherigen Erfolge zukünftig in adäquaten Programmen nicht nur fortzuschreiben, sondern auszuweiten. Das Ziel müssen kosten- und risikosenkende sowie produktivitätssteigernde Weiterentwicklungen vor allem im Bereich der Lagerstättenerschließung sein. Diese Weiterentwicklungen gilt es an verschiedenen Standorten in Deutschland mit unterschiedlichen geologischen Bedingungen zu demonstrieren, um so den Nachweis einer nachhaltigen und effizienten Energiebereitstellung mit dem Einsatz von EGS zu erbringen.

Zusätzlich müssen europaweite F&E-Aktivitäten und nationale Förderprogramme und Kompetenzen zukünftig stärker zusammengeführt und vernetzt werden. Um zuverlässige und langfristige Erfolge in der geothermischen Technologieentwicklung zu erzielen, muss Planungssicherheit für langfristig ausgerichtete F&E-Vorhaben und investierende Unternehmen geschaffen werden.

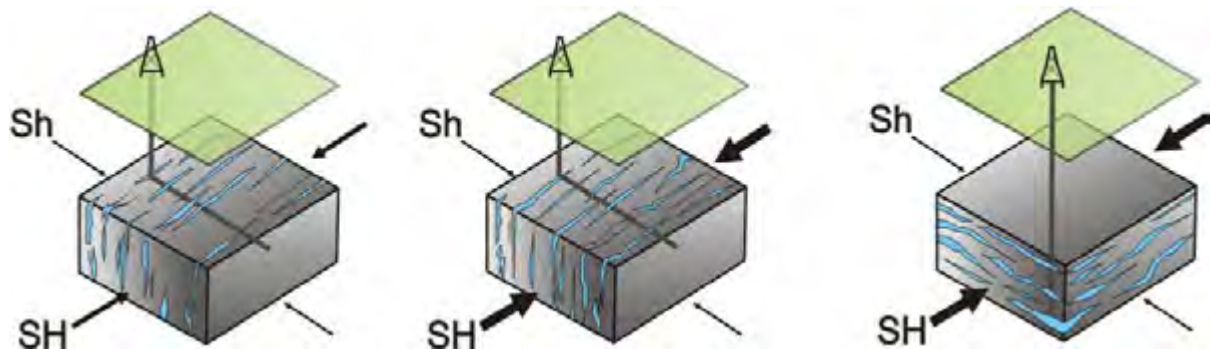


Abb. 7: Lagerstättenerschließung in verschiedenen Tektonischen Settings. SH und Sh sind größte und kleinste horizontale Hauptspannung (Bruhn et al. 2010).

Forschungsbedarf, insbesondere für eine weitere Entwicklung der EGS, besteht schwerpunktmäßig in folgenden Bereichen:

- Die Erfahrungen aus der Kohlenwasserstoff-Exploration müssen für die Exploration von EGS modifiziert werden. EGS erfordern mehr Kenntnis über Kluft- und Störungssysteme und deren Verhalten unter besonderer Berücksichtigung der Wasserführung und des In-situ Spannungsfeldes. Entwicklung von Methoden zur Erkundung des Spannungsregimes im engeren und weiteren Umfeld eines geplanten EGS-Projekts sollten mit dem Ziel durchgeführt werden, notwendige Stimulationsmaßnahmen zu optimieren und das Risiko induzierter Seismizität zu senken.
- Mit innovativen Bohrtechnologien und -strategien muss eine Reduktion der Bohrkosten erreicht werden. Im Mittelpunkt stehen dabei die Erhöhung der Lebensdauer von Bohrwerkzeugen, die Reduktion vom Energie- und Materialverbrauch einer Bohrung, für EGS spezielle Komplettierungssysteme mit langer Lebensdauer und speicherschonende Aufschlussverfahren. Die Weiterentwicklung der Exploration und damit die bessere Charakterisierung der lokalen geologischen Gegebenheiten werden ebenfalls zur Minderung des Bohrrisikos und damit zur Kostensenkung beitragen. Ein nationales EGS-Bohrprogramm kann diese Entwicklung ganz gezielt vorantreiben.
- Die technische Realisierbarkeit von EGS oder eines petrothermalen Systems muss in den nächsten Jahren an repräsentativen Standorten (mittlere Tiefe, hohe Temperatur, geringe natürliche Reservoirproduktivität) von der Exploration bis zur Energiebereitstellung mit einer Pilotanlage ganzheitlich demonstriert werden. Das Ziel bei der Weiterentwicklung von Maßnahmen zur Reservoirstimulation muss es sein, eine nachhaltige sowie bedarfsgerechte und somit weitgehend planungssichere Produktivität der Lagerstätte sicherzustellen. Die Realisierung muss eine Optimierung der obertägigen Umwandlungstechnologien (Wärme, Kälte, Strom) an den Pilotstandorten mit einschließen. Im Anschluss sollten die gewonnenen Erkenntnisse auf andere Standorte übertragen und dort mit Demonstrationsanlagen umgesetzt werden.

- Die verstärkte Geothermienutzung erfordert in vielen Teilgebieten noch wesentliche geowissenschaftliche Grundlagenforschung. Das Verständnis der Fluid-Gesteins-Wechselwirkung in Verbindung mit der Hydromechanik der Reservoire bildet die Basis für das Ingenieurwesen zur Nutzung geothermischer Systeme, also dem Reservoirmanagement im weiten Sinne. Erkenntnisorientierte Forschung wird in Zukunft verstärkt interdisziplinär, zum Beispiel in der Zusammenarbeit von Geologen und Ingenieuren, stattfinden müssen.

## 7. Ausblick

Nach dem im Mai 2009 vom Bundeskabinett verabschiedeten Geothermie-Bericht sollen in Deutschland bis zum Jahr 2020 etwa 280 Megawatt Leistung zur geothermischen Stromerzeugung installiert sein. Bei einer Leistung von etwa fünf Megawatt pro Kraftwerk entspricht dies mehr als fünfzig Kraftwerken. Sie haben zusammen das Potenzial, rund 1,8 Milliarden Kilowattstunden Strom und zusätzlich 3,4 Milliarden Kilowattstunden Wärme pro Jahr zu erzeugen. Im Bereich der Wärmeerzeugung ohne Stromproduktion wird erwartet, dass 2020 zudem 4,8 Milliarden Kilowattstunden Wärme aus Anlagen der Tiefen Geothermie erzeugt werden können. Nach 2020 wird mit einer Beschleunigung des Wachstums und einer installierten elektrischen Leistung von 850 Megawatt bis 2030 gerechnet.

Daher muss die Forschung in der Geothermie auf sichere und effiziente Systemlösungen ausgerichtet sein. Dazu gehören auch die Sicherstellung eines nachhaltigen Thermalwasserkreislaufes sowie die Optimierung der übertägigen Umwandlungstechnologien (Strom, Wärme, Kälte). Schwerpunktmäßig sollten diejenigen Technologien gefördert und weiterentwickelt werden, die sich auf die Nutzung der Erdwärme in Gebieten mit normalen Temperaturgradienten konzentrieren und nicht auf geothermische Anomalien (Hochenthalpie-Lagerstätten, Vulkangebiete) beschränkt sind. Damit wird diese Technologie weltweit auf viele andere Standorte übertragbar und exportfähig.

Der gerade begonnene Aufbau einer Forschungsstruktur in nationalen und internationalen Netzwerken muss fortgesetzt werden, und Deutschland muss seine führende Rolle in EGS-Technologie festigen. Die Entwicklung in dieser Forschung muss durch nachhaltig finanzierte Projekte verstetigt werden.

Die breite Etablierung der Nutzung geothermischer Energie sowohl im Wärme- (Kälte-) als auch im Strommarkt wird enorme volkswirtschaftliche Effekte haben. Zunächst wird verstärkt krisensichere heimische Energie nachhaltig und umweltfreundlich verfügbar, die teure und unsichere Importe fossiler Energieträger ersetzt. Dabei ist im Energiemarkt eine weitgehende Einstellung des Verbrauchs von Brennstoffen schon mittelfristig denkbar. Der Ausbau der Geothermie führt auch zu positiven Effekten in der Serviceindustrie mit vielen neuen Arbeitsplätzen, und nutzt den Anlagenbetreibern mit planungssicheren Energieangeboten. Die Qualifizierung geothermischer Systemkomponenten macht forschungsnahe Industrie attraktiv für den Export, wie es weltweite Anfragen derzeit schon anzeigen.

## Literatur

Bertani, R., 2010. World Update on Geothermal Electric Power Generation 2005-2009. Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, April 25-30, 2010.

Bloomfield, K.K., J.N. Moore, and R.N. Neilson, 2003. Geothermal energy reduces greenhouse gases. Geothermal Resources Council Bulletin, Vol. 32, No. 2, pp. 77-79. (ISSN 01607782)

Bruhn, T., A. Mandela, F. Vuataz, J. Faulds, I. Moeck, K. Erbas (2010). Exploration methods, In: Geothermal energy systems – Exploration, development and utilization. 1st. edition. E. Huenges (editor). Wiley-VCH, Berlin. 2010, pp. 37-111. (ISBN: 978-3527408313)

P. Fokker (2007) Hydraulic fracturing in the hydrocarbon industry, in C. Baujard & T. Kohl (Hrsg.): Proceedings of the Engine Workshop 3 “Stimulation of Reservoir and Induced Microseismicity”, 29 June – 1 July 2006, Zurich, Switzerland.

Frick, S., G. Schröder, and M. Kaltschmitt, 2010. Life cycle analysis of geothermal binary power plants using enhanced low temperature reservoirs. Energy, Vol. 35, Issue 5, pp. 2281-2294. (ISSN: 0360-5442)

Goldstein, B.A., G. Hiriart, J.W. Tester, R. Bertani, C.J. Bromley, L.C. Gutiérrez-Negrín, E. Huenges, A. Ragnarsson, M.A. Mongillo, H. Muraoka, and V.I. Zui, 2011. Great expectations for geothermal energy to 2100. Submitted to the Stanford Workshop of Geothermal Reservoir Engineering 2011.

Hamza, V.M., R.R. Cardoso, and C.F. Ponte Neto, 2008. Spherical harmonic analysis of earth's conductive heat flow. International Journal of Earth Sciences, Vol. 97, No. 2, pp. 205-226. (DOI: 10.1007/s0).

Huenges, E., 2010. Geothermal energy systems – Exploration, development and utilization. 1st. edition. E. Huenges (editor). Wiley-VCH, Berlin. June, 2010, 486 pp. (ISBN: 978-3527408313).

Schulte, T., G. Zimmermann, F. Vuataz, S. Portier, T. Tischner, R. Junker, R. Jatho, and E. Huenges (2010). Enhancing Geothermal Reservoirs, In: Geothermal energy systems – Exploration, development and utilization. 1st. edition. E. Huenges (editor). Wiley-VCH, Berlin. June, 2010, pp. 173-244. (ISBN: 978-3527408313)

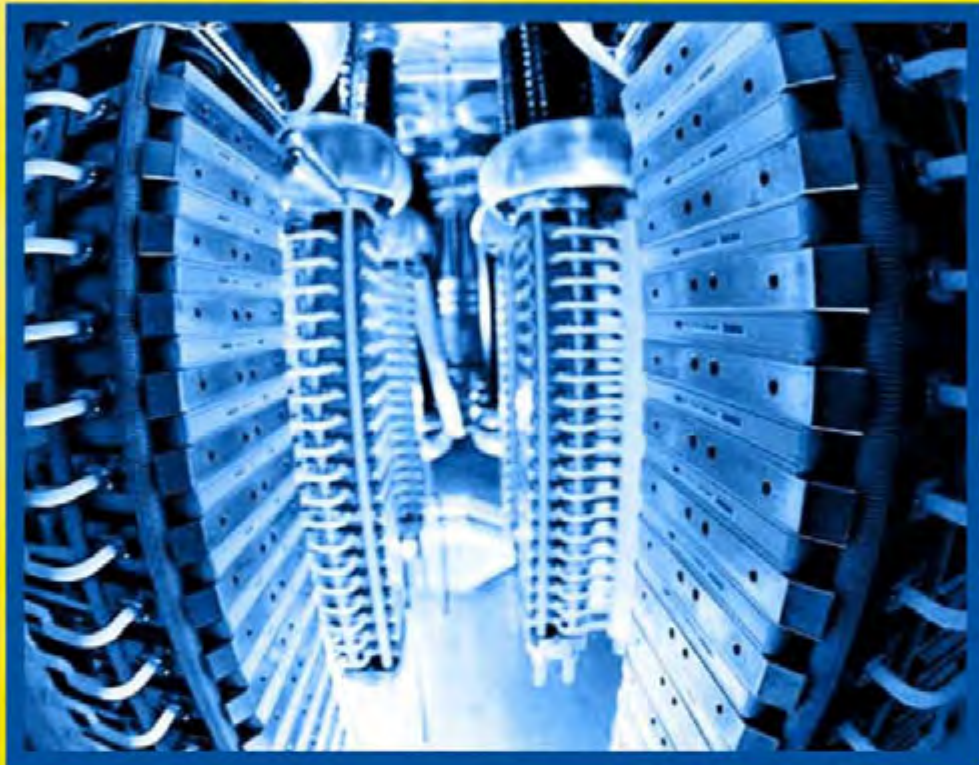
Dr. Ernst Huenges  
International Center for Geothermal Research  
Deutsches GeoForschungsZentrum - GFZ  
D-14473 Potsdam, Germany  
huenges@gfz-potsdam.de



Exzerpt aus Tagungsband des AKE, DPG-Tagung 2010 Bonn

home:

[http://www.uni-saarland.de/fak7/fze/AKE\\_Archiv/DPG2010-AKE\\_Bonn/Links\\_DPG2010.htm](http://www.uni-saarland.de/fak7/fze/AKE_Archiv/DPG2010-AKE_Bonn/Links_DPG2010.htm)



## Energie

Technologien für die Zukunft

Vorträge auf der DPG-Frühjahrstagung in Bonn 2010

Herausgegeben von Hardo Bruhns

# **Energie**

Technologien für die Zukunft

Vorträge auf der DPG-Frühjahrstagung in Bonn 2010

Arbeitskreis Energie in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft

Herausgegeben von Hardo Bruhns

Bad Honnef, April 2011

Frühjahrstagung des Arbeitskreises Energie  
in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft  
Bonn, 15. und 16. März 2010

Hauptvorträge

Inhaltsverzeichnis

Einleitung.....	5
Übersicht über die Fachsitzungen.....	7
Abstracts .....	8
Energieeffizienz in der Informationstechnologie (vorgetragen von W. Gnettner).....	18
ITER, the Decisive Step towards Fusion Energy (vorgetragen von G. Janeschitz) .....	29
The Physics Base for ITER and DEMO (vorgetragen von H. Zohm).....	44
Neue Reaktorenkonzepte für die Kernspaltung, Entwicklungen von AREVA (vorgetragen von W. Dams).....	55
Brennstoffzellen für mobile Anwendungen – Wo stehen wir auf diesem Weg? (vorgetragen von D. Stolten) .....	67
Elektrische Energiespeicher (vorgetragen von M. Rzepka) .....	77
Strom aus solarthermischen Kraftwerken im Sonnengürtel (vorgetragen von R. Pitz-Paal) .....	90
Stromtransport: Erfordernisse und Lösungen für ein europäisches Verbundnetz unter Nutzung solaren Stroms aus Nordafrika (vorgetragen von T. Benz) .....	97
Intelligente Stromnetze - Perspektiven und Potenziale (vorgetragen von F. Schulte) .....	108
Geothermische Stromerzeugung - Vom Reservoir bis zur Turbine (vorgetragen von E. Huenges).....	114
Energie aus Biomasse – Perspektiven für Europa (vorgetragen von D. Thrän).....	126
Thermodynamisch optimiertes Heizen und Kraft-Wärme-Kopplung (vorgetragen von G. Luther).....	137

Der vorliegende Band fasst schriftliche Ausarbeitungen der Hauptvorträge der AKE Tagung des Jahres 2010 in Bonn zusammen. Leider ist es nicht gelungen, von allen Vortragenden Manuskripte zu erhalten. Die Präsentationsfolien aller Hauptvorträge können auf der Webseite des Arbeitskreises über:

<http://www.dpg-physik.de/dpg/organisation/fachlich/ake.html>

(von dort zu dem Archiv des AKE weiterklicken) eingesehen werden. Allen, die zu diesem Sammelband beigetragen haben, sei an dieser Stelle sehr herzlich gedankt.

Düsseldorf, im Dezember 2010

Hardo Bruhns

Direkter Link zum AKE - Archiv:

<http://www.uni-saarland.de/fak7/fze/index.htm>

Direkter Link zum AKE - Archiv, Tagung 2010 -Bonn:

[http://www.uni-saarland.de/fak7/fze/AKE\\_Archiv/DPG2010-AKE\\_Bonn/Links\\_DPG2010.htm](http://www.uni-saarland.de/fak7/fze/AKE_Archiv/DPG2010-AKE_Bonn/Links_DPG2010.htm)