UmweltWissen

Erdwärme – die Energiequelle aus der Tiefe

Geothermie ist die wichtigste Energiequelle für Island, hier das Kraftwerk Nesjavellir, das größte des Landes. Doch auch in Bayern lohnt es sich, die Wärme der Erde zu nutzen.

Im Untergrund unserer Erde schlummert ein mächtiges Potential: Erdwärme – also Energie. Will man diese nutzen, ist im Sprachgebrauch häufig von „Geothermie“ die Rede. Erdwärme gehört zu den Energiequellen, deren Einsatz den Ausstoß von Treibhausgasen deutlich reduzieren kann. Im Gegensatz zu den anderen regenerativen Energien steht Erdwärme fast überall und jederzeit zur Verfügung, unabhängig vom Klima und von der Jahres- und Tageszeit.

1 Entstehung

Als Ursprung für geothermische Energie können zwei Hauptquellen ausgemacht werden: Radioaktive Zerfallsprozesse im Erdinneren und Restwärme aus der Zeit der Erdentstehung. Die Wärme der Erdoberfläche entsteht überwiegend durch den Zerfall natürlicher radioaktiver Elemente, ein kleinerer Anteil stammt aus der Zeit, in der die Erde entstanden ist. Oberflächennah kommt noch Wärme durch Sonneneinstrahlung und Niederschlag dazu.

Durch das Temperaturgefälle zwischen Erdinnerem und Erdoberfläche wird Erdwärme ständig aus der Tiefe nachgeliefert. Dieser geothermische Wärmefluss beträgt in Bayern rund 60–80 mW/m². Bezogen auf eine Fläche von der Größe eines Fußballfeldes entspricht dies dem Energieverbrauch rund 40 bis 50 Elf-Watt-Energiesparlampen.

Das dreidimensionale Modell der Erde in Abb. 1 zeigt die unterschiedlichen Wärmeschichten im Erdinneren: Der Erdkern ist der heißeste Teil, der verschiedenen Schätzungen zufolge 4.800 °C bis 7.700 °C heiß ist. Auch in anderen Schichten herrschen hohe Temperaturen; etwa 99 Prozent unseres Planeten sind heißer als 1.000 °C.

In den ersten 15 bis 20 Tiefenmetern wird der Wärmehaushalt maßgeblich durch die Sonneneinstrahlung sowie durch Sicker- und Grundwässer beeinflusst. Darunter nimmt die Temperatur durchschnittlich um ca. 3 °C pro 100 m Tiefe zu. Diese Temperaturzunahme mit der Tiefe wird als „geothermischer Gradient“ bezeichnet.

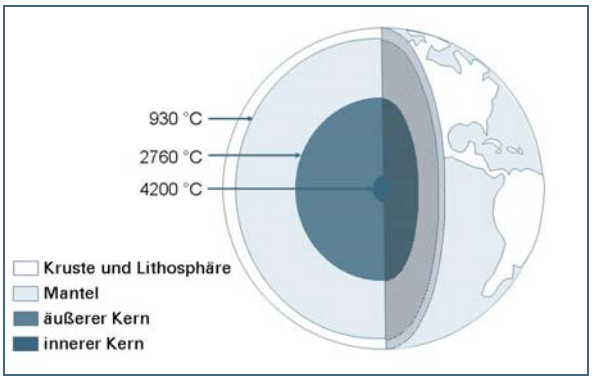

Abb. 1:
In der Erdkruste ist es deutlich heißer als an der Erdoberfläche – diese Wärme wird bei der Geothermie genutzt. (nach Huenges 2000)

2 Erdwärme als Energiequelle

Durch die im Untergrund gespeicherte Wärmeenergie stehen für die geothermische Nutzung große Wärmemengen zur Verfügung. Bei sachgerechter Bewirtschaftung ist diese Wärme praktisch unerschöpflich, deshalb zählt Erdwärme zu den „erneuerbaren Energien“. Im Gegensatz zu den meisten anderen erneuerbaren Energien ist Erdwärme eine Energie, die krisensicher und unabhängig von Witterung und Tageszeit immer und praktisch überall zur Verfügung steht. Außerdem kann sie zur Erzeugung von Wärme, Kälte und Strom genutzt werden.

Gerade in Anbetracht des Gebotes zur CO_2-Emissionsreduzierung ist die Nutzung erneuerbarer und umweltfreundlicher Energiequellen von Bedeutung. Weil fossile Brennstoffe immer knapper und damit teurer werden, wird die Erdwärme zunehmend konkurrenzfähig.

Geothermische Systeme lassen sich unter verschiedenen Gesichtspunkten klassifizieren. Berücksichtigt man gleichzeitig die Tiefe der Wärmegewinnung und die Nutzungsart der geothermischen Energie, bietet sich die Unterteilung in „tiefe“ und „oberflächennahe“ Geothermie an.

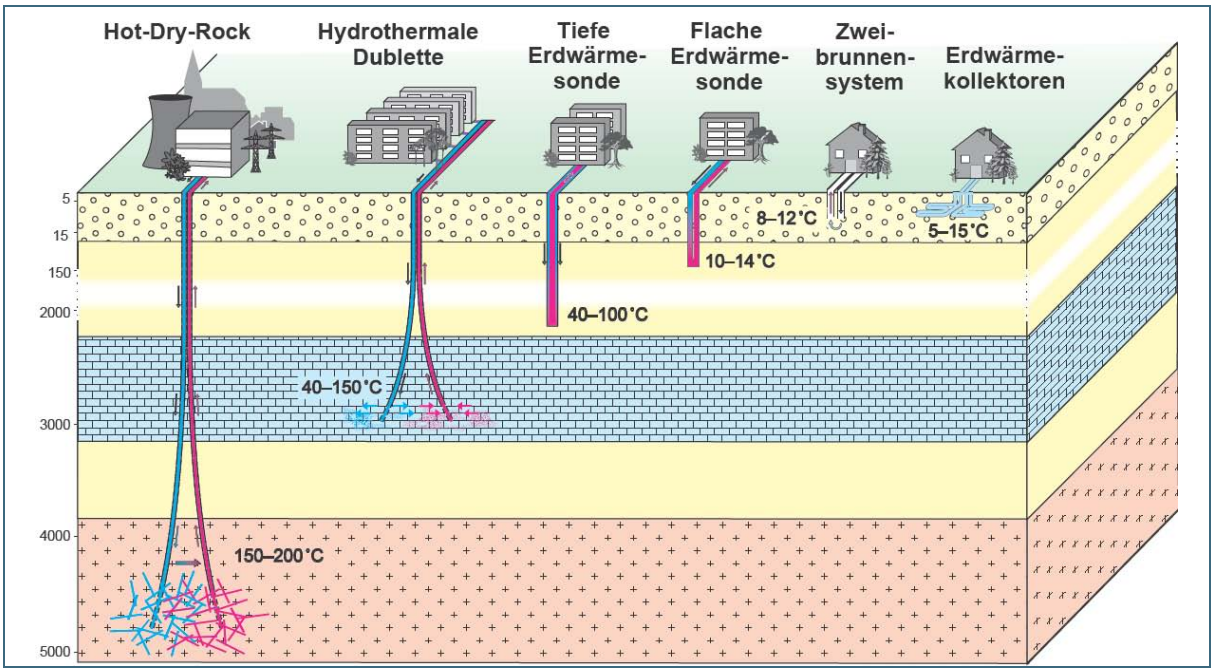

Abb. 2: Die Nutzung von Erdwärme im Vergleich: links drei „tiefe“, rechts drei „oberflächennahe“ Nutzungsarten.

Die direkte Wärmenutzung aus Geothermie ist weltweit verbreitet. Es gibt verschiedene Formen: Versorgung von Nah- und Fernwärmenetzen, Wärme- und Kälteversorgung von Gebäuden, Trocknung von Agrarprodukten sowie die industrielle Wärmenutzung in Betrieben z. B. zur Lederherstellung, für Gewächshäuser und zur Aufzucht von Fischen. Besonders effizient ist es, kaskadenförmig verschiedene Temperaturniveaus zu nutzen. Zunehmende Bedeutung gewinnt auch die Stromerzeugung aus tiefer Geothermie.

2.1 Tiefe Geothermie

Bei der tiefen Geothermie wird Erdwärme in der Regel über Tiefbohrungen gewonnen. Meist wird die thermische Energie direkt genutzt, also ohne dass die Temperatur durch eine Wärmepumpe erhöht wird. Per Definition (VDI Regelwerk 4640) reicht die oberflächennahe Geothermie bis in eine Tiefe von 400 m. Von „echter“ tiefer Geothermie wird allerdings erst ab Tiefen von über 1.000 m ausgegangen.

Die Nutzung der tiefen Geothermie unterliegt dem Bergrecht. Zuständig hierfür sind in Bayern das Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie (StMWIVT) bzw. die Bergämter.

Je nach Temperaturniveau kann Erdwärme über Wärmetauscher direkt für die Nah- oder Fernwärmeversorgung oder indirekt für die Stromerzeugung über Dampfturbinen mit niedrig siedenden Fluiden eingesetzt werden. Für letztere müssen die Temperaturen in der Regel über 100°C liegen, ein erstes bayerisches Pilotprojekt für Thermalwassertemperaturen unter 100°C steht seit etwa einem Jahr in Simbach. Neben der rein thermischen Nutzung gibt es bereits seit langer Zeit noch die Nutzung des Thermalwassers zu Badezwecken (Balneologie).

Je nach Wärmeinhalt (Enthalpie) lassen sich Hoch- und Niedrigenthalpie-Systeme unterscheiden. Bei Hochenthalpie-Systemen nutzt man Dampf bzw. Dampf und Wasser (Zweiphasensystem) meist für die Stromerzeugung. Gebiete mit ausgesprochen günstigen Verhältnissen für derartige Lagerstätten gibt es beispielsweise in Italien (Larderello), Island oder Neuseeland – nicht aber in Deutschland. Bei uns muss vergleichsweise tief gebohrt werden, insbesondere wenn die für die Stromerzeugung benötigten hohen Temperaturen erreicht werden sollen (Abb. 3).

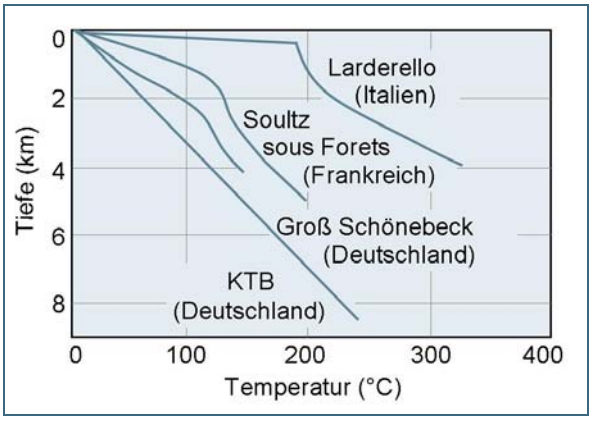

Abb. 3:
In manchen Regionen steigt die Temperatur mit der Tiefe rasch an. (KTB: kontinentale Tiefbohrung)
(nach Huenges 2000)

Die tiefe Geothermie kann grundsätzlich über zwei Systeme genutzt werden:

- **Hydrothermale Systeme** nutzen überwiegend das im Untergrund vorhandene Wasser
- **Petrothermale Systeme** nutzen überwiegend die im Gestein gespeicherte Wärmeenergie, Beispiele sind: **Hot-Dry-Rock-Systeme (HDR)** und **tiefe Erdwärmesonden.**

Zur tiefen Geothermie zählt auch die Nutzung geothermischer Energie aus Bergwerken, Kavernen oder Tunneln.

2.1.1 Hydrothermale Geothermie

Bei der hydrothermalen Geothermie nutzt man im tieferen Untergrund vorkommendes Thermalwasser mit Temperaturen von 20°C bis etwa 200°C. Das Thermalwasser wird über eine Förderbohrung an die Oberfläche gepumpt. Dort wird ihm die Wärmeenergie über Wärmetauscher entzogen und diese in der Regel direkt und nur bei geringen Thermalwassertemperaturen mittels nachgeschalteter Wärmepumpe genutzt. Das abgekühlte Wasser wird in ausreichender Entfernung über eine Reinjektionsbohrung wieder in den Grundwasserleiter (Aquifer) zurückgepumpt. Grundsätzlich ist auch eine Kombination von mehreren Förder- und Reinjektionsbohrungen möglich.

Um normale Wasser-Dampfturbinen anzutreiben, sind hohe Temperaturen notwendig. Bei Temperaturen bis etwa 200°C kann der Strom nur mit speziellen Anlagen erzeugt werden: Bei ORC-Anlagen (Organic Rankine Cycle, kurz ORC) wird die Dampfturbine nicht durch Wasser, sondern durch eine organische Flüssigkeit mit niedrigerem Siedepunkt angetrieben, z. B. Butan oder Pentan. Kalina-Anlagen arbeiten mit einer Wasser-Ammoniak-Mischung als Medium.

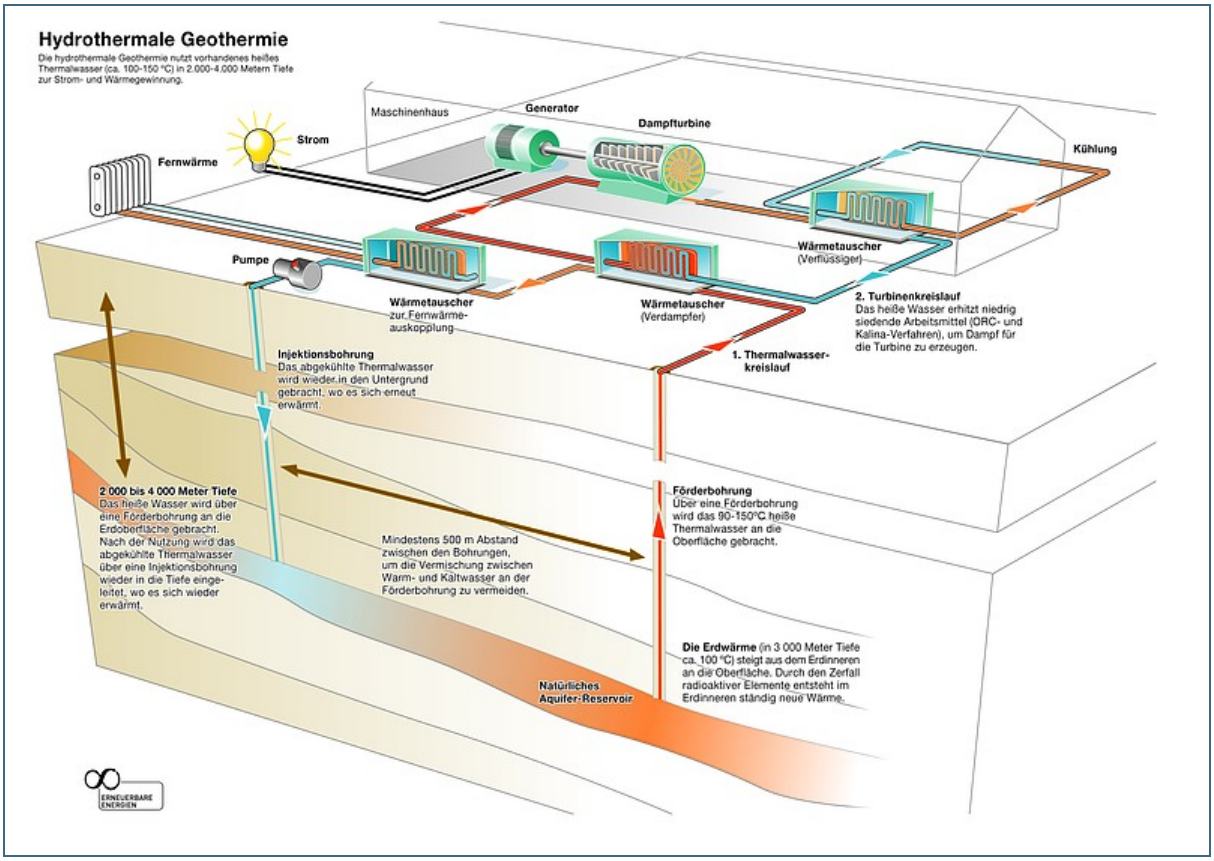

Abb. 4: Hydrothermales System im Detail

Für eine wirtschaftliche hydrothermale Nutzung sollte der Grundwasserleiter (Aquifer) gut durchlässig sein. In Bayern ist dies insbesondere in den teilweise verkarsteten Malmkarbonaten im Untergrund des Molassebeckens südlich der Donau gegeben.

Neben der rein energetischen Nutzung ist die Verwendung des Thermalwassers zu Heilzwecken bereits seit langer Zeit ein wichtiger Faktor bei der Gesundheitsvorsorge in Kurbädern – und neuerdings auch in Wellnessbädern. In Bayern wird das warme Wasser in über 20 Thermalbädern genutzt (siehe Abb. 5). Für Badezwecke sind allgemein nur geringe Thermalwassermengen erforderlich, so dass sich hierfür auch wenig ergiebige Thermalwasserhorizonte eignen, die für eine rein thermische Nutzung unwirtschaftlich wären.

An neun Standorten in Bayern werden über die hydrothermale Geothermie bereits Nah- und Fernwärmenetze betrieben: in Aschheim, Erding, München-Riem, Pullach, Simbach/Braunau, Straubing, Unterföhring, Unterhaching und Unterschleißheim. In Erding und Straubing wird das Thermalwasser zusätzlich noch zu Badezwecken genutzt, wobei dieser Anteil nicht zurückinjiziert, sondern über die Kanalisation abgeleitet wird. An zwei Standorten wird zusätzlich Strom erzeugt: in Simbach/Braunau (ORC-Anlage) und Unterhaching (Kalina-Anlage).

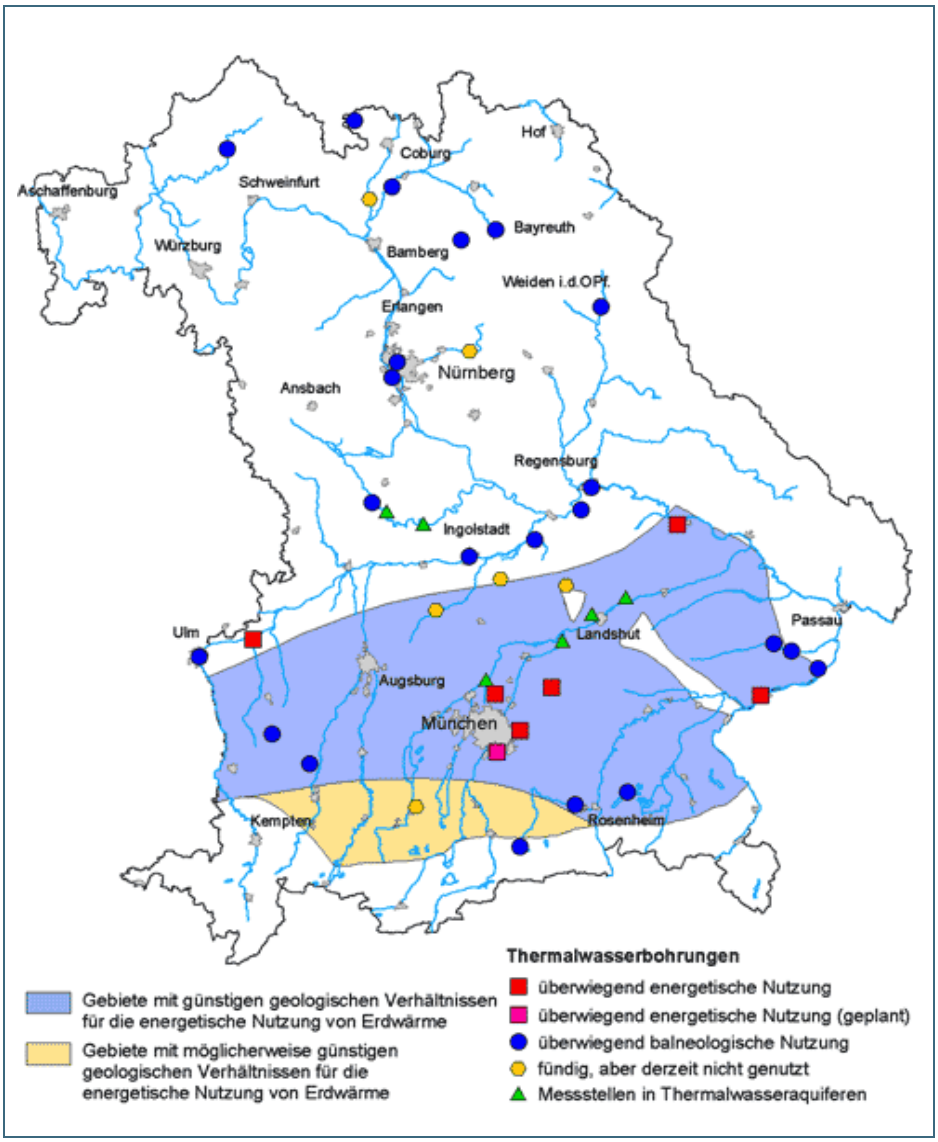

Abb. 5: Hydrothermale Nutzungen in Bayern

2.1.2 Petrothermale Systeme: Hot-Dry-Rock-Technik

Petrothermale Systeme gewinnen die geothermische Energie aus dem tieferen Untergrund. Sie arbeiten unabhängig von wasserführenden Schichten und nutzen die im heißen, gering durchlässigen Gestein gespeicherte Energie (Hot-Dry-Rock-Verfahren). Neben dem klassischen Begriff „Hot Dry Rock (HDR)“ werden auch die Begriffe „Deep Heat Mining“, „Hot Wet Rock“, „Hot fractured Rock“ oder „Stimulated Geothermal System“ verwendet. Der umfassende Begriff ist „Enhanced“ oder „Engineered Geothermal System (EGS)“, der aber auch einen Übergangsbereich zu hydrothermalen Systemen umfasst.

Um im Untergrund große Wärmetauscher-Oberflächen zu erzeugen, presst man Wasser mit hohem Druck in ein Bohrloch, so dass sich Klüfte aufweiten oder neu bilden. Für den Betrieb leitet man kaltes Wasser ein, das sich an dem heißen Gestein erhitzt. Das heiße Wasser wird in weiteren Bohrungen

gefördert. An der Oberfläche wird ihm die Wärmeenergie wieder entzogen. Diese Energie wird primär zur Stromerzeugung genutzt. Da EGS Systeme theoretisch überall einsetzbar sind, wird in ihnen das größte Potenzial für die geothermische Nutzung gesehen. Für HDR-Systeme werden jedoch derzeit Standorte mit einem höheren geothermischen Gradient bevorzugt, wie etwa der Forschungsstandort Soultz im Elsass (siehe Kurve in Abb. 3).

In Bayern ist bislang noch keine derartige Anlage in konkreter Planung.

2.1.3 Petrothermale Systeme: Tiefe Erdwärmesonden

Bei tiefen Erdwärmesonden wird eine Technik eingesetzt, die mit der bei üblichen Erdwärmesondenlängen vergleichbar ist: Ein Wärmeträgermedium zirkuliert in vertikalen geschlossenen Wärmetauschern, die in Bohrungen von mehr als 400 m Tiefe installiert sind. Die Leistung der tiefen Erdwärmesonden beträgt in der Regel nur wenige hundert Kilowatt, sie ist also wesentlich geringer als die Leistung der offenen Systeme. Tiefe Erdwärmesonden haben einerseits eine vergleichsweise geringe Leistung, andererseits sind die Kosten für eine Tiefbohrung hoch. Deshalb bieten sich tiefe Erdwärmesonden vor allem dort an, wo bereits eine nicht genutzte Tiefbohrung vorhanden ist, z. B. in einer nichtfündigen hydrothermalen Geothermie-Bohrung. Inwieweit auch aufgegebene Erdöl- oder Erdgasbohrungen hierfür genutzt werden können, wird derzeit z. B. in Österreich (Wiener Becken) untersucht. Tiefe Erdwärmesonden können jedoch nach gegenwärtigem Stand der Technik nur zur Wärmeversorgung eingesetzt werden, wobei sie sich vor allem für eine Wärmeversorgung auf mittlerem Temperaturniveau (bis ca. 60°C Vorlauftemperatur) eignen.

2.2 Oberflächennahe Geothermie

Bei der oberflächennahen Geothermie wird die Wärme dem oberflächennahen Bereich der Erde entzogen, meist bis in eine Tiefe von 100 m, maximal bis 400 m Tiefe. Dies geschieht z. B. mithilfe von Erdwärmekollektoren, Erdwärmesonden, Grundwasserbohrungen oder Energiepfählen. Um die Energie für Heizzwecke zu nutzen, ist aber eine Wärmepumpe notwendig. Da sich die Anlagen auch zur Kühlung der Gebäude eignen, können sie Klimaanlagen ersetzen.

Die Nutzung der oberflächennahen Geothermie unterliegt nur in Ausnahmefällen dem Bergrecht, maßgeblich sind daher insbesondere die Regelungen des Wasserrechts.

Ausführliche Informationen über die oberflächennahe Geothermie finden Sie im UmweltWissen-Infoblatt ► Oberflächennahe Geothermie.

3 Umweltverträglichkeit des Energieträgers „Erdwärme“

Im Vergleich zu fossilen Energieträgern kann die Erdwärme einen Beitrag dazu leisten, die Emission klimarelevanter Gase zu reduzieren. So beträgt der Gesamtausstoß an Stoffen, die zur Klimaerwärmung beitragen, über die gesamte Projektlaufzeit eines geothermischen Heizkraftwerks – also von der Errichtung über den Betrieb bis zum Rückbau – nur einen kleinen Bruchteil der entsprechenden Werte fossiler Anlagen. Und Geothermie hat noch weitere spezifische Umweltvorteile: Der Flächenverbrauch beispielsweise ist so gering wie bei keiner anderen Energieform. Dennoch sind prinzipiell auch bei dieser Energieform Umweltaspekte zu beachten.

Schadstoffe: Heißwasser und Dampf aus großen Tiefen können Schadstoffe enthalten, z. B. Schwefelwasserstoff, Borsäure, Ammoniak, Arsen und Quecksilber oder auch radioaktive Substanzen. Bei den Geothermiekraftwerken bleibt der Dampf bzw. das Thermalwasser aber in einem geschlossenen Kreislauf, und die geförderten Stoffe werden wieder injiziert, ohne an die Oberfläche bzw. in die Atmosphäre zu geraten. Da einige der Substanzen aggressiv sind, können bei deren Auftreten technische Anlagen und Materialien einem erhöhten Verschleiß ausgesetzt sein. Die in geringen Mengen in Reinigungsanlagen zurückgehaltenen Schadstoffe müssen über die zugelassenen Entsorgungspfade unter behördlicher Aufsicht beseitigt werden. Dabei gelten die gleichen Regelungen wie z. B. für

Trinkwasseraufbereitungsanlagen und Anlagen für die Erdöl- und Erdgasförderung bzw. -speicherung. Da die Mineralisation der in Bayern genutzten Wässer relativ gering ist, gibt es hier in der Regel keine derartigen Probleme.

Langfristiger Abbau von Wärmelagerstätten: Bei der Nutzung der tiefen Geothermie wird in der Regel nicht der schwache, ständig aus dem Erdinneren nachfließende terrestrische Wärmestrom genutzt, sondern das sehr viel höhere, aber erschöpfbare Potenzial der gespeicherten Erdwärme. Damit wird strenggenommen eine Wärmelagerstätte abgebaut. Numerische Simulationen haben jedoch ergeben, dass sich Geothermiekraftwerke bei richtiger Auslegung ohne merklichen Temperaturrückgang an der Förderbohrung über einen Zeitraum betreiben lassen, der deutlich länger ist als die Lebensdauer der technischen Anlagen. Der nach 50-jähriger Nutzung thermisch beeinflusste Bereich um die Reinjektionsbohrung ist nach Simulationen für die in Bayern sich in Betrieb befindlichen Anlagen mit Radien von meist unter einem Kilometer vergleichsweise klein. Allerdings kann die vollkommene Wiedererwärmung eines über 50 Jahre thermisch genutzten Bereichs im Untergrund mehrere hundert bis tausend Jahre dauern.

Abwärme: Der Wirkungsgrad eines geothermischen Kraftwerks ist von der Temperatur abhängig. Er liegt bei Temperaturen zwischen 80°C und 160°C derzeit bei rund 8 bis 13%. Dies bedeutet, dass nur ein kleiner Teil der Wärmeenergie des geförderten Thermalwassers für die Stromerzeugung genutzt werden kann. Die Restwärme sollte möglichst für Heizzwecke oder anderweitig genutzt werden, andernfalls wird sie über den Kühlkreislauf an das für die Kühlung genutzte Oberflächengewässer bzw. Grundwasser oder an die Luft abgegeben.

Grundwasser: Bei geothermischen Kraftwerken muss das Arbeitsmedium, das die Turbine antreibt, wieder rückgekühlt werden. Dies kann grundsätzlich mittels Frischwasser-, Hybrid- oder Luftkühlung erfolgen. Falls für eine Frischwasserkühlung kein geeignetes Oberflächenwasser zur Verfügung steht und stattdessen oberflächennahes Grundwasser zu Kühlzwecken genutzt würde, käme es dabei zu vergleichsweise hohen Grundwasserentnahmen. Diese können bei Nutzung der Hybrid- oder Verdunstungskühlung deutlich reduziert werden. Dem Kühlwasser müssen dann jedoch verschiedene Inhibitoren (z. B. gegen Algenbewuchs und Korrosion) zugesetzt werden. Das Restwasser darf daher nur soweit aufkonzentriert werden, dass es den entsprechenden gesetzlichen Regelungen zur Rückleitung in den Vorfluter bzw. zur Wiederversickerung genügt.

Bei der Nutzung der oberflächennahen Geothermie mittels Erdwärmesonden ist darauf zu achten, dass Grundwasserstockwerke nicht durch die Erdwärmesondenbohrungen kurzgeschlossen werden, da andernfalls z. B. Schadstoffe aus einem oberen Grundwasserstockwerk in ein tieferes Grundwasserstockwerk verschleppt werden könnten. In Bayern ist daher grundsätzlich eine Erdwärmesondenbohrung nur bis in die Sohlschicht des obersten Grundwasserleiters zulässig.

Stromverbrauch: Bei der oberflächennahen Geothermie verbraucht die Wärmepumpe Strom, was hohe CO_2-Emissionen bedingt, sofern der Strom nicht aus erneuerbaren Energien erzeugt wird. Das Ziel sollte daher sein, den Strom für die Wärmepumpe aus erneuerbaren Energien zu erzeugen. Entsprechender Strombezug ist in Deutschland bei unterschiedlichen Anbietern möglich. Selbst bei Nutzung eines konventionellen Strommixes liegen die CO_2-Emissionen einer Geothermie-Heizung immer noch um bis zu 40 Prozent unter denen einer Gas- oder Ölheizung.

4 Literatur

Oberflächennahe Geothermie

BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (in Vorb.): Oberflächennahe Geothermie. UmweltWissen

BUNDESVERBAND WÄRMEPUMPE (BWP) E.V. (2003): ► Leitfaden Erdwärmesonden in Bayern. 3. Aufl.

VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: Thermische Nutzung des Untergrundes. Richtlinie 4640, Blätter 1–4

Tiefe Geothermie

BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT, INFRASTRUKTUR, VERKEHR UND TECHNOLOGIE (2010): Bayerischer Geothermieatlas – Hydrothermale Energiegewinnung.
► www.stmwivt.bayern.de/fileadmin/Web-Dateien/Dokumente/energie-und-rohstoffe/Bayerischer_Geothermieatlas.pdf

BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (2009, Neuauflage in Vorb.): Nutzungsmöglichkeiten der tiefen Geothermie in Deutschland. Bonn. 76 S.

PASCHEN, H., OERTEL, D., GRÜNWALD, R. (2003): Möglichkeiten geothermischer Stromerzeugung in Deutschland. Büro für Technikfolgenabschätzung, TAB-Arbeitsbericht Nr. 84. Zusammenfassung
► www.tab.fzk.de/de/projekt/zusammenfassung/ab84.htm

VERBAND BERATENDER INGENIEURE (2010): Tiefe Geothermie. VBI-Leitfaden, Band 21. VBI-Service- und Verlagsgesellschaft, Berlin. 120 S.

Quelle Abbildung

HUENGES E. (2000): Nutzung der Erdwärme des tiefen Untergrundes. InfoForum Geothermie. Veranstaltung der GEOAgentur Berlin Brandenburg in der Technischen Universität Berlin am 25.1.2000.

5 Weiterführende Informationen im Internet

Bayerisches Landesamt für Umwelt: ► www.lfu.bayern.de/geologie/fachinformationen/geothermie

Bayerisches Energieforum: ► www.bayerisches-energie-forum.de

Bundesverband WärmePumpe e.V.: ► www.waermepumpe-bwp.de

Geothermische Vereinigung e.V.: ► www.geothermie.de

Informationszentrum Wärmepumpen und Kältetechnik e.V.: ► www.izw-online.de

6 Ansprechpartner

Private Anfragen an das Bayerische Landesamt für Umwelt richten Sie bitte an unser Bürgerbüro:
E-Mail: oeffentlichkeitsarbeit@lfu.bayern.de

Fragen und Anregungen zu Inhalten, Redaktion und Themenwahl der Publikationen von UmweltWissen sowie Anfragen bezüglich Recherche und Erstellung von Materialien für die Umweltbildung/-beratung richten Sie bitte an:

UmweltWissen am Bayerischen Landesamt für Umwelt:
Telefon: 0821 / 9071 – 5671
E-Mail: umweltwissen@lfu.bayern.de
Internet: www.lfu.bayern.de/umweltwissen

Impressum:

Herausgeber:
Bayerisches Landesamt für Umwelt
Bürgermeister-Ulrich-Straße 160
86179 Augsburg

Telefon: (08 21) 90 71-0
Telefax: (08 21) 90 71-55 56
E-Mail: poststelle@lfu.bayern.de
Internet: www.lfu.bayern.de

Bearbeitung:
Ref. 12: Serena Kummer, Friederike Bleckmann
Ref. 107: Dr. Thomas Fritzer
Ref. 93: Wolfgang Büttner
Neue, stark überarbeitete Auflage
Stand:
Juli 2010 (Links 03/11)

Bildnachweis:
Agentur für Erneuerbare Energien, Berlin: Abb. 4; Gretar Ívarsson, Þingvellir, Island: S. 1

Diese Veröffentlichung wurde mit großer Sorgfalt zusammengestellt. Eine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit kann dennoch nicht übernommen werden. Sofern auf Internetangebote Dritter hingewiesen wird, sind wir für deren Inhalte nicht verantwortlich.

Sie haben diese Veröffentlichung auf Papier, wollen aber auf die verlinkten Inhalte zugreifen?
Die jeweils aktuellste Ausgabe finden Sie im Internet unter:
►www.lfu.bayern.de/umweltwissen/doc/uw_20_erdwaerme.pdf oder
►www.lfu.bayern.de: UmweltWissen > Klima und Energie.