

Strom aus Geothermie in der Schweiz

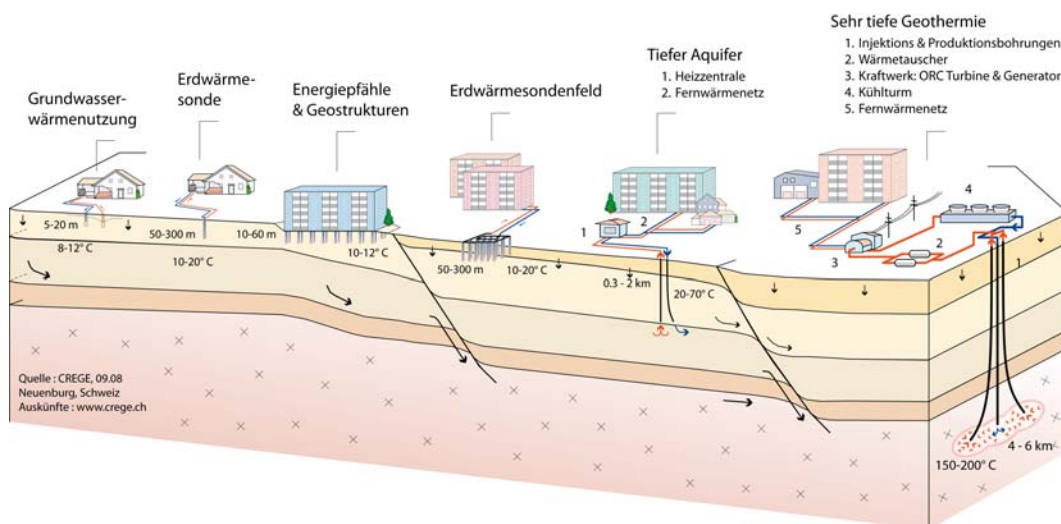
Geothermie - Wärme aus dem Untergrund

Geothermie bezeichnet die in Form von Wärme gespeicherte Energie unterhalb der Erdoberfläche. Die vorhandene Wärmemenge ist enorm, rund 99 % der Erdkugel sind heisser als 1000°C. Nur gerade die obersten 3 km der Erdkruste weisen Temperaturen unterhalb von 100°C auf. Ein Teil dieser Energie stammt noch aus der Erdentstehung vor über 4.5 Milliarden Jahren. Es wird aber auch laufend neue Erdwärme gebildet. Als massgebliche Wärmequellen treten hierbei Kristallisationsvorgänge im inneren Erdkern sowie natürliche radioaktive Zerfallsprozesse in der Erdkruste auf. Sie sorgen für einen kontinuierlichen und nahezu unerschöpflichen Wärmenachfluss an die Erdoberfläche. Damit ist die Geothermie eine echte erneuerbare Energie.

Erdwärmennutzung in der Schweiz

Nutzungsmöglichkeiten

Die im Untergrund gespeicherte Wärme bietet prinzipiell eine Vielzahl von Nutzungsmöglichkeiten auf unterschiedlichen Tiefen- bzw. Temperaturniveaus. Das Spektrum umfasst hierbei die oberflächennahe Erschliessung zu Heiz- oder Kühlzwecken aus Tiefen von mehreren bis einigen hundert Metern und reicht bis hin zur Stromproduktion aus Tiefen von 3 km bis über 5 km.



Figur 1: Nutzungsmöglichkeiten der Geothermie in unterschiedlichen Tiefenbereichen. Mit zunehmender Tiefe steigt die erreichbare Temperatur an (Grafik: CREGE, Neuchâtel).

Heutige geothermische Nutzung

In der Schweiz beschränkt sich die heutige Erdwärmennutzung noch ausschliesslich auf die Wärme- und Kälteerzeugung. Der Fokus liegt hierbei deutlich auf der oberflächennahen Geothermie (< 400 m Tiefe). Die Nutzung tieferer Aquifere macht weniger als ein Prozent der gesamtschweizerischen geothermischen Heizenergie aus. Im Jahr 2008 betrug die aus geothermischen Quellen produzierte Wärme rund 2040 GWh, wobei der

Anteil der erneuerbaren geothermischen Energie bei etwa 1530 GWh lag (Geowatt, 2009). Der grösste Teil stammt dabei von Erdwärmesonden-Systemen (70 %), untergeordnet sind auch Thermalbad-Anwendungen (19 %) oder die Nutzung von oberflächennahem Grundwasser (10 %) bedeutungsvoll. Die durch Erdwärme erzeugte Heizenergie liefert zurzeit mit knapp zwei Prozent zwar noch einen geringen Beitrag zur gesamten Wärme- und Warmwassererzeugung in der Schweiz, die Tendenz ist aber stark steigend.

Geothermische Stromerzeugung in der Zukunft

Die gewaltigen Wärmemengen im Erdinneren sind geradezu prädestiniert dafür, auch hinsichtlich einer Stromgewinnung genutzt zu werden. In der Schweiz wird zurzeit allerdings noch keine Elektrizität aus Geothermie gewonnen. Auch die weltweit installierte elektrische Leistung aus geothermischen Quellen ist mit knapp 10 GW_e noch vergleichsweise gering (IGA, 2009). Sie entspricht nicht einmal ganz der Gesamtleistung, welche der schweizerische Kraftwerkpark erbringt.

Prinzipiell lässt sich die geförderte geothermische Wärme je nach Temperaturniveau zur Wärmeproduktion, Stromproduktion oder einer gekoppelten Wärme-Stromproduktion nutzen. Im Hinblick auf eine potenzielle Stromgewinnung aus tiefer Geothermie können grundsätzlich zwei Nutzungstypen unterschieden werden:

- **Hydrothermale Systeme:** Nutzung von natürlich auftretenden tiefen Aquiferen (wasserführende Gesteinsschichten).
- **Petrothermale Systeme:** Erschliessung des «dichten» und «trockenen» Untergrundes durch eine künstliche Erhöhung der vorhandenen Wasserdurchlässigkeit zur Erzeugung eines Wärmetauschers (Enhanced Geothermal Systems, EGS, auch Hot-Dry-Rock, HDR genannt).

Daneben sind auch Nutzungsarten denkbar, welche zwischen diesen beiden Endgliedern liegen.

Potenzial der geothermischen Stromproduktion in der Schweiz

Gemäss dem heutigen Kenntnisstand ist davon auszugehen, dass geothermische Kraftwerke einen wichtigen Beitrag zur zukünftigen Energieversorgung in der Schweiz leisten könnten. Insbesondere im Bereich der petrothermalen Systeme besteht ein enormes Potenzial. Hierbei liegt die Begrenzung nicht bei der Ressource selbst, sondern bei der Wirtschaftlichkeit der Technologie, mit welcher die Energie an die Erdoberfläche gebracht und in nutzbare elektrische Energie umgewandelt werden kann. Eine Abschätzung des geothermischen Potenzials ist deshalb abhängig vom Stand der Technik und den damit verbundenen Kosten. In Bezug auf die Art der im Untergrund vorhandenen Energiereserven werden aus diesem Grund drei Kategorien unterschieden:

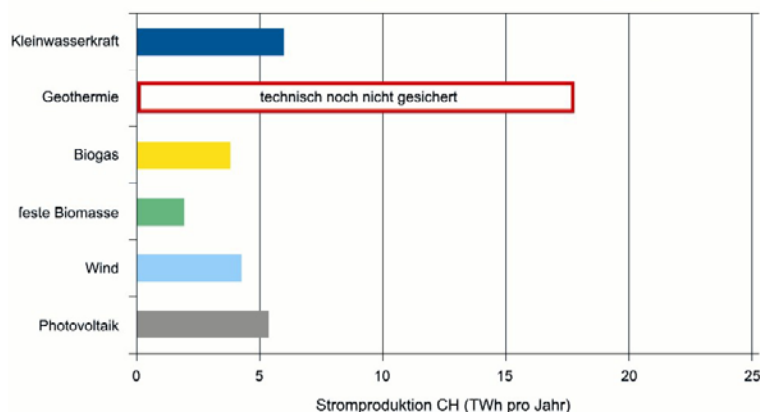
Art der Energiereserve	Potenzial
Gesamte im Gestein enthaltene Energiemenge.	Theoretisches Potenzial
Mit bekannten Methoden technisch nutzbare Energiemenge.	Technisches Potenzial
Mit bekannten Methoden wirtschaftlich nutzbare Energiemenge.	Wirtschaftliches Potenzial

Tabelle 1: Art und Potenziale von geothermischen Energiereserven im Untergrund.

Eine Studie des Paul Scherrer Instituts (PSI, 2005) schätzt das theoretische geothermische Potenzial für die Schweiz in einer Tiefe von 3–7 km auf etwa 15'900'000 TWh. Mit einem Gewinnungsfaktor von 4 % und einem Wirkungsgrad bei der Stromproduktion von rund 10 % kann somit eine potenzielle totale Elektrizitätsgewinnung von rund 63'700 TWh_e angenommen werden.

Das theoretisch langfristig erschliessbare Potenzial der Stromerzeugung aus geothermischen Ressourcen wird für die Schweiz auf etwa 17 TWh_e pro Jahr geschätzt (Axpo, 2007). Dies entspricht der Leistung von mehr als zwei Kernkraftwerken in der Grösse von Gösgen und würde rund 30 % des heutigen schweizerischen Elektrizitätsverbrauchs in der Höhe von ca. 59 TWh_e pro Jahr decken (BFE, 2008). Die Geothermie weist damit bei weitem das grösste Potenzial der erneuerbaren Energien in der Schweiz auf (siehe Fig. 2). Deren Nutzbarkeit ist technisch allerdings noch keineswegs gesichert.

Eine Quantifizierung des technischen oder wirtschaftlichen Potenzials der geothermischen Stromerzeugung ist nur schwierig zu erbringen und stark abhängig von den zukünftigen technologischen Entwicklungen, insbesondere in der Bohrtechnik und den Möglichkeiten, künstliche Wärmetauscher im Untergrund zu erzeugen.



Figur 2: Theoretisches Potenzial erneuerbarer Energien in der Schweiz nach 2050 ohne Berücksichtigung der Kosten und der Raumplanung (Axpo, 2007).

Stand der Kenntnisse

Herausforderungen

Um Erdwärme aus grösseren Tiefen effizient zur Stromproduktion nutzen zu können, sind einige geologische und technische Problemstellungen zu bewältigen. Dabei gilt es insbesondere folgende Fragen zu beantworten (FEGES, 2008):

- Lassen sich in der Tiefe Schichten mit erhöhter Wasserdurchlässigkeit finden?
- Kann die Wasserdurchlässigkeit von tiefen wasserführenden Zonen dermassen erhöht werden, dass sie eine geothermische Nutzung zulässt?
- Ist es sogar möglich, im undurchlässigen Untergrund künstliche Wärmetauscher wirtschaftlich zu erzeugen (EGS-Technologie)?

Die Beantwortung dieser Fragestellungen macht vertiefte Kenntnisse über die regionalen und lokalen geologischen Verhältnisse sowie über die zur Verbesserung der Durchlässigkeit notwendigen Technologien unerlässlich.

Geologische Kenntnisse über den tiefen Untergrund in der Schweiz

Für eine erfolgreiche Nutzung von tiefer Geothermie sind in erster Linie Informationen über die natürliche Wasserdurchlässigkeit im Untergrund sowie den Temperaturverlauf in der Tiefe zu erarbeiten. Daneben existiert eine Vielzahl von weiteren relevanten Faktoren wie die chemische Zusammensetzung der vorhandenen Wässer, das Gebirgsspannungsfeld oder felsmechanische Bedingungen.

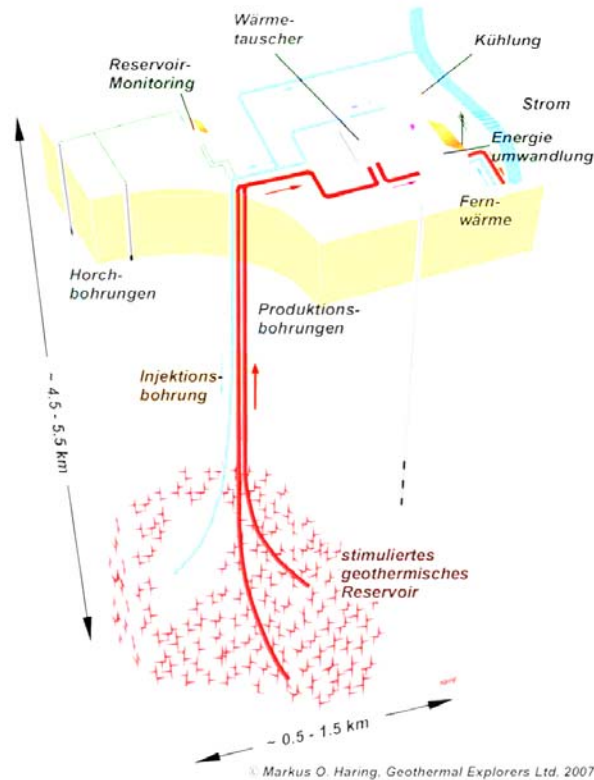
Kenntnisse über diese ausschlaggebenden geologischen Parameter im tiefen Untergrund sind in der Schweiz verglichen mit Süd- und Norddeutschland oder dem Rheintalgraben nördlich von Basel aber relativ bescheiden. Gerade eine Prognose der Wasserdurchlässigkeit potenzieller Erschliessungsgebiete ist noch mit grossen Unsicherheiten behaftet. Die Lokalisierung von geeigneten Standorten für geothermische Anlagen ist entsprechend aufwändig. Bis anhin beschränkt sich das Wissen über den tiefen Untergrund im schweizerischen Mittelland im Wesentlichen auf Daten der Erdöl- und Erdgasexploration der letzten 60 Jahre sowie die sehr bedeutsamen Erkundungsarbeiten der NAGRA in der Nordschweiz. Daneben sind lokale Kenntnisse aus vereinzelt geothermischen, hydrogeologischen oder ingenieurgeologischen Bohrungen verfügbar.

Heutige Technologien und erschliessbare Tiefenbereiche

Beträgt die Temperatur einer geothermischen Wärmequelle über 100°C, so kann mit den derzeit bekannten Möglichkeiten eine Umwandlung der Wärme in Strom wirtschaftlich sein. Da es im Untergrund des schweizerischen Mittellandes mit typischerweise rund 30°C pro Kilometer zunehmend wärmer wird, ist diese minimal geforderte Temperaturmarke in etwa 3 km Tiefe anzutreffen. Die untere Begrenzung einer Geothermiebohrung wird von der verfügbaren Bohrtechnologie vorgegeben und beträgt mit der heutigen Technik ca. 7–10 km. Die aktuell wirtschaftlich erreichbare Tiefe liegt bei rund 5 km.

Geothermische Anlagen zur Stromerzeugung bestehen nach heutigem Standard aus mindestens zwei Tiefbohrungen (siehe Fig. 3). Davon wird eine zur Injektion von kühlem Wasser in den unterirdischen natürlichen oder künstlich erzeugten Wärmetauscher genutzt. Durch Zirkulation im heissen Umgebungsgestein kann sich das injizierte Wasser erhitzen und anschliessend mittels einer oder mehrerer Produktionsbohrungen gefasst werden. An der Oberfläche wird die Wärme des geförderten heissen Wassers über einen Wärmetauscher an eine Wärmeträgerflüssigkeit übertragen. Deren Dampf dient zum Antrieb einer Turbine mit gekoppeltem Stromgenerator. Der Wirkungsgrad bei der Umwandlung von Wärme in Strom liegt momentan noch lediglich bei etwa 10–13 % (PSI, 2005). Ein beträchtlicher Anteil der Restenergie gelangt über die Injektionsbohrung zurück in den Untergrund. Daneben kann die bei der Stromproduktion anfallende Abwärme auch zur lokalen Wärmeversorgung genutzt werden.

Das Leistungsspektrum einer geothermischen Anlage zur Stromproduktion mit zwei bis drei Bohrungen liegt nach heutigen Ansichten bei etwa 1–6 MW_e. Um den Strombedarf einer Kleinstadt mit etwa 10'000 Einwohnern zu decken sind rund 4 MW_e erforderlich. Die Geothermie ist folglich als dezentrale Technologie zu verstehen. Allerdings sind zukünftig grössere Anlagen mit mehr als drei Bohrungen vorstellbar.



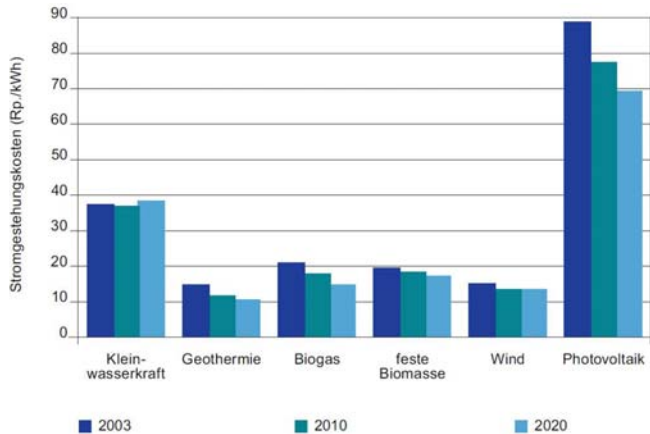
Figur 3: Nutzung der Erdwärme aus «dichtem» Untergrund durch das sogenannte «Enhanced Geothermal System», EGS (Grafik: Häring, 2007).

Die Förderung von sehr heissem Wasser stellt hohe Anforderungen an den Ausbau einer geothermischen Tiefbohrung. Aufgrund von Alterungserscheinungen kann mit der heutigen Technologie die Lebensdauer einer Geothermiebohrung auf etwa 20 Jahre geschätzt werden. Im Weiteren findet in Abhängigkeit von der entnommenen Wärmemenge aus der Tiefe auch eine gewisse Abkühlung des Untergrundes statt. Es wird geschätzt, dass dieser Effekt die Lebensdauer einer Geothermie-Anlage auf ungefähr 30 Jahre beschränkt.

Wirtschaftlichkeit geothermischer Stromproduktion

Der überwiegende Teil der Investitionskosten für eine Geothermieanlage (ca. 65–75 %) wird durch die Bohrung verursacht. Da die Bohrkosten mit der Tiefe überproportional steigen, nimmt die Wirtschaftlichkeit einer Geothermieanlage prinzipiell mit der Bohrtiefe ab. Für die 5 km tiefe Geothermie-Bohrung des europäischen Forschungsprojekts in Soultz-sous-Forêts (F) aus dem Jahr 2004 beliefen sich die Bohrkosten beispielsweise auf etwa CHF 1600.- pro Meter.

Die Stromgestehungskosten aus geothermischen Anlagen sind aber nicht nur abhängig von der aktuellen Bohrtechnologie, sondern auch der Effizienz in der Erzeugung von künstlichen Wärmetauschern im Untergrund. Eine PSI-Studie schätzt die zukünftigen Stromgestehungskosten auf etwa 7–15 Rp./kWh (PSI, 2005). Verglichen mit anderen erneuerbaren Energien kann die Geothermie damit zu den günstigsten Energieressourcen gezählt werden (siehe Fig. 4).



Figur 4: Stromgestehungskosten einzelner neuer erneuerbarer Energien (Axpö, 2007).

Zukünftige Technologien

Die Forschung und Entwicklung für zukünftige Technologien zur geothermischen Stromgewinnung konzentriert sich hauptsächlich auf die Steigerung der Effizienz von bekannten Systemen. Dies betrifft insbesondere den Bereich der Bohrtechnik (schnellere Bohrmethoden, effizienter Bohrlochausbau und effiziente und zuverlässige Testmethoden).

Technisch noch unzureichend gelöst ist auch das Erreichen von befriedigenden Produktionsflussraten. Für eine wirtschaftliche Nutzung werden Pumpleistungen in der Grössenordnung von 100 l/s angestrebt. Hier geht es darum, die Forschung im Bereich der Erstellung von künstlichen Wärmetauschern im Untergrund weiter voranzutreiben. Offene Fragen finden sich auch in der geringen Effizienz der Konversion von Wärme in Strom, den möglichen Wasser- oder Dampf-Verlusten im System sowie potenziellen Korrosionserscheinungen aufgrund der geförderten heissen, stark mineralisierten Wässer.

Probleme und Risiken

Die Risiken bei der Geothermie fallen je nach Nutzungstechnologie unterschiedlich aus. Auf dem Gebiet der Tiefengeothermie sind grundsätzlich folgende Probleme oder Unsicherheiten zu erwähnen:

- **Explorationskosten:** Bei jedem Geothermieprojekt besteht ein Fündigkeits- und Bohrkostenrisiko, d.h. nicht in jeder abgeteuften Bohrung können Bedingungen vorgefunden werden, welche hinsichtlich einer geothermischen Nutzung erfolgsversprechend sind.
- **Risiken beim Bohren:** Bohrlochausbrüche, Bohrlochstabilität, Brüche des Bohrgestänges, hoher Verschleiss der Bohrkronen etc.;
- **Stimulationsrisiken und induzierte Seismizität:** Erzeugung von mikroseismischen Ereignissen aufgrund der hydraulischen Stimulation zur Erhöhung der vorhandenen Durchlässigkeit bis hin zur potenziellen Auslösung von spürbaren grösseren Erdbeben infolge eines Abbaus von natürlich aufgebauten Gebirgsspannungen entlang von Störzonen.
- **Umwelteinflüsse:** Energetische und materielle Aufwendungen für die Erschliessung, ungenutzte Abwärme der Konversionsanlage und anderes.

Perspektiven

Als dezentrale, ressourcenschonende und umweltverträgliche Energiequelle kann die Tiefengeothermie einen substanziellen Beitrag zu einer sicheren Energieversorgung in der Zukunft leisten.

Da der Wissensstand auf dem Gebiet der hydrothermalen Geothermie im Vergleich zur petrothermalen Technologie als deutlich höher einzustufen ist, könnten weitere Entwicklungs- oder Pilotprojekte in naher Zukunft insbesondere auf die Erschliessung von tiefen Aquiferen fokussiert sein. Sobald zusätzliche Kenntnisse über den tiefen Untergrund vorliegen und die weltweite EGS-Technologie weiterentwickelt ist, kann in der Schweiz ebenso eine Nutzung der petrothermalen Geothermie mit ihrem enormen Potenzial angestrebt werden. Generell sind dazu allerdings noch grosse Anstrengungen in der Grundlagen- und angewandten Forschung zu unternehmen.

Bis anhin wurden alle in der Schweiz ausgeführten geothermischen Projekte durch lokale Energieversorger individuell initiiert und finanziert. Um die zukünftige Erkundung des Schweizer Untergrundes im Hinblick auf eine Nutzung von tiefen geothermischen Ressourcen möglichst effizient voranzutreiben, wäre allerdings eine koordinierte Vorgehensweise und systematische Exploration über zusammenhängende Gebiete in der Schweiz notwendig. Damit könnten in einer ersten Explorationsphase die erfolgversprechendsten Standorte eruiert werden. Hier wäre auch die Unterstützung von Bund, Kantonen und Gemeinden sehr wünschenswert.

Die Gründung einer in der Schweiz tätigen Explorationsgesellschaft sollte deshalb in Betracht gezogen werden. Diese könnte, gefördert beispielsweise durch die Elektrizitätsversorgungsunternehmen (EVU), als Kompetenzzentrum für schweizerische Explorationsprojekte auftreten. Hierzu müssen aber auch die entsprechenden politischen Rahmenbedingungen geschaffen werden.

Im Weiteren sind mögliche Anpassungen in rechtlichen Belangen zu diskutieren. Die Nutzung des Untergrundes ist in den verschiedenen Kantonen heute unterschiedlich und hinsichtlich einer geothermischen Anwendung teilweise ungenügend spezifisch geregelt. Einheitliche und kantonsübergreifend akzeptierte Vergaberichtlinien für Explorations- und Produktionsprojekte könnten die Rahmenbedingungen verbessern und Firmen sowie Investoren motivieren, vermehrt Projekte in der Tiefengeothermie zu realisieren.

Gründe für die Nutzung von Geothermie

Die geothermische Strom- oder Wärmeproduktion bietet in vielerlei Hinsicht entscheidende Vorteile. Geothermie ist:

- **Sauber und sicher:** Die Erdwärmennutzung erzeugt weder Luftschadstoffe noch CO₂ und ist hinsichtlich der Umweltauswirkungen vergleichbar mit denjenigen von Windenergie- oder Wasserkraftanlagen.
- **Eine Bandenergie:** Die Erdwärme ist unabhängig von saisonalen, klimatischen oder tageszeitlichen Einflüssen ständig verfügbar.
- **Nahezu unerschöpflich / nachhaltig:** Die Geothermie ist in menschlichen Zeiträumen unbegrenzt vorhanden.

- **Platzsparend und unauffällig:** Der Landverbrauch einer geothermischen Anlage an der Oberfläche ist gering.
- **Überall einsetzbar:** Die Erdwärme kann in der jeweils benötigten Menge gefördert werden und ist somit regulierbar.
- **Einheimisch:** Die Geothermie ist unabhängig verfügbar.

Literaturverzeichnis

AXPO (2007): Strom für heute und morgen. Studie Stromperspektiven 2020.

BFE (2008): Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2008.

FEGES (2008): Forschungs- und Entwicklungsprogramm zur geothermischen Stromerzeugung in der Schweiz, FEGES. Schweizerische Vereinigung für Geothermie, SVG.

GEOWATT (2009): Statistik der geothermischen Nutzung in der Schweiz, Ausgabe 2008.

HÄRING M. O. (2007): Geothermische Stromproduktion aus Enhanced Geothermal Systems (EGS) – Stand der Technik.

IGA (2009): International Geothermal Association (www.geothermal-energy.org).

PROGEO THERM (2007): Programme national de développement de la géothermie en Suisse. Rapport final élaboré pour l'Office fédéral de l'énergie.

PSI (2005): Neue erneuerbare Energien und neue Nuklearanlagen: Potenziale und Kosten. PSI-Bericht Nr. 05-04.

Glossar

Begriff / Kennwert	Erklärung / Definition
<i>Geothermischer Gradient</i>	Bezeichnung des Temperaturanstiegs im Untergrund mit zunehmender Tiefe (typischerweise ca. 30°C/km).
<i>Tiefengeothermie</i>	Bezeichnung für die Erdwärmenutzung in grosser Tiefe. Generell wird dieser Begriff ab einer Tiefe von 400 m verwendet.
<i>Hydrothermale Geothermie</i>	Teilgebiet der Tiefengeothermie, bei welchem die Erdwärme direkt mittels Förderung von natürlich vorhandenen heissen Wässern genutzt wird.
<i>Petrothermale Geothermie</i>	Teilgebiet der Tiefengeothermie, bei welchem die Erdwärme aus «dichten» Zonen (Kristallingestein) mittels künstlich erzeugten unterirdischen Wärmetauschern genutzt wird.
<i>EGS-Technologie (SGS-Technologie)</i>	«Enhanced Geothermal System» («Stimuliertes Geothermisches System»)
<i>Unterirdischer Wärmetauscher</i>	Zone im Untergrund, in welcher sich injiziertes kühles Wasser durch Zirkulation im heissen Umgebungsgestein erhitzen kann.
<i>Hydraulische bzw. chemische Stimulation</i>	Künstliche Erhöhung der Wasserdurchlässigkeit im Untergrund durch Einpressen von Wasser unter hohem Druck (hydraulisch) oder durch Spülung mittels Säuren (chemisch).
5 MW_e	Typische Leistung bestehender geothermischer Kraftwerke in Deutschland oder von EGS-Prototypen (entspricht etwa 1/200 der Leistung eines grossen KKW).
40 GWh_e	Jährliche Stromproduktion einer 5 MW-Anlage (entspricht etwa 1/1500 des gesamtschweizerischen Elektrizitätsverbrauchs).