

# Geothermie

<http://de.wikipedia.org/wiki/Geothermie>

Die **Geothermie** oder **Erdwärme** ist die im zugänglichen Teil der Erdkruste gespeicherte Wärme. Sie umfasst die in der Erde gespeicherte Energie, soweit sie entzogen und genutzt werden kann, und zählt zu den regenerativen Energien. Sie kann sowohl direkt genutzt werden, etwa zum Heizen und Kühlen im Wärmemarkt (Wärmepumpenheizung), als auch zur Erzeugung von elektrischem Strom oder in einer Kraft-Wärme-Kopplung. *Geothermie* bezeichnet sowohl die ingenieurtechnische Beschäftigung mit der Erdwärme und ihrer Nutzung als auch die wissenschaftliche Untersuchung der thermischen Situation des Erdkörpers.



Geothermische Anlage in Kalifornien



Geothermiekraftwerk in Island



## Ursprung geothermischer Energie

Geothermie stammt zum Teil (geschätzt: 30–50 Prozent) aus der Restwärme aus der Zeit der [Erdentstehung](#) ([Akkretion](#)), zum anderen (geschätzt: 50–70 Prozent) aus [radioaktiven Zerfallsprozessen](#) und den [Gezeitenkräften](#) (vor allem des Mondes), die in der Erdkruste seit Jahrmillionen kontinuierlich Wärme erzeugt haben und heute noch erzeugen. Ein aktuelles Forschungsergebnis geht von ca. 50% Erdwärme aus radioaktivem Zerfall aus.<sup>[1]</sup> Ganz oberflächennah kommen Anteile aus der [Sonneneinstrahlung](#) auf die [Erdoberfläche](#) und aus dem Wärmekontakt mit der Luft dazu.

Die Temperatur im inneren [Erdkern](#) beträgt nach verschiedenen Schätzungen 4800 °C bis 7700 °C. 99 Prozent unseres Planeten sind heißer als 1000 °C; ca. 90 Prozent des Rests sind immer noch heißer als 100 °C. Fast überall hat das Erdreich in 1 Kilometer Tiefe eine Temperatur von 35 °C bis 40 °C (siehe auch [Geothermische Tiefenstufe](#)). Unter besonderen [geologischen](#) Bedingungen – zum Beispiel in heutigen oder früheren [Vulkangebieten](#) – entstehen *geothermische Anomalien*. Hier kann die Temperatur viele hundert Grad Celsius erreichen.

### Restwärme aus der Zeit der Erdentstehung

Die Erde ist vor ungefähr 4,6 Milliarden Jahren durch Akkretion von [Materie](#) entstanden. Hierbei erhitzt sich das Material, wobei [potentielle Energie](#) durch Gravitation in Wärme umgewandelt wird (gravitative [Bindungsenergie](#)). Diese Wärmeenergie hat sich wegen der geringen [Wärmeleitfähigkeit](#) der Gesteine und damit der geringen Wärmeabgabe an den [Weltraum](#) bis heute zum Teil erhalten und kann als Restwärme aus der Zeit der Erdentstehung bezeichnet werden. Zusätzlich wurde der noch jungen, geschmolzenen Erde erhebliche kinetische Energie (Bewegungsenergie) beim Einschlag eines Meteoriten zugeführt, in dessen Folge sich der [Mond](#) aus der Erde separierte.

Auch die Wärme, die beim Erstarren des geschmolzenen Erdgesteins frei wird, zählt zur Ursprungswärme. Noch heute wird am Übergang vom festen zum flüssigen Teil des [Erdkerns](#) durch das allmähliche Verfestigen zähflüssigen Kernmaterials [Kristallisationswärme](#) freigesetzt.

### Radioaktive Zerfallsprozesse

Dieser Anteil der Geothermie geht auf den natürlichen Zerfall der im Erdkörper vorhandenen langlebigen radioaktiven [Isotope](#) wie z. B. [Uran-235](#) und U-238, [Thorium-232](#) und [Kalium-40](#) zurück. Diese Elemente sind in die [Kristallgitter](#) bestimmter [Minerale](#) eingebaut, beispielsweise in die Feldspäte und Glimmer in Graniten.

Die [Leistung](#), die aus dem radioaktiven Zerfall resultiert, beträgt etwa  $22 \cdot 10^{12}$  [Watt](#).<sup>[1]</sup> Bei einem mittleren [Erdradius](#) von 6.371 km beträgt die geothermische Leistungsdichte des radioaktiven Zerfalls an der Erdoberfläche etwa 0,032 Watt (32 mW) pro Quadratmeter Erdoberfläche. Dies würde etwa die Hälfte des terrestrischen Wärmestroms ausmachen.

## Wärmestrom aus dem Erdinneren

Die Wärme wird aus tieferen Teilen der Erde durch

- [Wärmeleitung](#), also [Konduktion](#), aber auch mittels
- [Konvektion](#) durch aufsteigende Tiefenwässer oder Gase,

in für die Nutzung erreichbare Tiefen transportiert.

In geothermisch anomalen Gebieten, wie etwa

- in solchen mit einer großen Wärmestromdichte wie
  - in aktiven oder geologisch bis vor kurzem aktiven [vulkanischen](#) Bereichen (z. B. in Deutschland der [Schwäbische Vulkan](#) bei [Bad Urach](#)) oder
  - oberhalb auskühlender [Plutonite](#), bei denen aber die Wärmestromdichte noch über dem Durchschnitt liegt,
- in solchen mit einem hohen Wärmetransport durch [Konvektion](#), wie in großen [Grabenbrüchen](#) (z. B. Oberrheingraben),
- in solchen mit großen Mengen frei verfügbaren warmen oder heißen Tiefenwassers, wie an der Basis tiefer [Sedimentbecken](#), an deren Basis das dort gespeicherte heiße Wasser angezapft wird,
- in solchen mit einem Gestein mit einem hohen Wärmeleitkoeffizienten, wie im Umfeld von [Salzdiapiren](#),

kann der [Wärmefluss](#) um ein Vielfaches größer sein.

## Wärmestrom aus dem Erdinneren durch Wärmeleitung

Der terrestrische Wärmestrom, die von der Erde pro Quadratmeter an den Weltraum abgegebene Leistung, beträgt durchschnittlich etwa  $0,063 \text{ W/m}^2$  ( $63 \text{ mW/m}^2$ ) ([Wärmestromdichte](#)).

Wegen der häufig geringen [Wärmestromdichte](#) wird bei der Geothermienutzung außerhalb von Gebieten mit einer erhöhten Wärmestromdichte zunächst nicht die aus dem Erdinneren nachströmende Energie, sondern die in der [Erdkruste](#) gespeicherte Energie durch die Abkühlung eines Teils des Erdkörpers über einen bestimmten Nutzungszeitraum von einigen Jahrzehnten genutzt:

Zitat aus dem Sachstandsbericht des Büros für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag „Möglichkeiten geothermischer Stromerzeugung in Deutschland“:[\[2\]](#)

*„Der natürliche Wärmestrom aus dem Erdinnern liegt bei ca.  $70 \text{ kW/km}^2$  (Anmerkung: entspricht  $0,07 \text{ W/m}^2$ ). Beides zusammen reicht nicht aus, um die bei einer Stromerzeugung dem Quader zu entnehmende thermische Leistung von mehreren MW auszugleichen. In diesem Sinne steht eine Erdwärmenutzung immer für „lokalen Abbau“ der gespeicherten Wärmeenergie. Geothermische Energie kann also nur in einem weiteren Sinne zu den regenerativen Energien gerechnet werden“ (da bei rein konduktiver Wärmenachlieferung meist mehr Energie durch Abkühlung des erschlossenen Gebirgskörpers abgezogen wird, als aus dem Erdinneren nachströmt).*

Eine Geothermienutzung sollte idealerweise so dimensioniert werden, dass die Auskühlung des betreffenden Erdkörpers so langsam voranschreitet, dass in der Nutzungszeit der Anlage die Temperatur nur in einem Umfang absinkt, der einen wirtschaftlichen Betrieb der Anlage gestattet. In geothermisch vergleichsweise inaktiven Gebieten wird gegebenenfalls mehr Wärmeenergie aus der Erdkruste entnommen, als zunächst natürlich nachströmen kann. Da die in der Erdkruste gespeicherte Energie in einem solchen Fall schneller entzogen wird, unterliegt der Betrieb einer tiefen Geothermie-Anlage in vielen Regionen Mitteleuropas entsprechenden Begrenzungen. Die

Einflussfläche (Fläche des Quaders) des rein konduktiv nachströmenden Wärmestrom kann sich jedoch beispielsweise in gut durchlässigen [Aquiferen](#) durch konvektive Ausgleichströme um ein Vielfaches vergrößern.

Der terrestrische Wärmestrom kann gemäß der Gleichung für den konduktiven Wärmetransport berechnet werden.

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} = \lambda \cdot \frac{\Delta T}{\Delta z} \Rightarrow \Delta T = \frac{\dot{q} \cdot \Delta z}{\lambda}$$

mit

$$\dot{q} = \text{Wärmestromdichte in } \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

$$\dot{Q} = \text{Wärmestrom in W}$$

$A$  = horizontale Querschnittsfläche, durch die der Wärmestrom tritt, in  $\text{m}^2$

$\Delta z$  = vertikale Ausdehnung des von einem Wärmestrom aus dem *Erdmittelpunkt* durchflossenen Gebirgskörpers in m

$$\lambda = \text{spezifische Wärmeleitfähigkeit des Gesteins in } \frac{\text{W} \cdot \text{m}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

$\Delta T$  = Temperaturgradient im Gestein in Kelvin, meistens bezogen auf einen Bereich von etwa 10 m unter der Geländeoberfläche mit konstanten, von den Jahreszeiten unbeeinflussten Temperaturverhältnissen von  $\approx 10^\circ\text{C}$  (283 K).

Durch die geringe Wärmeleitfähigkeit von Gesteinen meist im Bereich von  $2 \dots 5 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$  und dem  $3 \text{ K}$

daraus resultierenden niedrigen Temperaturgradienten von etwa  $100 \text{ m}$  können technisch nutzbare Temperaturniveaus nur erreicht werden, in dem möglichst große Bohrtiefen erschlossen werden. Diese sind bei der tiefen Hochenthalpiegeothermie wiederum begrenzt durch die begrenzte Temperaturbeständigkeit zum Beispiel

- der Bohrspülung oder von
- geophysikalischen Geräten, die in die Bohrung eingeführt werden müssen, um die richtige Lage der Bohrung zu kontrollieren oder
- die begrenzte Hakenlast der [Bohranlage](#) von bis zu 500 t.

Die Nutzung dieses geringen Wärmestroms von maximal  $0,1 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$  auf dem jeweiligen in der [Teufe](#) angetroffenen Temperaturniveau bedarf daher

- entweder technischer Hilfsmittel (bei einem niedrigen Temperaturniveau beispielsweise einer Wärmepumpe), oder
- bei direkter Nutzung eines höheren Temperaturniveaus, wie es beispielsweise in tieferen Bereichen der Erdkruste der Fall ist.

## Wärmestrom aus dem Erdinneren durch Konvektion

In

- offenen (nicht durch Kristallisation *verstopften*) Kluftsystemen oder
- für Wasser permeablen (sprich durchlässigen) Gesteinsschichten

kann Wärme wesentlich effektiver in das Geothermieprojekt nachgeführt werden. Dadurch wird die durch die Bohrung erschlossene Gesteinsschicht je nach Ausrichtung der Klüfte vertikal oder horizontal vervielfacht, wodurch ein sehr hoher Wärmestrom realisiert werden kann. Solche Gebiete sind immer Gebieten vorzuziehen, in denen

- ein dichtes Gestein durch Fracs für die Konvektion erschlossen werden muss oder
- wo mit ausschließlicher Wärmeleitung vorliebgenommen werden muss.

Die Berechnung des erschließbaren Wärmestroms ist in solchen Gebieten nicht mit Hilfe von einfachen Gleichungen möglich, sondern bedarf der komplexen Analyse, zum Beispiel mit Hilfe von finiten Elementen.

## Einteilung der Geothermiequellen

Geothermie kann als Energiequelle zur Erzeugung von Wärme und Strom genutzt werden. Hierbei wird zwischen der Nutzung der

- oberflächennahen Geothermie zur *direkten Nutzung*, etwa zum Heizen und Kühlen, meist als [Wärmepumpenheizung](#), und der
- tiefen Geothermie zur *direkten Nutzung* im Wärmemarkt oder auch *indirekt* zur *Stromerzeugung* unterschieden.

Weiterhin wird zwischen [Hoch- und Niedrigenthalpielagerstätten](#) unterschieden. Hochenthalpie bedeutet, dass derartige Lagerstätten eine hohe Temperatur bereitstellen.

## Tiefe Geothermie

Mit zunehmender Tiefe in der [Erdkruste](#) steigt die Temperatur an. Im Durchschnitt beträgt die Temperaturerhöhung 35 K bis 40 K pro Kilometer Eindringtiefe ([geothermische Tiefenstufe](#)). Dieser Wert schwankt regional jedoch oft stark. Abweichungen vom Standard werden als Wärmeanomalien bezeichnet. Interessant sind besonders Gebiete mit deutlich höheren Temperaturen. Hier können die Temperaturen schon in geringer Tiefe mehrere hundert Grad betragen. Derartige Anomalien sind häufig an [Vulkanaktivität](#) geknüpft. In der Geothermie gelten sie als hochenthalpe Lagerstätten. Sie werden weltweit zur Stromerzeugung genutzt.

## Hochenthalpie-Lagerstätten

Die weltweite Stromerzeugung aus Geothermie wird durch die Nutzung von Hochenthalpie-Lagerstätten dominiert. Dies sind Wärmeanomalien, die mit vulkanischer Tätigkeit einhergehen. Dort sind mehrere hundert Grad heiße Fluide (Wasser/Dampf) in geringer Tiefe anzutreffen. Ihr Vorkommen korreliert stark mit Vulkanen in den entsprechenden Ländern.

Land	Anzahl der Vulkane	Theoretische Dauerleistung: MW <sub>el</sub>
USA	133	23.000
Japan	100	20.000
Indonesien	126	16.000
Philippinen	53	6.000
Mexiko	35	6.000
Island	33	5.800
Neuseeland	19	3.650
Italien (Toskana)	3	700

(Quelle: [3])

Abhängig von den Druck- und Temperaturbedingungen können Hochenthalpie-Lagerstätten mehr dampf- oder mehr wasserdominiert sein. Früher wurde der Dampf nach der Nutzung in die Luft entlassen, was zu erheblichem [Schwefelgeruch](#) führen konnte (Italien, [Larderello](#)). Heute werden die abgekühlten Fluide in die Lagerstätte reinjiziert (zurückgepumpt). So werden negative Umwelteinwirkungen vermieden und gleichzeitig die Produktivität durch Aufrechterhalten eines höheren Druckniveaus in der Lagerstätte verbessert.

Das heiße Fluid kann zur Bereitstellung von Industriedampf und zur Speisung von Nah- und Fernwärmenetzen genutzt werden. Besonders interessant ist die Erzeugung von Strom aus dem heißen Dampf. Hierfür wird das im Untergrund erhitzte Wasser genutzt, um eine Dampfturbine anzutreiben. Der geschlossene Kreislauf im Zirkulationssystem steht so unter Druck, dass ein Sieden des eingepressten Wassers verhindert wird und der Dampf erst an der Turbine entsteht (Flash-Verfahren).

## Niederenthalpie-Lagerstätten

In nichtvulkanischen Gebieten können die Temperaturen im Untergrund sehr unterschiedlich sein. In der Regel sind jedoch tiefe Bohrungen notwendig; für eine wirtschaftliche Stromerzeugung sind Temperaturen über 100 °C erforderlich.

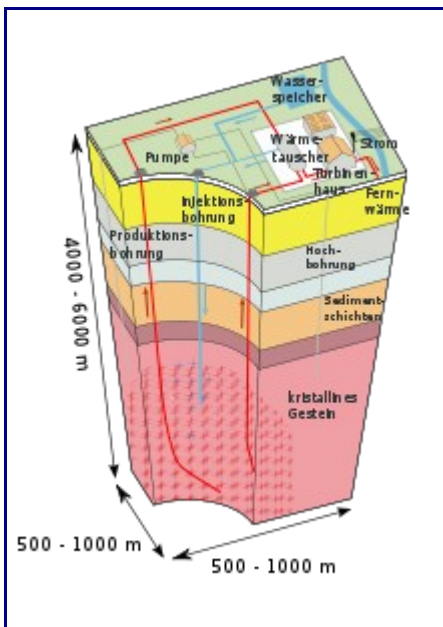
Generell werden im Bereich der tiefen Geothermie drei Arten der Wärmeentnahme aus dem Untergrund unterschieden; welches der in Frage kommenden Verfahren zum Einsatz kommt, ist von den jeweiligen geologischen Voraussetzungen, von der benötigten Energiemenge sowie dem geforderten Temperaturniveau der Wärmenutzung abhängig. Es wird öfter zur Wärmegewinnung

genutzt, denn da ist der Wirkungsgrad höher. Derzeit (2010) werden in Deutschland fast ausschließlich hydrothermale Systeme geplant. [HDR](#)-Verfahren befinden sich in den Pilotprojekten in [Bad Urach](#) (D), in [Soultz-sous-Forêts](#) im Elsass (F) und in [Basel](#) (CH) in der Erprobung. In Südost-Australien [Cooperbecken](#) ist seit 2001 ein kommerzielles Projekt im Gange (Firma *Geodynamics Limited*).

### Hydrothermale Systeme

Liegen entsprechende Temperaturen in einem [Aquifer](#) vor, so kann aus diesem Wasser gefördert, abgekühlt und reinjiziert werden: Im Untergrund vorhandene Thermalwässer zirkulieren zwischen zwei Brunnen über vorhandene natürliche Grundwasserleiter. [Hydrothermale](#) Energie ist je nach vorliegender Temperatur zur Wärme- oder Stromgewinnung nutzbar. Die für hydrothermale Geothermie brauchbaren [Horizonte](#) können im [Geothermischen Informationssystem](#) ersehen werden. Außerdem stellt dieses Informationssystem diverse Auswertemechanismen hinsichtlich der nutzbaren Aquifere und Temperaturen zur Verfügung.

### Petrothermale Systeme



Das Prinzip der Nutzung der Geothermie aus heißem dichtem Gestein (HDR)

werden oft auch als [HDR](#)-Systeme (**H**ot-**D**ry-**R**ock) bezeichnet: Ist das Gestein, in dem die hohen Temperaturen angetroffen wurden, wenig [permeabel](#), so dass aus ihm kein Wasser gefördert werden kann, so kann dort ein künstlich eingebrachtes Wärmeträgermedium (Wasser oder auch [CO<sub>2</sub>](#))

zwischen zwei tiefen Brunnen in einem künstlich erzeugten Rissystem zirkuliert werden: zunächst wird Wasser mit (mindestens einer) *Injektions-* bzw. *Verpressbohrung* in das Kluftsystem eingepresst unter einem Druck, welcher so weit über dem *petrostatischen Druck* liegen muss, dass die minimale [Hauptspannung](#) in der jeweiligen [Teufenlage](#) überschritten wird, in das Gestein gepresst (*hydraulische Stimulation*); hierdurch werden Fließwege aufgebrochen oder vorhandene aufgeweitet und damit die Durchlässigkeit des Gesteins erhöht. Dieses Vorgehen ist notwendig, da sonst die Wärmeübertragungsfläche und die Durchgängigkeit zu gering wären. Anschließend bildet dieses System aus natürlichen und künstlichen Rissen einen unterirdischen, geothermischen [Wärmeübertrager](#). Durch die zweite, die *Produktions-* oder *Förderbohrung*, wird das Trägermedium wieder an die Oberfläche gefördert.

Tatsächlich ist die Annahme, bei diesen Temperaturen und Tiefen trockene Gesteinsformationen vorzufinden, nicht korrekt. Aus diesem Grund existieren auch verschiedene andere Bezeichnungen für dieses Verfahren: u. a. *Hot-Wet-Rock* (HWR), *Hot-Fractured-Rock* (HFR) oder *Enhanced Geothermal System* (EGS). Als neutrale Bezeichnung wird der Begriff *petrothermale Systeme* verwendet.[4]

### **Tiefe Erdwärmesonden**

Hier wird vergleichsweise wenig Energie extrahiert: eine tiefe Erdwärmesonde ist ein geschlossenes System zur Erdwärmegewinnung. Sie besteht aus einer 2000 bis 3000 m tiefen Bohrung, in der ein Fluid zirkuliert. In der Regel ist das Fluid in einem koaxialen Rohr eingeschlossen: Im Ringraum der Bohrung fließt das kalte Wärmeträgerfluid nach unten, um anschließend in der dünneren eingehängten Steigleitung erwärmt wieder aufzusteigen. Derartige Erdwärmesonden haben gegenüber offenen Systemen den Vorteil, dass kein Kontakt zum Grundwasser besteht. Sie sind an jedem Standort möglich. Ihre Entzugsleistung hängt neben technischen Parametern von den Gebirgstemperaturen und den Leitfähigkeiten des Gesteins ab. Sie wird jedoch nur einige hundert kW betragen und somit wesentlich kleiner sein als bei einem vergleichbaren offenen System. Dies liegt daran, dass die Wärmeübertragungsfläche mit dem Gebirge sehr klein ist, da sie nur der Mantelfläche der Bohrung entspricht.

Tiefe Erdwärmesonden wurden beispielsweise 2005 in Aachen (SuperC der RWTH Aachen)[5] und Arnsberg (Freizeitbad *Nass*) gebaut. Ende 2009 wurde in der Schweiz die Forschungsanlage Tiefen-EWS Oftringen[6] realisiert. Es handelt sich hierbei um eine 706 m tiefe konventionelle Doppel-U-Sonde, welche 2009 / 2010 im Sinne einer Direktheizung (also ohne den Einsatz mit einer Wärmepumpe) getestet wurde.[7]

Alternativ zur Zirkulation von Wasser (eventuell mit Zusätzen) in der Erdwärmesonde sind auch Sonden mit Direktverdampfern (*Wärmerohre* oder aus dem Englischen Heatpipes) vorgeschlagen worden. Als Arbeitsmittel kann entweder eine Flüssigkeit mit einem entsprechend niedrigen Siedepunkt verwendet werden, oder ein Gemisch beispielsweise aus Ammoniak und Wasser. Eine derartige Sonde kann auch unter Druck und dann beispielsweise mit Kohlendioxid betrieben werden. Heatpipes können eine höhere Entzugsleistung erreichen als konventionelle Sonden, da sie auf ihrer gesamten Länge die Verdampfungstemperatur des Arbeitsmittels haben können. Tiefe Erdwärmestichsonden bis 3000 m sind mit einem Luftpolsterisoliervorgang auszustatten, da hierbei eine erhebliche Wärmeenergiemenge eingespart wird.[8] Dies kann zu einer höheren Energieausbeute führen oder es kann eine geringere Bohrtiefe bei gleicher Leistung zur wesentlichen Kostenminderung beitragen. Das Isolierkappensystem ist einfach herzustellen und bietet eine dauerhafte Lösung dieses Problems.

### **Oberflächennahe Geothermie**

Die Temperaturen der Luft schwanken mit der Jahreszeit sehr stark. Innerhalb der oberen Schichten des Erdbodens werden diese Temperaturen jedoch nicht bzw. nur sehr stark gedämpft nachvollzogen. Aus mathematischer Sicht folgt der Temperaturverlauf einer harmonischen Schwingung. In 5 bis 10 m Tiefe entspricht die im Boden gemessene Temperatur praktisch der Jahresmitteltemperatur des Standortes (ca. 8 bis 10 °C in Deutschland).

Mittels Erdwärmesonden (vertikale Bohrungen), Erdwärmekollektoren (horizontal und oberflächennah ins Erdreich eingebrachte Systeme) oder Erdwärmekörben, aber auch mit erdgebundenen Beton-Bauteilen wird die Wärme an die Oberfläche befördert. Meist kommen Wärmepumpen zum Einsatz, um Heiz-Anwendungen für Gebäude zu realisieren (Wärmepumpenheizung). Vor allem im Sommer kann mit einer Wärmepumpenheizung auch gekühlt werden, während im Winter sehr viel Heizmaterial eingespart werden kann.



## Geothermie aus Tunnel

Zur Gewinnung thermischer Energie aus Tunnelbauwerken wird auch austretendes [Tunnelwasser](#) genutzt, welches ansonsten aus Umweltschutzgründen in Abkühlbecken zwischengespeichert werden müsste, bevor es in örtliche Gewässer abgeleitet werden darf. Die erste solche bekannte Anlage wurde 1979 in der [Schweiz](#) beim Südportal des [Gotthard-Straßentunnels](#) in Betrieb genommen. Sie versorgt den Autobahnwerkhof von [Airolo](#) mit Wärme und Kälte. Weitere Anlagen sind zwischenzeitlich dazugekommen, welche vor allem Warmwasser aus [Bahntunneln](#) nutzen. Beim Nordportal des im Bau befindlichen [Gotthard-Basistunnels](#) tritt bereits heute Tunnelwasser mit Temperaturen zwischen 30 und 34 °C aus. Es soll bald in einem [Fernwärmenetz](#) genutzt werden. Das Tunnelwasser des neuen [Lötschberg-Bahntunnels](#) wird für eine [Störzucht](#) und für ein [Tropenhaus](#) verwendet.[9]

In [Österreich](#) wurde ein Verfahren entwickelt, um die Wärme aus Tunneln mittels eines Transportmediums zu nutzen, welches in eingemauerten [Kollektoren](#) zirkuliert. Für [konventionell vorgetriebene](#) Tunnel wurde das Prinzip unter dem Namen [TunnelThermie](#) bekannt. Durch die großen, erdberührten Flächen stellt diese relativ junge Technologie ein hohes Nutzungspotenzial besonders in innerstädtischen Tunnelbauwerken dar.

In [Deutschland](#) wurde ein Verfahren entwickelt, um Geothermie auch in [maschinell vorgetriebenen](#) Tunneln zu nutzen. Dazu sind [Kollektoren](#) in Betonfertigteile (sog. [Tübbinge](#)), die die Schale eines Tunnels bilden, eingebaut ([Energietübbing](#) genannt). Da innerstädtische Tunnel in schwierigen geologischen Verhältnissen häufig im [Schildvortrieb](#) aufgeföhren werden, bietet der Energietübbing die Möglichkeit, auch entlang dieser Strecken das geothermische Potenzial des Erdreichs zu nutzen. [10]

## Geothermie aus Bergbauanlagen

[Bergwerke](#) und ausgeföhrderte [Erdgaslagerstätten](#), die wegen der Erschöpfung der Vorräte stillgelegt werden, sind denkbare Projekte für Tiefengeothermie. Dies gilt eingeschränkt auch für tiefe Tunnelbauwerke. Die dortigen Formationswasser sind je nach Tiefe der Lagerstätte 60 bis 120 °C heiß, die Bohrungen oder Schächte sind oft noch vorhanden und könnten nachgenutzt werden, um die warmen Lagerstättenwässer einer geothermischen Nutzung zuzuföhren.

Derartige Anlagen zur Gewinnung der geothermischen Energie müssen so in die Einrichtungen zur Verwahrung des Bergwerks integriert werden, dass die öffentlich rechtlich normierten Verwahrungsziele, das stillgelegte Bergwerk (§ 55 Absatz 2 Bundesberggesetz und § 69 Abs. 2 Bundesberggesetz) geföhrenfrei zu halten, auch mit den zusätzlichen Einrichtungen erfüllt werden.

## Saisonale Wärmespeicher

Geothermie steht immer, also unabhängig von der Tages- und Jahreszeit und auch unabhängig vom Wetter zur Verfügung. Optimal wird eine Anlage, in der das oberflächennahe Temperaturniveau genutzt werden soll, dann arbeiten, wenn sie auch [zeithomogen](#) genutzt wird. Dies ist zum Beispiel dann der Fall, wenn im Winter mit Hilfe einer Wärmepumpe das oberflächennahe Temperaturniveau von ca. 10 °C zum Heizen genutzt wird und sich dabei entsprechend absenkt und im Sommer dann dieses Reservoir zur direkten Kühlung benutzt wird. Beim Kühlen im Sommer ergibt sich dabei eine Erwärmung des oberflächennahen Reservoirs und damit dessen teilweise oder vollständige Regeneration. Im Idealfall sind beide Energiemengen gleich. Der Energieverbrauch des Systems besteht dann im Wesentlichen aus der Antriebsleistung für die Wärme- bzw. Umwälzpumpe.

Verstärkt wird diese Funktion, wenn Geothermie mit anderen Anlagen z. B. [Solarthermie](#) kombiniert wird. Solarthermie stellt Wärme vorwiegend im Sommer zur Verfügung, wenn sie weniger gebraucht wird. Durch Kombination mit Geothermie lässt sich diese Energie im Sommer in

den unterirdischen [Wärmespeicher](#) einspeisen und im Winter wieder abrufen. Die Verluste sind standortabhängig, aber in der Regel gering.

Saisonale Speicher können sowohl oberflächennah, als auch tief ausgeführt werden. Sogenannte Hochtemperatur-Speicher ( $> 50\text{ °C}$ ) sind allerdings nur in größerer Tiefe denkbar. Beispielsweise verfügt das [Reichstagsgebäude](#) über einen derartigen Speicher.

## Nutzung von Erdwärme

Die Geothermie ist global gesehen eine langfristig nutzbare Energiequelle. Mit den Vorräten, die in den oberen drei Kilometern der Erdkruste gespeichert sind, könnte im Prinzip, rechnerisch und theoretisch der derzeitige weltweite Energiebedarf für über 100.000 Jahre gedeckt werden. Allerdings ist nur ein kleiner Teil dieser Energie technisch nutzbar und die Auswirkungen auf die Erdkruste bei umfangreichem Wärmeabbau sind noch unklar.

Bei der Nutzung der Geothermie unterscheidet man zwischen *Direkter Nutzung*, also der Nutzung der Wärme selbst, und *Indirekter Nutzung*, der Nutzung nach Umwandlung in Strom in einem Geothermiekraftwerk. Mit Einschränkungen sind zur Optimierung der Wirkungsgrade auch hier [Kraft-Wärme-Kopplungen](#) (KWK) möglich. Vor allem in dünn besiedelten Gegenden bzw. an weit von Siedlungen mit Wärmebedarf entfernten Kraftwerksstandorten lassen sich nur schwer, KWK-Prozesse realisieren. Nicht an jedem Kraftwerksstandort werden sich Abnehmer für die Wärme finden lassen.

### Direkte Nutzung

Nutzungsart	Temperatur in °C
Einkochen und Verdampfen, Meerwasserentsalzung	120
Trocknung von Zementplatten	110
Trocknung von organischem Material wie Heu, Gemüse, Wolle	100
Lufttrocknung von Stockfisch	90
Heizwassertemperatur zur Raumheizung (klassisch)	80
Kühlung	70
Tierzucht	60
Pilzzucht, Balneologie, Gebrauchtwarmwasser	50
Bodenheizung	40
Schwimmbäder, Eisfreihaltung, Biologische Zerlegung, Gärung	30
Fischzucht	20
Natürliche Kühlung	<10

#### Lindal-Diagramm

Frühe [balneologische](#) Anwendungen finden sich in den Bädern des Römischen Reiches, im Mittleren Königreich der Chinesen und der Ottomanen. In Chaudes-Aigues im Zentrum Frankreichs existiert das erste historische, geothermische Fernwärmenetz, dessen Anfänge bis ins 14. Jahrhundert zurückreichen.

Wärme wird heutzutage in vielfältiger Weise gebraucht (Wärmemarkt). Eine klassische Darstellung der dabei benötigten Temperaturen gibt das [Lindal-Diagramm](#) ([Baldur Lindal](#), 1918-1997).

### Heizen und Kühlen mit Erdwärme

Für die meisten Anwendungen werden nur relativ niedrige Temperaturen benötigt. Aus *tiefer Geothermie* können häufig die benötigten Temperaturen direkt zur Verfügung gestellt werden.

Reicht dies nicht, so kann die Temperatur durch [Wärmepumpen](#) angehoben werden, so wie dies meist bei der *oberflächennahen Geothermie* geschieht.

In Verbindung mit Wärmepumpen wird Erdwärme in der Regel zum Heizen und Kühlen von Gebäuden sowie zur Warmwasserbereitung eingesetzt (siehe [Wärmepumpenheizung](#)).

Eine weitere Nutzungsmöglichkeit ist die *natürliche Kühlung*, bei der Wasser mit der Temperatur des flachen Untergrundes, also der Jahresmitteltemperatur des Standortes, direkt zur Gebäudekühlung verwendet wird (ohne den Einsatz einer Wärmepumpe). Diese natürliche Kühlung hat das Potential, weltweit Millionen von elektrisch betriebenen Klimageräten zu ersetzen. Sie wird jedoch derzeit nur wenig angewendet.

Ebenfalls eine direkte Anwendung ist das *Eisfreihalten* von Brücken, Straßen oder Flughäfen. Auch hier wird keine Wärmepumpe benötigt, denn der Speicher wird durch Abführung und Einspeicherung der Wärme mit einer Umwälzpumpe von der heißen Fahrbahn im Sommer regeneriert. Dazu zählt auch das frostfreie Verlegen von Wasserleitungen. Die im Boden enthaltene Wärme lässt den Boden in Mitteleuropa im Winter nur bis in eine geringe Tiefe einfrieren.

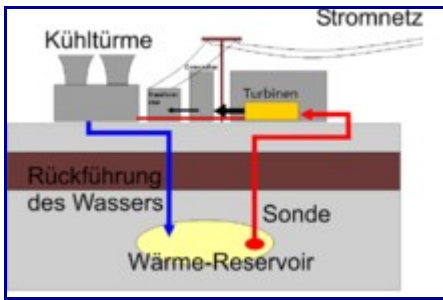
Für die Wärmenutzung aus *tiefer Geothermie* eignen sich niedrigthermale Tiefengewässer mit Temperaturen zwischen 40 und 150 °C, wie sie vor allem im süddeutschen [Molassebecken](#), im Oberrheingraben und in Teilen der norddeutschen Tiefebene vorkommen. Das Thermalwasser wird gewöhnlich aus 1000 bis 4500 Metern Tiefe über eine Förderbohrung an die Oberfläche gebracht, gibt den wesentlichen Teil seiner Wärmeenergie per Wärmeübertrager an einen zweiten, den „sekundären“ Heiznetzkreislauf ab. Ausgekühlt wird es anschließend über eine zweite Bohrung wieder mit einer Pumpe in den Untergrund verpresst, und zwar in die Schicht, aus der es entnommen wurde.

Nutzungsart	Energie TJ/a	Leistungsabgabe Kapazität MW
Wärmepumpen	214.236	35.236
Schwimmbäder	109.032	6.689
Raumheizung/Fernwärme	62.984	5.391
Gewächshäuser	23.264	1.544
Industrie	11.746	533
Aquakulturen	11.521	653
Trocknung (Landwirtschaft)	1.662	127
Kühlen, Schneeschmelzen	2.126	368
Andere Nutzung	956	41
<b>Total</b>	<b>438.071</b>	<b>50.583</b>

direkte Nutzung der Erdwärme weltweit  
(Stand: 2010, Quelle: Literatur/Statistik, 7.)

## Stromerzeugung

Zur Stromerzeugung wurde die Geothermie zum ersten Mal in [Larderello](#) in der Toskana eingesetzt. 1913 wurde dort von Graf [Piero Ginori Conti](#) ein Kraftwerk erbaut, in dem wasserdampfbetriebene Turbinen 220 kW elektrische Leistung erzeugten. Heute sind dort ca. 750 MW elektrische Leistung installiert. Unter der Toskana befindet sich Magma relativ dicht unter der Oberfläche. Dieses heiße Magma erhöht hier die Temperatur des Erdreiches soweit, dass eine wirtschaftliche Nutzung der Erdwärme möglich ist.



### Schemazeichnung für die Stromgewinnung aus Geothermie

Bei der hydrothermalen Stromerzeugung sind Wassertemperaturen von mindestens 100 °C notwendig. Hydrothermale Heiß- und Trockendampfvorkommen mit Temperaturen über 150 °C können direkt zum Antrieb einer Turbine genutzt werden. In Deutschland liegen allerdings die üblichen Temperaturen geologischer Warmwasservorkommen niedriger. Lange Zeit wurde Thermalwasser daher ausschließlich zur Wärmeversorgung im Gebäudebereich genutzt. Neu entwickelte [Organic-Rankine-Cycle-Anlagen \(ORC\)](#) ermöglichen eine Nutzung von Temperaturen ab 80 °C zur Stromerzeugung. Diese arbeiten mit einem organischen Medium (z. B. [Pentan](#)), das bei relativ geringen Temperaturen verdampft. [11] Dieser Dampf treibt über eine Turbine den Stromgenerator an. Eine Alternative zum ORC-Verfahren ist das [Kalina-Verfahren](#). Hier werden [Zweistoffgemische](#), so zum Beispiel aus Ammoniak und Wasser, als Arbeitsmittel verwendet. Für Anlagen in einem kleineren Leistungsbereich (< 200 kW) sind auch motorische Antriebe wie [Stirlingmotoren](#) denkbar. Geothermie ist [grundlastfähig](#).

Dabei muss beachtet werden, dass andere Wärmeträgermedien für die Kreisprozesse als Wasser wie z. B.

- [Pentan](#) (hochentzündlich) oder
- [Ammoniak](#) (giftig)

sind und daher aufwändige Vorkehrungen ergriffen werden müssen, um die Sicherheit solcher Anlagen im Betrieb und bei der Wartung zu gewährleisten.

### Stromerzeugung aus Geothermie über Hochenthalpielagerstätten

Die Stromerzeugung aus Geothermie ist traditionell in Ländern, die über [Hochenthalpielagerstätten](#) verfügen, in denen Temperaturen von mehreren hundert Grad Celsius in vergleichsweise geringen Tiefen (< 2000 m) angetroffen werden. Die Lagerstätten können dabei, je nach Druck und Temperatur, wasser- oder dampfdominiert sein. Bei modernen Förderungstechniken werden die ausgekühlten Fluide reinjiziert, so dass praktisch keine negativen Umweltauswirkungen, wie Schwefelgeruch, mehr auftreten.

### Stromerzeugung aus Geothermie über Niederenthalpielagerstätten [[Bearbeiten](#)]

In [Niederenthalpielagerstätten](#), wie sie ungünstigerweise in Deutschland meist angetroffen werden, ist wegen der geringen Temperaturspannung zwischen Vor- und Rücklauf der maximal mögliche [Wirkungsgrad](#) systembedingt niedriger als in Hochenthalpielagerstätten.

Durch andere Kreisprozesse (z. B. [Kalinaprozess](#) mit Ammoniak) versucht man den Abstand zwischen Vor- und Rücklauftemperatur zu erhöhen. Dabei ist aber zu beachten, dass die Sicherheitsanforderungen für den Umgang mit [Ammoniak](#) wesentlich anspruchsvoller sind als für den Umgang mit Wasser oder auch organischen Arbeitsmitteln.

Der Eigenstromverbrauch in solchen Anlagen kann bis zu 25 Prozent der erzeugten Strommenge [12] betragen.

# Geothermie weltweit

Geothermie ist eine bedeutende erneuerbare Energie. Einen besonderen Beitrag zu ihrer Nutzung leisten hierbei die Länder, die über Hochenthalpielagerstätten verfügen. Dort kann der Anteil der Geothermie an der Gesamtenergieversorgung des Landes erheblich sein, zum Beispiel [Geothermale Energie in Island](#).

## Direkte Nutzung international

Land	Energieumsatz pro Jahr TJ/a	Leistungsabgabe Jahresmittelwert GW
China	45.373	1,44
Schweden	36.000	1,14
USA	31.239	0,99
Island	23.813	0,76
Türkei	19.623	0,62
Ungarn	7.940	0,25
Italien	7.554	0,24
Neuseeland	7.086	0,22
Brasilien	6.622	0,21
Georgien	6.307	0,20
Russland	6.243	0,20
Frankreich	5.196	0,16
Japan	5.161	0,16
Summe	208.157	6,60

(Quelle: Literatur/Statistik, 3.)

Im Jahr 2005 waren zur direkten Nutzung von Geothermie weltweit Anlagen mit einer Leistung von 27.842 Megawatt (fast 28 Gigawatt) installiert. Diese haben Energie in der Größenordnung von 261.418 Terajoule pro Jahr (72.616 Gigawattstunden pro Jahr), das entspricht einer mittleren Leistungsabgabe im Jahr von 8,29 GW oder bei einer Weltbevölkerung 2005 von 6,465 Mrd. Menschen 1,28 Watt/Mensch – durchschnittlicher Primärenergieverbrauch 2.100 Watt/Mensch – oder 0,061 % des Primärenergieverbrauchs der Welt. Der [Ausnutzungsgrad](#) der installierten Leistung beträgt also etwa 30 % (diese Kennzahl ist wichtig für die überschlägige Kalkulation der Wirtschaftlichkeit von geplanten Anlagen, sie wird allerdings weitgehend durch die Verbraucherstruktur und weniger durch die Erzeuger, also die Wärmequelle bestimmt).

Länder mit Energieumsätzen größer als 5.000 TJ/Jahr zeigt die Tabelle.

Besonders hervorzuheben sind Schweden und Island. Schweden ist geologisch eher benachteiligt, hat aber durch eine konsequente Politik und Öffentlichkeitsarbeit diesen hohen Anteil bei der Nutzung erneuerbarer Energien vorwiegend zum Heizen (Wärmepumpenheizung) erreicht.

Auch in Island hat die Nutzung dieser Energie einen beträchtlichen Anteil an der Energieversorgung des Landes (ca. 53 %), vgl. [Geothermale Energie in Island](#). Es ist inzwischen weltweit Vorreiter auf diesem Gebiet.

Das 1981 in Betrieb genommene und laufend erweiterte Geothermische Kraftwerk Olkaria (121 MW, Potential 2 GW) im afrikanischen [Rift Valley](#) deckt mittlerweile 14 % des landesweiten Strombedarfs von [Kenia](#). Die Erfolge dabei führten zu Geothermie-Projekten in [Eritrea](#), [Uganda](#), [Tansania](#) oder [Äthiopien](#), die ebenfalls entlang des [Ostafrikanischen Grabenbruchs](#) liegen[13].

Im [Nahen Osten](#) wird in den [Vereinigten Arabischen Emiraten](#) das erste Geothermie-Projekt realisiert. Es soll zur Versorgung der Ökostadt [Masdar](#) mit Energie zur Kühlzwecken dienen. Zunächst wurden zwei Probebohrungen in Tiefen von 2800 und 4500 m gestartet.[\[14\]](#)

## Stromerzeugung international

Stromerzeugung aus Geothermie konzentriert sich traditionell auf Länder, die über oberflächennahe Hochenthalpie-Lagerstätten verfügen (meist Vulkan- oder [Hot-Spot-Gebiete](#)). In Ländern, die dies – wie zum Beispiel Deutschland – nicht haben, muss der Strom mit einem vergleichsweise niedrigen Temperaturniveau (Niederenthalpielagerstätte mit etwa 100–150 °C) erzeugt werden, oder es ist entsprechend tiefer zu bohren.

Weltweit ist geradezu ein Boom bei der Nutzung von Geothermie zur Stromerzeugung eingetreten. Die zum Ende des ersten Quartals 2010 installierte Leistung betrug 10.715 MW. Damit wird in den weltweit 526 geothermischen Kraftwerken 56 67.246 GWh/a grundlastfähige, elektrische Energie bereitgestellt.

In den letzten fünf Jahren wurde die Stromerzeugung stark ausgebaut. Auf einige Länder bezogen ergeben sich die in der linken Tabelle angegebenen Zuwächse für den Zeitraum 2005–2010.

<b>In 2005–2010 neu installierte elektrische Leistung</b>	
<b>Land (Auswahl)</b>	<b>MW<sub>e</sub></b>
USA	529
Indonesien	400
Island	373
Neuseeland	193
Türkei	62
El Salvador	53
Italien	52
Kenia	38
Guatemala	19
Deutschland	6

(Quelle: [\[15\]](#))

Rechte Tabelle – Länder mit einem bedeutsamen Anteil der Geothermie an der Gesamtversorgung (Stand 2005):

<b>Land</b>	<b>Anteil an der Stromerzeugung in %</b>	<b>Anteil am Wärmemarkt in %</b>
Tibet	30	30
San Miguel Island	25	keine Angabe
El Salvador	14	24
Island	19,1	90
Philippinen	12,7	19,1
Nicaragua	11,2	9,8
Kenia	11,2	19,2
Lihir Island	10,9	keine Angabe

Guadeloupe	9	9
Costa Rica	8,4	15
Neuseeland	5,5	7,1

(Quelle:)[16]

Niederenthalpie-Lagerstätten werden bisher weltweit wenig genutzt. Zukünftig könnten sie an Bedeutung gewinnen, da diese Nutzung weiter verbreitet möglich ist und nicht spezielle geothermische Bedingungen mit überdurchschnittlich hohen geothermischen Gradienten voraussetzt. Im November 2003 wurde das erste derartige Kraftwerk Deutschlands, das [Geothermiekraftwerk Neustadt-Glewe](#), mit 0,23 Megawatt Leistung in Betrieb genommen. Im Jahr 2007 folgte mit der 3-Megawatt Anlage des [Geothermiekraftwerkes Landau](#) die erste industrielle Installation.

In [Australien](#) wird in Cooperbecken das erste rein wirtschaftliche Geothermiekraftwerk auf der Basis HFR (Hot Fractured Rock) erstellt. Bisher sind zwei Bohrungen auf über 4.000 m Tiefe gebohrt und ein künstliches Rissystem erzeugt. Die Temperaturen sind mit 270 Grad höher als erwartet und auch die künstlich erzeugte Wasserwegsamkeit zwischen den Bohrungen ist besser als geplant.

Bezogen auf die pro-Kopf-Nutzung der Erdwärme ist Island heute Spitzenreiter mit 664 MW (2011) installierter Gesamtleistung ([Geothermale Energie in Island](#)). Die USA führen dagegen bei den Absolutwerten mit einer installierten Gesamtleistung von 3.093 MW (2010) vor den Philippinen mit 1.904 MW (2010) und Indonesien mit 1.197 MW (2010). (Quelle:)[17]

## (Rechtliche) Situation in Deutschland



Das [Geothermiekraftwerk Neustadt-Glewe](#) in Deutschland von Innen

*Geothermische Energie* ist nach dem deutschen [Bergrecht](#) ([Bundesberggesetz](#), BBergG, § 3 Abs. 3 Satz 2 Nr. 2b) ein *bergfreier* Rohstoff (*bergfreier Bodenschatz*), er gehört also dem Staat und das *Recht für Aufsuchung und Nutzung* wird an die jeweiligen Antragsteller [verliehen](#) (wenn sie nicht städtebaulich genutzt wird, weil dann der *Gewinnungsbegriff* im § 4 Abs. 2 Bundesberggesetz nicht einschlägig ist). Dies bedeutet, dass das Eigentum an einem Grundstück sich *nicht* auf die Erdwärme erstreckt. Für die *Aufsuchung der Erdwärme* bedarf es also einer Erlaubnis nach § 7 BBergG und für die *Gewinnung* einer Bewilligung nach § 8 BBergG. Die meisten Anlagen *oberflächennaher* Geothermie können jedoch bislang nach dem § 4 BBergG ohne ein solches Verfahren erstellt werden, wenn die Nutzung *auf dem eigenen Grundstück* erfolgt, *bei der genauen Abgrenzung herrscht die übliche föderale Vielfalt*. Auf jeden Fall sind Anlagen, die in das Grundwasser reichen, nach dem [Wasserrecht](#) [erlaubnispflichtig](#). Für Bohrungen, die länger als 100

Meter sind, ist außerdem ein bergrechtlicher [Betriebsplan](#) nötig.[18] Die Stadt [Freiburg im Breisgau](#) hat allerdings unter Anderem in Folge der in [Staufen](#) nach einer Probebohrung aufgetretenen Geländehebungen sowie der in [Basel](#) durch eine solche ausgelösten Erdbeben ihre Auflagen für oberflächennahe Geothermie-Projekte auch für Bohrungen unter 100 m verschärft.[19]

Nach zumindest in zeitlichem Zusammenhang mit Erdwärmennutzungs-Sondierungen aufgetretenen Erdabsenkungen in [Leonberg](#) und [Renningen](#) (beide im baden-württembergischen [Landkreis Böblingen](#)) reduzierte das Landes-Umweltministerium die maximale Bohrtiefe für die oberflächennahe Geothermie; die Bohrungen dürfen nurmehr bis zur obersten [Grundwasser führenden Schicht](#) niedergebracht werden.[20][21]

Die *geothermische Stromerzeugung* steckt in Deutschland noch in den Anfängen. Unter anderem beschäftigt sich jedoch das [Deutsche GeoForschungsZentrum](#) in Potsdam intensiv mit diesem Thema.[22] Der Niedersächsische Forschungsverbund „Geothermie und Hochleistungsbohrtechnik – gebo“[23] verfolgt die Zielsetzung, neue Konzepte zur geothermischen Energiegewinnung in tiefen geologischen Schichten mit hoher Effizienz und Effektivität sowie geringerem geologischen und technischen Risiko zu entwickeln, um die bislang noch fehlende Wirtschaftlichkeit dieser regenerativen Energiequelle herzustellen. Vier Kraftwerke (in [Neustadt-Glewe](#), [Unterhaching](#) bei München, Bruchsal und Landau) erzeugen Strom aus Geothermie.

Zahlreiche weitere Projekte sind im Bau, so dass in den nächsten Jahren mit einem Anstieg beim Anteil der geothermisch erzeugten Strommenge zu rechnen ist.

Recht weit verbreitet ist hingegen die **direkte** energetische Nutzung von *hydrothermalen Geothermie* beim Betrieb von Fern- und Nahwärmenetzen. Eine Übersicht über die in Deutschland vorhandenen Anlagen hydrogeothermaler Nutzung ist in dem Verzeichnis Geothermischer Standorte[24] zu finden. Aus den derzeit bekannten Ressourcen hydrothermalen Geothermie könnte bis zu 29 Prozent der in der Bundesrepublik benötigten Wärme bereitgestellt werden.

In Deutschland ist die direkte Nutzung oberflächennaher Geothermie ([Wärmepumpenheizung](#)) schon weit verbreitet, 2010 wurden 51.000 neue Anlagen installiert [25]. Insgesamt waren 2009 etwa 330.000 Anlagen installiert[26]. Erstmals flächig erforscht werden soll der Einsatz von oberflächennaher Geothermie im **Erdwärmepark** in [Neuweiler](#) im Nordschwarzwald; einem Baugebiet, in dem ausschließlich Erdwärme zu Zwecken der Gebäudeheizung und –kühlung verwendet wird. Hier soll im Rahmen eines Modellprojekts auch das Heizen bzw. Kühlen der vorhandenen Straßen erstmals umgesetzt werden. Oberflächennahe Geothermie wird auch in Bayern u. a. in der Umgebung von [Ansbach](#) untersucht,[27] wo es auch einen Ausbildungsschwerpunkt an der dortigen Fachhochschule gibt.

Für Deutschland ergibt sich laut der Zahlen des BMU für das Jahr 2004 das folgende Bild:

Der Energieerzeugung im Jahr 2004 aus der Geothermie von 5.609 TJ/a (entsprechend einer mittleren Leistungsabgabe von 0,178 GW im Jahr 2004) steht ein Primärenergieverbrauch in Deutschland im selben Jahr von 14.438.000 TJ/a (entsprechend einer mittleren Leistung von 458 GW) gegenüber. Es wurden also im Jahr 2004 0,04 % des Primärenergieverbrauchs in Deutschland durch Geothermie gedeckt.

Die Geothermie-Branche rechnet in Deutschland mit einem jährlichen Wachstum von 14 Prozent. Im laufenden Jahr (Stand: März 2005) werden sich der Umsatz auf etwa 170 Millionen Euro und die Investitionen auf 110 Millionen Euro belaufen. Etwa 10.000 Menschen arbeiten bereits direkt oder indirekt für die geothermische Energieversorgung (Quelle, siehe Literatur/Statistik, 2.).

### **Direkte Nutzung**

Im Bereich der tiefen Geothermie gibt es in Deutschland zurzeit 30 Installationen mit Leistungen über 2 MW. Diese leisten zusammen 105 MW (Quelle, siehe Literatur/Statistik, 4.). Die meisten dieser Einrichtungen stehen im



- Norddeutschen Becken, in der
- Süddeutschen [Molasse](#) oder in der
- [Oberrheinischen Tiefebene](#)/Oberrheingraben.

Der norddeutsche Raum verfügt geologisch bedingt über ein großes Potential geothermisch nutzbarer Energie in thermalwasserführenden Porenspeichern des [Mesozoikums](#) in einer Tiefe von 1000 bis 2500 m mit Temperaturen zwischen 50 °C und 100 °C. Die [Geothermische Heizzentrale](#) (GHZ) in Neubrandenburg war bereits in der DDR eines der Pilotprojekte zur Nutzung der Geothermie.

Das Molassebecken in Süddeutschland (Alpenvorland) bietet günstige Voraussetzungen für eine geothermische Nutzung. Zahlreiche balneologische Erschließungen in Baden-Württemberg (Oberschwaben) und Bayern (Bäderdreieck) bestehen bereits seit einigen Jahrzehnten. Darüber hinaus existieren in Südbayern derzeit neun groß-energetische Nutzungen (geothermisch betriebene Fernwärmenetze in Simbach-Braunau, Straubing, Erding, Unterschleißheim, Pullach, München-Riem, Unterhaching, Unterföhring, Aschheim) und zahlreiche weitere sind in Planung oder im Bau. Das Thermalwasser stammt aus einer Kalksteinschicht (vor allem Kluft- Karstgrundwasser) des Oberjura (Malm) an der Basis des nordalpinen Molassetrogs. Diese Gesteine treten entlang der Donau an der Erdoberfläche in Erscheinung und tauchen in Richtung Süden am Alpenrand auf bis über 5000 m unter die Erdoberfläche ab. Dort sind auch Temperaturen höher als 140 °C zu erwarten.

Der Oberrheingraben bietet deutschlandweit besonders gute geologisch-geothermische Voraussetzungen (u. a. hohe Temperatur, Wärmefluss, Struktur im Untergrund). Allerdings sind die Thermalwässer im Oberrheingraben reich an gelösten Inhaltsstoffen, was hohe Anforderungen an die Anlagentechnik stellt. An verschiedenen Standorten sind Projekte in Planung und im Bau. Für viele Regionen sind bereits Konzessionen erteilt worden.

Untersucht wird zudem beispielsweise, ob in das [Fernwärmenetz](#) der [Ruhr-Universität](#) und der [Hochschule Bochum](#) Erdwärme eingespeist werden kann. Auch Gebäude der [RWTH Aachen](#) sollen mittels Geothermie beheizt werden (Tiefe Erdwärmesonde).

In [Bad Urach](#) (Schwäbische Alb) konnte ein langjährig betriebenes und weit fortgeschrittenes Projekt aus finanziellen Gründen nicht vollendet werden.[28]

Baden-Württemberg hat genau wie Nordrhein Westfalen ein Förderprogramm für Erdwärmesonden-Anlagen für kleine Wohngebäude aufgelegt, mit einer Förderung der Bohrmeter, siehe Weblinks.

Zusätzlich gibt es in Deutschland mehr als 50.000 oberflächennahe Geothermieanlagen, bei denen Wärmepumpen zum Anheben der Temperatur eingesetzt werden. Diese haben zusammen eine Leistung von mehr als 500 MW. Im Vergleich zu Schweden, Schweiz oder Österreich ein eher geringer Marktanteil. Im Jahr 2000 betrug er in Deutschland 2 bis 3 %, in Schweden 95 %, und in der Schweiz 36 % (Siehe auch [Wärmepumpenheizung](#))

## **Stromerzeugung**

Das erste geothermische Kraftwerk in Deutschland ist 2004 in Mecklenburg-Vorpommern als Erweiterung des bereits 1994 errichteten geothermischen Heizwerks in Betrieb genommen worden. Die elektrische Leistung des [Geothermiekraftwerks Neustadt-Glewe](#) beträgt bis zu 230 kW. Aus einer Tiefe von 2250 Metern wird etwa 97 °C heißes Wasser gefördert und zur Strom- und Wärmeversorgung genutzt. Im Jahr 2004 betrug die erzeugte Strommenge 424 000 Kilowattstunden (Quelle: AGEE-Stat/BMU); angestrebt werden jährlich ca. 1,2 Mio. Kilowattstunden (entspricht einer mittleren Leistung von 48kW bzw. 137kW). Die Inbetriebnahme stellt einen Meilenstein in der Entwicklung der geothermischen Stromerzeugung in Deutschland dar, dem weitere Projekte folgen werden. Der Bau von Geothermiekraftwerken erlebt in Deutschland derzeit geradezu einen Boom. Viele Kraftwerke sind im Bau oder in der Planung, die meisten davon am Oberrhein und in

der oberbayrischen [Molasse](#). Die Bergämter haben dort zahlreiche [Aufsuchungsgenehmigungen](#) vergeben (bis 2007 über 100).

Die für die Stromerzeugung erforderlichen Wärmereservoirs mit hohen Temperaturen sind in Deutschland nur in großer Tiefe vorhanden. Die für den Betrieb erforderlichen Temperaturen zu erschließen ist mit einem hohen finanziellen Aufwand verbunden. Geologische und bohrtechnische Erschließungsrisiken müssen dabei im Verhältnis zum finanziellen Aufwand abgewogen werden. Forschungsarbeiten zur Nutzung tief liegender bzw. weitgehend wasserundurchlässiger Gesteine laufen und versprechen die Möglichkeiten zur Stromerzeugung weiter zu erhöhen. Eine Studie des Deutschen Bundestages gibt das Potential der Stromproduktion mit  $10^{21}$  Joule an.

### Geplante und realisierte Geothermieranlagen (Stromerzeugung) in Mitteleuropa

	Geoth. Leistung in MW	Elektr. Leistung in MW	Temperatur in °C	Förderrate in m <sup>3</sup> /h	Bohrtiefe in m	Geplante Inbetriebnahme Jahr
<u>Deutschland</u>						
<a href="#">Groß Schönebeck</a>	10	1,0	150	< 50	4.294	2008
<a href="#">Neustadt-Glewe</a>	10	0,21	98	119	2.250	Im Kraftwerksbetrieb seit 2003
<a href="#">Bad Urach</a> (HDR-Pilotprojekt)	6–10	ca. 1,0	170	48	4.500	Bohrarbeiten beendet wg. Auslauf der Finanzierung
<a href="#">Bruchsal</a>	4,0	ca. 0,5	118	86	2.500	Im Kraftwerksbetrieb seit 2009
<a href="#">Karlsruhe</a>	28,0		> 150	270	3.100	unbekannt Im Probetrieb seit 2007. Zeitweise eingestellt wegen leichter Beben. Wiederaufnahme mit reduziertem Pumpendruck. <a href="#">[1]</a> .
<a href="#">Landau</a>	22	3	159	70	3.000	
<a href="#">Insheim</a>		4,0–5,0 <a href="#">[29]</a>	>155		3.600	voraussichtlich 2011
<a href="#">Schaidt</a>			>155		>3.500	(Bohrbeginn 2011)
<a href="#">Offenbach an der Queich</a>	30–45	4,8–6,0	160	360	3.500	gestoppt wg. Bohrlochinstabilität
<a href="#">Riedstadt</a>	21,5	ca. 3,0		250	3.100	unbekannt 2005 aufgegeben, <a href="#">[31]</a> weil Erdöl statt Wasser gefunden wurde (drei Bohrungen im Probetrieb)
<a href="#">Speyer</a> <a href="#">[30]</a>	24–50	4,8–6,0	150	450	2.900	
<a href="#">Unterhaching</a>	40	3,4	122	> 540	3.577	seit 2008 im Betrieb
<a href="#">Sauerlach</a>	ca. 80	ca. 5 <a href="#">[32]</a>	140	> 600	> 5.000	Ende 2011 (Bohrarbeiten erfolgreich beendet)

<a href="#">Dürnhaar</a>	ca. 50	ca. 5,0	135	> 400	> 4.000	2011 (Bohrarbeiten erfolgreich beendet)
<a href="#">Mauerstetten</a>	40	4,0–5,0	120–130	ca. 300	4.100	unbekannt (zu geringe Schüttung) <a href="#">[33]</a>
<a href="#">Kirchstockach</a>	50	5	130	450	> 4.000	2011 (Bohrarbeiten erfolgreich beendet)
<a href="#">Laufzorn (Oberhaching)</a>	50	5	130	470	> 4.000	2011 (Bohrarbeiten erfolgreich beendet)
<a href="#">Kirchweidach</a>			120	470	> 3.000	2012 (Bohrbeginn 2010)
<a href="#">Bernried</a>			150		> 4.500	2013 (Bohrbeginn 2011)
<a href="#">Taufkirchen</a>			120	470	> 3.000	2012 (Bohrbeginn 2011)
<a href="#">Geretsried</a>					> 4.000	2013 (Bohrbeginn 2011)
<u>Österreich</u>						
<a href="#">Altheim (Oberösterreich)</a>	18,8	0,5	105	ca. 300–360	2.146	Im Kraftwerksbetrieb seit 2000
<a href="#">Bad Blumau</a>	7,6	0,18	107	ca. 80–100	2.843	Im Kraftwerksbetrieb seit 2001
<u>Frankreich</u>						
<a href="#">Soultz-sous-Forêts</a> <a href="#">[34]</a>	12,0	2,1	180	126	5.000	Testbetrieb seit 2008
<u>Schweiz</u>						
<a href="#">Basel</a>	17,0	6,0	200		5.000	Projekt eingestellt wegen Beben <a href="#">[35]</a>
<a href="#">St. Gallen</a>	ca. 30	3-5	150-170		ca. 4.000	Projekt in Planung, voraussichtlich 2012 <a href="#">[36]</a>

Quelle:[\[37\]](#)

## Staatliche Fördermaßnahmen

### Einspeisevergütung

Durch die Novellierung des EEG (Erneuerbare Energien Gesetz) zum 1. Januar 2009 wird die geothermische Stromerzeugung mit bis zu 0,23 EUR pro eingespeister Kilowattstunde deutlich höher gefördert als zuvor. Die Förderung setzt sich zusammen aus:

- Grundvergütung 16 Cent pro eingespeister Kilowattstunde.
- Bonus von 4 Cent für Anlagen die bis 2015 ans Netz gehen.
- Bonus von 3 Cent bei Auskopplung von mindestens 20% Fernwärme.

Als zusätzliche Vergünstigung darf die Einspeisevergütung für die gesamte Brutto-Stromproduktion der Anlage in Anspruch genommen werden. Dies entspricht einer EEG-einheitlichen Regelung und gilt für alle Formen erneuerbarer Stromerzeugung. Der Eigenenergiebedarf beträgt bei deutschen

Geothermiekraftwerken ca. 30% der Bruttostromproduktion (größter Verbraucher sind die Förderpumpen). Dieser Eigenenergiebedarf darf aus günstigeren Netztarifen zugekauft werden und muss auch nicht aus regenerativen Quellen stammen.

### **Marktanreizprogramm des BMU**

Anlagen der tiefen Geothermie werden aus dem MAP (Marktanreizprogramm des Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) durch zinsverbilligte Darlehen mit Tilgungszuschüssen gefördert. Förderfähig sind:

- Die Errichtung der Tiefengeothermieanlage („Anlagenförderung“)
- Die Realisierung der Förder- und Injektionsbohrung („Bohrkostenförderung“) sowie unvorhergesehene Mehrkosten gegenüber der Bohrplanung („Mehraufwendungen“)
- Die Reduzierung des Fündigkeitsrisikos durch Haftungsfreistellungen für bis zu 80% der Bohrkosten („Kreditprogramm Fündigkeitsrisiko“)
- Die Errichtung von Wärmenetzen („Wärmenetze“)

Die KfW kann daraus Darlehen pro Projekt in einer Höhe von bis zu 80% der Bohrkosten vergeben. Diese Darlehen werden im Fall der Nichtfündigkeit haftungsfrei gestellt, d. h. sie müssen vom Kreditnehmer ab diesem Zeitpunkt nicht weiter zurückgezahlt werden. Das „KfW Sonderprogramm“ für allgemeine Projektfinanzierungen, wie u. a. Geothermieprojekte, refinanziert Banken mittels KfW-Krediten bis zu einem Kreditbetrag von i.d.R. 200 Mio. Euro pro Projekt.

Aufgrund der mit der Bohrung verbundenen hohen Investitionskosten und Risiken besteht bei Geothermieprojekten ein hohes Anfangshemmnis. Dies erschwert und verteuert die Finanzierung.

## **Ökonomische Aspekte**

Die geringe Nutzung der überall vorhandenen und vom Energieangebot her kostenlosen Geothermie liegt darin begründet, dass sowohl der Wärmestrom mit  $\approx 0,06 \text{ Watt/m}^2$  als auch die Temperaturzunahme mit der Tiefe mit  $\approx 3 \text{ K/100 m}$  in den zugänglichen Teilen der Erdkruste, von besonderen Standorten abgesehen, so gering sind, dass eine Nutzung zu Zeiten niedriger Energiepreise nicht wirtschaftlich war. Durch das Bewusstwerden des  $\text{CO}_2$ -Problems und der absehbaren Verknappung der fossilen Energieträger setzte eine stärkere geologische Erkundung und technische Weiterentwicklung der Geothermie ein.

Da die eigentliche Energie, die Geothermie, kostenlos ist, wird die Wirtschaftlichkeit einer Geothermienutzung vor allem durch die Investitionskosten (Zinsen) und Unterhaltskosten der Anlagen bestimmt.

Unter den gegenwärtigen politischen Rahmenbedingungen ([Erneuerbare-Energien-Gesetz](#)) ist eine Wirtschaftlichkeit bei größeren Geothermieanlagen auch in Deutschland in vielen Gebieten, wie zum Beispiel in Oberbayern, Oberrheingraben und Norddeutsches Becken, erreichbar.

Grundsätzlich sind größere Geothermieanlagen (über 0,5 MW und mit einer Tiefe von mehr als 500 m) immer mit gewissen Fündigkeitsrisiken behaftet, da die tieferen Erdschichten eben nur punktuell und oft in geringem Ausmaß erkundet sind. Dabei lassen sich die anzutreffenden Temperaturen meist recht gut prognostizieren. Die bei hydrothermalen Anlagen aber besonders relevanten Schüttmengen sind jedoch häufig nicht gut vorhersehbar. Neuerdings werden allerdings Risikoversicherungen dazu angeboten. Zur Minimierung des Fündigkeitsrisikos wurde das [Geothermische Informationssystem](#) (gefördert vom [BMU](#)) erstellt.

Die oberflächennahe Erdwärmennutzung für die Heizung von Gebäuden mittels einer Wärmepumpe ist bereits in vielen Fällen konkurrenzfähig. Wärmepumpenheizungen bestehen in der Regel aus einer oder mehreren Erdwärmesonde(n) und einer [Wärmepumpe](#) bzw. mehreren parallel geschaltet. 2004 wurden in Deutschland etwa 9.500 neue Anlagen errichtet, 2006 waren es schon 28.000, der

Bestand übersteigt 130.000. In der Schweiz waren es 2004 rund 4.000 neue Anlagen mit Erdwärmennutzung. Der Marktanteil in Deutschland ist im Gegensatz zu Ländern wie Schweden, der Schweiz oder Österreich jedoch noch gering.

Bei den Betriebskosten spielt die Beständigkeit der Anlagen gegen Verschleiß (z. B. bewegte Teile einer Wärmepumpe oder eines Stirlingmotors) eine Rolle. Bei offenen Systemen kann Korrosion durch aggressive Bestandteile im wärmetransportierenden Wasser entstehen (alle Teile in der Erde und die Wärmeübertrager). Diese früher bedeutenden Probleme sind heute jedoch technisch weitestgehend gelöst.

## Ökologische Aspekte

### Energiepotential

Die Geothermie wird zu den regenerativen Energiequellen gezählt, da ihr Potenzial als sehr groß und nach menschlichem Ermessen unerschöpflich gilt. Der kumulierte Energieaufwand (KEA, auch: graue Energie) von Geothermie liegt in dem Bereich von  $0,12 \text{ kWh}_{PE} / \text{kWh}_{th}$ . [38]

Theoretisch würde allein die in den oberen drei Kilometern der Erdkruste gespeicherte Energie ausreichen, um die Welt für etwa 100.000 Jahre mit Energie zu versorgen. Allerdings ist nur ein sehr kleiner Teil dieser Energie technisch nutzbar. Im *Arbeitsbericht 84 des Büros für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag* [39] wurde 2003 ein jährliches technisches Angebotspotential aus geothermischer „Stromerzeugung von ca. 300 TWh/a für Deutschland ermittelt, was etwa der Hälfte der gegenwärtigen Bruttostromerzeugung entspricht“. Die Berechnungen in der Studie ermitteln einen nachhaltigen Nutzungszeitraum von eintausend Jahren für diese Form von 50 Prozent geothermischer Gesamtstromerzeugung. Entscheidenden Einfluss bei der Realisierung einer nachhaltigen Nutzung hat das Wärmeträgerfluid (Wasser oder Dampf). Wird die Wärme über das Fluid im großen Maßstab dem Untergrund entzogen, so wird, in Abhängigkeit von den geologischen Rahmenbedingungen, regional mehr Wärme entzogen, als durch den natürlichen Wärmestrom zunächst „nachfließen“ kann. So gesehen wird die Wärme zunächst „abgebaut“. Nach Beendigung der Nutzung werden sich jedoch die natürlichen Temperaturverhältnisse nach einer gewissen Zeit wieder einstellen. Das Entnahmeszenario der Studie berücksichtigt die Wärmeströme in der Potenzialberechnung. Geothermie ist wie Biomasse oder Wasserkraft bei der Stromerzeugung und nicht wärmegesteuerten Kraftwerken grundlastfähig.

### Regeneration des Wärmereservoirs

Da bei Geothermiekraftwerken in Regionen mit geringem oder durchschnittlichem Wärmestrom mehr Wärmeenergie aus der Erdkruste entnommen wird, als natürlich nachströmen kann, wird die in der Erdkruste gespeicherte Energie abgebaut. Die Nutzungsdauer eines Kraftwerks bzw. Standortes ist also je nach Rate der entnommenen Energie begrenzt. Allerdings regeneriert sich das Wärmereservoir durch den natürlichen Wärmestrom nach einiger Zeit. Die Regeneration eines Wärmereservoirs im Bereich der Kaltwasserinjektion richtet sich sehr stark nach den geologischen Rahmenbedingungen. Wichtig ist dabei, ob die Wärme ausschließlich über Wärmeleitung von unten nachgeführt wird oder zusätzlich Wärme über den Transport von warmem Wasser konvektiv nachgeführt wird.

### Regeneration in klüftigen System mit dem Wärmetransport durch Konvektion

Wärmetransport durch Konvektion ist immer effektiver, da das Problem der Begrenzung des Wärmetransports durch den Widerstand des Gebirgskörpers gegen die Wärmeleitung umgangen wird. Deswegen sollte ein Investor für Geothermieprojekte nach Möglichkeit geologische Regionen suchen, in denen durch Klüfte warmes oder heißes Tiefenwasser nachströmt (offene Klüftsysteme):

- Karstgebiete (z. B. bayerisches Molassebecken) oder
- Zonen mit offenen Kluftsystemen (z. B. der Oberrheingraben)

sind daher für Geothermieprojekte bevorzugte Regionen in Deutschland.

In einer Modellrechnung über den Wärmetransport wurde in diesem Zusammenhang exemplarisch für einen Standort im bayerischen Molassebecken das Folgende festgestellt: Für ein hydrothermales System im Malmkarst mit 50l/s Reinjektionsrate und 55 °C Reinjektionstemperatur wurde die folgende Zeitdauer für die vollständige Wärmeregeneration unmittelbar um die Injektionsbohrung nach Abschluss des Dublettenbetriebs bei rein konduktivem Wärmetransport berechnet: Nach 2.000 Jahren wird eine Temperatur von 97 °C und etwa 8.000 Jahre nach Betriebsende die Ausgangstemperatur von 99,3 °C wieder erreicht: „Die Modellierung der Wärmeregeneration nach Abschluss eines 50 Jahre währenden Betriebszeitraumes unter den gegebenen Randbedingungen verdeutlicht, dass frühestens nach 2000 Jahren mit einer weitgehenden thermischen Regeneration des Reservoirs im Malm zu rechnen ist“. Die Modellrechnung verdeutlicht aber auch das hohe Potenzial des Reservoirs: „Im vorliegenden Szenario kann zusammengefasst gesagt werden, dass im Betriebszeitraum von 50 Jahren erwartungsgemäß nur von einer geringen thermischen Beeinflussung des Nutzhorizontes auszugehen ist, da die erschlossene Malm-Mächtigkeit mehrere 100 Meter beträgt und somit ein ausreichend großes Wärmereservoir zur Wiedererwärmung des injizierten Wassers zur Verfügung steht. Exemplarisch zeigt ... die radiale Kaltwasserausbreitung im Injektionshorizont zu diesem Zeitpunkt mit einem Radius von ca. 800 m.“[\[40\]](#)

### **Wärmetransport ausschließlich über die Wärmeleitung in dichtem Gestein**

In diesen Fällen kann die nachhaltige Entnahme ausschließlich aus dem Wärmestrom abgedeckt werden, der durch die Wärmeleitung geliefert wird. Der Wärmestrom hängt dann vom Wärmeleitkoeffizienten ab. Die Entnahme ist dann so zu gestalten, dass während der geplanten Betriebsdauer die Rücklauftemperatur nicht unter den Mindestwert absinkt, der durch das Nutzungskonzept bestimmt wird.

## **Risiken**

### **Risiken für die Sicherheit eines Geothermieprojekts**

Die oberflächennahe Geothermie kann bei der Einhaltung des [Standes der Technik](#) und einer ausreichend intensiven Überwachung und Wartung so errichtet und betrieben werden, dass in der Regel keine erheblichen Risiken von solchen Anlagen ausgehen. Durch die stark angestiegene Verbreitung dieser Nutzungsform, steigt jedoch auch entsprechend das Risiko von technischem Versagen oder von Fehlplanungen.

Die tiefe Geothermie muss sehr sorgfältig geplant und durchgeführt werden, um die damit verbundenen Risiken so gering wie möglich zu halten. Die Tiefbohrertätigkeiten werden daher von zahlreichen Behörden intensiv überwacht und setzen ein umfangreiches Genehmigungsverfahren voraus. So wird das gegebene Risiko als *planbar herstellbar* bezeichnet, wenn z. B. folgende Aspekte beachtet werden:

### **Risiken seismischer Ereignisse**

Kleinere, kaum spürbare Erderschütterungen (Seismizität) sind bei Projekten der tiefen Geothermie in der Stimulationsphase (Hochdruckstimulation) möglich. Im späteren Verlauf, soweit nur der Dampf entzogen wird und nicht reinjeziert wird, ist es durch Kontraktion des Speichergesteins zu Landabsenkungen gekommen (z. B. in Neuseeland, Island, Italien). Diese Probleme führten bereits zur Einstellung von Geothermieprojekten (z. B. *Geysers-HDR-Project der AltaRock Energy Inc.* [\[41\]](#) Kalifornien 2009[\[42\]](#) und *Kleinhüningen bei Basel* 2009).

Die Gesteine des [Cooperbeckens](#) in Australien gelten für wirtschaftliche Bohrtiefen und unabhängig von vulkanischer Aktivität als vergleichsweise heiß.[\[43\]](#) Als das Reservoir angebohrt wurde, kam es zu einem kleinen Erdbeben mit einer [Magnitude](#) auf der [Richterskala](#) von 3,7.[\[44\]](#)

Die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten seismischer Ereignisse und deren Intensität richtet sich stark nach den geologischen Gegebenheiten (z. B. wie [permeabel](#) die wasserführende Gesteinsschicht ist) sowie nach der Art des Nutzungsverfahrens (z. B. mit welchem Druck das Wasser in das Gestein injiziert wird oder mit welchem Druck stimuliert wird).

Generell ist eine verlässliche Bewertung der Risiken durch tiefe Geothermie in Deutschland nur begrenzt möglich, da hierzulande bislang nur wenige langfristige Erfahrungswerte vorliegen.

Ob *stärkere* Schadbeben durch Geothermie ausgelöst werden können, ist derzeit noch umstritten, war aber die Grundlage für die Einstellung des Vorhabens in Basel.

Die Seismizitäten von Basel und Landau verdeutlichen, dass eine sorgfältige Planung und Ausführung für die Aufrechterhaltung der Sicherheit in einem Geothermieprojekt wichtig ist:

#### **Kleinhüningen bei Basel/Schweiz (2006)**

Bei dem Geothermieprojekt [Deep Heat Mining Basel](#) in Kleinhüningen im Großraum [Basel/Schweiz](#) gab es seit dem 8. Dezember 2006 im Abstand von mehreren Wochen bis zu einem Monat fünf leichte Erschütterungen mit abnehmender [Magnitude](#) (von 3,4 bis 2,9).[\[45\]\[46\]\[47\]](#) Dadurch soll ein Schaden zwischen 3 und 5 Mio. [Schweizer Franken](#) (ca. 1,8 bis 3,1 Mio. Euro) entstanden sein[\[48\]](#), verletzt wurde niemand.

Die Staatsanwaltschaft in Basel hat gegen den Geschäftsführer der Firma Geothermal Explorers Ltd. wegen

- Sachbeschädigung mit großem Schaden[\[49\]](#) sowie
- der Verursachung eines Einsturzes[\[50\]](#)

Anklage erhoben.[\[51\]](#) Das Gericht hat den Geologen jedoch freigesprochen, das [strafrechtliche](#) Verfahren ist damit beendet.[\[52\]\[53\]](#)

Inzwischen wurde entschieden, das Vorhaben nicht fortzusetzen, da gemäß einer am 10. Dezember 2009 vorgestellten Risikoanalyse allein während des Anlagenbaus mit weiteren schweren Erdbeben und mit Schäden von rund 40 Millionen Franken gerechnet wird. Während des Betriebs sind zusätzlich Schäden von rund sechs Millionen Schweizer Franken pro Jahr zu erwarten.[\[54\]](#)

Die Erde beruhigt sich nach derartigen Vorfällen meist nur langsam und es kommt oft zu einer ganzen Serie kleinerer Erdstöße.

#### **Landau in der Pfalz (2009)**

Auch in [Landau in der Pfalz](#) hat es am 15. August und 14. September 2009 leichte Erderschütterungen gegeben, die mit dem [Geothermiekraftwerk Landau](#) in Verbindung gebracht werden.[\[55\]](#) Die Erdstöße hatten eine Stärke von ca. 2,5 auf der Richterskala und sind ebenfalls als leicht einzustufen. Die zuständige Aufsichtsbehörde geht davon aus, dass die in ihrem Auftrag durchgeführten Berechnungen von vier unabhängigen Instituten alle bestätigt haben, „*dass das Epizentrum in der Nähe des Kraftwerks liegt*“. Andere Auslöser könnten daher gemäß dem Bericht nahezu ausgeschlossen werden.[\[56\]](#) Dieser Meinung ist demnach auch die [Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe](#) (BGR). Nach Erfüllung der Auflagen des Landesbergamtes (Errichtung von Messstationen, Erhöhung der Versicherungsschutzes sowie möglichst wenig Druckdifferenz beim Anfahren und Abstellen des Kraftwerks) hat das Kraftwerk den Betrieb wieder aufgenommen.[\[57\]](#) Inzwischen liegt der Abschlussbericht[\[58\]](#) der *Expertengruppe „Seismisches Risiko bei hydrothermalen Geothermie“* vor, die feststellt, dass das Erdbeben vom 15. August 2009 bei Landau sich den Ergebnissen der Expertengruppe zur Folge in unmittelbarer Nähe der

Bohrloch-Landepunkte ( $\leq 2$  km entfernt) und im gleichen Tiefenbereich wie das geothermisch genutzte Reservoir befindet. *Die Expertengruppe ist der Meinung, dass ein kausaler Zusammenhang zwischen der Seismizität seit November 2007 im Bereich um Landau, die auch das Erdbeben vom 15. August 2009 beinhaltet, und der geothermischen Energiegewinnung in Landau sehr wahrscheinlich ist, da sowohl ein enger räumlicher als auch ein zeitlicher Zusammenhang gegeben ist. ... Die nach derzeitigem Stand der Wissenschaft anerkannte Theorie zur Ursache fluidinduzierter Erdbeben besagt, dass durch die Injektion von Wasser in tiefe Gesteinsschichten der Porenwasserdruck erhöht werden kann. Hierdurch wird die Scherfestigkeit auf präexistenten Scher-/Bruchflächen herabgesetzt. Wenn die Spannung im Gestein nun schon vorher nahe der Scherfestigkeit lag, kann dieses Herabsetzen dazu führen, dass die Scherspannung im Untergrund die Scherfestigkeit überschreitet und somit ein Erdbeben ausgelöst wird. Bei diesem Vorgang werden bereits im Untergrund vorhandene tektonische Spannungen abgebaut. ... Unerwünscht hohe Seismizität lässt sich nach derzeitigem Wissensstand durch Reduktion der Fluidfließrate und des Fluiddruckes verringern. Die langsame Fluidausbreitung im Untergrund führt jedoch zu einer zeitlichen Verzögerung zwischen der Änderung der hydraulischen Parameter einer Geothermieanlage und der daraus folgenden Änderung der Erdbebenaktivität. Tritt nun eine unerwünscht hohe Erdbebenaktivität auf, kann der Prozess nicht sofort sondern nur zeitlich verzögert verringert werden. Zu Beweissicherung bei möglicherweise in Zukunft eintretenden Beben empfiehlt die Expertengruppe daher das Folgende: Die Expertengruppe empfiehlt, Beobachtungsnetze (seismologisches Netz und Immissionsnetz) so auszulegen, dass innerhalb des Reservoirs Ereignisse deutlich unterhalb der Spürbarkeitsgrenze vollständig aufgezeichnet werden können. Die Genauigkeit bei der Bestimmung der Hypozentren sollte so hoch liegen, dass im Zweifelsfall ein möglicher Zusammenhang mit der geothermischen Nutzung hergestellt bzw. ausgeschlossen werden kann und dass die Betreiber angehalten werden, die kontinuierlichen seismologischen Wellenformdaten in Echtzeit in ein gemeinsames Datenzentrum einfließen zu lassen sowie vereinheitlichte und abgestimmte seismologische Datenformate zu verwenden sowie die Berechnung der Überschreitenswahrscheinlichkeit als Funktion der maximalen Bodenschwinggeschwindigkeit (seismische Gefährdungskurve) innerhalb der angenommenen Laufzeit der Geothermieanlage (z. B. 30 Jahre) als Maß für die seismische Gefährdung durchzuführen sowie numerische Reservoirmodellierungen durchzuführen. Hierbei sollte gemäß dem Bericht die durch das Geothermiereservoir verursachte hydraulische Druckausbreitung, die thermische Kontraktion und die daraus resultierenden Spannungsänderungen im Untergrund abgeschätzt werden. Ferner soll nach Meinung der Expertengruppe bereits im Voraus ein Reaktionsschema erstellt werden, falls unerwünschte Erdbeben wider Erwarten auftreten sollten, um bereits im Vorfeld festzulegen, wie beim Eintreten bestimmter Seismizität zu reagieren ist. Um durch die Beweissicherung im Schadensfall eine schnelle Regulierung zu garantieren, soll gemäß dem Bericht ein Messnetz zur Bestimmung der Bodenschwinggeschwindigkeit nach DIN 4150 errichtet werden. Die Expertengruppe stellt fest, dass bis zum 1. Oktober 2010 63 Schadensmeldungen beim Betreiber des Vorhabens eingegangen sein.* [\[59\]](#)

#### **Potzham/Unterhaching bei München (2009)**

Am 2. Februar 2009 wurden bei Potzham nahe München zwei Erdstöße der Stärke 1,7 und 2,2 auf der Richterskala gemessen. Potzham liegt in unmittelbarer Nähe des 2008 fertig gestellten Geothermiekraftwerks Unterhaching. Die gemessenen Erdstöße ereigneten sich ca. ein Jahr nach Inbetriebnahme dieses Kraftwerks. [\[60\]](#) Aufgrund der großen Herdtiefe ist ein unmittelbarer Zusammenhang zum Geothermieprojekt Unterhaching jedoch fraglich. Weitere Mikro-Beben wurden gem. Geophysikalischem Observatorium der Uni München in Fürstenfeldbruck dort nach der Installation weiterer Seismometer zwar beobachtet, sie lagen jedoch alle unter der Fühlbarkeitsgrenze. Auch die größten Ereignisse in Potzham lagen unterhalb der [Fühlbarkeitsgrenze](#) gemäß der Einteilung der [Richterskala](#). Auch sie wurden daher mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht verspürt sondern nur von Geräten aufgezeichnet.



## Schäden an Gebäuden und Infrastruktur (indirekt) durch Verformung der Tagesoberfläche (Hebungen/Senkungen) oder (direkt) durch Bohrungen

### Oberflächennahe Geothermie

In Deutschland gibt es derzeit fast 200.000 Installationen der oberflächennahen Geothermie. Jährlich kommen etwa 40.000 neu dazu. In einigen Fällen sind Probleme aufgetreten, die jedoch vor allem einen Bedarf an verbesserter Qualitätskontrolle und Qualitätssicherung aufgezeigt haben. Herausragend ist in diesem Zusammenhang die Katastrophe von Staufen zu nennen. Dieser und weitere Problemfälle sind nachfolgend aufgeführt; die Stadt Freiburg hat in der Folge ihre Auflagen für die Nutzung oberflächennaher Geothermie verschärft, sie sind jetzt genehmigungspflichtig.[\[61\]](#)  
[\[62\]](#)

#### Staufen im Breisgau

In [Staufen](#) traten im Jahr 2008 nach dem [Abteufen](#) mehrerer Erdwärmesonden (mit je ca. 140 m Tiefe), zur Beheizung unter anderem des Rathauses, erhebliche kleinräumige Hebungen von bis zu 20 cm im bebauten Stadtgebiet auf, die zu großen Zerrungen und Stauchungen bzw. Schiefstellungen an Gebäuden führten. Über 200 Häuser wurden dabei erheblich beschädigt. Die Ursache ist offiziell noch nicht geklärt, wahrscheinlich fand aber eine Reaktion von Wasser mit [Anhydrit](#) (wasserfreier, dehydrierter [Gips](#)) statt.[\[63\]](#) Durch die Umwandlung von Anhydrit zu Gips nimmt das Gestein Kristallwasser auf, wodurch es an Volumen zunimmt. Geschieht dies großflächig, so wird die Ausdehnung ggf. zur Tagesoberfläche übertragen und führt dort zu punktuellen Hebungen, wodurch die Tagesoberfläche deformiert wird. Dadurch entstehen Risse an den betroffenen Häusern. Das Problem des Aufquellens von Anhydrit bei der Umwandlung zu Gips ist aus dem Tunnelbau und dem Tiefbau bekannt und hängt von den regionalen geologischen Bedingungen ab (z. B. im sog. [Gipskeuper](#) Südwestdeutschlands). Unter Umständen spielt auch das Fehlen einer äußeren Verrohrung in den Bohrungen eine Rolle (*Man hätte in einer verrohrten Bohrung bohren müssen. Dann hätte eine äußere Verrohrung der Bohrung den Kontakt zwischen Grundwasser und Gips-Keuper sehr stark reduziert bis vermieden*[\[64\]](#)). Die Umwandlung von Anhydrit zu Gips ist auch ein natürlicher Prozess, immer wenn ein Anhydrit-haltiges Gestein innerhalb der [Verwitterungszone](#) mit Oberflächenwasser, Niederschlagswasser bzw. Grundwasser in Kontakt kommt ([Hydratationsverwitterung](#)). Ab einer bestimmten Tiefe in der Erdkruste sind die Druck- und Temperaturverhältnisse so hoch, dass eine Kristallumwandlung trotz Wasserkontakt nicht mehr eintritt.

#### Kamen-Wasserkurl

In Kamen haben sich nach Erdwärmebohrungen zur Erschließung oberflächennaher Geothermie im Juli 2009 mehrere Tage lang die Häuser gesetzt. „Die Ursache, warum in Kamen-Wasserkurl 48 Kubikmeter Boden plötzlich in einem Loch verschwanden, ist geklärt: Erdwärmebohrungen vergrößerten bereits vorhandene Risse im Felsgestein. Die Schuldfrage kann indes nur in einem langwierigen Rechtsverfahren geklärt werden.“[\[65\]](#)

### Allgemeine Risiken

Bei der Förderung von Thermalfluiden ([Wasser/Gas](#)) stellen ggf. die Wasserinhaltsstoffe eine Umweltgefahr dar, falls das Fluid nicht reinjiziert wird. Die Reinjektion der Thermalfluide ist jedoch mittlerweile Standard.

Nach gesetzlichen Bestimmungen muss ausgeschlossen werden, dass [Quellen](#) oder sogar [Heilquellen](#) durch das Geothermieprojekt beeinträchtigt werden. Enthalten die durchströmten Erdschichten [Sulfide](#), so kann

- giftiger und

- brennbarer (GefahrstoffEinstufung [hochentzündlich](#))

[Schwefelwasserstoff](#) freigesetzt werden.

Wichtig ist es auch, den Aspekt der Versauerung von Wasser aus tiefen, sauerstofffreien Grundwasserschichten wegen Oxidation von Eisen II zu Eisen III (Bildung von braunem Eisenocker) zu beachten.

Durch Ableitung von Eisen-II-haltigem Wasser in eine [Vorflut \(Bach oder Fluss\)](#) findet die Oxidation zu Eisen III unter Sauerstoffverzehr im Fluss statt, wodurch, je nach Konzentrationen, mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit ein Fischsterben eintritt, da

- dann kein gelöster Sauerstoff im Wasser für die [Fische](#) zur Atmung zur Verfügung steht und
- auch die Fische beim *Luftschnappen* an der Oberfläche über die Kiemen keinen [Sauerstoff](#) aufnehmen können, da die [Kiemen](#) mit [Eisenocker](#) zugesetzt und damit für den Sauerstoff undurchlässig, also *verstopft* werden. Das Verursachen eines Fischsterbens ist eine Straftat nach § 324 (Gewässerverunreinigung), § 326 (Unerlaubter Umgang mit gefährlichen Abfällen), § 329 (Gefährdung schutzbedürftiger Gebiete), § 330 Abs. 1 Nr. 1 „ein Gewässer ... derart beeinträchtigt, daß die Beeinträchtigung nicht, nur mit außerordentlichem Aufwand oder erst nach längerer Zeit beseitigt werden kann“ (Besonders schwerer Fall einer Umweltstraftat) [Strafgesetzbuch](#).

Im Bereich der oberflächennahen Geothermie besteht das Risiko, bei Nutzung eines tieferen [Grundwasserleiters](#) den trennenden [Grundwassernichtleiter](#) derart zu durchstoßen, dass ein die Grundwasserstockwerke verbindendes Fenster entsteht, mit der möglichen Folge nicht erwünschter Druckausgleiche und Mischungen. Bei einer ordnungsgemäßen Ausführung der Erdwärmesonde wird dies allerdings zuverlässig verhindert.

Ein weiteres potenzielles Risiko bei einer Geothermiebohrung ist das Durchbohren von [Artesern](#), da der artesische Austritt von [Grundwasser](#) nur sehr schwer beziehungsweise kostenaufwändig zu stoppen ist und sehr große Schäden durch eine dann eintretende Überschwemmung eintreten können (Straftat nach dem § 313 [Strafgesetzbuch](#)).<sup>[66]</sup>

Auch gespannte Gase können unvermutet angetroffen werden. Denkbar sind Kohlendioxid und Stickstoff, aber auch Erdgas gegebenenfalls in Zusammenhang mit Erdöl. Solche Funde sind meistens nicht wirtschaftlich verwertbar, führen aber zu hohen Zusatzkosten auch wegen

- zusätzlicher Maßnahmen zum [Explosionsschutz](#) und
- zusätzlicher Kontamination der Bohrspülung mit [Kohlenwasserstoffen](#).

Bei der Planung sollte daher sorgfältig untersucht werden, welche geologischen Risiken bei der Planung durch entsprechende Sicherungsmaßnahmen wie Preventer, Verrohrung, Schwerspülung etc. nachweislich mit ausreichender Sicherheit beherrscht werden müssen.

- Schäden nach Geothermiebohrung zur Erkundung der oberflächennahen Geothermie am Finanzministerium in Wiesbaden



Aufgefangene Wasser- und Betonschlammmassen



Bohrstelle auf Parkplatz



Aufgetürmter Steinhaufen am Bohrloch

### Regeln der Technik zur Minimierung der Risiken

Zur Beherrschung des Problems Induzierte Seismizität hat der GtV-Bundesverband Geothermie mit Hilfe einer internationalen Forschergruppe ein Positionspapier erarbeitet, das als Hauptteil umfangreiche Handlungsanweisungen zur Beherrschung der Seismizität bei Geothermieprojekten vorschlägt. [\[67\]](#)

Im Zusammenhang mit Gebäudeschäden in der Stadt [Staufen](#) ist eine Diskussion um Risiken der oberflächennahen Geothermie entbrannt. Untersuchungen dazu, ob das Aufquellen von [Anhydrit](#) die Ursache sein könnte, wurden inzwischen beauftragt. Das Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau in Freiburg hat als Konsequenz empfohlen, bei Gips- oder Anhydritvorkommen im Untergrund auf Erdwärmebohrungen zu verzichten. [\[68\]](#) Da ganz geringe Mengen an Gips/Anhydrit bei etwa zwei Drittel der Fläche des Landes vorkommen können, deren genaue Verbreitung aber weitgehend unbekannt ist, wurde diese Vorgehensweise von der Geothermie-Industrie als überzogen kritisiert. [\[69\]](#)

Hinweise, wie eine sichere Geothermiebohrung hergestellt werden kann, findet man im Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Erdwärmesonden des Umweltministeriums Baden-Württemberg. [\[70\]](#)

### Risiken für die Wirtschaftlichkeit eines Geothermieprojekts

#### Risiken für die Wirtschaftlichkeit eines oberflächennahen Geothermieprojekts

Bei der oberflächennahen Geothermie besteht das größte Risiko in einer Übernutzung der Geothermiepotentiale. Wenn benachbarte Geothermieanlagen sich gegenseitig beeinflussen, kann die Vorlauftemperatur der im Abstrom des Grundwassers gelegene Anlage so weit abgesenkt werden, dass die [Wärmepumpe](#) nur noch mit einer sehr ungünstigen Leistungszahl betrieben werden kann. Dann heizt der Nutzer im Grunde genommen mit Strom und nicht mit Erdwärme. Das tückische daran ist, dass die Fläche im Anstrom des Grundwassers, in der eine Errichtung einer weiteren Anlage zu einer zusätzlichen erheblichen Absenkung der Temperatur des Grundwassers für die betroffene Anlage führt, sehr groß sein kann und es für den Betreiber schwierig ist, die Ursache hierfür zu erkennen. Er wird das wahrscheinlich nur merken, wenn er den außentemperaturbereinigten Stromverbrauch ins Verhältnis zur genutzten Wärmemenge setzt, um so

die Leistungszahl beobachten zu können. Das erfordert aber die Kenntnis der mittleren wirksamen Außentemperatur und der im Haus abgegebenen Wärmemenge und bedarf eines großen Messaufwandes.

### **Risiken für die Wirtschaftlichkeit eines tiefen Geothermieprojekts**

Bei der tiefen Geothermie ist vor allem das Fündigkeitsrisiko und das Umsetzungsrisiko zu beachten.

Die Risiken können beim Eintreten des Schadensfalls zu einer Unwirtschaftlichkeit des Vorhabens führen. Um das Scheitern von Geothermieprojekten zu verhindern, bietet die öffentliche Hand für Kommunen Bürgschaften an (z.B. durch die [KfW](#)), die wirksam werden, wenn zum Beispiel in einer Bohrung kein heißes Tiefenwasser in ausreichender Menge angetroffen wird. Auch einige große Versicherungen bieten solche Versicherungsprodukte an.

#### **Fündigkeitsrisiko**

Das Fündigkeitsrisiko definiert sich aus den beiden Parametern Temperatur und Schüttung. Das heißt kann eine notwendige Mindesttemperatur und eine Mindestschüttungsrate für einen wirtschaftlichen Betrieb der Geothermieanlage erreicht werden. Um das Fündigkeitsrisiko für den Investor abzufedern, werden mittlerweile Fündigkeitsversicherungen auf dem Versicherungsmarkt angeboten. Laut der Presseerklärung des Bundesumweltministeriums, der KfW Bankengruppe und der Münchener Rück vom 25. Februar 2009 sind "Die hohen Bohrkosten sind wegen des Risikos, in der Tiefe nicht fündig zu werden, das größte Investitionshemmnis für Tiefengeothermie-Projekte. Die kommerzielle Nutzung der Tiefen-Erdwärme für die Wärme- und/oder Stromgewinnung hängt entscheidend davon ab, dass im Untergrund ausreichende Mengen an genügend heißem Wasser vorgefunden werden. Investitionen von oft mehr als 10 Mio. € stehen pro Projekt im Risiko. Mit dem Förderinstrument von BMU, KfW und Münchener Rück soll nun das so genannte Fündigkeitsrisiko für Investoren deutlich verringert werden. Im Einzelnen ist geplant, dass die KfW Darlehen für Tiefengeothermiebohrungen über Geschäftsbanken gewährt. Es werden maximal bis zu 80 Prozent der förderfähigen Kosten finanziert. Wird die Nicht-Fündigkeit festgestellt, wird der Investor ab diesem Zeitpunkt von der Rückzahlung des Restdarlehens freigestellt. Das Fündigkeitsrisiko der jeweiligen Tiefengeothermieprojekte und damit die Förderwürdigkeit wird im Vorfeld der Darlehensvergabe überprüft. Die Förderdarlehen enthalten neben den üblichen Darlehenszinsen einen „Risikoaufschlag“ für das Fündigkeitsrisiko. Zusätzlich fallen einmalige Gebühren bei Antragstellung und Abschluss des Darlehensvertrages an. Im Gegenzug erhält der Investor eine sachkundige Überprüfung sowie Begleitung seines Tiefengeothermieprojektes vor und während der Bohrphase."[\[71\]](#)

#### **Umsetzungsrisiko**

Wenn beispielsweise Kluftzonen durch einen Riss (Frac) erst geschaffen werden müssen, um zwei Bohrungen zu verbinden und dabei die Oberfläche des aufgerissenen Gebirges als Flächenwärmetauscher zu nutzen, dann kann es passieren, dass die Risse die Bohrung nicht verbinden oder nach einiger Zeit kollabieren und damit ihre Funktion verlieren. Hier kann man von dem Umsetzungsrisiko sprechen, welches je nach Konzept und Standort unterschiedlich hoch sein kann.

#### **Betriebsrisiko**

Während des Betriebes können Prozesse zu Einwirkungen auf das Projekt führen, die den Wärmeertrag so mindern, dass unplanmäßige Wartungsarbeiten erforderlich werden (z. B. Auflösungen von Kristallbildungen durch Säuerung). Da dann meistens teure Bohrausrüstungen angemietet und Fachleute bezahlt werden müssen, kann das zur Unwirtschaftlichkeit des

Gesamtvorhabens führen.

### **Konkurrierende Nutzung**

Konkurrierende Nutzung zur Tiefengeothermie können Projekte der [Kohlenwasserstoffförderung](#) oder- speicherung darstellen. Vor allem der starke Ausbau von [Untertage-Gasspeichern](#) steht in einigen Regionen Deutschlands (Molasse, Norddeutsche Ebene, Rheintalgraben) in direkter Konkurrenz zu tiefengeothermischen Projekten. Aktuell in der Diskussion ist auch die Nutzungskonkurrenz durch die Absicht großer Kohlekraftwerksbetreiber und der Industrie, verflüssigtes CO<sub>2</sub> in den Untergrund zu Verpressen ([CCS-Technologie](#)). Die RWE Dea AG hat dazu bereits die Hälfte des Landes Schleswig-Holstein bergrechtlich reserviert. Sollte es zu einer Untersuchungsgenehmigung kommen, so wäre dieser Bereich für die Aufsuchung und Nutzung von Erdwärme ausgeschlossen.[\[72\]](#)

### **Siehe auch**

- [Meereswärmekraftwerk](#)
- [Kältemaschine](#)
- [Erdwärmeübertrager](#)

### **Literatur**

#### Statistikquellen


- R. Bertini: *World geothermal generation 2001-2005*. World Geothermal Congress, Antalya 2005 (pdf, online).
- [Imagekampagne: Unendlich viel Energie](#).
- J. Lund u. a.: *World wide direct use of geothermal energy 2005*. World Geothermal Congress, Antalya 2005 (pdf, online).
- R. Schellschmidt u. a.: *Geothermal energy use in Germany*. World Geothermal Congress, Antalya 2005 (pdf, online).
- V. Steffansson: *World geothermal assessment*. World Geothermal Congress, Antalya 2005 (pdf, online).
- J. Lund: *Ground Heat – worldwide utilization of geothermal energy*. Renewable Energy World, 2005.


#### Allgemeines

- C. Clauser: *Geothermal Energy*. In: K. Heinloth (Hrsg.): [Landolt-Börnstein, Physikalischchemische Tabellen](#). Group VIII: Advanced Materials and Technologies. Bd 3. Energy Technologies, Subvol. C. Renewable Energies. Springer, Heidelberg/Berlin 2006, 480-595, [ISBN 3-540-42962-X](#).
- Burkhard Sanner: *Erdwärme zum Heizen und Kühlen. Potentiale, Möglichkeiten und Techniken der Oberflächennahe Geothermie*. Kleines Handbuch der Geothermie. Bd 1. Red. B. Sanner, W., Bußmann. Geothermische Vereinigung, Geeste 2001 (3. überarb. Aufl.), [ISBN 3-932570-21-9](#).
- W.J. Eugster, L. Laloui (Hrsg.): *Geothermische Response Tests*. Verlag der Geothermischen Vereinigung, Geeste 2002, [ISBN 3-932570-43-X](#).
- Geothermische Vereinigung, GeoForschungsZentrum Potsdam (Hrsg.): *Start in eine neue Energiezukunft*. Tagungsband 1. Fachkongress Geothermischer Strom Neustadt-Glewe 12.-13. November 2003. Geothermische Vereinigung, Geeste 2003, [ISBN 3-932570-49-9](#).

- Ernst Huenges: *Energie aus der Tiefe: Geothermische Stromerzeugung*. in: *Physik in unserer Zeit*. Wiley-VCH, Weinheim 35.2004,6, S. 282–286, [ISSN 0031-9252](#).
- F. Rummel, O. Kappelmeyer (Hrsg.): *Erdwärme, Energieträger der Zukunft? Fakten – Forschung – Zukunft/Geothermal Energy, Future Energy Source? Facts-Research-Future*. Unter Mitarbeit von J. Jesse, R. Jung, Fl. Rummel & R. Schulz. C. F. Müller, Karlsruhe 1993, [ISBN 3-7880-7493-0](#).
- Michael Tholen, Dr. Simone Walker-Hertkorn: *Arbeitshilfen Geothermie Grundlagen für oberflächennahe Erdwärmesondenbohrungen*, Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn 2007, [ISBN 978-3-89554-167-4](#).
- Zeitschrift *Geowissenschaften*, Hefte 7+8 (1997, Sonderhefte mit dem Thema Geothermie).
- Zeitschrift *Sonderheft bbr Oberflächennahe Geothermie*, Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn Dezember 2008.

## Weblinks

 **Commons: Geothermie** – Sammlung von Bildern, Videos und Audiodateien

 **Wiktionary: Geothermie** – Bedeutungserklärungen, Wortherkunft, Synonyme, Übersetzungen

- [geothermie.de: Geothermische Vereinigung - Bundesverband Geothermie e. V.](#)
- [unendlich-viel-energie.de: Geothermie in der Agentur für Erneuerbare Energie](#)
- [erneuerbare-energien.de: Informationen zur Geothermie vom Umweltministerium](#)
- [iga.igg.cnr.it: International Geothermal Association \(IGA\)](#)
- [Geschichte der Geothermie buch-der-synergie.de](#)
- [Sachstandsbericht tab-beim-bundestag.de: Möglichkeiten geothermischer Stromerzeugung in Deutschland, 2003](#) (PDF)
- [The Future of Geothermal Energy](#) (PDF) [geothermal.inel.gov](#), [Massachusetts Institute of Technology](#) (MIT)
- [Erdwärme](#) (PDF) [lfu.bayern.de](#), Bayerisches Landesamt für Umwelt: UmweltWissen
- [Geothermie](#) Basisinfo von BINE Informationsdienst
- [geothermie-nachrichten.de: Hauptseite](#)
- [Transenergy — Transboundary Geothermal Energy Resources of Slovenia, Austria, Hungary and Slovakia](#)

## Einzelnachweise

1. ↑ <sup>a</sup> <sup>b</sup> [Hälfte der Erdwärme kommt aus radioaktivem Zerfall](#). NPO Nature Geoscience, 18. Juli 2011
2. ↑ [tab.fzk.de](#) (PDF) Seite 18
3. ↑ V. Steffansson: [World geothermal assessment](#) (PDF)
4. ↑ [Tiefen-Geothermie in Down Under. Australien sieht sich als Labor für die umstrittene «hot rock»-Technologie](#)
5. ↑ [Super C: Tiefenwärme nicht wirtschaftlich](#) (*Aachener Zeitung*, 18. Juli 2011)
6. ↑ [info-geothermie.ch](#)
7. ↑ [Tiefen-EWS Oftringen \(706 m\)](#) (PDF) Direktheizen mit einer 40-mm-2-Kreis PE-Tiefen-Erdwärmesonde
8. ↑ [patent-de.com](#)
9. ↑ NZZ-online: [Stör als Frutigtaler Qualitätsprodukt](#), 16. September 2006
10. ↑ [jenbach.at: Geothermisches Tunnelkraftwerk Jenbach](#) (PDF)
11. ↑ [http://www.gmk.info/ORC\\_Geothermie.113.html?](http://www.gmk.info/ORC_Geothermie.113.html?)
12. ↑ [Geothermie gerät unter Druck](#). In: *taz*
13. ↑ [energyprofi.com](#), abgerufen am 20. Oktober 2011

14. ↑ [Masdar Starts Geothermal Drilling \(in Englisch\)](#) Artikel auf RenewableEnergyWorld.com vom 24. März 2010
15. ↑ J. Bertani: *Geothermal Power Generation in the world - 2005-2010 Update Report*. Proceedings of the World Geothermal Congress 2010.
16. ↑ J. Lund: *Ground Heat - worldwide utilization of geothermal energy*. Renewable Energy World, 2005.
17. ↑ J. Bertani: *Geothermal Power Generation in the world – 2005–2010 Update Report*. Proceedings of the World Geothermal Congress 2010.
18. ↑ [geothermie-nachrichten.de, 2008, Dr. Burkhard Sanner: Erdgekoppelte Wärmepumpen in Deutschland und Europa: ein Wachstumsmarkt – Rechtliche Situation der Geothermie in europäischen Ländern; Deutschland](#)(3. Oktober 2010)
19. ↑ [Beate Beule: Restrisiko - Freiburg verschärft Auflagen für Geothermie-Projekte](#) badische-zeitung.de, Lokales, Freiburg, 16. März 2010 (17. Oktober 2010)
20. ↑ Wulf Rüska: *Neue Grenzen für Erdwärme-Bohrungen*. In: Badische Zeitung, 19. August 2011
21. ↑ [bkz-online.de bkz-online.de, 8. September 2011: Neue Grenze bei Erdwärmebohrung](#) (10. September 2011)
22. ↑ [Deutsches GeoForschungsZentrum: Intelligent die Wärme der Erde nutzen](#), 26. Februar 2009
23. ↑ [gebo-nds.de](#)
24. ↑ Geothermisches Informationssystem für Deutschland: [Verzeichnis Geothermischer Standorte](#)
25. ↑ [Pressemitteilung des Branchenverbandes](#)
26. ↑ [Entwicklung der Neuanlagen](#)
27. ↑ Bayerisches Staatsministeriums für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz: [Oberflächennahe Geothermie - Übersichtskarte Bayern 1:200.000 \(PDF 9,6MB\)](#), siehe Umgebung von Ansbach.
28. ↑ Bundesverband Geothermie. e. V.: [Politischer Einsatz für Bad Urach](#)
29. ↑ [pfalzwerte.de](#)
30. ↑ [firstgeotherm.de: Daten zum Projekt Speyer](#) von der Firma FirstGeoTherm
31. ↑ [speyer-aktuell.de: Stadtwerke Speyer verpachten ehemaliges Geothermie-Gelände](#), 20. September 2006
32. ↑ [erdwerk.com](#) (PDF)
33. ↑ [merkur-online.de](#)
34. ↑ [geothermie-soultz.fr: GEIE - Le programme Géothermie Soultz](#), abgerufen am 25. Juni 2008 (französisch)
35. ↑ [Definitives Aus für Basler Geothermieprojekt](#). In: *Neue Zürcher Zeitung*, 10. Dezember 2009. Abgerufen am 11. Dezember 2009.
36. ↑ [Geothermie-Projekt der Stadt St. Gallen](#). In: *Geothermie-Projekt*
37. ↑ Dr. Martin Kruska, EUtech Energie Management GmbH; Jonas Mey, Greenpeace Deutschland e. V.: [Studie 2000 Megawatt – sauber!](#) (PDF) September 2005.
38. ↑ Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V.: [Niedertemperatur-Netz mit dezentraler Wärmeerzeugung](#)
39. ↑ Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag: [Möglichkeiten geothermischer Stromerzeugung in Deutschland](#) (PDF) Arbeitsbericht Nr. 84, Februar 2003 (PDF)
40. ↑ F. Wenroth, T. Fitzer, M. Gropius, B. Huber, A. Schubert: [Numerische 3D-Modellierung eines geohydrothermalen Dublettenbetriebs im Malmkarst](#). (PDF) In: *Geothermische Energie 48/2005*, August 2005. Seite 16–21.
41. ↑ [AltaRock Energy #Status](#) in der englischsprachigen Wikipedia
42. ↑ [Geothermie unter Druck: HDR Projekt innerhalb am Standort The Geysers in den USA wird eingestellt](#). heise-online, 15. Dezember 2009

43. ↑ [Economics of Geothermal Energy](#) geodynamics.com.au (25. Oktober 2007)
44. ↑ [C. J. Bromley: Geothermal Energy from Fractured Reservoirs – Dealing with Induced Seismicity](#) (PDF) iea.org, *IEA Open Journal* 48, S. 5, Heft 7/2007
45. ↑ [Basler Zeitung: Erneut Erdbeben in Basel wegen Geothermieprojekt](#) (nicht mehr aufrufbar)
46. ↑ [Erneut Erdbeben am Bohrloch von Basel](#). In: *Spiegel Online*, 16. Januar 2007
47. ↑ [news.ch: Erneuter Geothermie-Erdstoss in der Region Basel](#), 21. März 2007
48. ↑ [Basler Zeitung: Geothermie-Erdstöße: 3 bis 5 Millionen Franken Schaden](#)
49. ↑ Die Bundesbehörden der Schweizerischen Eidgenossenschaft: [Art. 144 Sachbeschädigung](#) im 2. Buch des Strafgesetzbuches der Schweiz
50. ↑ Die Bundesbehörden der Schweizerischen Eidgenossenschaft: [Art. 227 Verursachen ... eines Einsturzes](#) im 2. Buch des Strafgesetzbuches der Schweiz
51. ↑ NZZ-online: [Anklage wegen Verursachung von Erdbeben](#), 5. März 2008
52. ↑ [Freispruch für den leitenden Geologen](#). In: *Spiegel-online*, 22. Dezember 2009. Abgerufen am 22. Dezember 2009.
53. ↑ [Freispruch für Erdbebenmacher - Geologe hat nicht vorsätzlich gehandelt](#). In: *NZZ Online*, 21. Dezember 2009 (22. Dezember 2009)
54. ↑ [Definitives Aus für Basler Geothermieprojekt](#). In: *Neue Zürcher Zeitung*, 10. Dezember 2009. Abgerufen am 11. Dezember 2009.
55. ↑ [Das Beben von Landau](#). In: *Der Spiegel*. Nr. 39, 2009 ([online](#)).
56. ↑ ad hoc news: [Betriebsgenehmigung – Hinweise auf Geothermie-Werk als Erdbeben-Ursache verdichten sich](#), 15. Oktober 2009
57. ↑ [Landau: Geothermie-Kraftwerk läuft wieder](#). In: *Mannheimer Morgen*
58. ↑ [Abschlussbericht](#) (PDF)
59. ↑ [Nach den von vereidigten Sachverständigen erstellten Baugutachten sind 51 \(= 81 Prozent\) der Meldungen gesichert keine Erschütterungs-, sondern vor allem herkömmliche Bauschäden. Demnach wurden 12 Meldungen als Erschütterungsschäden eingestuft, wobei bei allen 12 Meldungen es sich nach den Gutachten ausschließlich um „haarfeine Schönheitsrisse ohne baustatische Relevanz“ handelt.](#)
60. ↑ Erdbebendienst Bayern: [Erdbeben in Bayern seit dem Jahr 1390](#)
61. ↑ [Beate Beule: Restrisiko – Freiburg verschärft Auflagen für Geothermie-Projekte](#). In: *Badische Zeitung*, Lokales, Freiburg, 16. März 2010 (17. Oktober 2010)
62. ↑ [badische-zeitung.de, Nachrichten, Südwest, 26. Februar 2010, Bastian Henning: Ein Traum ist geplatzt – Basel, Staufen und Schorndorf in Schwaben haben das Vertrauen in die Geothermie erschüttert](#) (17. Oktober 2010)
63. ↑ [Nach Erdwärme-Bohrung: Eine Stadt zerreißt''](#). In: *Spiegel Online*, 15. November 2008
64. ↑ [Zitat aus einem Interview in Forschung aktuell, Deutschlandfunk, 29. Juni 2009](#)
65. ↑ [derwesten.de](#)
66. ↑ [\(Zum Beispiel jüngst Arteser am hessischen Finanzministerium Wiesbaden, der nach einiger Zeit mit Zement ausreichender Dichte totgepumpt wurde\).](#)
67. ↑ [Positionspapier Seismizität](#) (PDF)
68. ↑ Staatsanzeiger Nr 6 vom 20. Februar 2009, S. 13.
69. ↑ Modernisierungsmagazin 1–2, 2009, S. 9.
70. ↑ [Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Erdwärmesonden des Umweltministeriums Baden-Württemberg](#) (PDF).
71. ↑ [Erneuerbare Energien. Geothermie-Projekte bekommen Rückhalt Bundesumweltministerium, KfW Bankengruppe und Münchener Rück fördern mit vereinten Kräften.](#)
72. ↑ [Verbändeanhörung im BMWi am 27. August 2010 zeigt erhebliche Widerstände gegen neuen Anlauf für CCS-Gesetz.](#)
73. Original quelle dieser PDF <http://de.wikipedia.org/wiki/Geothermie>