

16. Geothermie

◦Geothermische Energie entsteht aus zwei Quellen: aus radioaktivem Zerfall in der Erdkruste und durch Wärme des Erdkerns, die durch dessen Mantel leckt. Die Hitze im Kern ist da, weil die Erde früher rotglühend war und sich immer noch in einem Prozess der Abkühlung und Aushärtung befindet. Die Wärme im Erdkern wird zudem noch durch Gezeitenreibung erhöht: Die Erde verformt sich als Antwort auf die Gravitationskräfte von Mond und Sonne, ähnlich wie eine Orange, wenn Sie sie drücken und zwischen den Händen rollen.

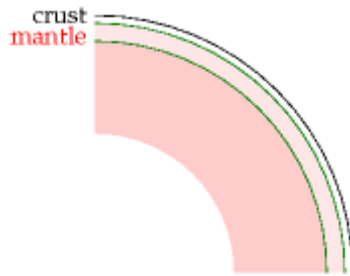


Fig.16.1: ein Ausschnitt der Erde



Fig.16.2: etwas Granit

Geothermie ist eine attraktive Erneuerbare Energie, weil sie „immer an“ ist, unabhängig vom Wetter. Geothermiekraftwerke können wir an- und ausschalten, wie es die Nachfrage erfordert.

Doch wie viel geothermische Leistung ist möglich? Wir können diese für zwei Fälle abschätzen: die verfügbare Leistung an einem gewöhnlichen Ort der Erdkruste, oder die verfügbare Leistung an besonderen heißen Stellen, wie Island (Fig.16.3). Wenn auch der richtige Ort für erste Entwicklungen der Geothermie sicherlich eine solche besonders heiße Stelle sein wird, werde ich dennoch annehmen, die größere Gesamt-Ressource komme von gewöhnlichen Orten, da diese weitaus häufiger sind.

Die Schwierigkeit, nachhaltig geothermische Leistung zu erzeugen, liegt in der begrenzten Geschwindigkeit, mit der Wärme durch festes Gestein fließt. Diese begrenzt die Rate, mit der nachhaltig Wärme aus dem rotglühenden Erdinneren gezogen werden kann. Es ist als würde man versuchen, ein Crunch-Eis-Getränk mit einem Strohhalm zu trinken: Sie stecken den Strohhalm hinein und saugen und bekommen einen schönen Schluck erfrischender Flüssigkeit. Doch nach etwas längerem Saugen, saugen sie plötzlich Luft. Sie haben die Flüssigkeit um ihre Strohhalmspitze herum abgesaugt. Ihre anfängliche Saugrate war nicht aufrechtzuerhalten, nicht nachhaltig.

Wenn Sie einen 15-km Strohhalm in die Erde stecken, werden Sie es dort schön warm finden, leicht warm genug um Wasser zu kochen. Sie können jetzt zwei Strohhalme nehmen, kaltes Wasser durch den einen hinunterpumpen und mit dem anderen saugen. Sie werden Wasserdampf saugen, und können damit ein Kraftwerk betreiben. Unbegrenzte Leistung? Nein. Nach einiger Zeit wird das Herausaugen von Wärme die Temperatur des Felses reduzieren. Sie haben nicht aufrechterhaltbar, nicht nachhaltig gesaugt. Sie müssen jetzt eine lange Zeit warten, bis der Fels an der Strohhalmspitze sich wieder erwärmt hat. Eine mögliche Lösung dieses Problems ist es, geothermische Energie in derselben Weise zu nutzen wie fossile Lagerstätten: als abbaubare Ressource, statt als nachhaltige Quelle. Doch wahrscheinlich wäre das nur ein Zwischenstopp, der

uns weitere hundert Jahre nicht-nachhaltiges Leben ermöglicht. In diesem Buch bin ich, wie der Titel vermuten lässt, an nachhaltigen Energiequellen interessiert. Rechnen wir also nach.



Fig.16.3: Geothermie in Island. Die Mittlere geothermische Energieproduktion in Island (Bevölkerung: 300.000) war 2006 bei 300 MW (24 kWh/d/p). Mehr als die Hälfte der isländischen Elektrizität wird für Aluminiumproduktion verwendet. Foto von Gretar Ivarsson.

Geothermie auf nachhaltiger Basis – für ewig aufrechtzuerhalten

Wir wollen also Geothermie nutzen, indem wir Strohhalm bis zu einer angemessenen Tiefe in die Erde stecken und *moderat* saugen. Saugen mit einer Rate, dass der Fels am Ende unseres Strohhalms nicht kälter und kälter wird. Das heißt saugen mit einer Rate, die dem natürlichen Wärmefluss der Erde entspricht.

Wie eingangs dargestellt, entsteht Geothermie aus zwei Quellen: aus radioaktivem Zerfall in der Erdkruste und durch die Wärme des Erdkerns, die durch dessen Mantel leckt. In einem typischen Kontinent ist der Wärmestrom vom Mantel zur Kruste um die 10 mW/m². Der Wärmestrom an der Oberfläche liegt bei 50 mW/m². Der radioaktive Zerfall hat also zusätzliche 40 mW/m² beigetragen.

An einer typischen Stelle können wir also maximal 50 mW/m² erhalten. Doch diese Leistung ist keine hochstufige Energie, es ist niederstufige Wärme, die durchsickert bei der gegebenen Umgebungstemperatur. Wir wollen wahrscheinlich aber Strom erzeugen, und deswegen müssen wir bohren. Wärme ist nur dann nutzbar, wenn sie mit nennenswert höherer Temperatur als die der Umgebung zur Verfügung steht. Die Temperatur steigt mit der Tiefe, wie in Fig.16.4 dargestellt, bis 500°C bei 40 km. Zwischen 0 km Tiefe, wo der Wärmefluss am größten aber die Temperatur niedrig ist, und 40 km Tiefe, wo der Fels am heißesten ist aber der Wärmefluss 5 mal kleiner (weil uns dort der Anteil aus der Radioaktivität der Kruste fehlt), liegt ein Optimum, bei dem wir saugen sollten. Die exakte Optimaltiefe hängt von der Art des Saugens ab und der Energieanlage, die wir benutzen. Wir können eine Grenze abschätzen für die maximale nachhaltig erzeugbare Leistung. Dazu suchen wir die optimale Tiefe unter der Annahme, wir hätten a) eine perfekte Maschine zur Umwandlung der Wärme in Elektrizität und könnten b) kostenlos in jede beliebige Tiefe bohren.

Für ein Temperaturprofil wie in Fig.16.4 errechne ich als optimale Tiefe 15 km. Eine ideale Wärmemaschine würde dann 17 mW/m² liefern. Bei der weltweiten Bevölkerungsdichte von 43 Menschen pro km² sind das 10 kWh pro Tag pro Person, wenn *alle*

Landflächen genutzt wären. In Deutschland, wo die Bevölkerungsdichte 5 mal größer ist, wären das maximal **2 kWh/d pro Person**.

Das ist ein ewig aufrechterhaltbares Szenario, unter Vernachlässigung von Hot Spots, mit der Annahme von perfekten Kraftwerken, wenn jeder Quadratmeter des Kontinents ausgebeutet würde und die Bohrkosten vernachlässigbar sind. Und dass es möglich ist, 15 km tiefe Löcher zu bohren.

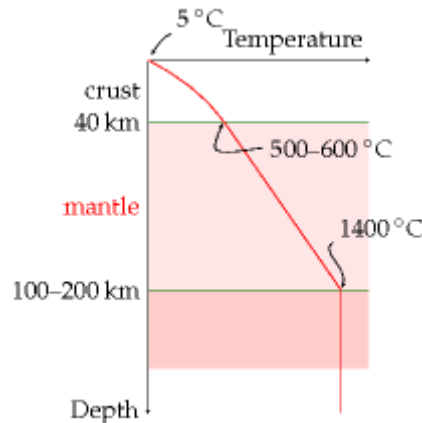


Fig.16.4: Temperaturprofil in einem typischen Kontinent

Geothermische Leistung als Abbauprodukt

♦Eine andere geothermische Strategie baut die Hitze als Ressource ab. Betrachten wir das thermische Potential bis in eine Tiefe von 7 km, was etwa der derzeit technisch erreichbaren Bohrgrenze entspricht. Wie viel Energie ist in den 7 km Gestein unter jedem Quadratmeter Deutschlands gespeichert? Wenn man – theoretisch – diesen gesamten Quader von 1m x 1m x 7km auf Oberflächentemperatur abkühlte, würde dadurch Energie im Umfang von 360.000 kWh pro Quadratmeter Oberfläche frei, bezogen auf ganz Deutschland sind das 1.500.000.000 kWh pro Person. Würde man diese Energieressource gleichmäßig und moderat innerhalb von 1000 Jahren abbauen, wäre das eine Leistung von über 4000 kWh/d pro Person.

Geothermie in England

◦Welche Ressourcen an heißem trockenem Fels hat nun England? Leider ist England nicht besonders gesegnet damit. Die meisten Vorkommen konzentrieren sich auf Cornwall, wo in einer Forschungsanlage bei Rosemanowes, die mittlerweile geschlossen ist, bereits 1985 geothermische Experimente durchgeführt wurden. Berater, die diese Experimente begleiteten, konstatierten, dass „Erzeugung von elektrischer Leistung aus heißem trockenem Fels kurz oder mittelfristig wohl technisch und kommerziell nicht durchführbar wäre, sowohl in Cornwall als auch anderswo in England.“ Dennoch, welche Ressourcen sind vorhanden? Das größte Vorkommen von heißem trockenem Fels enthält eine Gesamtenergie von 130.000 TWh und könnte nach Expertenmeinung einen realistischen Beitrag von 1,1 kWh/d/p an Elektrizität über 800 Jahre leisten.

Das „Southampton Geothermal District Heating Scheme“ war, wenigstens im Jahr 2004, das einzige geothermische Heizwerk in England. Es versorgt die Stadt mit heißem Wasser. Die Geothermiebohrung ist Teil eines kombinierten Heiz-, Elektrizitäts- und Kühlsystems. Es liefert heißes und kaltes Wasser an die Abnehmer und speist Elektrizität ins Netz. Der Geothermieanteil an den 70 GWh Wärme, die das System jährlich liefert, liegt bei etwa 15 %. Die Bevölkerung von Southampton liegt laut der letzten Zählung bei 217445 Personen, also wird 0,13 kWh/d pro Person in Southampton durch Geothermie erzeugt.



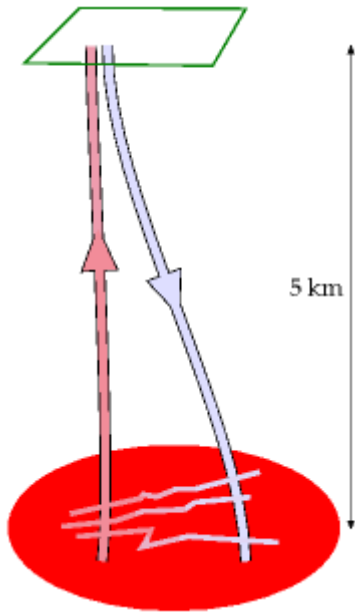


Fig.16.5: Erweiterte geothermische Extraktion aus heißem trockenem Fels. Ein Bohrung wird niedergebracht und unter Druck gesetzt, um Brüche im Fels zu erzeugen. Eine zweite Bohrung schafft einen Zugang zu einer entfernten Stelle der Bruchzone. Kaltes Wasser wird in eine der Bohrungen gepumpt und heißes Wasser (tatsächlich Dampf) in der anderen hochgesaugt.

♦Welcher Anteil dieser Ressource könnte realistisch zur Energiegewinnung genutzt werden? Bei der „erweiterten geothermischen Extraktion“ aus heißem trockenem Gestein (Fig.16.5) bohren wir zuerst zwei Löcher in geeignetem Abstand zueinander bis in 3-7 km Tiefe, wo Temperaturen von über 100 Grad Celsius herrschen. Wird Wasser durch eines der Bohrlöcher eingepumpt, tritt es beim anderen als Dampf wieder aus. Diesen Dampf können wir zur Elektrizitätsgewinnung oder als Wärmequelle nutzen.

Die Gesteinsschicht zwischen den beiden unteren Rohr-Enden wirkt wie ein riesiger Wärmetauscher. Wie viel Wärme auf diese Weise abtransportiert werden kann, hängt neben der Temperatur vor allem von der Wasserdurchlässigkeit des Gesteins ab. Um diese zu erhöhen, wird – wenn nötig – der Fels in der Bohrtiefe gebrochen, indem man Wasser mit hohem Druck in eine der Bohrungen verpresst und so Mikroerdbeben in der Zieltiefe auslöst. Durch dieses „Hydraulic Fracturing“ werden bestehende Gesteinsrisse aufgeweitet und neue geschaffen, so dass insgesamt die Fließgeschwindigkeit des Wassers zwischen den Bohrlochenden um ein Vielfaches erhöht wird. Für einen lohnenden Wärmeabbau zur Elektrizitätsgewinnung halten die Experten Fließgeschwindigkeiten von mindestens 50 m³/h für erforderlich.

Stromerzeugung aus Geothermiequellen kann man mit einem Anlagenwirkungsgrad von etwa 10% betreiben. Zudem müssen die Wasserpumpen mit Strom versorgt werden, die die Flüssigkeit durch den Fels pressen, was je nach Fließwiderstand bis zu 50% der gewonnenen Energie benötigen kann. Nehmen wir weiter an, dass wir nicht die gesamte thermische Energie des 1m x 1m x 7km-Quaders, sondern lediglich einen Anteil von, sagen wir, 10% seines Inhalts (nämlich den in wirtschaftlich gesehen optimaler Tiefe liegenden) ausbeuten, erhalten wir einen Beitrag von 20 kWh/d/p als Elektrizitätsausbeute aus Geothermie in Deutschland.

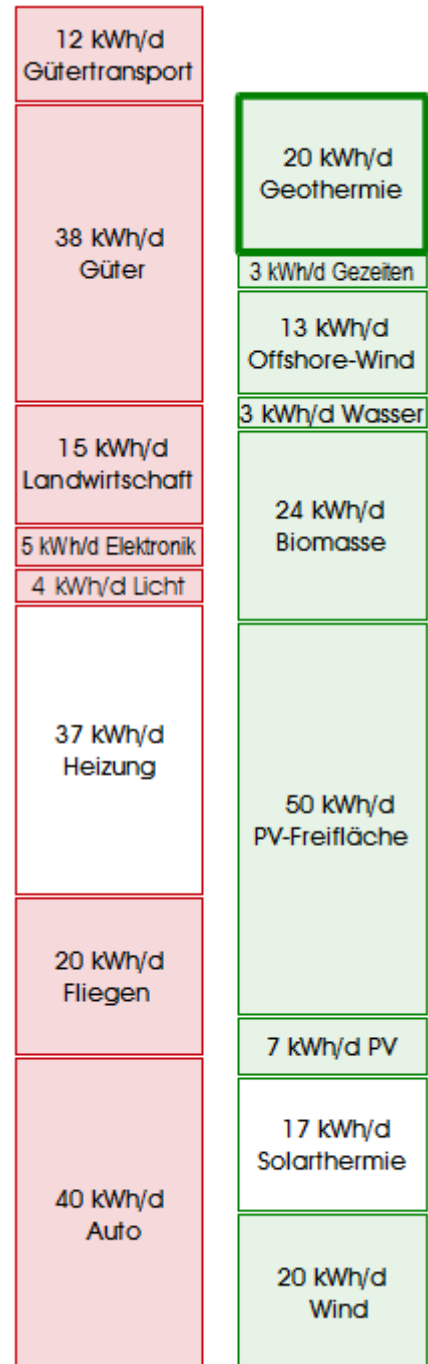


Fig.16.6: Geothermie

Anmerkungen und Literaturhinweise

Seite

111 Der Wärmestrom an der Oberfläche liegt bei 50 mW/m^2 °Das Massachusetts Institute of Technology (2006) gibt 59 mW/m^2 im Mittel für die USA an, in einem Bereich von 25 mW bis 150 mW . Shepherd (2003) gibt 63 mW/m^2 an.

112 wird dadurch Energie im Umfang von 360.000 kWh pro Quadratmeter Oberfläche frei ♦Quelle: Jung et al. (2002), zitiert in Paschen et al. (2003)

112 Erzeugung von elektrischer Leistung aus heißem trockenen Fels kurz oder mittelfristig wohl technisch und kommerziell nicht durchführbar wäre °Quelle: MacDonald et al. (1992). Siehe auch Richards et al. (1994).

Das größte Vorkommen von heißem trockenen Fels Quelle: MacDonald et al. (1992).

Southampton Geothermal District Heating Scheme siehe www.southampton.gov.uk.

113 Andere Gegenden der Welt mögen vielversprechende heiße trockene Felsvorkommen haben Es gibt eine hervorragende Studie (Massachusetts Institute of Technology, 2006) die die Hot-Dry-Rock-Ressourcen der USA beschreibt. Ein anderer, spekulativerer Ansatz, der von den Sandia National Laboratories in den 1970ern untersucht wurde, ist ein Loch bis zur Magma mit $600\text{-}1200 \text{ }^\circ\text{C}$ zu bohren, etwa 15 km tief, und die Leistung von dort zu gewinnen. Die Website www.magma-power.com rechnet damit, dass die Leistung in Magma-Pools unter den USA den US-Energieverbrauch für 500 bis 5000 Jahre decken könnte und dass sie ökonomisch extrahierbar wäre.

Weiterführende Literatur:

BMU (2007),

Paschen et al. (2003).

Siehe auch Anhang D für einen Kostenvergleich mit anderen Technologien.