

Geothermie für Grundlaststrom und Wärmeversorgung - internationale Nutzung, Potenzial, technologische Entwicklungen

David Bruhn und Ernst Huenges, International Centre for Geothermal Research / Deutsches GeoForschungszentrum Potsdam

1. Einführung

Die für menschliche Aktivität zugänglichen Tiefen der Erdkruste bieten, neben der Gewinnung von Rohstoffen, auch die Möglichkeit, Wärme sowohl zur direkten Nutzung als auch zur Erzeugung elektrischer Energie zu erschließen. In Form von heißen Bädern als auch zur Beheizung von Gebäuden wird dies auch schon seit Jahrtausenden getan. Heute wird Erdwärme sowohl direkt genutzt als auch gezielt aus der Tiefe gefördert. Dabei wird unterschieden zwischen „flacher“ und „tiefer“ Geothermie. Gemäß der VDI Richtlinie 4640 *Thermische Nutzung des Untergrundes* liegt die Grenze zwischen tiefer und flacher Geothermie bei einer Tiefe von etwa 400m bzw. bei einer Temperatur von 20°C. Von tiefer Geothermie zur Energiegewinnung wird aber meist erst ab Temperaturen von über 60°C, die in Deutschland in Tiefen von mehr als 1 km vorkommen gesprochen.

1.1. Flache Geothermie

Die flache Geothermie wird in Deutschland fast ausschließlich für die stetig wachsende Zahl von Wärmepumpen (oftmals als ground source heat pumps, GSHP, bezeichnet) für Gebäudeheizungen genutzt. Dabei ist die Nutzung von Wärmesonden zu diesem Zweck bis in Tiefe von 99m gestattet und unterliegt dem Wasserrecht, wohingegen Bohrungen ab 100m Tiefe dem Bergrecht unterliegen, weshalb die meisten Sonden für die Wärmepumpennutzung bis max. 99m tief sind. Weltweit erfolgt ca. 50% aller direkten Wärmenutzung in der Geothermie mit Hilfe von Wärmepumpen, ca. 25% wird in Thermalbädern weltweit genutzt. Weitere Nutzungsarten schließen Gewächshäuser, Aquakulturen zur Fischzucht, das Trocknen von Holz oder landwirtschaftlicher Produkte oder die Beheizung von Fahrbahnen, Gehwegen und Brücken im Winter ein. Insgesamt erreichte die installierte Kapazität für die direkte Nutzung weltweit mehr als 51 GW_t (Stand Anfang 2010), was einem Zuwachs von 79% seit 2005 entspricht (Lund et al., 2010). Insgesamt wird in 78 Ländern Erdwärme direkt genutzt, allerdings vorwiegend in den kühleren Klimazonen. So befinden sich in den 5 Ländern mit der stärksten Verbreitung – USA, China, Schweden, Norwegen und Deutschland – 77% aller installierten geothermischen Kapazität im Bereich der direkten Nutzung. Aber auch in Ländern wie der Schweiz, dem Vereinigten Königreich oder Süd-Korea ist ein Boom beim Einbau von Wärmepumpen zu beobachten.

Neben der Nutzung des Untergrunds als Wärmequelle gewinnt auch die Speicherung von Wärme und "Kälte" in Aquiferen (ATES – aquifer thermal energy storage; Aquifer = Grundwasserhorizont) zunehmend an Bedeutung. Ein Beispiel einer solchen Nutzung ist

das Energieversorgungssystem der deutschen Parlamentsbauten im Berliner Spreebogen (Reichstag sowie Abgeordnetenbüros). Hier wird ein Aquiferspeicher in 35 bis 70 m Tiefe zur Gebäudeklimatisierung im Sommer eingesetzt. Aus einem zweiten Aquiferspeicher in 270 bis 300 m Tiefe wird im Winter Wärme zur Gebäudeheizung genutzt, welche zuvor in den Sommermonaten als Überschusswärme aus den bestehenden Blockheizkraftwerken eingespeichert wurde (Kranz et al., 2008).

1.2. Tiefe Geothermie

Im Gegensatz zur flachen geht es bei der tiefen Geothermie nicht nur um die Wärmenutzung, sondern um die Erzeugung elektrischen Stroms oder um die kombinierte Nutzung für Strom und Wärme. Die Erzeugung elektrischen Stroms aus einer Erdwärmebohrung gelang erstmals 1904 in Larderello, südlich von Pisa in Italien, wo die bekannten Thermalwässer vor allem zur Borsäure-Gewinnung gefasst und verwendet wurden. Der erzeugte elektrische Strom wurde dann ab 1913 für diesen Borsäuregewinnungsprozess eingesetzt. Auch heute ist Larderello mit ca. 800 MW installierter Leistung noch der größte Geothermiestandort Europas. In den 1950er Jahren begann dann weltweit die Nutzung von Heißwasserdampf in großen Kraftwerken in Neuseeland, Island und Kalifornien/USA. Heute wird in 25 Ländern weltweit elektrischer Strom mit heißem Wasser aus den Tiefen der Erdkruste erzeugt mit einer installierten Kapazität von 11 GW_e (Stand Ende 2011).

Für die Gewinnung von elektrischer Energie aus der Tiefe müssen zwei grundlegende Bedingungen erfüllt sein: die Temperatur muss ausreichend hoch sein und ein Trägermedium muss die Wärme an die Oberfläche zum Kraftwerk bringen, wo sie in elektrische Energie umgewandelt werden soll. Dieses Trägermedium ist im Falle der tiefen Geothermie Wasser in flüssiger oder in Dampfform. Neben der Temperatur hängt also die Energiemenge vom Volumenstrom des heißen Fluids ab. Um an die Heißwasser- oder Dampfvorkommen zu gelangen, müssen Bohrungen abgeteuft werden, meist mehrere tausend Meter tief.

Der durchschnittliche weltweite Temperaturgradient beträgt 30°C/km. Traditionell werden zur Stromgewinnung solche geothermischen Lagerstätten genutzt, die schon in Tiefen von wenigen Kilometern hohe Temperaturen und viel heißes Wasser in Form von Dampf aufweisen, wo also der Temperaturgradient überdurchschnittlich ist. Dies ist vorwiegend in Gebieten mit vulkanischer Aktivität der Fall. Besonders konzentrieren sich solche Lagerstätten im sogenannten 'ring of fire', dem zirkumpazifischen Vulkanbogen, also an den Westküsten Nord-, Mittel- und Südamerikas sowie in Neuseeland, Indonesien, den Philippinen, Japan und der Kamtschatka-Halbinsel im Osten Russlands. Aber auch in den Vulkanprovinzen Ostafrikas und Europas, - hier vor allem in Italien und Island, aber auch in Griechenland, der Türkei sowie den Vulkaninseln Spaniens und Portugals – oder in der Karibik und Hawaii finden sich solche klassischen Geothermie-Lagerstätten (Abbildung 1). Der heiße Wasserdampf dieser Lagerstätten kann direkt zum Antreiben einer Turbine eingesetzt werden, sofern die Temperatur über 180°C beträgt bei einem Druck von ca. 4 bar, das sogenannte „dry steam“ Verfahren. Liegt das Heiße Wasser als „wet steam“ vor, also mit einem Teil des Wassers in flüssiger Form, wird durch Absenken des Drucks der

flüssige Teil des Wassers gasförmig. Dieses Verfahren wird als „flash steam“ bezeichnet und kommt weltweit am häufigsten vor. Beide Verfahren, das dry steam als auch das flash steam Verfahren sind etablierte Methoden der Energiegewinnung und werden daher oft als 'conventional geothermal' bezeichnet.

Diesen konventionellen stehen die 'unkonventionellen' Verfahren gegenüber, deren Verbreitung sich entweder noch überwiegend auf Demonstrationsanlagen beschränkt oder deren Machbarkeit erst gezeigt werden muss. Unkonventionell können die Lagerstätten in verschiedener Hinsicht sein: entweder die Temperaturen sind zu niedrig für die Stromerzeugung im konventionellen Verfahren, das heißt heißes Wasser liegt in flüssiger Form bei $<180^{\circ}\text{C}$ vor. Das andere Extrem sind Vorkommen von Wasser im Druck- und Temperaturbereich über dem kritischen Punkt, was meist als „superkritisches“ Wasser bezeichnet wird. Ein dritter Fall tritt ein, wenn die Temperaturen zwar eine energetische Nutzung erlauben würden, der Volumenstrom des Wassers aber zu gering ist, so dass durch ingenieurtechnische Maßnahmen die Wegsamkeiten im Gestein verbessert werden müssen, um Fließraten in ausreichender Menge zu garantieren. In letzterem Fall spricht man von „enhanced geothermal systems“ (EGS).

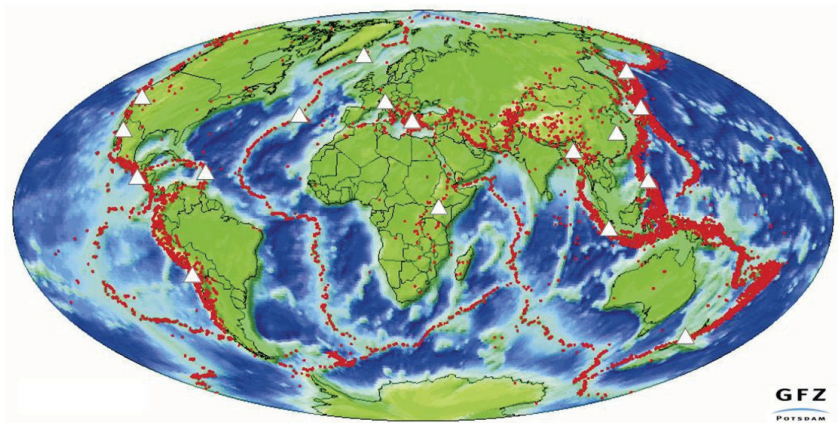


Abbildung 1: Weltkarte mit Regionen erhöhter Seismizität (rote Punkte) und Vulkanismus. Standorte mit größeren Geothermiekraftwerken sind durch weiße Dreiecke gekennzeichnet.

2. Entwicklungen

2.1 Niedertemperaturkraftwerke

Während die Stromerzeugung aus geothermischen Hochenthalpie- bzw. Hochtemperaturlagerstätten auf eine langjährige Erfahrung zurückblicken kann, hat die Nutzung

von Niedertemperaturlagerstätten zur Strombereitstellung erst in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen. Mit dieser Technologie kann nämlich der Großteil des weltweit bestehenden geothermischen Potenzials zur Stromerzeugung genutzt werden. In Deutschland werden für die Stromerzeugung Thermalwassertemperaturen von $>100^{\circ}\text{C}$ benötigt. In Abhängigkeit der Umgebungsbedingung kann aber auch bei niedrigeren Temperaturen Strom erzeugt werden. Der Rekord bei der Niedertemperaturstromerzeugung liegt bei 57°C für das geothermische Kraftwerk in Chena Hot Springs in Alaska, bedingt durch die sehr geringen Umgebungstemperaturen.

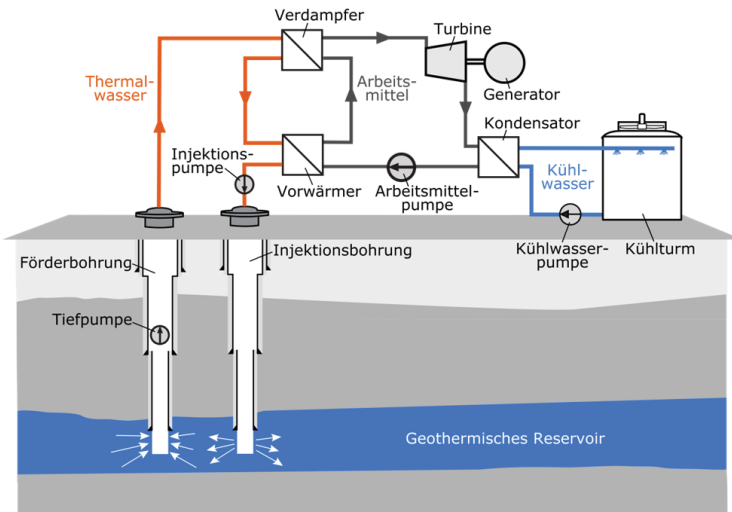


Abbildung 2: Prinzip eines geothermischen Niedertemperaturkraftwerks. Heißes Thermalwasser wird gefördert und zur Wärmeabgabe an ein binäres Arbeitsmittel genutzt. Dieses verdampft und treibt eine Turbine an. Das Arbeitsmittel wird im Kondensator kondensiert und das abgekühlte Thermalwasser wieder in den Untergrund verpresst (Quelle: GFZ).

Bei niedrigen Reservoirtemperaturen ($< 200^{\circ}\text{C}$) wird die Wärme des Thermalwassers aus thermodynamischen Gründen an ein binäres Arbeitsmittel übertragen, welches bereits bei niedrigen Drücken und Temperaturen siedet. Das Arbeitsmittel wird verdampft und ein Teil der zugeführten Energie kann in einer Expansionsmaschine zur Wandlung in mechanische Energie genutzt werden. Durch die Kondensation des Arbeitsmittels nach der Turbine wird ein geschlossener Konversionskreislauf realisiert (Abbildung 2). Am häufigsten werden organische Fluide als Arbeitsmittel genutzt und sog. ORC (Organic Rankine Cycle)-Anlagen realisiert. Es kommen aber auch fluorierte Arbeitsmittel und Arbeitsmittelgemische (z.B. Ammoniak-Wasser-Gemische in sog. Kalina-Anlagen) zum Einsatz. (Saadat et al. 2010) Das abgekühlte Thermalwasser kann nun entweder wieder in den Untergrund verpresst oder weiter verwendet werden, z.B. zur Nahwärmeversorgung.

Ein Beispiel einer solchen Nutzung sowohl zur Stromerzeugung als auch zur Wärmebereitstellung ist in Deutschland im südlichen Oberbayern zu finden. Die Gemeinde Unterhaching bei München nutzt seit 2007 125°C heißes Thermalwasser aus 3500 m Tiefe im Winter für die direkte Wärmeversorgung. Im Sommer wird die überschüssige Wärme zusätzlich zur Wandlung in elektrischen Strom verwendet. So kann eine kontinuierliche Auslastung der geothermischen Ressource erreicht werden. Diesem Beispiel folgen viele Gemeinden der Region, auch in der Schweiz (St. Gallen) und anderen Regionen der Welt werden Anlagen geplant und gebaut.

Obwohl Niedertemperaturkraftwerke auf einer etablierten Technik basieren, zeigt sich aus den Erfahrungen bestehender geothermischer Kraftwerke, dass bei der Auslegung und beim Betrieb noch verschiedene Herausforderungen und Optimierungspotenziale bestehen. Spezielle geothermische Anforderungen an die Technik bestehen unter anderem durch die Wärmequelle Thermalwasser, das für die Stromerzeugung sehr niedrige Temperaturniveau, und z.T. auch durch die kombinierte Nutzung des Thermalwassers zur Strom- und Wärmebereitstellung.

Bei der Auswahl von Kraftwerkskomponenten spielen neben Kosten vor allem Effizienzkriterien und Zuverlässigkeit im Betrieb eine entscheidende Rolle. Die Beurteilung dieser Kriterien ist im Vorfeld allerdings nicht immer möglich, da z.T. nur geringe oder keine Betriebserfahrungen für die in geothermischen Anlagen relevanten Drücke, Temperaturen, Volumenströme und Medien vorliegen. Dies ist z.B. der Fall bei Wärmeübertragern, die mit Thermalwasser und/oder bestimmten Arbeitsfluiden beaufschlagt werden, und damit die chemische Zusammensetzung und die thermophysikalischen Eigenschaften von typischen Anwendungsfällen abweichen. Zudem ist die Beurteilung der Effizienz einer einzelnen Komponente im Hinblick auf das Gesamtsystem nicht immer eindeutig, insbesondere weil geothermische Anlagen aufgrund des natürlichen Reservoirverhaltens und veränderlicher Umgebungsbedingungen oftmals außerhalb des Auslegungspunkts betrieben werden. Neben der Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit einzelner Komponenten stellen der Planungsprozess und die Fahrweise der Gesamtanlage weitere wichtige Optimierungspotenziale dar.

Entwicklungen in der Kraftwerkstechnologie zielen daher generell auf Effizienzsteigerungen und Erhöhung der Zuverlässigkeit des Gesamtsystems sowie eine verbesserte Planbarkeit geothermischer Anlagen.

2.2 Enhanced geothermal systems

Die Entwicklung von 'enhanced geothermal systems' (EGS) ist theoretisch fast überall möglich, wo geringe Volumenströme des Thermalwassers eine energetische Nutzung ökonomisch unrentabel machen. Damit kann Geothermie unabhängig vom optimalen Standort in vulkanisch aktiven Regionen genutzt werden. Für die Verbesserung der Fließraten werden Stimulationsverfahren eingesetzt, die teilweise in der Kohlenwasserstoffindustrie entwickelt wurden (Schulte et al., 2010). In karbonatischen (= kalkhaltigen) Gesteinen kann durch gezielte Injektion von angesäuertem Wasser Gestein gelöst und damit vorhandene Klüfte erweitert werden. Die Injektion von kaltem Wasser kann durch thermischen Schock auch zur Bildung neuer Mikrorisse eingesetzt werden. Die

Wirksamkeit dieses Verfahrens ist besonders in sehr heißen Reservoiren hoch und wird daher bevorzugt in Ländern wie Island eingesetzt.

Am weitesten verbreitet ist das Verfahren der hydraulischen Stimulation, bei der große Mengen an Wasser unter hohem Druck ins Reservoir injiziert werden, was zu einer Öffnung und Erweiterung vorhandener Risse führt. Ursprünglich ging man davon aus, trockenes, heißes Gestein im Untergrund mit diesem Verfahren durchlässig für Wasser zu machen, um es dann als Wärmetauscher benutzen zu können, daher die Bezeichnung „hot dry rock“ Verfahren. Es wurde weltweit erstmals am Los Alamos National Laboratory in den USA für die Geothermie in einem Projekt in Fenton Hill, New Mexico, entwickelt und später auch in anderen Ländern versucht, z.B. in Großbritannien (Rosemanowes) und in Japan, wo die bis heute heißeste Bohrung, WD-1A in Kakonda, in einen Granit mit über 500 C abgeteuft wurde. Obwohl die prinzipielle Machbarkeit dieses Ansatzes gezeigt werden konnte, wurde keines dieser Projekte damals weiter verfolgt.

Der heutige Ansatz unterscheidet sich von den ursprünglichen Projekten insofern, als man vorhandene Wasservorkommen erschließt und für die Nutzung verbessert, daher die Bezeichnung „enhanced geothermal systems“ (EGS). Das weltweit erste dieser Systeme, das vollständig von der Erkundung bis zur Energiebereitstellung entwickelt wurde, ist das Europäische Testprojekt in Soultz-sous-Forêts im Elsass. Dort wurde in einem Granit in ca. 5 km Tiefe das Rissnetzwerk systematisch erweitert und ein Kraftwerk errichtet. In Deutschland wurden die Standorte Landau in der Pfalz (in der Nähe von Soultz) und der Forschungsstandort Groß Schönebeck nördlich von Berlin nach diesem Verfahren erschlossen (Huenges, 2011). Weltweit finden Aktivitäten statt, mit Hilfe von EGS das enorme Potenzial der Geothermie auch an Standorten ohne Vulkanismus nutzbar zu machen. Besonders in Australien und in den USA, wo entsprechende nationale Förderprogramme aufgelegt wurden, wird hier das weitgehend in Europa entwickelte know-how nun eingesetzt.

Eines der Probleme, die bei der Injektion von Fluiden in den tiefen Untergrund auftreten können, sind damit einhergehende Erschütterungen, auch als „induzierte Seismizität“ bezeichnet. Diese Erschütterungen sind meist unterhalb der Wahrnehmungsgrenze und treten bei vielen Rohstofferschließungen auf. So sind z.B. der Norden der Niederlande und auch Teile Norddeutschlands schon mehrfach durch Erdgasförderung erschüttert worden, auch der Kohlebergbau oder Staudämme können zu induzierter Seismizität führen. In der Geothermie haben zwei Vorfälle in Europa für Schlagzeilen gesorgt. In Basel wurde durch Stimulationsmaßnahmen Ende 2006 ein Beben der Magnitude 3.4 ausgelöst, was letztendlich zum Verlust der öffentlichen Akzeptanz und zum Ende des Projekts führte. In Landau hat 2009 ein Beben der Magnitude 2.7 zu Verunsicherungen geführt und zu entsprechenden Auflagen, die Re-Injektion des Fluids nur noch mit geringerem Druck zu gestatten.

2.3 Nutzung von superkritischem Wasser

Geothermische Reservoire, besonders in den Regionen mit hohem Temperaturgradienten, können Wasser im Zustand über dem kritischen Punkt enthalten. Solche Vorkommen wurden zwar schon erbohrt, zu einer energetischen Nutzung ist es bisher allerdings nicht gekommen. In einem Vergleich zwischen konventionellen und

superkritischen Vorkommen zeigen Albertsson et al. (2010), dass aus einem Bohrloch die 10fache Energiemenge gefördert werden könnte bei gleichem Volumenstrom, wenn man die superkritischen Wässer nutzbar machen könnte (Tabelle 1).

	conventional	IDDP
Dry steam	235°C	430°- 550°C
Druck	30 bar	230 – 260 bar
Volumenstrom	0,67 m ³ /h	0,67 m ³ /h
Leistung	5 MW _e	50 MW _e

***Tabelle1:** Vergleich konventioneller und superkritischer Reservoirs bei gleichem Volumenstrom*

Seit 2000 laufen daher Bestrebungen, ein solches Reservoir in Island zu erbohren, zu erforschen und zu erschließen. Im Iceland Deep Drilling Project (IDDP) schlossen sich Industrie und Forschung zusammen, um in ein bekanntes Reservoir im Norden Islands, Krafla, was bereits zur Stromerzeugung genutzt wird, bis in den darunter liegenden Vulkan zu bohren.

Zwischen 4 und 5 km Tiefe wurde aufgrund vorliegender geophysikalischer Daten die Magmakammer des Vulkans erwartet, unmittelbar darüber sollten die Bedingungen für ein 'superkritisches Reservoir' gegeben sein (Abb 3). Im Verlauf der Bohrarbeiten, die 2008 begannen, blieb der Bohrmeißel in ca. 2100m Tiefe stecken, weil die Bohrung bereits Magma erreicht hatte bei einer Temperatur >900°C, so dass Anfang 2009 die Arbeiten eingestellt werden mussten (Friðleifsson et al., 2010). Im während der Bohrarbeiten stark gekühlten Bohrloch steigt die Temperatur seither wieder an. Seit Anfang 2010 werden immer wieder sogenannte ‚flow tests‘ durchgeführt, bei denen Fluid aus der Bohrung gefördert wird. Im August 2011 erreichte die Temperatur des geförderten Fluids 410°C bei 40 bar. Die Schlüsselfrage bei der Nutzung dieser Art von Fluid ist, ob sie in einem Kreislauf kontrollierbar ist oder ob hierzu noch nicht vorhandene Technologieentwicklungen notwendig sind.

Für eine neue Tiefbohrung in Island läuft die Suche nach einem Alternativstandort, 2013/14 soll ein neuer Anlauf genommen werden. Ähnliche Vorbereitungen laufen in Neuseeland. Auch in Japan werden aufgrund der Neuausrichtung der Energiepolitik neue Pläne zur Erschließung der im Land weit verbreiteten geothermischen Ressourcen entwickelt, die auch Reservoirs mit potenziell superkritischem Wasser einschließen.

Für die Erschließung solcher Wässer im Temperatur- und Druckbereich über dem kritischen Punkt müssen einige technische Herausforderungen gemeistert werden. Nicht nur ist die Lokalisierung solcher Vorkommen nicht einfach, auch gibt es so gut wie keine Messtechnik, die in diesem Temperaturbereich zuverlässig Informationen aus einem

Bohrloch wiedergeben könnte. Zudem ist Wasser in diesem Bereich, vor allem wenn es stark mineralisiert ist und einen relativ niedrigen pH-Wert aufweist, ein aggressives Medium, welches hohe Anforderungen an die verwendeten Materialien stellt (siehe Berichte auf der IDDP website - <http://iddp.is>).

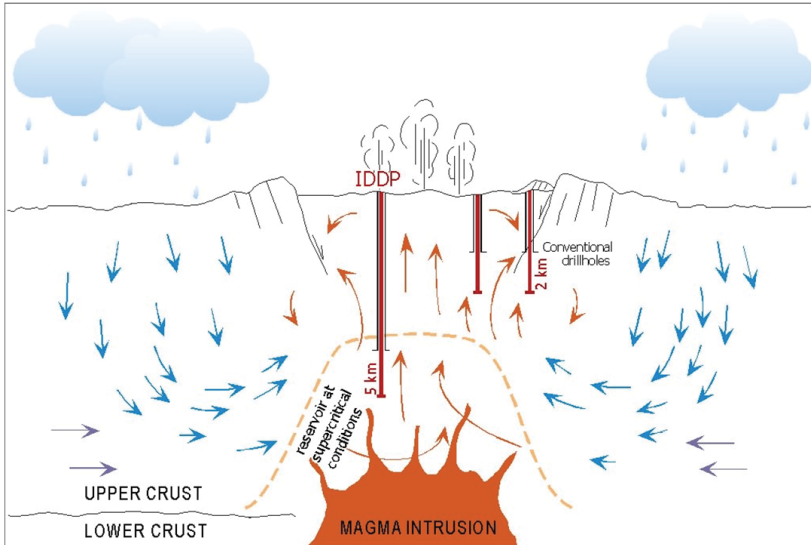


Abbildung 3: Schematischer Querschnitt durch die vulkanische Geothermielagerstätte in Krafla/Island mit ursprünglich geplanter IDDP Bohrung. Gestrichelte Linie zeigt Bereich mit potenziell überkritischem Wasser (aus: Elders & Friðleifsson, 2010).

2.4 Zero-emission/total re-injection

Bei Binär-Kraftwerken wird grundsätzlich alles gefördert Thermalwasser wieder in den Untergrund verpresst, so dass keine Emissionen entstehen. Bei Hochtemperatur-Anlagen jedoch entweicht ein Teil des Dampfes nach der Nutzung in die Luft. Auch wenn diese „konventionellen“ Geothermiekraftwerke im Vergleich zu fossilen Energieträgern nur geringe Emissionen verschiedenster Gase verursachen, ist eine komplette Vermeidung von Abgasen aus der Bohrung für zukünftige Entwicklungen aus mehreren Gründen wichtig: die öffentliche Akzeptanz ist bei Kraftwerkneubauten grundsätzlich leichter zu erreichen, je geringer der Einfluss auf die Umwelt ist, besonders wenn die Emissionen auch mit einer Geruchsentwicklung verbunden sind, wie dies bei einigen älteren Anlagen der Fall war. Aber nicht nur für die ökologische sondern auch für die ökonomische Nachhaltigkeit des

Betriebs kann die vollständige Re-Injektion von Bedeutung sein, weil dadurch der Reservoir-Druck besser aufrecht erhalten bleiben kann.

Diese Entwicklung wird bereits diskutiert, bisher werden solche Anlagen aber noch nicht gebaut. Für die Entwicklung müssen einige grundlegende Fragen geklärt werden. Insbesondere müssen nicht kondensierbare Gase vom Dampf getrennt werden um später mit dem kondensierten Wasser wieder re-injiziert zu werden. Die Injektion des Wasser-Gasgemischs ist sowohl für das Bohrloch als auch für das Reservoir eine Herausforderung, die bisher noch nicht verstanden und daher untersucht werden muss. Im Bohrloch sind die Anforderungen an die Materialien für die Verrohrung zu prüfen und der Wasser-Gas-Chemie anzupassen um Korrosion und/oder unerwünschte Ausfällungen zu vermeiden. Aber auch für die Pumpen, mit denen das Fluid in das Bohrloch verpresst werden soll, ist ein Wasser-Gasgemisch problematisch. Lösungen, das Gas zusammen mit dem Wasser wieder in den Untergrund zu bringen, müssen noch entwickelt werden. Aber auch die Langzeit-Reaktionen im Reservoir müssen untersucht werden, weil die Fluid-Gesteinswechselswirkung durch ein verändertes Fluid beeinflusst werden.

Das Thema ist zwar bisher noch nicht Gegenstand laufender Projekte, wird aber bereits bei Projektentwicklern diskutiert. Im Forschungsbereich wurden bereits erste Vorschläge zu Untersuchungen gemacht, besonders im Bereich der Materialentwicklung.

3. Ausblick

Durch die weltweiten Bestrebungen, den CO₂ Ausstoß zu reduzieren und die negativen Auswirkungen des Klimawandels gering zu halten erfährt die Entwicklung der Geothermie, wie auch die anderer erneuerbarer Energieformen gegenwärtig einen Schub, der auf breiter Ebene die Nutzung dieser nahezu überall rund um die Uhr zur Verfügung stehenden Ressource zum Ziel hat. Aufgrund ihrer Grundlastfähigkeit kann die Geothermie im Konzert der klimafreundlichen Energiequellen in der Tat einen wichtigen Part spielen, selbst wenn die Gesamtleistung weltweit installierter Kraftwerke geringer sein wird als die anderer Energiequellen. Momentan trägt sie nur in wenigen Ländern signifikant zur Energieversorgung bei. Das kann sich jedoch ändern, wenn ein nachhaltiger Durchbruch bei EGS gelingt, der die Abhängigkeit von geothermischen Idealbedingungen reduziert. Bestrebungen in vielen Ländern der Welt gehen in diese Richtung. Entscheidend wird neben wissenschaftlich-technischem Fortschritt sein, ob die Nebenwirkungen der induzierten Seismizität in Zukunft kontrolliert werden können und ob es gelingt, stimulierte Rissnetzwerke im Gestein nachhaltig offen und produktiv zu halten. Die öffentliche Akzeptanz neuer Kraftwerke wird auch entschieden von deren subjektiv wahrgenommener Umweltfreundlichkeit sein. Daher können in Zukunft „Zero-emission“ Anlagen zur Bedingung für neue Kraftwerke werden.

Neben der Entwicklung in die Breite, die durch EGS ermöglicht wird, wird sich auch die Kapazität einzelner Kraftwerke an den Hochenthalpie-Standorten mit vulkanischen Geothermie-Lagerstätten vervielfachen, wenn die superkritischen Fluide genutzt werden können. Die weltweiten Aktivitäten, an denen auch verschiedene Energieversorger und andere Unternehmen beteiligt sind, lassen den optimistischen Schluss zu, dass auch diese Ressourcen in Zukunft genutzt werden und damit in der Lage sind, große, mit fossilen Kraftstoffen betriebene Kraftwerke zu ersetzen.

4. Literatur

- Albertsson A., Bjarnason J.O., Gunnarsson T., Ballzus C., and Ingason K., (2003) Part III: Fluid handling and evaluation. In: G.O. Friðleifsson (Ed.), Iceland Deep Drilling Project, Feasibility Report, Part 3, 33 pp. Orkustofnun Report OS-2003-007.
- Elders, W.A. and Friðleifsson, G.Ó. (2010) The Science Program of the Iceland Deep Drilling Project (IDDP): a Study of Supercritical Geothermal Resources. *Proceedings World Geothermal Congress 2010*, Bali, Indonesia, 25-29 April 2010, paper no. 3903
- Friðleifsson G.Ó., Pálsson B., Stefánsson B., Albertsson A., Gunnlaugsson E., Ketilsson J., Lamarche R., and Andersen P. E. (2010) Iceland Deep Drilling Project. The first IDDP Drill Hole Drilled and Completed in 2009. *Proceedings World Geothermal Congress 2010*, Bali, Indonesia, 25-29 April 2010, paper no. 3902
- Huenges, E. (2011) Geothermische Stromerzeugung - Vom Reservoir bis zur Turbine. Exzerpt aus Tagungsband des AKE, DPG-Tagung 2010 Bonn, pp. 114-125. http://www.uni-saarland.de/fak7/fze/AKE_Archiv/DPG2010-AKE_Bonn/Links_DPG2010.htm
- Kranz, S.; Bartels, J.; Gehrke, D.; Hoffmann, F.; Wolfgramm, M. (2008): Wärme- und Kältespeicherung in Aquiferen. *bbr - Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau*, 59, 7/8, 34-43.
- Saadat A., Frick S., Kranz S., Regenspurg S. (2010) Energetic use of EGS reservoirs, In: *Geothermal energy systems – Exploration, development and utilization*. 1st edition. E. Huenges (editor). Wiley-VCH, Berlin. June, 2010, pp. 303-372 (ISBN: 978-3527408313)
- Lund J.W., Freeston D.H., and Boyd T.L. (2010) Direct Utilization of Geothermal Energy 2010 Worldwide Review. *Proceedings World Geothermal Congress 2010*, Bali, Indonesia, 25-29 April 2010, paper no. 0007
- Schulte T., Zimmermann G., Vuataz F., Portier S., Tischner T., Junker R., Jatho R., and Huenges E. (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. David Bruhn
International Center for Geothermal Research
Deutsches GeoForschungsZentrum - GFZ
D-14473 Potsdam, Germany
huenges@gfz-potsdam.de

Deutsche Physikalische Gesellschaft Φ DPG

Arbeitskreis Energie



Energie

Perspektiven und Technologien

Vorträge auf der DPG-Frühjahrstagung in Dresden 2011

Herausgegeben von Hardo Bruhns

Energie

Perspektiven und Technologien

Vorträge auf der DPG-Frühjahrstagung in Dresden 2011

Arbeitskreis Energie in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft

Herausgegeben von Hardo Bruhns

Bad Honnef, April 2012

Frühjahrstagung des Arbeitskreises Energie
in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft
Dresden, 13. bis 16. März 2011

Hauptvorträge

Inhaltsverzeichnis

Einleitung.....	7
Übersicht über die Fachsitzungen.....	8
Abstracts aller Vorträge.....	9
Electrolytes in lithium-ion batteries: state of the art and future trend (presented by A. Balducci).....	27
Das Energiekonzept der Bundesregierung und andere Optionen für die Energiezukunft Deutschlands (vorgetragen von M. Popp).....	37
Vergleichende Bewertung von Stromerzeugungssystemen (vorgetragen von R. Friedrich).....	47
Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen - internationaler Stand und Perspektiven (vorgetragen von H. Geckeis).....	64
Nuclear Waste Transmutation: Status and Perspectives for Accelerator Driven Systems (ADS) in Europe (presented by A. C. Mueller).....	81
Der Stellarator - Ein alternatives Einschlusskonzept für ein Fusionskraftwerk (vorgetragen von R. Wolf).....	97
Production and conversion of liquid fuels and hydrogen from biomass and natural gas using microreactor technology (presented by P. Pfeifer).....	105
Physik der Windparkoptimierung (vorgetragen von S. Emeis).....	120

Geothermie für Grundlaststrom und Wärmeversorgung - internationale Nutzung, Potenzial, technologische Entwicklungen (vorgetragen von D. Bruhn).....	130
Einsatz großer Wärmepumpen im Industrie- und Gewerbebau (vorgetragen von R. Grimm)	140
Anforderungen an einen Wärmepumpentarif zur Überwindung diskriminierender Steuern und Abgaben beim thermodynamisch optimierten Heizen (vorgetragen von G. Luther).....	151
Clean Power from Deserts (presented by M. Düren).....	164
Hochkonzentrierende Photovoltaik: Stand der Entwicklungen und Perspektiven (vorgetragen von A. Bett)	182
Das Aufwindkraftwerk – Funktionsweise und aktueller Stand (vorgetragen von G. Weinrebe)	200

Direkter Link zum AKE - Archiv:

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

Direkter Link zum AKE - Archiv, Tagung 2011 -Dresden:

http://www.uni-saarland.de/fak7/fze/AKE_Archiv/DPG2011-AKE_Dresden/Links_DPG2011.htm

Der vorliegende Band fasst schriftliche Ausarbeitungen der Hauptvorträge der AKE Tagung des Jahres 2011 in Dresden zusammen. Leider ist es nicht gelungen, von allen Vortragenden Manuskripte zu erhalten. Die Präsentationsfolien der Hauptvorträge können auf der Webseite des Arbeitskreises über:

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

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